



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

**MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR  
UNIDAD NÚMERO UNO HIDROELÉCTRICA XACBAL**

**Eric Rolando Almeda Díaz**

Asesorado por el Ing. Marco Junio Martínez Hernández

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR  
UNIDAD NÚMERO UNO HIDROELÉCTRICA XACBAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ERIC ROLANDO ALMEDA DÍAZ**

ASESORADO POR EL ING. MARCO JUNIO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR UNIDAD NÚMERO UNO HIDROELÉCTRICA XACBAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 22 de octubre de 2009.



**Eric Rolando Almeda Díaz**

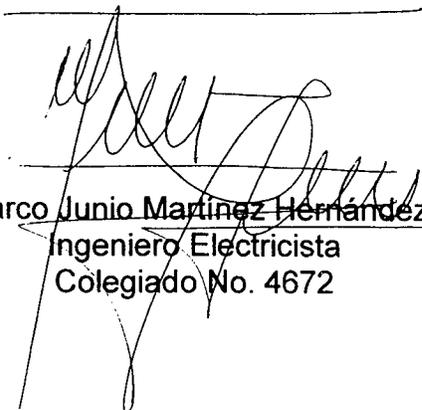
Guatemala 06 de Julio de 2012

**Ingeniero**  
**Francisco González**  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado **“MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR UNIDAD NÚMERO UNO DE HIDROELÉCTRICA XACBAL”**, desarrollado por el estudiante Eric Rolando Almeda Díaz; con base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos por lo que doy mi aprobación sobre el mismo.

Atentamente,



Marco Junio Martínez Hernández  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 4672

ING. MARCO JUNIO MARTINEZ  
COLEGIADO No. 4,672



SC.636-2013

**CONSTANCIA**

El Infrascrito Secretario de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, HACE CONSTAR QUE: El estudiante **ERIC ROLANDO ALMEDA DIAZ**, con carné **199911948**, sustentó su **EXAMEN GENERAL PRIVADO** en la carrera de **INGENIERIA ELECTRICA** el **21 de octubre de 2009**, siendo **APROBADO**, según consta en el Acta No. **24267**, de oficinas de Control Académico.

Para el uso que al interesado convenga, se extiende, sella y firma la presente constancia a trece días del mes de febrero del año dos mil trece.

Atentamente,

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Humberto Rivera Pérez'.

Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez  
Secretario Académico de la Facultad



HHRP / amet



Ref. EIME 06.2013.  
Guatemala, 31 de OCTUBRE 2012.

Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
“MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR  
UNIDAD NÚMERO UNO DE HIDROELÉCTRICA XACBAL”.  
del estudiante Eric Rolando Almeda Díaz, que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Francisco Javier González López  
Coordinador Área Potencia



FJGL/sro



REF. EIME 07. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ERIC ROLANDO ALMEDA DÍAZ titulado: “MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR UNIDAD NÚMERO UNO DE HIDROELÉCTRICA XACBAL”, procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 25 DE FEBRERO 2,013.**

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

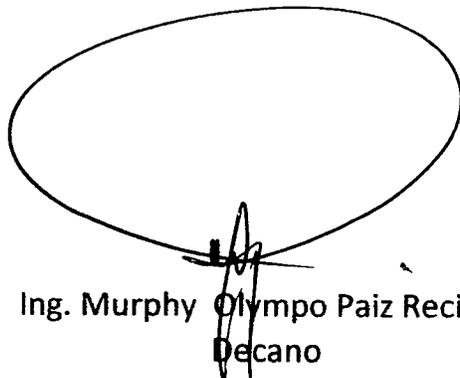


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 772.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DE TURBINA Y GENERADOR UNIDAD NUMERO UNO DE HIDROELÉCTRICA XACBAL**, presentado por el estudiante universitario **Eric Rolando Almeda Díaz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 4 de noviembre de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por permitirme alcanzar tan importante meta en mi vida.
<b>Mis padres</b>	Por ser ejemplo de honradez, humildad, trabajo y tenacidad.
<b>Mis abuelas</b>	Porque son dos mujeres muy importantes en mi vida a quienes amo y admiro
<b>Mi familia</b>	Por ser la fuente de inspiración a seguir superándome.
<b>Mi amigos</b>	Por ser una parte especial en mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Ingeniero Marco Junio Martínez**

Por apoyarme en la revisión de este trabajo.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. GENERALIDADES DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	1
1.1. Energía renovable .....	1
1.2. Impacto ambiental de una central hidroeléctrica .....	2
1.3. Componentes de las centrales hidroeléctricas .....	4
1.3.1. Presa .....	4
1.3.2. Embalse .....	4
1.3.3. Túnel.....	5
1.3.4. Tubería de alta presión .....	5
1.3.5. Tanque de oscilación .....	5
1.4. Turbina Francis.....	8
1.4.1. Principio de funcionamiento de una turbina Francis .	10
1.4.2. Potencia efectiva de la turbina .....	10
1.4.3. Ecuación fundamental de las turbinas.....	12
1.5. Componentes de una turbina Francis .....	13
1.5.1. Tubo de aspiración.....	14
1.5.2. Cámara espiral.....	17
1.5.3. Distribuidor .....	21
1.5.4. Álabes directrices.....	22

1.5.5.	Equipo de accionamiento .....	28
1.5.6.	Anillo de operación .....	30
1.5.7.	Bielas.....	31
1.5.8.	Rodete de turbina .....	32
1.5.9.	Eje .....	35
1.5.10.	Equipo de sellado .....	37
1.6.	Gobernador de turbina .....	38
2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECUENCIA DE MONTAJE DEL ESTATOR.....	45
2.1.	Secuencia de instalación.....	45
2.2.	Giro de los segmentos del estator .....	46
2.3.	Montaje de bobinas en el estator.....	50
2.3.1.	Devanado del estator.....	53
2.4.	Pruebas eléctricas al devanado del estator. ....	58
2.4.1.	Prueba de resistencia de aislamiento .....	59
2.4.2.	Tipos de pruebas de resistencia de aislamiento .....	62
2.4.2.1.	Prueba de tiempo corto.....	62
2.4.2.2.	Método Resistencia Tiempo.....	63
2.4.3.	Prueba de alto voltaje .....	66
2.5.	Montaje de estator en foso. ....	73
3.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECUENCIA DE MONTAJE DEL ROTOR.....	79
3.1.	Instalación de los polos del rotor .....	79
3.2.	Conexión entre polos .....	82
3.3.	Instalación de aletas para ventilación en el rotor .....	84
3.4.	Instalación del sistema de freno en el rotor .....	85
3.5.	Instalación de barras conductoras en el eje del rotor.....	88

3.6.	Montaje de rotor.....	91
3.6.1.	Centralización axial del rotor al estator.....	92
3.7.	Instalación de anillos colectores en el eje .....	93
3.7.1.	Montaje y conexión de escobillas.....	96
3.8.	Sistema de excitación .....	98
3.8.1.	Sistema rectificadores estacionarios .....	104
3.8.2.	Voltaje máximo y mínimo de excitación.....	105
3.8.3.	Corriente de excitación nominal .....	106
3.8.4.	Corriente de excitación máxima .....	107
3.9.	Regulador automático de voltaje.....	108
3.9.1.	Modo automático del regulador de voltaje.....	111
3.9.2.	Modo manual del regulador de voltaje.....	112
3.10.	Regulador de corriente de campo .....	112
3.11.	Limitadores .....	113
3.11.1.	Limitador de sobreexcitación.....	114
3.11.2.	Limitador de sobrecorriente de campo .....	116
3.11.3.	Limitador rápido de corriente de campo .....	117
3.11.4.	Limitador voltio/hertz .....	117
3.11.5.	Limitador de sobrecorriente del generador .....	118
4.	MONTAJE DE CRUCETAS SUPERIOR E INFERIOR .....	121
4.1.	Montaje de cruceta inferior .....	121
4.2.	Montaje de cruceta superior .....	125
4.2.1.	Ajuste axial de cruceta superior .....	127
4.3.	Montaje de cojinete de empuje .....	128
4.3.1.	Montaje del bloque de empuje .....	131
5.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	135
5.1.	Operación del generador .....	135

5.1.1.	Sistema de automatización.....	135
5.1.2.	Arquitectura SDSC .....	136
5.1.3.	Servidores .....	137
5.1.4.	Estaciones de operación local .....	138
5.1.5.	Controlador de secuencia .....	139
5.2.	Secuencia de arranque .....	140
5.2.1.	Secuencia de arranque de equipos auxiliares .....	140
5.2.2.	Secuencia de arranque de la turbina .....	141
5.2.3.	Secuencia de arranque del generador .....	142
5.3.	Puntos de carga del generador .....	145
5.4.	Mantenimiento.....	147
5.4.1.	Mantenimiento a partes mecánicas .....	148
5.4.2.	Alineamiento de la máquina.....	148
5.4.3.	Elementos de fijación de la máquina .....	149
5.4.4.	Inspección a sistemas de agua y aceite.....	149
5.4.5.	Elementos móviles .....	150
5.4.6.	Mantenimiento al estator .....	150
5.4.7.	Mantenimiento al rotor .....	151
6.	GENERALIDADES DEL MERCADO ELÉCTRICO EN GUATEMALA..	155
6.1.	Coordinación de la operación.....	158
6.2.	Beneficios que aportará hidroeléctrica Xacbal al sistema nacional interconectado .....	161
	CONCLUSIONES .....	165
	RECOMENDACIONES .....	167
	BIBLIOGRAFÍA .....	169

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Esquema de conducción de agua .....	7
2.	Corte transversal de una turbina Francis de eje vertical .....	9
3.	Cálculo potencia efectiva .....	11
4.	Diagrama de presiones en la turbina de reacción .....	13
5.	Tubo de aspiración.....	15
6.	Diagrama de presiones en tubo de aspiración .....	16
7.	Protocolo de montaje según topografía en sitio.....	17
8.	Cámara espiral.....	18
9.	Distribuciones de caudal en la cámara espiral .....	19
10.	Puntos de referencia para montaje de cámara espiral .....	20
11.	Distribuidor.....	21
12.	Componentes directrices del distribuidor.....	22
13.	Álabe directriz .....	24
14.	Verticalidad en los álabes .....	24
15.	Ubicación de los álabes .....	26
16.	Holgura de apertura en los álabes .....	26
17.	Servomotor izquierdo .....	29
18.	Servomotor derecho.....	30
19.	Anillo de operación.....	31
20.	Bielas de accionamiento .....	32
21.	Rodete de turbina Francis .....	33
22.	Resultados obtenidos de presión normalizada .....	34
23.	Eje de turbina.....	35

24.	Detalle de pernos de acople eje y rotor de turbina.....	37
25.	Diagrama de bloques simplificado de un gobernador de velocidad ...	39
26.	Diagrama de bloques del gobernador de velocidad .....	42
27.	Curva de rendimiento de la turbina .....	43
28.	Corte transversal del conjunto estator .....	46
29.	Maniobra de transporte de segmentos de estator .....	47
30.	Maniobra de giro de los segmentos del estator.....	48
31.	Maniobra para alineación de los segmentos del estator .....	50
32.	Bobina tipo diamante .....	51
33.	Vista general del devanado del estator .....	54
34.	Plano de conexiones internas del devanado del estator .....	56
35.	Conexión de bobinas .....	57
36.	Vista final de trabajos realizados en el estator .....	58
37.	Esquema eléctrico para prueba de resistencia de aislamiento.....	60
38.	Componentes de la corriente en una prueba de aislamiento con CD .....	61
39.	Curva típica de resistencia de aislamiento (en megaohms) con tiempo para el método de lectura puntual .....	63
40.	Curvas típicas que muestran el efecto de absorción dieléctrica en una prueba tiempo – resistencia.....	64
41.	Trazo típico de una prueba de tiempo .....	65
42.	Circuito equivalente prueba de resistencia de aislamiento.....	67
43.	Tipos de corrientes para aislamientos asfáltico-mica .....	69
44.	Mediciones típicas de resistencia de aislamiento para tres máquinas diferentes .....	72
45.	Corte transversal del montaje de placas base .....	74
46.	Características de saturación sin carga y corto circuito .....	76
47.	Curvas en V y rango de voltaje .....	77

48.	Curvas de capacidad .....	78
49.	Vista de planta de un rotor de polos salientes .....	80
50.	Ranura de martillo doble para los polos .....	82
51.	Montaje de conexiones en U .....	83
52.	Conexión del devanado de amortiguación .....	84
53.	Dirección de montaje de aletas de ventilación.....	85
54.	Ubicación del disco de frenado .....	86
55.	Gatos hidráulicos para frenar el rotor .....	87
56.	Conexión de anillo colector de rotor y eje.....	88
57.	Rotor en posición final.....	92
58.	Corte transversal del conjunto de rotor.....	94
59.	Anillos colectores .....	95
60.	Porta escobilla de presión constante.....	97
61.	Escobilla de conductores flexibles.....	97
62.	Sección transversal del estator y de los polos del rotor.....	99
63.	Circuito equivalente del rotor.....	100
64.	Diagrama equivalente rotor de polos salientes.....	102
65.	Circuito equivalente de estator .....	103
66.	Diagrama general del sistema de excitación .....	105
67.	Lazo de control de un regulador de voltaje.....	109
68.	Controlador y regulador digital actuación de los limitadores.....	114
69.	Configuraciones para el limitador UExc y la protección de pérdida de excitación .....	115
70.	Corriente de campo en la curva de cargabilidad .....	116
71.	Límites máximos de corriente del generador .....	118
72.	Corte transversal del conjunto de generador.....	122
73.	Conjunto de cojinete guía y cruceta inferior .....	123
74.	Segmentos de cojinete guía.....	124
75.	Vista general de la cruceta superior y cojinete combinado.....	125

76.	Segmentos del cojinete de empuje .....	129
77.	Calentamiento del bloque de empuje .....	132
78.	Conjunto de bloque de empuje .....	134
79.	Arquitectura de red SDSC .....	137
80.	Pantalla táctil HMI local .....	139
81.	Secuencia de arranque auxiliares de generador .....	141
82.	Secuencia de arranque para la turbina .....	142
83.	Secuencia de arranque excitación de la unidad.....	144
84.	Secuencia de sincronización de la unidad .....	144
85.	Diagrama unifilar sistema nacional interconectado 2010 .....	162
86.	Composición por tecnología en la producción de energía del 2009 .....	163
87.	Composición por tecnología en la producción de energía del 2010 .....	163

## TABLAS

I.	Protocolo de montaje de cámara espiral .....	20
II.	Registro de medición de holgura álabes.....	25
III.	Registro de medición de holgura para apertura de álabes .....	27
IV.	Registro de medición montaje servomotor izquierdo .....	29
V.	Registro de medición montaje servomotor derecho.....	30
VI.	Registro de medición de elongación de pernos de acople.....	36
VII.	Características de aislamiento de bobinas .....	55
VIII.	Condiciones de aislamiento indicadas por la relación de absorción dieléctrica.....	66
IX.	Directrices para las tensiones continuas que se aplicarán durante el ensayo de resistencia de aislamiento .....	70
X.	Valores recomendados de índice de polarización .....	72

XI.	Datos de placa del generador.....	75
XII.	Factores de diseño para el sistema de excitación según el fabricante.....	108



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\alpha$	Aceleración angular
$g$	Aceleración de la gravedad
H	Altura
$\theta_{\min}$	Ángulo mínimo de disparo de tiristor
A	Área
C	Capacitancia
Q	Caudal
$X_i$	Coeficiente experimental
IA	Corriente de absorción
IG	Corriente de conducción
$i$	Corriente instantánea
$I_{fn}$	Corriente nominal de campo
IL	Corriente superficial
IT	Corriente total
$K_{in}$	Factor de corriente de excitación nominal
$K_{cn}$	Factor de máximo voltaje negativo
$K_{cp}$	Factor de máximo voltaje positivo
$K_{ic}$	Factor máximo de corriente
L	Inductancia
J	Masa de momento de inercia en relación con el eje de rotación
$I_{fma}$	Máxima corriente de campo
$I_{en}$	Máxima corriente de excitación

$U_{cp}$	Máximo voltaje positivo
$hs'$	Pérdida de carga a la salida del difusor
$h_d$	Pérdida de carga en el distribuidor
$h_r$	Pérdida de carga en el rodete
$hs$	Pérdida de carga en el tubo de aspiración
$h_{d'}$	Pérdida de carga entre el distribuidor y el rodete
$P_{atm}$	Presión atmosférica
$R$	Resistencia
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$t$	Tiempo
$T_{cf}$	Tiempo de aplicación máxima corriente
$M$	Torque externo resultante
$c$	Velocidad absoluta del agua
$u$	Velocidad tangencial o periférica de la rueda
$v$	Voltaje instantáneo
$w$	Velocidad angular
$w_{nom}$	Velocidad angular nominal
$U_{fn}$	Voltaje de campo nominal

## GLOSARIO

<b>Álabe</b>	Es la paleta curva de una turbo máquina o máquina de fluido roto dinámica.
<b>Capacitancia</b>	Es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica.
<b>Chaveta</b>	Pieza de sección rectangular o cuadrada que se inserta entre dos elementos que deben ser solidarios entre sí para evitar que se produzcan deslizamientos.
<b>Corriente</b>	Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un conductor.
<b>Devanado</b>	Es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por una corriente eléctrica.
<b>Estator</b>	El estator es la parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la transmisión de potencia.
<b>Generador</b>	Un generador es una máquina eléctrica que cual transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

<b>Presa</b>	Es un muro grueso construido en el cauce de un río para embalsar el agua.
<b>Rotor</b>	La parte giratoria de una máquina.
<b>Turbina</b>	Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas.
<b>Voltaje</b>	Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

## RESUMEN

En Guatemala el mercado eléctrico está abastecido mayormente por plantas térmicas, las que utilizan como combustible principal bunker para el funcionamiento de sus unidades generadoras. Guatemala es un país rico en recursos hídricos, pero no se aprovechan en su totalidad, por lo tanto es de suma importancia la construcción de plantas hidroeléctricas y no depender de combustibles fósiles. Este trabajo hace referencia al montaje de las partes principales de la unidad número uno de la planta hidroeléctrica Xacbal.

El capítulo número uno, da a conocer que son las energías renovables haciendo énfasis en la energía hídrica, se describen las principales partes de una hidroeléctrica y se detalla las partes principales de las turbinas Francis con eje vertical, las principales ecuaciones para el cálculo de la turbina, gobernador de la turbina, y los principales protocolos para el montaje. En el capítulo número dos se refiere al montaje del estator de la unidad generadora, se describen los pasos que requiere para el armado de la carcasa, se detalla el montaje de las bobinas del generador, también incluye las principales pruebas eléctricas que deben efectuarse después de terminar el bobinado del estator y las características eléctricas del generador.

El capítulo número tres complementa la parte eléctrica del generador porque describe el montaje del rotor del generador, describe los cálculos para los parámetros principales en el sistema de excitación y da una introducción al regulador de voltaje del generador.

El capítulo número cuatro describe el montaje de las crucetas superior e inferior, montaje del bloque de empuje, montaje de segmentos guía y las partes principales que componen el sistema de soporte y anclaje de la máquina. El tema principal del capítulo número cinco es la parte de operación y mantenimientos principales del generador, en la parte de operación se describen los pasos necesarios para el funcionamiento óptimo de la máquina y el capítulo número seis da una descripción generalizada de los aspectos importantes en el mercado eléctrico de Guatemala y los principales beneficios que tendrá el funcionamiento de la planta para el sistema nacional interconectado.

# OBJETIVOS

## General

Describir en forma generalizada las partes de una central hidroeléctrica y detallar las actividades que deben ejecutarse para el montaje de la turbina y el generador número uno de la central hidroeléctrica Xacbal.

## Específicos

1. Detallar las partes principales de una turbina Francis de eje vertical y las actividades de montaje en la unidad número uno de hidroeléctrica Xacbal.
2. Describir las partes principales de un generador de energía eléctrica y el montaje de la unidad número uno de hidroeléctrica Xacbal.
3. Describir las piezas necesarias para el soporte y anclaje de un generador de eje vertical y sus respectivas actividades de montaje.
4. Listar los principales parámetros y condiciones para la operación, también listar las principales actividades de mantenimiento para la unidad número de hidroeléctrica Xacbal.
5. Dar a conocer los principales aspectos en el mercado eléctrico de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La utilización a gran escala de las energías renovables es uno de los campos de la ciencia y la tecnología de mayor desarrollo a nivel mundial, en las últimas décadas, ante las perspectivas ventajosas que ofrece frente a los sistemas tradicionales de generación, en términos de costos, eficiencia y bajo impacto ambiental.

La energía hidráulica se ha usado durante años para la obtención tanto de energía mecánica, como para uso directo en energía eléctrica. Las ventajas que presenta este tipo de aprovechamiento energético son, su bajo costo de generación, bajo costo de mantenimiento, no requiere abastecimiento de combustibles, no presenta problemas de contaminación, puede compatibilizarse con el uso de agua para otros fines, y una larga vida útil.

El principio de aprovechamiento de la energía hidráulica es transformar la energía potencial del agua que está a cierta altura conducirla hasta una tubería de presión para transformarla en energía cinética, esta se transforma en energía mecánica al pasar por una turbina y posteriormente la energía mecánica se transforma en energía eléctrica por medio de un generador síncrono.

La finalidad de este trabajo es describir el montaje electromecánico de turbina y generador de la unidad número uno en la central hidroeléctrica Xacbal, este tipo de planta se denomina como central de filo de agua con presa de volumen útil con capacidad para compensaciones de variaciones diarias aprovechando las descargas del régimen natural del río.



# **1. GENERALIDADES DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

Se define como central hidroeléctrica al conjunto de instalaciones construidas con la finalidad de generar energía eléctrica, transformando la energía potencial del agua en energía cinética, posteriormente la energía cinética en energía mecánica y la energía mecánica se transforma en energía eléctrica por medio de un generador síncrono.

## **1.1. Energía renovable**

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, la biomasa y los biocombustibles. Una de las fuentes de energía más utilizadas para la producción de electricidad es la energía hidráulica, esta energía se obtiene a partir del almacenamiento del agua en embalses, se tiene energía potencial que luego a través de tuberías o canales de conducción se lleva a tuberías de alta presión donde se transforma en energía cinética, el agua se hace llegar a las turbinas convirtiendo de esa manera la energía cinética en mecánica, y la energía mecánica en energía eléctrica.

Guatemala es un país que cuenta con una considerable cantidad de recursos renovables, los cuales a la fecha no han sido aprovechados intensamente. Tal afirmación se deriva del hecho que existiendo un potencial

aprovechable de 5 000 MW en energía hidroeléctrica y solamente se utiliza el 16 % (800 MW). El aprovechamiento de energías renovables con que cuenta Guatemala, en la producción de energía eléctrica le permitirá al país:

- Disminuir la dependencia energética del exterior, ya que los recursos renovables de energía son recursos autóctonos.
- Reducir el costo de la energía eléctrica, ya que éste no dependería de los precios del barril de petróleo.
- En el mediano y largo plazo, estabilizar los precios de la electricidad.
- Ahorrar divisas, porque se estaría disminuyendo la compra de barriles de petróleo.
- Proteger al medio ambiente, al reducirse la cantidad de contaminantes principalmente de dióxido de carbono CO<sup>2</sup>.
- Diversificar la oferta energética.
- Crear fuentes de trabajo.

## **1.2. Impacto ambiental durante la construcción de una central hidroeléctrica**

Como se mencionó en el inciso 1.1., la energía hidráulica tiene ventajas económicas y ambientales pero poco se menciona del impacto que produce una central hidroeléctrica en su etapa de construcción, el propósito no es detallar un estudio de impacto ambiental pero si listar de forma generalizada las principales consecuencias que sufre el medio ambiente cuando se construye una central hidroeléctrica, los principales impactos son:

- Contaminación del agua y el suelo
- Erosión de suelos y sedimentación
- Desplazamiento parcial de la fauna

- Pérdida de cobertura forestal
- Pérdidas tierras agrícolas
- Desechos sólidos
- Producción de gases de efecto invernadero
- Interrupción del hábitat entre la bocatoma y el punto de desfogue
- Impacto visual y pérdida de belleza natural
- Alteración de la red de drenaje natural

Por lo anterior se hace necesario tomar medidas de prevención y mitigación con la finalidad de disminuir el daño al medio ambiente. Las principales medidas que se deben considerar son:

- A. Plan de manejo de desechos sólidos y líquidos
- B. Disposición correcta de las aguas residuales y de los materiales provenientes de los movimientos de tierra.
- C. Reciclaje de desechos y disposición adecuada de aceites y materiales químicos.
- D. Construcción de trampas de sedimentos
- E. Utilizar patrón de drenajes naturales en las obras y estabilizar taludes
- F. Plan de manejo de desechos sólidos y líquidos
- G. Disposición correcta de las aguas residuales y de los materiales provenientes de los movimientos de tierra.
- H. Reciclaje de desechos y disposición adecuada de aceites y materiales químicos.
- I. Construcción de trampas de sedimentos
- J. Utilizar patrón de drenajes naturales en las obras y estabilizar taludes
- K. Plan de manejo de desechos sólidos y líquidos
- L. Disposición correcta de las aguas residuales y de los materiales provenientes de los movimientos de tierra.

- M. Reciclaje de desechos y disposición adecuada de aceites y materiales químicos.
- N. Construcción de trampas de sedimentos

### **1.3. Componentes de las centrales hidroeléctricas**

Para comprender el funcionamiento dinámico de los sistemas de potencia se presenta una breve descripción de los componentes y sistemas de una central hidroeléctrica.

#### **1.3.1. Presa**

La presa es una pared que cierra una depresión geográfica atravesada por el río para originar el embalse, ya sea frente a ella o en un sitio alejado del río. Para construir la represa se debe desviar el río aguas arriba del sitio donde la misma se levantará; para este fin es necesario construir un túnel de desvío, el cual funciona mientras se construye la represa. Para definir el nivel máximo del embalse, la presa puede ser del tipo gravedad vertedora, cuya cresta permite el paso del agua sobre ella, de modo que al llegar el agua a su máximo nivel, el excedente vierte sobre la cresta y sigue su recorrido aguas abajo en el río.

#### **1.3.2. Embalse**

El propósito del embalse es almacenar el agua que será utilizada en la generación de energía, su diseño debe ser tal que esté capacitado para soportar los fenómenos naturales, contaminación del agua y/o ambiente, etc., para garantizar la operación de la central hidroeléctrica.

### **1.3.3. Túnel**

Es un tramo de conducción de gran longitud, ubicado dentro la montaña. Se inicia en una de las paredes del embalse, la entrada está constituida por la toma de aguas, en cuyo frente existe una rejilla para evitar que objetos, restos de árboles y animales ingresen al túnel. En el otro extremo existe una compuerta que permite el ingreso del agua al túnel, dependiendo del diseño de la central hidroeléctrica pueden usarse canales de conducción.

### **1.3.4. Tubería de alta presión**

Es el extremo de la conducción; soporta la gran presión de la columna de agua en su camino hacia las turbinas. En su parte superior incluye una válvula tipo mariposa para cortar el paso del agua en caso de problemas en la conducción. La tubería se divide en ramificaciones de acuerdo al número de turbinas que compartan la tubería, una central puede tener más de una tubería. Cada rama de tubería llega a una válvula de admisión tipo esférica que permite o impide que el agua llegue a la turbina. La tubería forzada puede tener tramos con pendientes diferentes, esto es para determinada longitud de la tubería se tienen diversos niveles o alturas, en unos tramos la pendiente es suave, en otros tramos la pendiente es mayor. Con esto se logra la conversión de la energía potencial, del agua en la energía cinética que hace rotar una turbina.

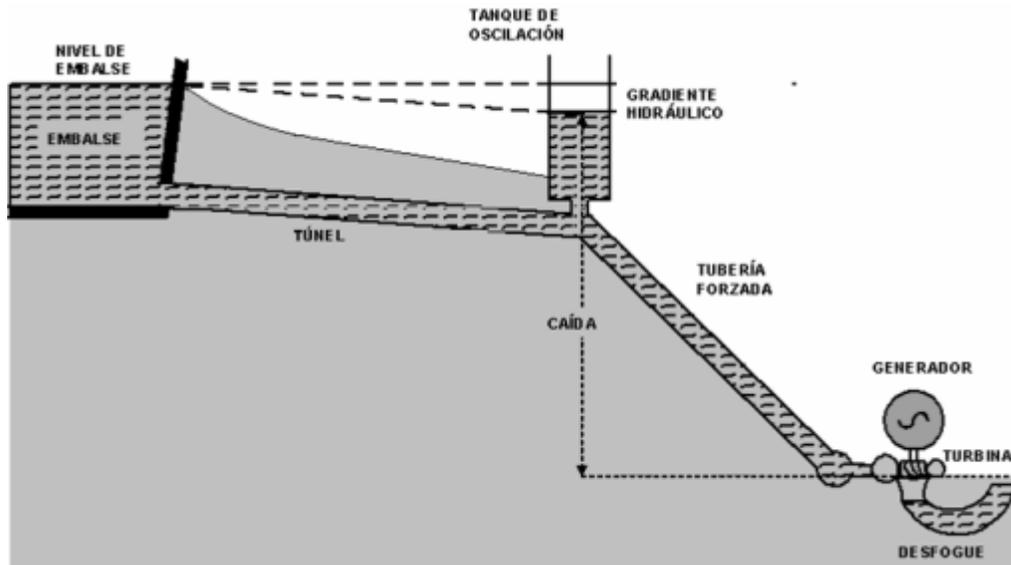
### **1.3.5. Tanque de oscilación**

Es una estructura para la protección de las obras hidráulicas, se ubica entre el túnel y la tubería de presión. En él, el agua recupera el nivel que hay en el embalse cuando se cierran las válvulas de admisión de las turbinas. El tramo de tubería anterior al tanque de oscilación que corresponde al túnel de

conducción tiene una pendiente suave y el tramo posterior que corresponde a la tubería de presión tiene una pendiente mayor. Cada tramo debe ser diseñado para las condiciones apropiadas al flujo de agua y niveles de presión. El tanque cumple las siguientes funciones:

- Permite el escape del aire que se retiene en el túnel al finalizar la construcción de éste; con ello impide que el agua arrastre una masa de aire que dañe a las turbinas.
- Cuando las válvulas se cierran por algún motivo, el tanque de oscilación amortigua la onda de choque llamada golpe de ariete, que se propaga de las válvulas de admisión hasta el túnel y lo podría dañar de no existir el tanque para disipar dicha energía.
- Suministra suficiente caudal de agua cuando se abren las válvulas de admisión de las turbinas mientras llega el caudal requerido que aporta el embalse, para que la tubería de presión siempre tenga una presión interna mayor que la atmosférica.
- Enfrentar variaciones en régimen de operación, almacenando o suministrando el caudal necesario, hasta que, se logre el nuevo punto de equilibrio, debido a la aceleración y desaceleración del agua en la tubería.

Figura 1. Esquema de conducción de agua



Fuente: ARAYA, Mauricio. Metodología para la evaluación de sistemas de regulación de centrales de generación hidroeléctrica. p. 4.

La función principal del tanque de oscilación es que al cerrarse o abrirse las válvulas de admisión se produce una sobrepresión que se refleja propagándose por la tubería, al llegar al tanque de oscilación la onda de presión se bifurca, una porción entra por el orificio del tanque de oscilación y la otra sigue por la tubería. Como la sección transversal del tanque es mayor que la de la tubería, la mayor parte de la sobrepresión penetra en el tanque de oscilación y se amortigua. La sobrepresión que sigue por la tubería es pequeña en comparación con la que entró en el tanque. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio que se da al reducirse abruptamente la velocidad del flujo de agua hacia la turbina, elevándose la presión interna de la tubería al cerrarse los álabes o inyectores dándose una onda viajera hacia atrás en la columna de agua.

Si el cierre es rápido la sobrepresión es mayor lo que podría dañar la tubería o el túnel. Si por el contrario los álabes rápidamente se abren la presión podría disminuir produciéndose una onda de succión que podría hacer implotar la tubería. Para evitar estas dos situaciones la parte hidráulica del gobernador debe contar con mecanismos de seguridad para controlar los tiempos y la velocidad de apertura y cierre de los álabes.

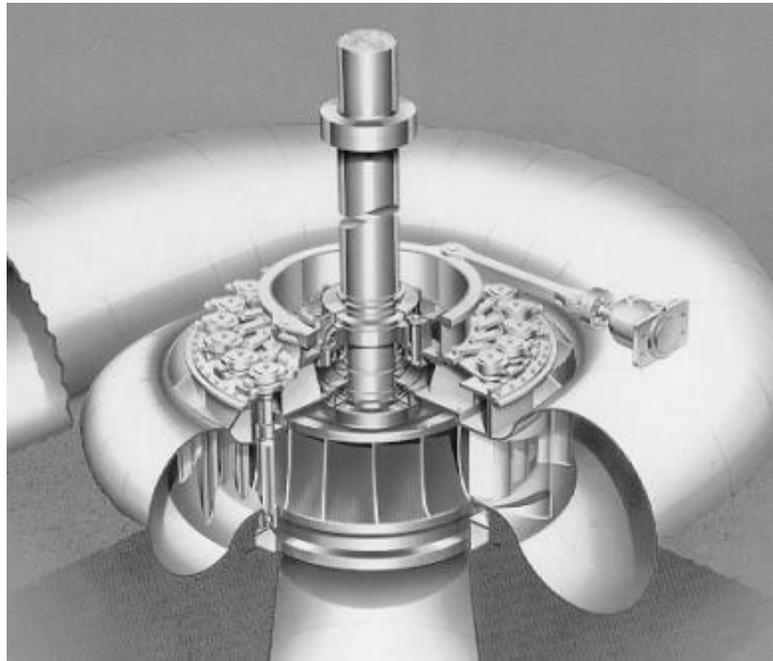
#### **1.4. Turbina Francis**

Las turbinas son máquinas motrices de flujo continuo que producen trabajo mecánico mediante un sistema de alabes de formas diversas empleando la energía cinética, térmica o de presión de un fluido. En este caso se refiere a una turbina hidráulica que se define como aquella donde al trabajo mecánico es obtenido por la transformación de energía cinética debido a la presión del agua que fluye a través de las piezas giratorias. El tipo de turbina al cual se enfocará es la turbina tipo Francis de eje vertical, es una turbina de reacción donde el fluido de trabajo sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete.

Las láminas de fluido que se forman, después de pasar el agua a través de las palas fijas y directrices, no se proyectan hacia los álabes del rodete de manera frontal, sino que, más bien, se trata de un deslizamiento sobre los mismos, de tal modo que el sentido de giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua. El agua, en su recorrido entre los álabes del rodete cambia de dirección, velocidad y presión. Todo ello, provoca una reacción en el rodete, dando origen a la potencia producida en la turbina, cuyo valor, paradójicamente está en función de la carga perdida por el líquido en su desplazamiento.

El campo de aplicación es muy extenso, pueden emplearse en saltos de distintas alturas dentro de una amplia gama de caudales (entre 2 y 200 m<sup>3</sup>/s aproximadamente). Las turbinas Francis son de muy buen rendimiento, pero solamente entre determinados márgenes de descarga, entre 60 % y 100 % del caudal máximo.

Figura 2. **Corte transversal de una turbina tipo Francis de eje vertical**



Fuente: BERTOMEU, Cesar. Turbina Francis. p. 7.

Las turbinas Francis se clasifican en función de la velocidad específica del rotor y de las características del salto.

- Turbina Francis lenta: para saltos de gran altura, alrededor de 200 metros o más.

- Turbina Francis normal: Indicada en saltos de altura media, entre 20 y 200 metros.
- Turbinas Francis rápidas y extra rápidas: apropiadas para saltos de pequeña altura, inferiores a 20 metros.

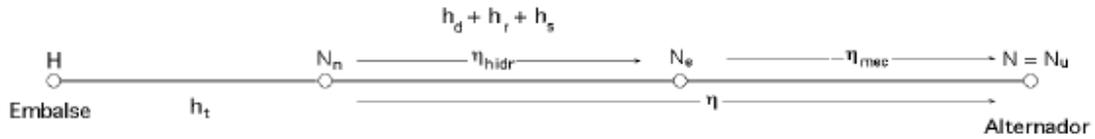
#### **1.4.1. Principio de funcionamiento de turbina Francis**

- A. El agua a presión va a una cámara espiral en forma de caracol, cuya misión es repartir el caudal por toda la periferia del rodete.
- B. Una serie de álabes fijos se encargan de canalizar correctamente las líneas de flujo del agua.
- C. Entre esta hilera de álabes fijos y el rodete se encuentra una segunda fila de álabes móviles o palas directrices que constituyen lo que se denomina el anillo distribuidor.
- D. El distribuidor permite regular el caudal de la turbina sin que las venas líquidas sufran desviaciones bruscas o contracciones, permitiendo un rendimiento elevado incluso con cargas reducidas. Estos álabes móviles pueden girar alrededor de un eje paralelo al eje de la máquina, y el movimiento de cierre es simultáneo para todos ellos.

#### **1.4.2. Potencia efectiva de la turbina**

La potencia efectiva  $H_{ef}$  se puede calcular teniendo en cuenta la figura 3, tomando como plano de referencia  $é$  a  $a'$ , aplicando la ecuación de Bernoulli a los puntos (1) y (2), e igualando ambas expresiones.

Figura 3. Cálculo de potencia efectiva



Fuente: MAYK, Turbinas hidráulicas. p. 11.

$h_d$  es la pérdida de carga en el distribuidor

$h_r$  es la pérdida de carga en el rodete

$h_s$  es la pérdida de carga en el tubo de aspiración

$$\text{Punto 1: } H = (H_s + H_r) + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + h_d + h_t \quad (1.1)$$

$$\text{Punto 2: } H = H_s + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{c_2^2}{2g} + H_{ef} + h_r + h_d + h_t \quad (1.2)$$

Igualando ambas expresiones queda:

$$H_{ef} = H_r + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} - h_r \quad (1.3)$$

En la que  $H_{ef}$  es la energía hidráulica generada en la turbina y que interesa sea lo más elevada posible. Si no hay pérdidas mecánicas:  $N_{ef} = N$ , siendo  $N$  la potencia al freno. Las diferencias de presiones y velocidades deben ser grandes, para lo cual  $C_2$  y  $P_2$  deben tender a cero, por lo tanto:  $P_1 - P_2$ ;  $C_1^2 - C_2^2$ .

Se cumple que:

- Turbinas de acción n :  $P_1 = P_2$
- Turbinas de reacción n:  $P_1 > 0$  ;  $P_2 < 0$

### 1.4.3. Ecuación fundamental de las turbinas

Para determinar la ecuación fundamental de las turbinas, y en general para cualquier turbo máquina, se pueden tomar como referencia los puntos 1 y 2 de la figura 4, en la forma:

$$H = H_s + H_r + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{C_1^2}{2g} + h_d + h_t \Rightarrow H_{ef} = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + H_r - h_r \quad (1.3)$$

$$H = H_s + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{C_2^2}{2g} + H_{ef} + h_r + h_d + h_t \Rightarrow H_{ef} = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (1.4)$$

Y aplicando el Teorema de Bernoulli al fluido en rotación entre (1) y (2), y considerando ( $z_1 - z_2 = H_r$ ), se obtiene la energía de presión en el rodete, en la forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + h_r \Rightarrow$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + H_r + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + h_r$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \begin{cases} \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} - H_r (\text{sin perdidas}) \\ \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} - (H_r - h_r) (\text{con perdidas}) \end{cases}$$

La altura efectiva, (ecuación fundamental de las turbinas), queda en la forma:

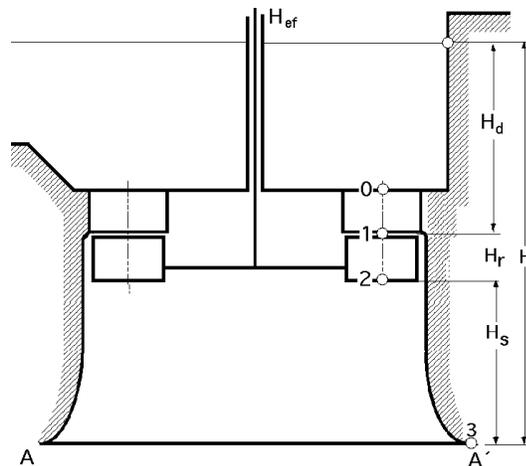
$$H_{ef} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} = \left| \begin{matrix} w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2c_1u_1 \cos \alpha_1 \\ w_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2c_2u_2 \cos \alpha_2 \end{matrix} \right| =$$

$$H_{ef} = \frac{c_1u_1 \cos \alpha_1 - c_2u_2 \cos \alpha_2}{g}$$

$$H_{ef} = \frac{c_{1n}u_1 - c_{2n}u_2}{g} = \eta_{hid}H_n, \quad (1.5)$$

$$\text{con: } H_n = H - h_t$$

Figura 4. Diagrama de presiones en la turbina de reacción



Fuente: MAYK. Turbinas hidráulicas. p. 14.

### 1.5. Componentes principales de una turbina Francis

Se consideran componentes principales de una turbina Francis:

- Tubo de aspiración
- Cámara espiral
- Distribuidor

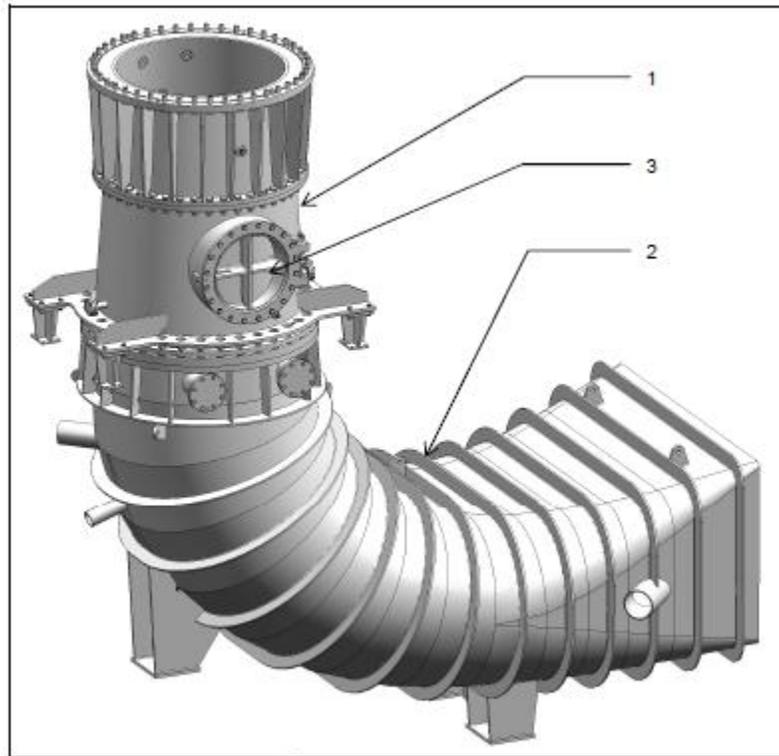
- Pala directrices o álabes directrices
- Rodete
- Eje
- Equipo de sellado

### **1.5.1. Tubo de aspiración**

El tubo de aspiración es una parte esencial de las turbinas centrípeta, tiene la función de mantener continuidad en el flujo de agua en la salida del rotor hasta que el nivel del canal de salida.

El tubo de extracción crea una depresión en la salida del rotor, que, además de recuperarla mayor parte de la energía cinética del agua que sale del tubo, también lleva el agua hasta el nivel del canal para su evacuación. Los conos del tubo de aspiración están fabricados con placas de acero carbónico, el inferior y el superior, justo después del rodete Francis, donde la velocidad del agua es muy alta, está hecho de acero inoxidable para mantener una mejor resistencia contra la cavitación.

Figura 5. **Tubo de aspiración**

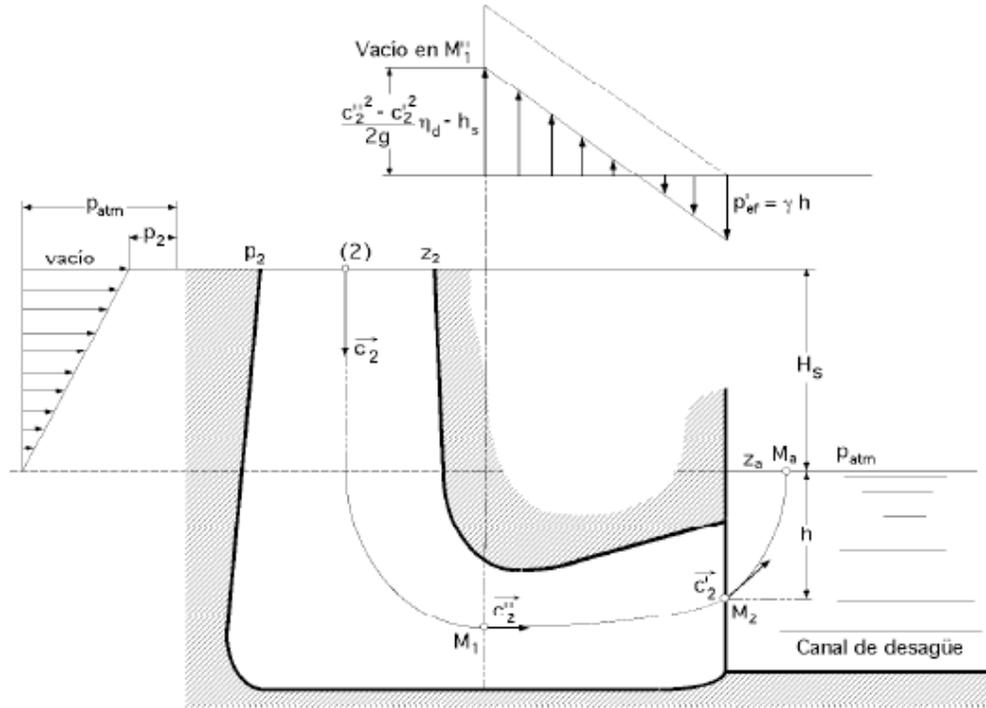


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje de turbina. p 18.

1. Conos del tubo de aspiración
2. Revestimiento del tubo de aspiración
3. Tapa de inspección

El cono inferior del tubo de aspiración está equipado con una tapa de inspección que permite el acceso dentro del tubo de aspiración. En la propia tapa de inspección hay una válvula de bola para chequear si el nivel del agua está más bajo que el acceso al tubo de aspiración, antes de abrir la tapa. El revestimiento del tubo de aspiración conecta la sección vertical del tubo de aspiración con la sección horizontal, el difusor.

Figura 6. Diagrama de presiones en tubo de aspiración



Fuente: MAYK. Turbinas hidráulicas. p 18.

$$\frac{c_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 = \frac{c_a^2}{2g} + \frac{P_{atm}}{\gamma} + z_a + h_s + h'_s \quad (1.6)$$

$$\frac{P_{atm} - P_2}{\gamma} = \frac{c_2^2 - c_a^2}{2g} + z_2 - z_a - h_s - h'_s = \frac{c_2^2 - c_a^2}{2g} + H_s - h_s - h'_s \quad (1.7)$$

Despreciando  $Ca^2$  y teniendo en cuenta que las pérdidas por choque a la salida del difusor son:

$$h'_s \cong \frac{c_2^2 - c_a^2}{2g} \cong \frac{c_2^2}{2g}$$

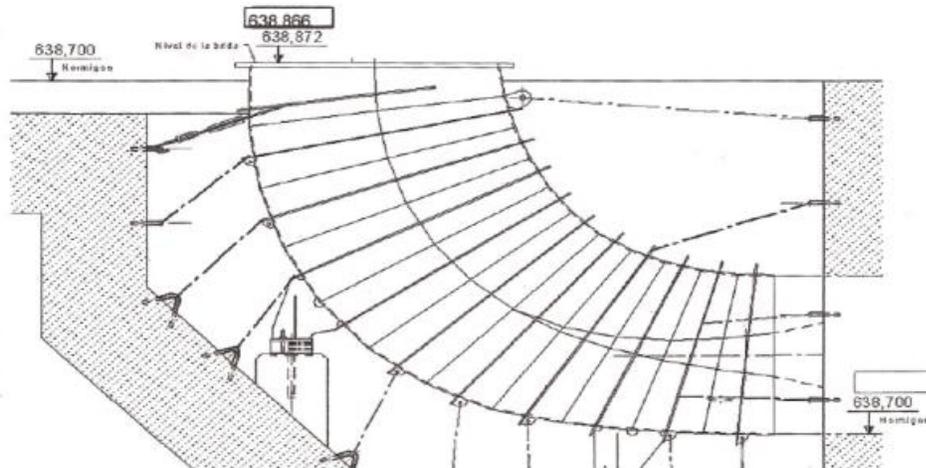
La energía recuperada es:

$$H'_{efec} - H_{efec} = \frac{P_{atm} - P_2}{\gamma} = \frac{c_2^2 - c_2'^2}{2g} - h_s + H_s = \frac{c_2^2 - c_2'^2}{2g} \eta_d + H_s \quad (1.8)$$

La altura del tubo de aspiración:

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_2}{\gamma} - \frac{c_2^2 - c_2'^2}{2g} \eta_d = |c_2'^2 \ll c_2^2| = \frac{P_{atm} - P_2}{\gamma} - \frac{c_2^2}{2g} \eta_d \quad (1.9)$$

Figura 7. Protocolo de montaje según topografía en sitio



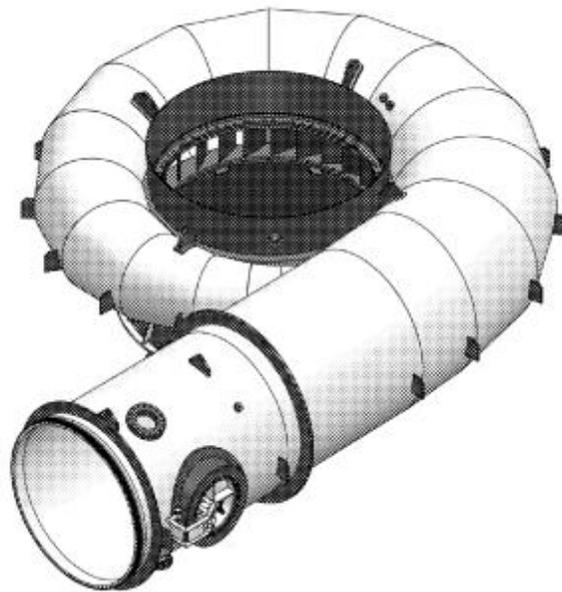
Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 18.

### 1.5.2. Cámara espiral

Está constituida por la unión sucesiva de una serie de secciones tronco-cónicas, cuyos ejes respectivos forman una espiral. Desde el acoplamiento con la tubería forzada la sección interior va decreciendo paulatinamente hasta que realiza el cierre de la cámara sobre sí misma, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente.

Esta disposición se conoce como el caracol de la turbina y debido a su diseño se consigue que el agua circule con velocidad constante y sin formar torbellinos, evitándose pérdidas de carga.

Figura 8. **Cámara espiral**

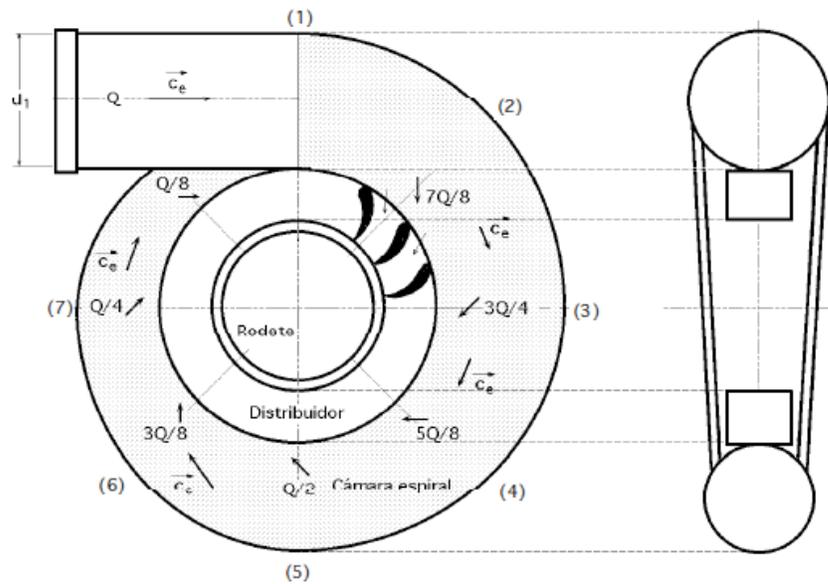


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje de cámara espiral. p. 20.

Todo el conjunto; construido con chapas de acero unidas con soldadura; suele estar rígidamente sujeto en la obra de hormigón de la central hidroeléctrica, por sus zonas periféricas externas, consideradas como tales las alejadas del centro de la turbina. Antes de proceder al hormigonado exterior de la cámara, esta se somete a presión con agua, a fin de descubrir posibles fugas por las uniones. Dada la curvatura y orientación de las palas fijas, se consigue que la proyección del agua salga dirigida casi radialmente, hacia el centro del espacio circular limitado por el anillo del predistribuidor.

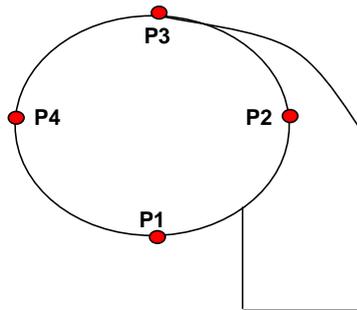
Para calcular sus dimensiones, la supondremos de sección circular, aunque también puede ser rectangular; su forma es tal que la velocidad media tiene que ser la misma en cualquier punto del caracol, evitándose así las pérdidas ocasionadas por los cambios bruscos de velocidad. A su vez, el agua no debe penetrar en la cámara espiral con una velocidad demasiado grande, ya que las pérdidas podrían ser excesivas.

Figura 9. **Distribuciones de caudal en la cámara espiral**



Fuente: MAYK, Turbinas hidráulicas. p. 54.

Figura 10. **Puntos de referencia para montaje de cámara espiral**



Fuente: reporte de topografía.

Tabla I. **Protocolo de montaje de cámara espiral**

<b>NIVELACIÓN DE CÁMARA DE ESPIRAL DE LA UNIDAD 1</b>				
<b>HORA</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
INICIAL	0,05	1,87	6,6	4,55
31/01/2009 15:43	-1,95	-2,5	-0,15	
31/01/2009 16:10	-1,03	-1,42	-0,16	0,41
31/01/2009 16:35	-0,17	-0,04	-0,24	0,18
04/02/2009 16:00	0,046	-0,284	-0,197	0,09
<b>DIFERENCIA DE NIVEL ENTRE PUNTOS</b>	1 - 2	0,33	mm	
	1 - 3	0,044	mm	
	1 - 4	0,044	mm	
	2 - 3	0,087	mm	
	2 - 4	0,374	mm	
	3 - 4	0,287	mm	
	<b>MÁXIMO</b>	<b>0,374</b>	<b>mm</b>	

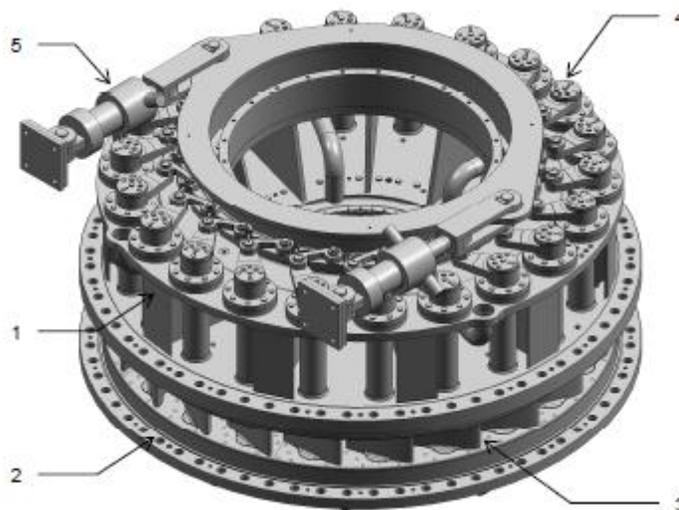
Fuente: elaboración propia.

### 1.5.3. Distribuidor

El distribuidor está formado por un determinado número de palas móviles, cuyo conjunto constituye un anillo que está situado concéntricamente entre el predistribuidor y la turbina.

Su función principal es la de distribuir y regular, eventualmente cortar totalmente, el caudal de agua que fluye hacia el rotor.

Figura 11. **Distribuidor**



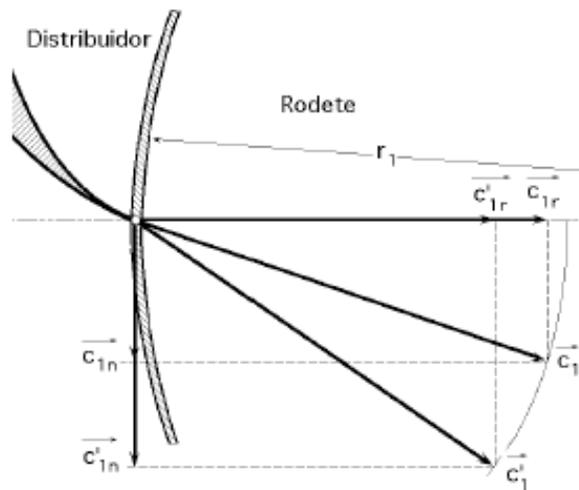
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje de turbina. p. 16.

1. Tapa de la turbina
2. Anillo distribuidor
3. Álabes directriz
4. Mecanismo de operación
5. Servomotor

La regulación se realiza, teóricamente, sin variación de la velocidad absoluta de entrada del agua en el rodete  $c_1$ , ya que lo único que se modifica es el ángulo  $c_1$  dentro del plano perpendicular al eje de rotación de la turbina, lo que implica que  $c_1$  no tenga componente axial.

La componente tangencial  $c_{1n}$  no da lugar a gasto alguno, ya que éste viene determinado por el módulo de la componente radial en el distribuidor  $c_{1r}$ .

Figura 12. **Componentes directrices del distribuidor**



Fuente: MAYK. Turbinas hidráulicas. p. 62.

#### 1.5.4. **Álabes directrices**

Son palas móviles que regulan el caudal admitido y modificando de esta forma la potencia de la turbina, ajustándose en lo posible a las variaciones de carga de la red, cada una de ellas al unísono con las demás pueden orientarse dentro de ciertos límites, al girar su eje pasando de la posición de cierre total a

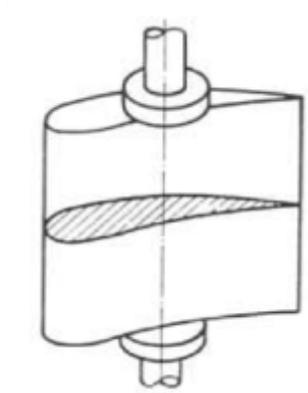
la de máxima apertura, que corresponde al desplazamiento extremo, tendiendo a quedar en dirección radial.

Las directrices son superficies desarrollables cilíndricas de generatrices paralelas al eje de rotación de la turbina; su perfil se determina teniendo en cuenta que no hay transformación de energía hidráulica en mecánica al paso del agua por el distribuidor, procurando evitar al máximo las pérdidas por rozamiento y torbellinos. Los ejes de las palas están asentados en su parte inferior en cojinetes situados en una corona circular denominada escudo inferior y guiados en su parte superior por cojinetes dispuestos en la tapa de la turbina o en otra corona circular que se llama escudo superior. Los álabes directrices están hechos de acero inoxidable con muñones superior, intermedio e inferior integrales.

La superficie hidráulica es terminada suavemente mecanizada. En la posición cerrada del distribuidor, los álabes directrices adyacentes descansan sobre dos líneas de contacto y proporcionan un goteo mínimo debido a que se comprime los álabes. Los vástagos del álabe directriz tienen superficies de soporte mecanizadas y superficie de contacto para los sellos de los álabes directrices.

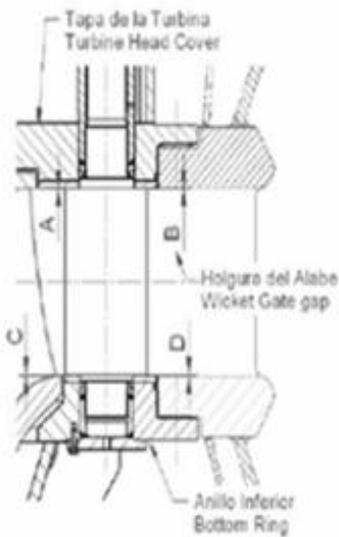
Los álabes directrices están sostenidos por tres cojinetes auto lubricantes. Los sellos del álabe directriz están dispuestos debajo del cojinete intermedio y encima del cojinete inferior para impedir que el agua o el polvo contaminen los cojinetes. Cada álabe directriz descansa sobre segmentos de cojinetes axiales auto lubricantes, mediante un aro de empuje hecho de acero inoxidable que está abullonado a la parte inferior de la palanca del álabe directriz.

Figura 13. **Álabe directriz**



Fuente: MAYK. Turbinas hidráulicas. p. 72.

Figura 14. **Verticalidad de los álabes**



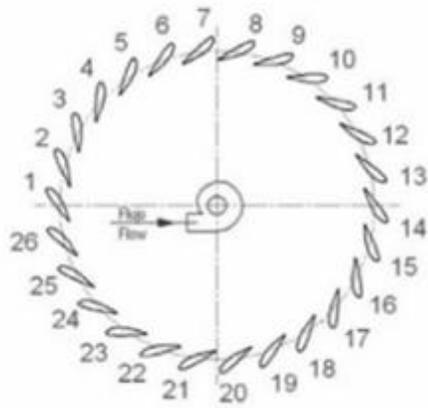
Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 25.

Tabla II. **Registro de medición de holguras en álabes**

ALABE No.	SUPERIOR		INFERIOR	
	A	B	C	D
1	0.15	0.15	0.17	0.17
2	0.17	0.15	0.20	0.17
3	0.17	0.20	0.15	0.15
4	0.10	0.10	0.15	0.17
5	0.17	0.10	0.10	0.15
6	0.15	0.10	0.15	0.17
7	0.10	0.10	0.15	0.15
8	0.10	0.15	0.17	0.17
9	0.15	0.15	0.17	0.17
10	0.15	0.10	0.20	0.17
11	0.15	0.17	0.17	0.15
12	0.15	0.17	0.20	0.15
13	0.17	0.15	0.17	0.15
14	0.17	0.17	0.20	0.20
15	0.20	0.20	0.20	0.20
16	0.17	0.17	0.20	0.17
17	0.17	0.15	0.20	0.20
18	0.20	0.15	0.23	0.25
19	0.20	0.15	0.20	0.25
20	0.20	0.15	0.20	0.25
21	0.20	0.17	0.20	0.17
22	0.20	0.15	0.20	0.20
23	0.17	0.15	0.20	0.20
24	0.20	0.20	0.20	0.20
25	0.17	0.15	0.20	0.20
26	0.10	0.17	0.17	0.10

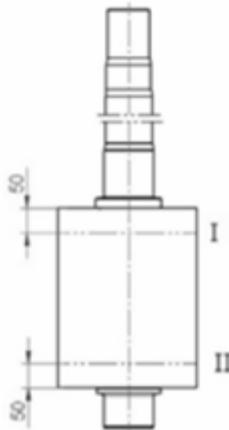
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Ubicación de los álabes**



Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 27.

Figura 16. **Holgura para apertura en los álabes**



Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 29.

Tabla III. **Registro de medición de holgura para apertura de álabes**

ALABE No.	HOLGURA	
	I	II
1-2	0.00	0.00
2-3	0.00	0.00
3-4	0.00	0.00
4-5	0.00	0.00
5-6	0.15	0.15
6-7	0.00	0.00
7-8	0.00	0.00
8-9	0.00	0.00
9-10	0.00	0.00
10-11	0.00	0.00
11-12	0.00	0.00
12-13	0.00	0.00
13-14	0.00	0.00
14-15	0.00	0.00
15-16	0.00	0.00
16-17	0.00	0.00
17-18	0.00	0.00
18-19	0.00	0.00
19-20	0.20	0.20
20-21	0.20	0.15
21-22	0.00	0.00
22-23	0.00	0.00
23-24	0.00	0.00
24-25	0.00	0.00
25-26	0.00	0.00
26-1	0.00	0.00

Fuente: elaboración propia.

### **1.5.5. Equipo de accionamiento**

Se trata de un conjunto de dispositivos mecánicos, a base de servomecanismos, palancas y bielas, que constituyen el equipo de regulación de la turbina, gobernado por el regulador de velocidad.

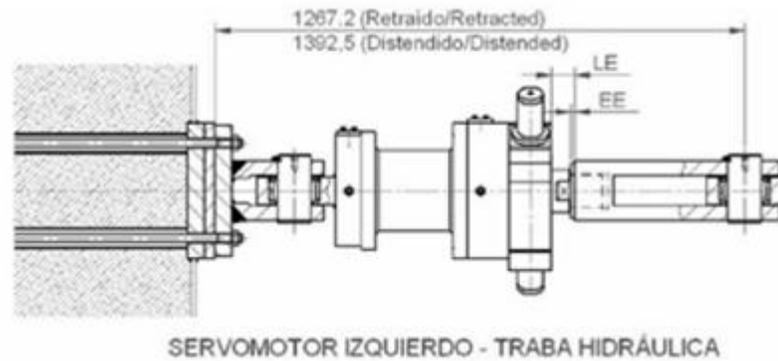
Tiene dos servomotores hidráulicos, que desplaza una biela en sentido inverso una respecto de la otra, proporcionando la fuerza necesaria para realizar un movimiento de giro alternativo a un aro móvil, llamado anillo operación, concéntrico con el eje de la turbina. Los servomotores proporcionan las fuerzas necesarias para mantener al distribuidor en diferentes posiciones de funcionamiento de acuerdo con lo solicitado por el sistema de regulación de la turbina durante el funcionamiento o para cerrar de forma efectiva el distribuidor en cualquier condición de funcionamiento si es necesario.

Un servomotor está equipado con un bloqueo mecánico y otro con bloqueo hidráulico, para la posición abierta y cerrada del distribuidor que se puede activar durante la operación de mantenimiento del distribuidor. Ambos servomotores están equipados con rótulas y pernos que no necesitan mantenimiento.

Los servomotores están dispuestos en el anclaje soldados al revestimiento del pozo de la turbina y empotrados en el hormigón. Se puede realizar el ajuste de la disposición del servomotor en el ojal del vástago del pistón y mediante calces dispuestos entre el servomotor y la placa de anclaje.

## Protocolo de ajuste de servomotores de accionamiento

Figura 17. **Servomotor izquierdo**



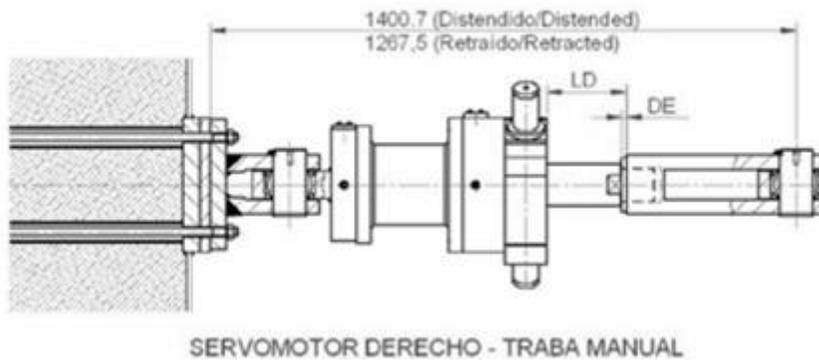
Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 18.

Tabla IV. **Registro de medición montaje servomotor izquierdo**

Dimensión	LE(1)	LE(2)	EE	SE
	183.15	53.04	x	x

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Servomotor derecho**



Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. P. 18.

Tabla V. **Registro de medición montaje servomotor derecho**

Dimensión	LD(1)	LD(2)	DE	SD
	182.75	53.1	x	x

Fuente: elaboración propia.

### 1.5.6. Anillo de operación

Con sus movimientos, hace girar a todas y cada una de los álabes; el giro conjunto y uniforme de los álabes directrices, permite variar la sección de paso de agua a través del distribuidor, este anillo es controlado por dos brazos hidráulicos llamados servomotores. Los esfuerzos en el anillo de operación están limitados por los servomotores, el esfuerzo en el anillo se calcula con la siguiente expresión:

$$S = \frac{MC}{I} + \frac{T_1}{A} + \frac{T_2}{A} \tag{1.10}$$

Dónde:

S: esfuerzo en el anillo de operación

M: momento de inercia en el anillo

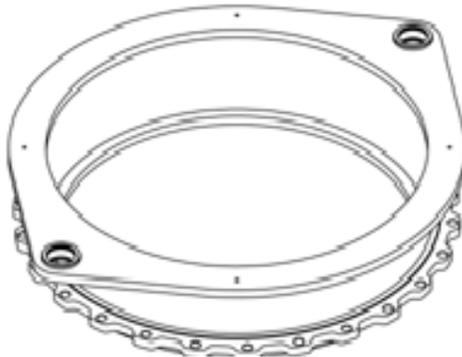
C: distancia del acople al extremo de los servomotores

$T_1$ : tensión en el anillo para apertura de álabes

$T_2$ : tensión en el anillo para el cierre de álabes

A: área de la sección transversal del anillo

Figura 19. **Anillo de operación**

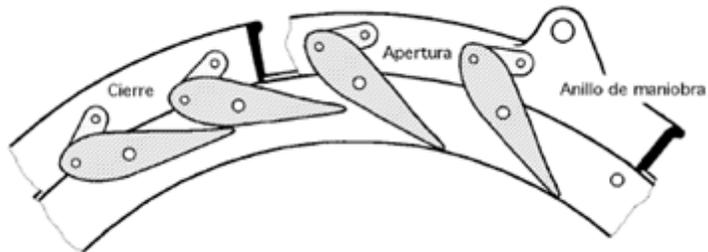


Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p .25.

### 1.5.7. **Bielas**

El eje de la pala directriz va ligada al anillo mediante una biela, la misma no va unida directamente al anillo, sino que lo hace mediante una bieleta, que ejerce la función de fusible mecánico.

Figura 20. **Bielas de accionamiento**



Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 25.

### **1.5.8. Rodete de turbina**

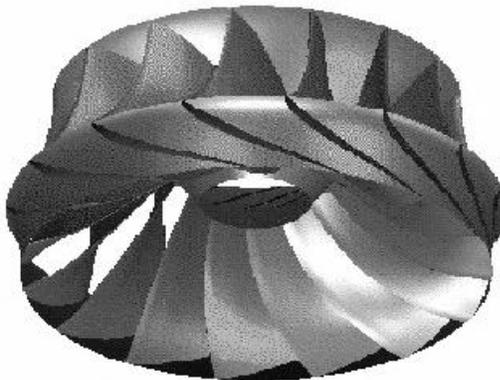
Se trata de la pieza fundamental, es donde se transforma la energía cinética del agua en la energía mecánica deseada, se puede realizar esta transformación por la conjunción de fuerzas del agua aplicada a los alabes las cuales hacen girar el rotor. Está unido rígidamente al eje de la turbina y perfectamente concéntrica con el distribuidor.

El rotor se compone de una serie de álabes en particular, estructurado y fijo entre las coronas internas y externas. En este tipo de flujo de la turbina El agua se dirige y se distribuye de manera uniforme en la dirección radial, a lo largo de la periferia de la entrada. El rotor consta de un núcleo central alrededor del cual se encuentra dispuesto determinado número de palas de superficie alabeada equidistantemente repartidas y fijadas al núcleo, forma una pieza única hecha por fundición o soldadura sin uniones ni fijaciones.

Las palas están unidas por su parte externa inferior a un anillo que hace cuerpo con las mismas. En su extremo superior van unidas a otro anillo el cual va sujeto al eje de la turbina. La longitud y mayor o menor inclinación respecto al eje de la turbina de las palas o álabes del rotor dependen del caudal, de la altura del salto y de la velocidad específica.

Experimentalmente, se ha establecido que el número de álabes del rotor debe de ser diferente al de álabes del distribuidor, en caso contrario se producirían vibraciones al coincidir los espacios de ambos conjuntos. El número de álabes del distribuidor suele ser primo, respecto al número de álabes del rotor.

Figura 21. **Rodete de turbina Francis**

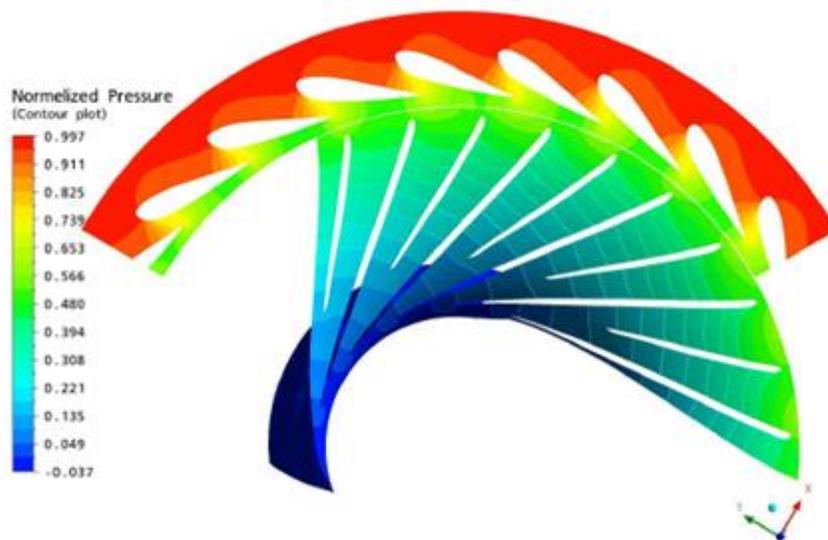


Fuente: MARTIN, Roth; ETH Zurich. Sultzer Hydro LTD.

Un análisis del flujo a través del rodete de una turbina hidráulica utilizando herramientas numérico-computacionales, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), contribuye a la evaluación del comportamiento de la máquina.

El análisis permite no sólo cuantificar las variables más significativas del estado de funcionamiento de la turbo máquina sino también contribuye a la identificación de los parámetros geométricos relacionados con el diseño del rodete que, a su vez, tienen un impacto directo en la mejora de su desempeño como es la eficiencia del rodete. La optimización geométrica de los álabes del rodete y el análisis de la integridad estructural del rodete de una turbina hidráulica contribuye al incremento de eficiencia, disponibilidad, capacidad de generación de las unidades, que a su vez impactan en un mejor al factor de planta de la central, en la figura 22 se da un ejemplo del análisis hecho con la herramienta CFD, donde se muestra la presión distribuida en el rodete de la turbina.

Figura 22. **Resultados obtenidos de presión normalizada**



Fuente: MARTIN, Roth; ETH Zurich. Sultzer Hydro LTD.

### 1.5.9. Eje

Es por medio del eje de turbina, que al estar rígidamente unido mediante un acoplamiento al eje del generador, transmite al rotor del generador el movimiento de rotación. En instalaciones de este tipo, es sobre el eje del generador donde se dispone del sistema para soportar todo el peso del conjunto formado por los ejes, el rotor del generador, la turbina y el empuje del agua sobre los álabes de la turbina por características constructivas y referidas a condiciones de peso y sustentación o de aireación del rotor, el eje es hueco en su totalidad

Figura 23. Eje de turbina



Fuente: sitio de montaje.

Un proceso importante en el montaje de la turbina es el acople del eje y el rotor de la turbina, para hacer el acople se utilizan resistencias eléctricas para calentar los pernos y darles el torque necesario, los pernos llegan a una temperatura aproximada de 80°C y por la dilatación que sufren al aplicarles calor se facilita la tarea de acople, en este caso al llegar a la temperatura requerida se giran un ángulo 55°.

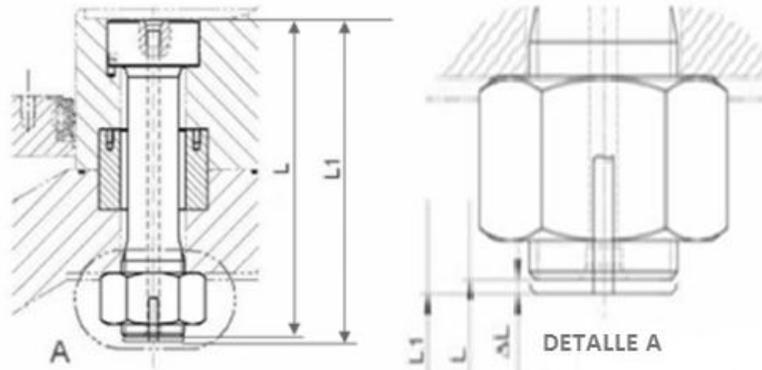
Tabla VI. **Registro de medición elongación de pernos de acople**

PERNOS	L (mm)	L1 (mm)	ELONGACIÓN $\Delta L$ (mm)	$\beta$
1	267.87	268.52	0.65	$\pm 55^\circ$
2	268.13	268.57	0.44	$\pm 55^\circ$
3	268.54	269.15	0.61	$\pm 55^\circ$
4	268.34	269	0.66	$\pm 55^\circ$
5	268.06	268.72	0.66	$\pm 55^\circ$
6	268.27	268.81	0.54	$\pm 55^\circ$
7	267.81	268.32	0.51	$\pm 55^\circ$
8	268.16	268.6	0.44	$\pm 55^\circ$
9	268.34	268.91	0.57	$\pm 55^\circ$
10	268.11	268.57	0.46	$\pm 55^\circ$
11	268.07	268.6	0.53	$\pm 55^\circ$
12	268.1	268.55	0.45	$\pm 55^\circ$

$\beta$  Ángulo de rotación de la tuerca en grados.

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Detalle de pernos de acople y rotos de turbina**



Fuente: VOITH SIEMENS. Protocolo de montaje. p. 30.

#### 1.5.10. **Equipo de sellado**

Está destinado a sellar, cerrar e impedir el paso de agua, que pudiera fluir desde el rotor hacia el exterior de la turbina, por el espacio existente entre la tapa de la turbina y el eje. Consta de una serie de aros formados por juntas de carbón o material sintético presionadas, generalmente por medio de servomecanismos hidráulicos u otro medio mecánico, sobre un collar solidario al eje. La serie de aros concéntricos, radial o axialmente, se disponen de manera alterna entre la parte giratoria y la parte fija, contribuyendo eficazmente al cierre hidráulico, esto constituye los denominados laberintos.

En esencia consta de una serie de aros formados por juntas, bien de carbón, de material sintético o grafitadas, etc., presionadas, sobre un casquillo o collarín solidario con el eje, por medio de muelles de acero inoxidable o servomecanismos convenientemente distribuidos alrededor de la periferia del mismo. Se conoce como junta del eje o junta de carbones. Según sean las características constructivas de cada turbina, la junta puede estar diseñada

para trabajar radial o axialmente. Una serie de aros concéntricos, radial o axialmente, alternos entre la parte giratoria y fija, contribuyen eficazmente al cierre hidráulico. Constituyen los denominados laberintos, que también se suelen disponer en zonas de llanta y núcleo del rodete. Dispone de un sistema de agua filtrada para refrigeración de las juntas, suministrada a mayor presión que la que posee el agua en la zona del rodete.

En turbinas modernas, instaladas por debajo de la cota de salida del agua, en dirección aguas abajo, se dispone de una junta inferior de goma, hinchable, razón por la que se denomina junta hinchable, a la cual, solamente cuando el grupo está parado, se le inyecta aire a presión. Con ello se eliminan las fugas de agua, en tal situación del grupo, pudiendo, en determinadas condiciones, facilitar la labor de cambiar juntas desgastadas.

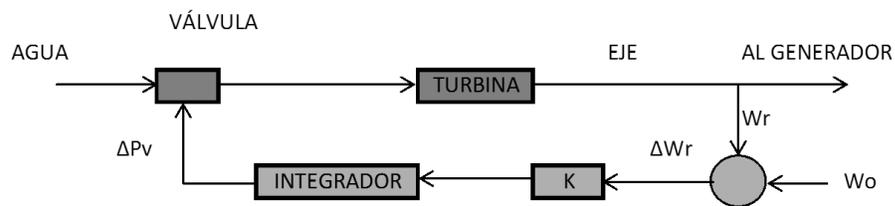
## **1.6. Gobernador de turbina**

Cuando la carga eléctrica del generador es súbitamente aumentada, la potencia eléctrica excede a la potencia mecánica de entrada. La deficiencia de potencia que se produce es administrada por la energía cinética almacenada en el sistema rotativo. La reducción de energía cinética causa que la velocidad de la turbina, y consecuentemente la frecuencia del generador disminuya, por lo que la función del gobernador es controlar la velocidad de la turbina, esto se logra monitoreando el cambio de velocidad y actuando para ajustar la entrada de agua a la turbina para cambiar la salida de potencia mecánica y llevar de nuevo la velocidad al estado estable. La figura 25 representa un diagrama de bloques simplificado de un gobernador de velocidad constante.

La velocidad medida del rotor  $W_r$ , se compara con la velocidad de referencia  $W_o$ , la señal de error, que es igual a la desviación de la velocidad se amplifica y se integra para producir una señal de control  $\Delta P_v$  que actúa sobre la entrada de agua de la turbina. Debido a la acción de restablecimiento de este controlador integrador,  $\Delta P_v$  alcanzará un nuevo estado solo cuando el error de la velocidad  $\Delta W_r$  sea cero.

Cuando se produce un aumento en la potencia eléctrica se da un decaimiento de frecuencia a una razón determinada por la inercia del rotor. Mientras que la velocidad decae, la potencia mecánica de la turbina comienza a aumentar. Esto causa una reducción en la razón de decaimiento de la velocidad, y luego un aumento en la velocidad cuando la potencia de la turbina excede la potencia de la carga. La velocidad regresará a su valor de referencia y la potencia de estado estable aumenta a una cantidad igual a la carga adicional.

Figura 25. **Diagrama de bloques simplificado de un gobernador de velocidad**



Fuente: elaboración propia.

El control de la potencia de la máquina es realizando de acuerdo a los valores de las ganancias y constantes de tiempo de los componentes proporcional, integral y derivativo, suministrando el valor de ajuste necesario

para lograr una apertura de los alabes, efectuando un cálculo en el bloque controlador PID de acuerdo a la señal de desviación de frecuencia. Los valores de los parámetros PID se ajustan de acuerdo al modo de operación de la máquina, sea este en vacío, carga aislada o conectado a la red barra infinita. El modo de operación es conmutado de acuerdo a la posición conectado o desconectado del interruptor de salida de la máquina.

El controlador tipo PID utiliza señales de realimentación de potencia y de velocidad, las cuales son comparadas con los valores de referencia respectivos, para calcular la acción de control a ejecutar. Este tipo de gobernador incluye un módulo limitador de potencia de la máquina para mantener la potencia o la posición de alabes constante, a pesar de las fluctuaciones de carga y frecuencia que tenga el sistema.

Los parámetros de ajuste de los reguladores de velocidad deben sintonizarse con las constantes de aceleración del agua  $T_w$  y constante de inercia  $H$  del generador, y con ello se garantiza la estabilidad entre la dinámica de la columna de agua y la potencia generada, para calcular la constante de aceleración del agua  $T_w$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_w = \text{tiempo de inercia del agua} = \frac{Q}{gH} \sum_l^n \frac{L_n}{A_n} \quad (1.11)$$

$Q$  = caudal de la tubería de presión, descarga garantizada ( $m^3/s$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$H$  = caída neta de agua, nivel de carga garantizado

$L$  = longitud correspondiente de cada tramo de tubería forzada

$A$  = área de cada sección

Se considera un tramo cada segmento continuo con la misma sección transversal de tubería.

$$T_m = \text{Tiempo de inercia de máquina} = \frac{GD^2 * n^2}{364756 P} \quad (1.12)$$

$GD^2$  = momento de inercia

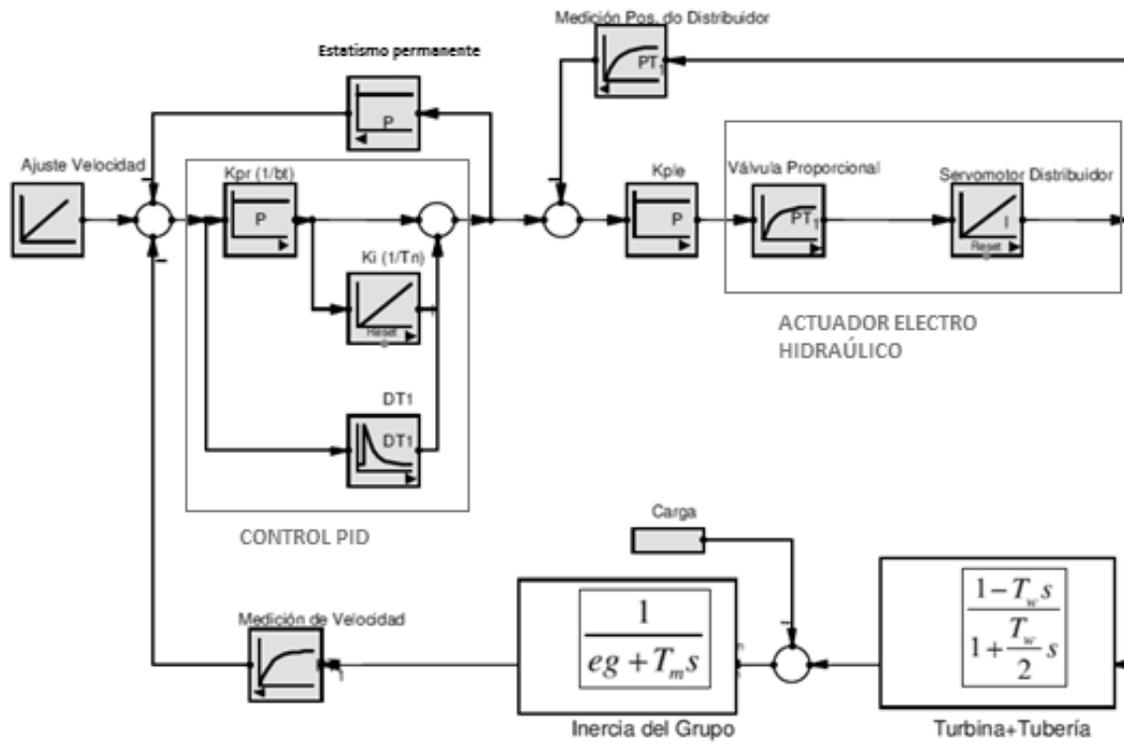
$n$  = rotación nominal (rpm)

$P$  = potencia nominal kW

eg= 364756 factor de auto regulación de la carga

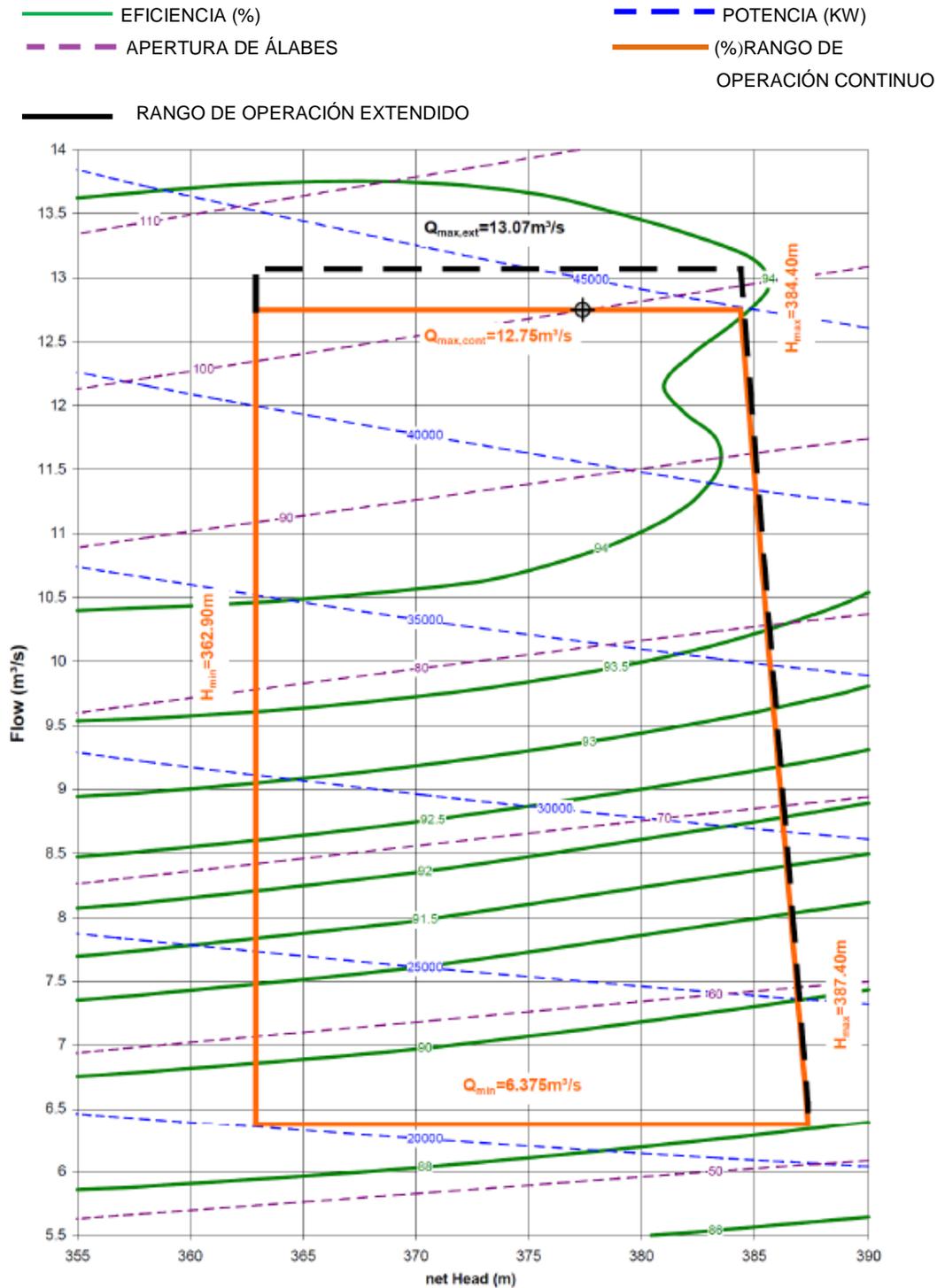
Para el sistema de control del gobernador se deben detallar todas las partes que formaran cada bloque y se deben colocar los bloques de acuerdo a su acción dentro del lazo de control que corresponda, incluyendo los lazos de control manual, los lazos de medición y acondicionamiento de señales, etc. Después se debe definir cuáles de los bloques van a ejercer un control automático continuo sobre las variables, en el caso de gobernadores, la apertura de alabes, la potencia y la velocidad del turbogenerador hidráulico. La figura 26 muestra el diagrama de bloques para el regulador hidráulico de la máquina.

Figura 26. Diagrama de bloques del gobernador de velocidad



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del gobernador. p. 25.

Figura 27. Curvas de rendimiento de la turbina



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación de la turbina. p. 20.



## **2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECUENCIA DE MONTAJE DEL ESTATOR**

El estator es la parte estacionaria de un generador, y es donde se encuentra el devanado de armadura o inducido; la carcasa del estator ha sido fabricada con chapas de acero soldadas y su estructura está formada por anillos unidos entre sí, con refuerzos que tienen también la función de dirigir el aire de refrigeración a los intercambiadores de calor.

Chavetas radiales entre la carcasa del estator y las placas de apoyo garantizan la concentricidad del estator y permiten el desplazamiento radial de la carcasa causada por la expansión térmica del núcleo disminuyendo así el esfuerzo de compresión entre el núcleo y la carcasa eliminando sus ondulaciones causadas por el esfuerzo.

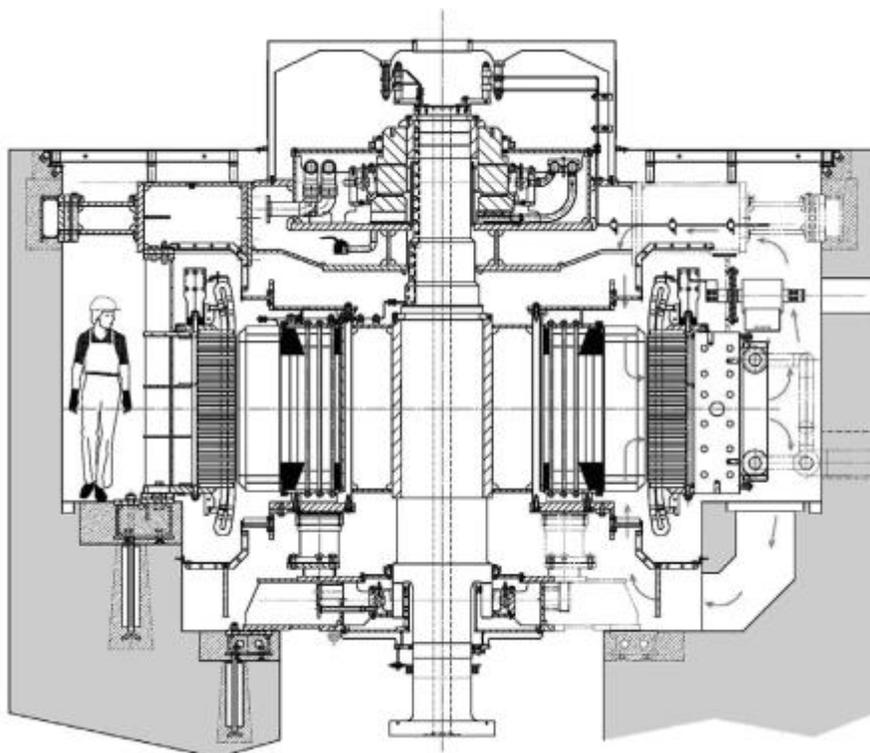
El núcleo del estator está formado por láminas de acero de silicio apiladas en el interior de la carcasa del estator. Las láminas han sido obtenidas estampando chapas de acero de silicio de bajas pérdidas magnéticas. Después del estampado, las aristas de las láminas fueron retiradas y su superficie tratada con barniz adecuado para operar a altas temperaturas, de modo a obtener la aislación entre las láminas y protegerlas contra la oxidación.

### **2.1. Secuencia de instalación del estator**

El montaje en sitio de los generadores consiste en el montaje de los componentes principales que no se entregaron terminados de fábrica por limitaciones de transporte, y el montaje final en el foso de la unidad, donde

todos los componentes del generador se agrupan y finalmente se acoplan a la turbina de acción para formar una unidad completa.

Figura 28. **Corte transversal del conjunto estator**



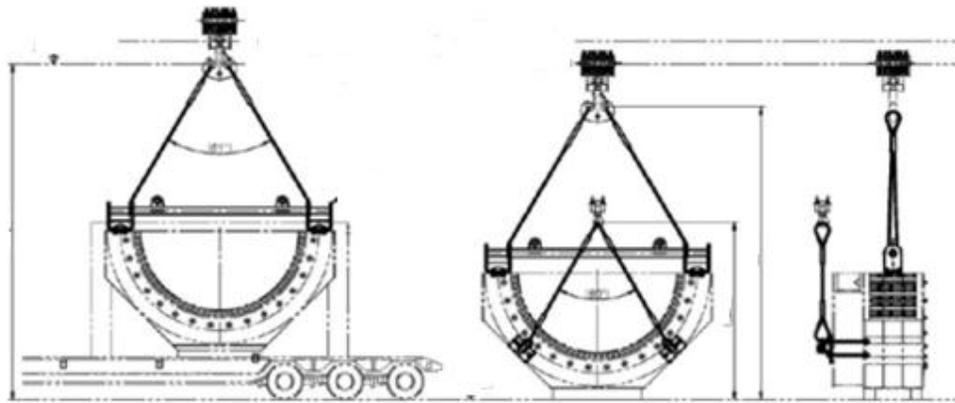
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del generador. p. 32.

## 2.2. **Giro de los segmentos del estator**

Debido a limitaciones de transporte, los segmentos del estator se envían con la cara posterior abajo. Como se indica en la figura 29, colocar el equipo de levantamiento con capacidad de carga suficiente en los puntos de levantamiento determinados en los segmentos marcados por el lado de aguas

arriba del estator. Generalmente, los segmentos se entregan con el dispositivo de levantamiento y la viga de giro en todos los segmentos.

Figura 29. **Maniobra de transporte de segmentos de estator**



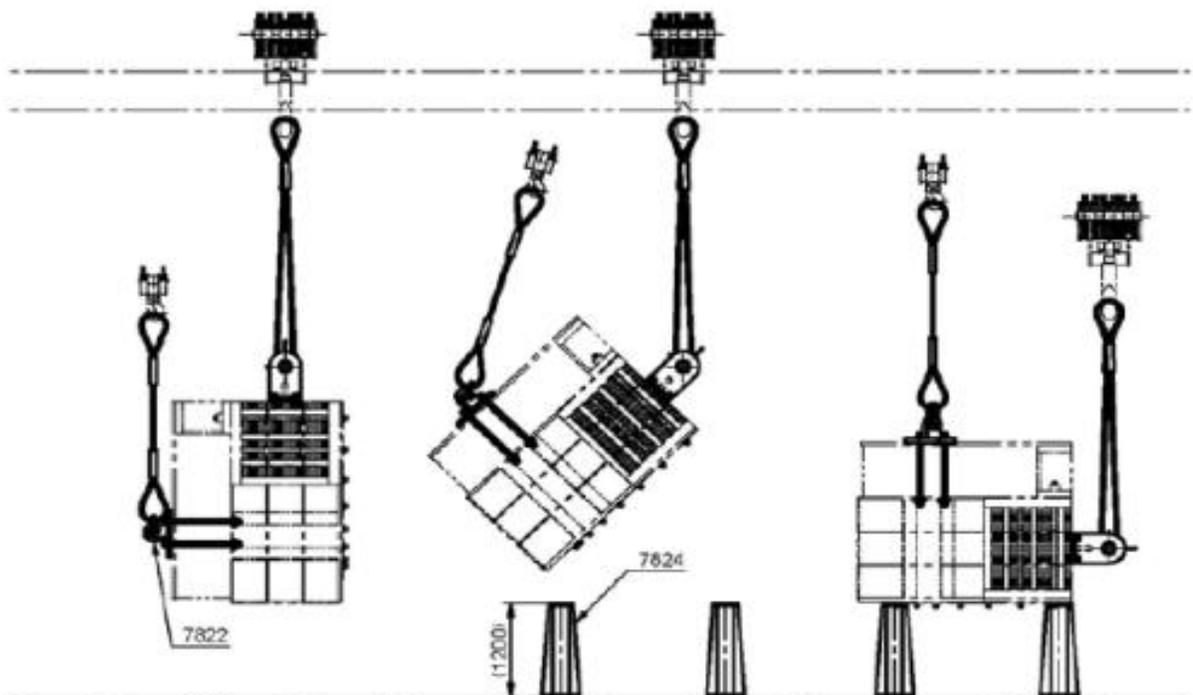
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del generador. p. 15.

Instrucciones son para girar los segmentos del estator.

- A. Coloque las secciones de modo tal que puedan levantarse con los ganchos principal y secundario de las grúas de la central eléctrica.
- B. Si la capacidad de carga del gancho auxiliar es inadecuada o si no se dispone de un gancho auxiliar, utilice un polipasto de cadena con capacidad apropiada.
- C. Una cables metálicos de longitud y capacidad de carga adecuadas a la sección del estator y suspéndala con los ganchos principal y secundario de las grúas.
- D. Levante la sección del marco aproximadamente 1 metro, de forma pareja, con los ganchos principal y secundario. Continúe levantando el marco con un gancho hasta que esté en la posición de servicio correcta.

- E. En algunos casos, la sección también puede llevarse a su posición final descendiendo el otro gancho.
- F. Coloque la sección girada sobre una base apropiada.

Figura 30. **Maniobra de giro de los segmentos del estator**



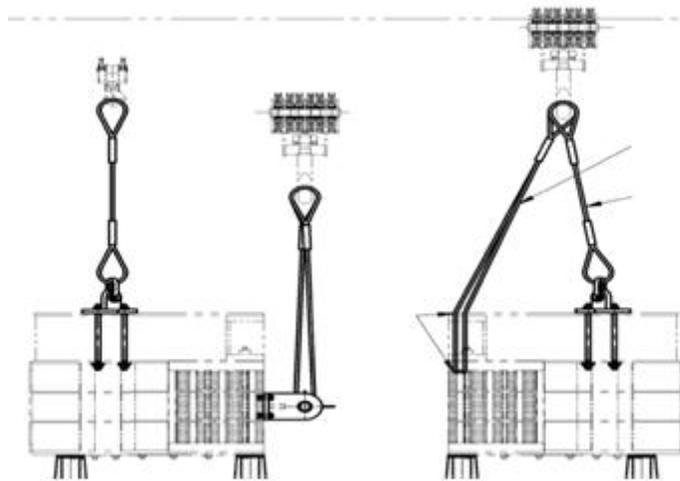
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del generador. p. 17.

Con la grúa, levante el segmento ligeramente y controle la posición horizontal mediante un nivel de burbuja. Descienda el segmento y corrija la longitud y / o la posición de los cables metálicos, si fuera necesario. Todavía con la grúa, coloque el segmento, libremente suspendido, por encima de los soportes; alinéelo con la superficie de la placa y colóquelo sobre los soportes. Importante: tenga cuidado con la marca aguas arriba cuando bajar la sección del marco.

Compruebe que la sección esté en una correcta posición horizontal con el nivel de burbuja y, si es necesario, corríjala agregando o quitando calzos debajo del estator, sobre el soporte o los pedestales. Pueden utilizarse cables de plomada, dos veces en cada segmento, para comprobar el nivel y la inclinación del segmento. Las inclinaciones pueden corregirse agregando calzas bajo el estator. Si es necesario, utilice un equipo auxiliar adecuado para asegurarse de que el núcleo no se caerá. Inserte los pernos de fijación (o tornillos de fijación) en los extremos de las juntas superior e inferior, preparándolas para acoplarlas a los segmentos adyacentes. Maneje la segunda sección del estator de la misma manera que la primera.

La marca de la junta, colocada en el diámetro exterior del estator de cada junta, debe coincidir con la marca asociada en la primera sección del estator. Quite la viga del diámetro interior. Mueva la segunda sección por sobre los soportes o pedestales preparados y descíndala, dejando una distancia de 10 mm del soporte o pedestal. Alinee las caras de las juntas y coloque la sección del estator. Compruebe el nivelado y, si es necesario, inserte calzos entre los soportes y la sección del estator. Apriete las tuercas de acoplamiento manualmente para mantener los segmentos unidos. Los segmentos serán guiados a la posición correcta por los pasadores cilíndricos axial y radial, que están firmemente posicionados por soldadura de fábrica. Una los segmentos en secuencia circular.

Figura 31. **Maniobra para alineación de los segmentos del estator**



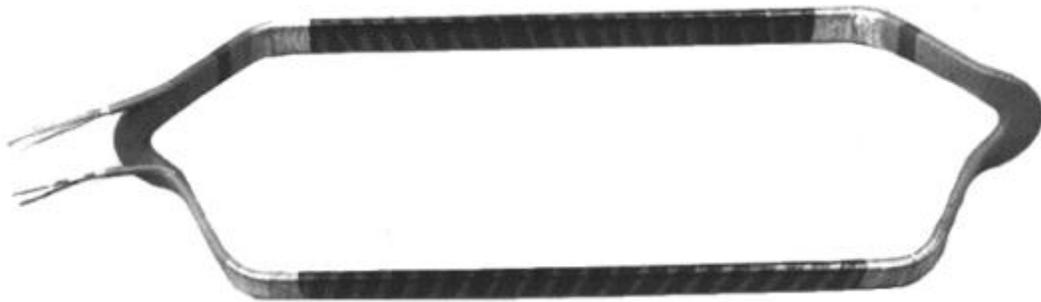
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del generador. p. 18.

### 2.3. **Montaje de bobinas en el estator**

Cada ranura en el núcleo del estator contiene dos devanados. La bobina tiene una forma con dos piernas, de manera que puede montarse en un lado la parte radial inferior de la ranura (camada inferior) y en el otro lado la parte radial superior de la ranura (camada superior). Cada bobina individual consiste de varias vueltas con hebras paralelas enrolladas. Las hebras deben salir en el lado extremo superior, después de montar todas las bobinas, se sueldan individualmente con las próximas terminaciones de bobinas. Las espirales se juntan en grupos que una vez conectados, forman el devanado del estator. Los lados se identifican como DE y NDE (Drive End = lado de tracción = lado inferior / turbina, y Non Drive End = lado de no tracción = lado superior / anillo colector).

Las bobinas previamente tratadas en fábrica son envueltas con cinta de mica y fibra de vidrio en varias capas, con media-superposición, sobre la parte recta y cabezas. La cantidad de capas y, con eso, también el espesor de la capa aislante total, dependen de la tensión de la máquina o de la tensión de ensayo del devanado. Sobre las capas de cinta de mica y fibra de vidrio es colocada aún una cinta reforzada para protección mecánica. Las bobinas así envueltas secan en una estufa. Posteriormente, las bobinas son impregnadas en un tanque en vacío, con resina epóxica, clase térmica F, la cual, debido a su baja viscosidad, garantiza una penetración perfecta en el aislamiento. Las barras impregnadas son colocadas en moldes con dimensiones determinadas, y endurecidas en una estufa a temperatura elevada. El aislamiento de las bobinas transpuestas atiende a la clase de aislamiento F.

Figura 32. **Bobina tipo diamante**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 17.

En primer lugar, deben colocarse todas las piezas de relleno inferiores. Siempre realice esta actividad de manera que pueda colocar las bobinas en el mismo período de trabajo. Para la instalación de las bobinas, es necesario seguir las siguientes instrucciones:

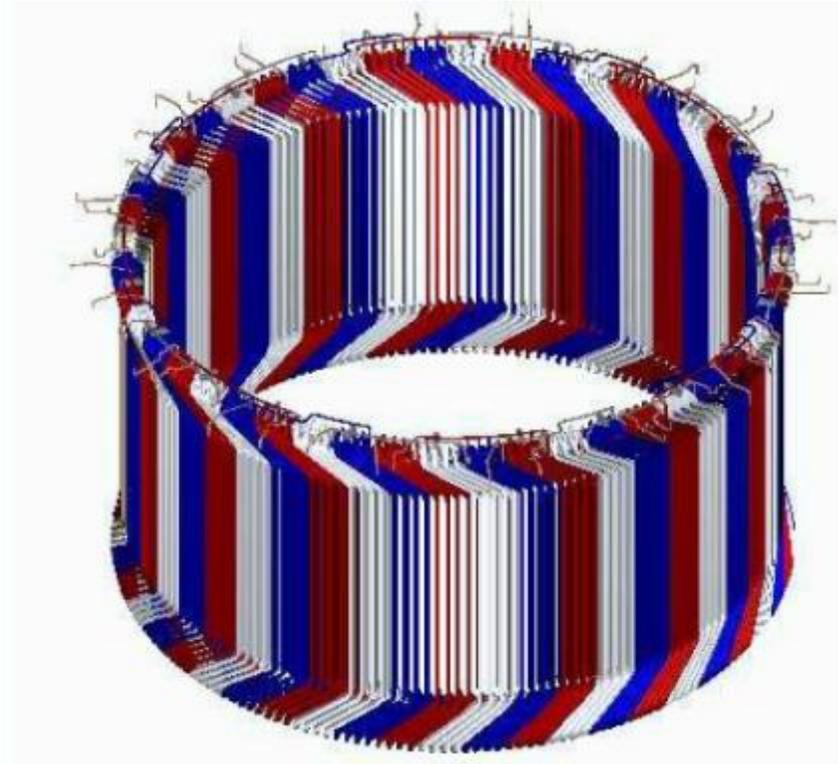
- A. Poner una rampa de madera en la cara del núcleo, alineado al centro de su altura axial, la rampa de madera tiene el largo de la distancia entre las piernas de la bobina.
- B. Coloque la primera bobina con la pierna superior en la rampa y la inferior en la ranura, fijándola contra la rampa y sucesivamente contra el núcleo, con cinta de fibra de vidrio o un material similar.
- C. Coloque las bobinas siguientes de acuerdo con la primera. Las siguientes bobinas montadas deben seguir el mismo procedimiento hasta quedar en contacto perfecto con la cara inferior de las ranuras (pierna inferior).
- D. Antes de montar la siguiente bobina, se coloca la capa separadora, luego la pierna superior de una bobina se apoya sobre la pierna inferior de una bobina ya montada.
- E. Inicio de la colocación de las bobinas con masilla conductora. Luego de que la bobina toque el fondo de la ranura (con el relleno de fondo de la ranura), las siguientes bobinas se montarán en la posición definitiva, y todas se pueden montar con masilla negra conductora.
- F. Para las bobinas que van a montarse con masilla conductora, coloque el papel conductor en la mesa especial para aplicar la masilla conductora. Con el aplicador tipo espátula, aplique una capa de masilla en el papel.
- G. Verifique la posición en la que se montará la bobina en la ranura. Coloque la bobina con la cara más amplia en la masilla colocada sobre el papel en la mesa especial. Abra una de las abrazaderas que sujetan el papel y repita el mismo paso con el otro lado para envolver el papel conductor en la barra. No se debe aplicar masilla a la zona del papel que toca la superficie angosta de la bobina.
- H. Con la bobina envuelta en el papel, mueva con cuidado la bobina hacia la ranura. Una vez que está en posición vertical, coloque la bobina frente a la ranura a la altura adecuada para instalarla y comience a introducirla en la ranura.

- I. Retire la rampa de madera y finalice la colocación de las bobinas que estaban debajo de la rampa, sin masilla, sólo en estas piernas.
- J. Empuje todas las bobinas que no tienen masilla a la posición final dentro de la ranura.
- K. Inserte el relleno lateral en todas las ranuras donde hay bobinas sin masilla.
- L. Deben montarse los sensores de temperatura (RTD) donde indique el plano.
- M. Las ranuras deben cerrarse con las cuñas, las cuñas se identifican con un número. El número figura en la conexión de corriente, en el cobre. Se debe llevar un registro para identificar qué barra se monta en cada ranura y en qué posición.

### **2.3.1. Devanado del estator**

El devanado del diseño del generador de la central hidroeléctrica Xacbal es de tipo imbricado, compuesto de barras con transposición de  $360^\circ$  en dos capas. Las bobinas son insertadas en ranuras en el núcleo con desplazamiento que resulte en el paso de devanado determinado en el diseño básico; posteriormente estas bobinas son conectadas unas a las otras en las extremidades. Este tipo de devanado produce una dimensión axial reducida de las cabezas, compensando así la desventaja de la gran cantidad de conexiones en el circuito (tres veces el número de polos). El devanado imbricado permite mayor simetría en el campo magnético de la máquina y menor volumen de pérdidas adicionales.

Figura 33. **Vista general del devanado de estator**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 50.

Los conductores parciales son generalmente posicionados en dos capas adyacentes, en la dirección del ancho de la ranura. La transposición de los conductores parciales es hecha de tal modo que todos pasen, a lo largo de la longitud del núcleo, por todas las posiciones posibles en la altura de la barra. Esta formación garantiza un flujo transversal en la ranura aproximadamente igual para cada conductor parcial. Así, la corriente se distribuye uniformemente por los conductores parciales y las pérdidas adicionales, causadas por el desplazamiento de la corriente en la ranura, son muy reducidas.

Tabla VII. **Características de aislamiento de bobinas**

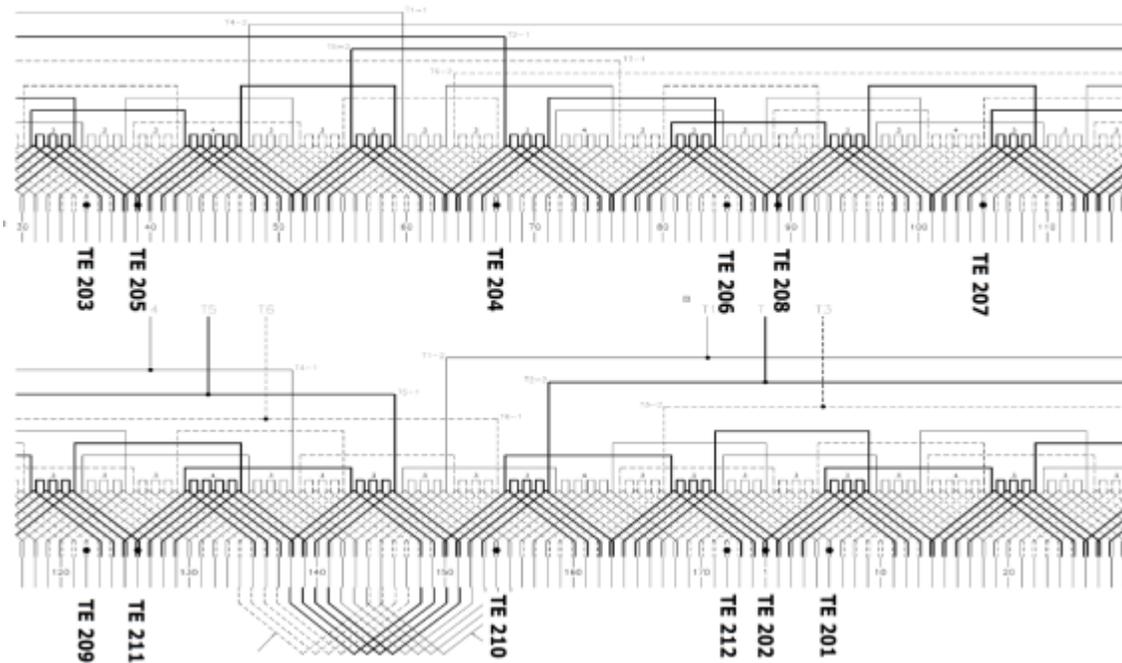
Constante dieléctrica relativa, $\epsilon_r$ , 20 °C, 50 Hz		$\cdot 4$
Tan $\delta$ a 0,2 UN, 20 °C, 50 Hz		$\leq 2,0 \%$
$\frac{1}{2}$ ( Tan $\delta$ / 0,6 UN - Tan $\delta$ / 0,2 UN ), 20 °C, 50 Hz		$\leq 0,5 \%$
Max. $\Delta$ Tang $\delta$ / paso 0,2 UN ( desde 0,2 UN a UN )		$\leq 0,5 \%$
1 min. Tensión de ruptura, 50 Hz, ranura lateral	kV/mm	$\geq 25$
• Barras de estator individuales ( half coil )	kV	$U_p \geq 4,5 \text{ UN}$ ranura lateral
	kV	$U_p \geq 3 \text{ UN}$ parte frontal
• bobinas de estator individuales, diamond coil	kV	$U_p \cdot 2 ( 2 \text{ UN} + 1 \text{ kV} )$ parte lateral
	kV	$U_p \geq ( 2 \text{ UN} + 1 \text{ kV} )$ parte frontal
Aumento de la Resistencia de voltaje a lo largo de la ranura	kV/mm	$\geq 50 ( 1.2 / 50 \text{ _s onda} )$
	kV	$U_s \geq ( 4 \text{ UN} + 5 \text{ kV} )$ parte lateral
Máxima temperatura permisible IEC 85	°C	155, clase F
Máxima resistencia a la tracción	N/mm <sup>2</sup>	$\cdot 10^6$
Módulo de elasticidad	N/mm <sup>2</sup>	$\cdot 10^8$

Tan $\delta$  : Pérdida de ángulo o factor de disipación

Fuente: elaboración propia.

Ya instaladas las bobinas, se montan las cuñas y se realiza las pruebas eléctricas al devanado del generador.

Figura 34. **Plano de conexiones internas de devanado del estator**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 57.

Las barras son conectadas entre sí a través de soldadura de cobre. Las conexiones tienen por fin ejecutar las conexiones en grupos serie paralelo, formando un devanado trifásico equilibrado. Las conexiones de grupo siempre ocurren en la parte de la extremidad axial superior de las bobinas. En la parte superior también son dispuestas las conexiones para los terminales de salida de la unidad. Estas conexiones en anillo son llamadas de Ringleitung. La unidad tiene 6 terminales, siendo 3 para las fases y 3 para el punto estrella que es cerrado externamente al devanado, ya que antes del cierre es necesario la

instalación de TC'S (transformadores de corriente) que monitorean eventuales corrientes de fuga de la protección diferencial, en caso de falla.

Figura 35. **Conexión de bobinas**



Fuente: sitio de montaje.

Se deben aislar las conexiones luego de soldarlas. En este proceso se utilizan tres tipos de cinta aisladora:

- Cinta de mica – abreviatura Gli
- Cinta de poliéster – abreviatura H
- Cinta de fibra de vidrio – abreviatura Gs
- Número de capas de cinta: 7
- Capas de tipo de material Gli + H + H + Gli + H + Gli+Gs.

Figura 36. **Vista final de trabajos realizados en el estator**



Fuente: sitio de montaje.

## 2.4. **Pruebas eléctricas al devanado del estator**

Previo a energizar la máquina debe realizarse pruebas eléctricas para verificar el estado del material aislante, indicando si el devanado de la máquina está en condición de ser sometido a ensayo eléctrico de tensión aplicada (alta tensión), o si existe alguna avería o problema de humedad. Para que los resultados obtenidos en la prueba sean confiables, el elemento aislante a ser ensayado debe estar debidamente limpio y seco, antes de realizar la medición.

Deben ponerse a tierra todas las partes metálicas no energizadas de la máquina y la fuente de alimentación. Durante las pruebas de alto voltaje, desconecte y ponga a tierra todos los sensores de temperatura del devanado. Aísle el área alrededor del estator y coloque advertencias de seguridad.

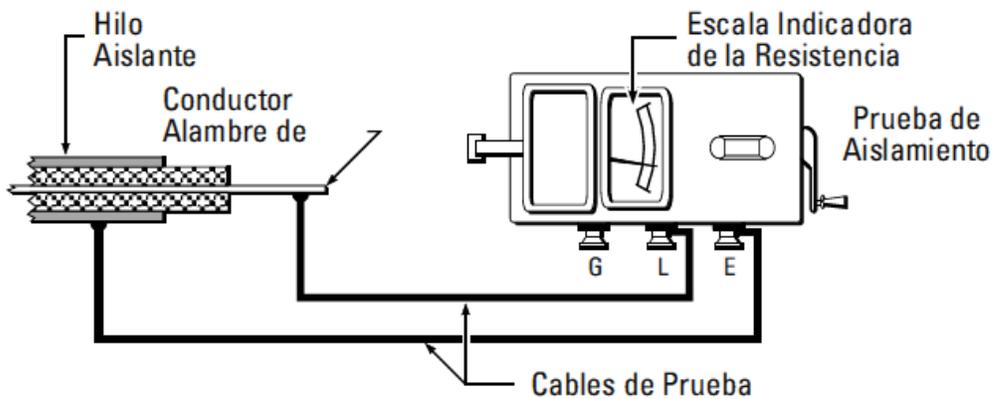
### **2.4.1. Prueba de resistencia de aislamiento**

La medición de la resistencia de aislamiento no se considera como una prueba de diagnóstico de la degradación del aislamiento, aunque en ciertos casos y condiciones si puede serlo. Más bien, el valor absoluto de la resistencia de aislamiento y el índice de polarización se usan para determinar la condición del aislamiento en cuanto a suciedad y humedad del mismo y decidir si el devanado es apto para operar o realizarle pruebas con tensiones elevadas. También, es la prueba de rigor para determinar si existe falla a tierra o entre fases en el devanado.

Se ha visto que un buen aislamiento tiene alta resistencia; un aislamiento pobre tiene baja resistencia relativamente. Los valores reales de resistencia pueden ser más altos o más bajos, dependiendo de factores como la temperatura o el contenido de humedad, la resistencia disminuye con la temperatura o la humedad. Sin embargo, con los registros y un poco de sentido común, se puede tener una buena imagen de las condiciones del aislamiento de valores que son sólo relativos. El probador de aislamiento es un instrumento pequeño y portátil que le da una lectura directa de la resistencia de aislamiento en ohms o megaohms. Para un buen aislamiento, la resistencia se lee generalmente en el rango de los megaohms. El probador de aislamiento es esencialmente un medidor de resistencia de alto rango (óhmetro) con un generador de corriente directa.

Este medidor es de construcción especial con bobinas de corriente y bobinas de voltaje que permiten que los ohms verdaderos se puedan leer directamente, independientemente del voltaje aplicado. Este método no es destructivo; es decir, no ocasiona deterioro del aislamiento.

Figura 37. **Esquema eléctrico para prueba de resistencia de aislamiento**



Fuente: Avo International. Guía para pruebas de aislamiento eléctrico. p. 6.

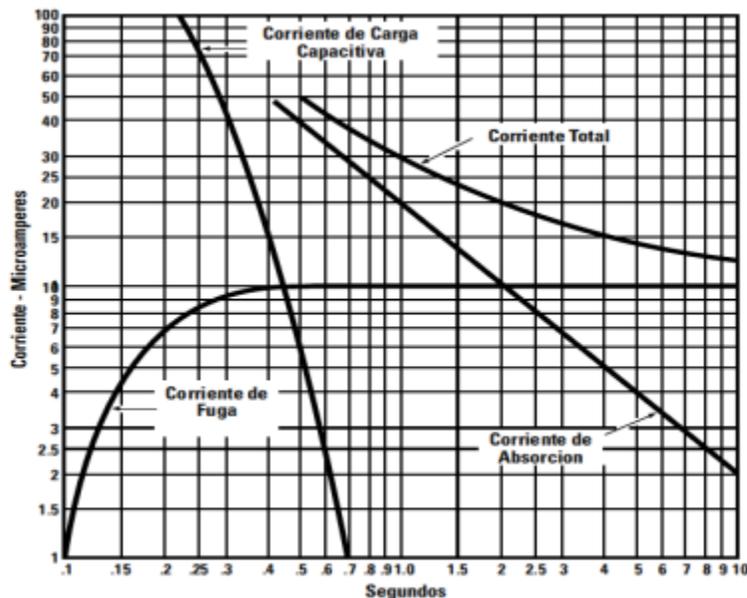
El generador puede operarse manualmente o eléctricamente para desarrollar un voltaje alto de CD que ocasiona el flujo de una pequeña corriente a través y sobre superficies del aislamiento bajo prueba. Esta corriente, generalmente con un voltaje aplicado de 500 volts o más, se mide por medio del óhmetro, que tiene una escala de indicación.

La resistencia aislamiento medida será determinada por el voltaje aplicado y la corriente resultante. La corriente a través y a lo largo del aislamiento forma parte de una corriente relativamente estable en las trayectorias de fuga sobre la superficie del aislamiento.

La electricidad también fluye a través del volumen del aislamiento, donde la corriente total se comprende de tres componentes:

- A. Corriente de carga capacitiva, corriente que empieza alta y cae después de que el aislamiento se ha cargado a voltaje pleno, de manera similar al flujo de agua en una manguera de jardín cuando se abre la llave.
- B. Corriente de absorción, también una corriente alta inicialmente que luego cae por razones que se analizan en la sección Método de Tiempo Resistencia.
- C. Corriente de conducción o fuga, es una corriente pequeña esencialmente estable a través y sobre el aislamiento. La corriente total es la suma de las tres componentes y es la corriente que puede medirse directamente por un micro ampérmetro, o en términos de megaohms con un voltaje particular por medio de un óhmetro. Debido a que la corriente total depende del tiempo que se aplica el voltaje, usted puede ver ahora porqué la ley de Ohm  $R = E/I$  sólo se mantiene, teóricamente, para un tiempo infinito.

Figura 38. **Componentes de la corriente en una prueba de aislamiento con CD**



Fuente: Avo International. Guía para pruebas de aislamiento eléctrico. p. 11.

## **2.4.2. Tipos de pruebas de resistencia de aislamiento**

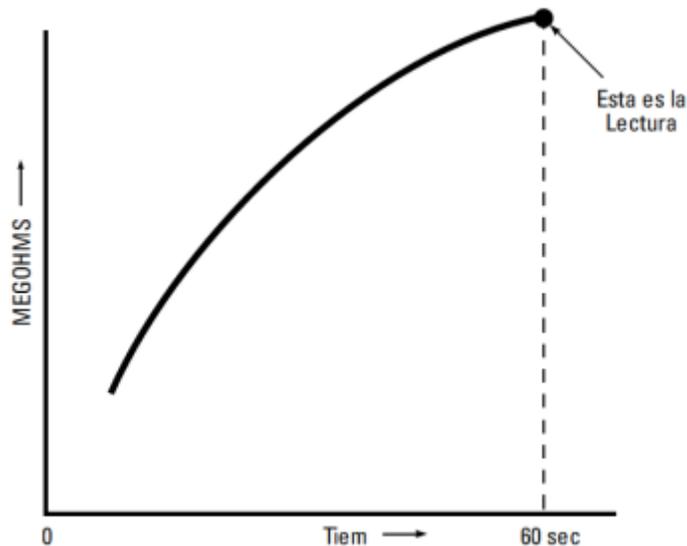
La suma de tres componentes corriente de carga capacitiva, corriente de absorción y corriente de fuga, la corriente total puede medirse con un megohmetro aplicando un cierto voltaje. Como esta depende del tiempo que se aplique el voltaje, es necesario esperar antes de tomar una lectura, con el objeto de que se cargue el equipo bajo prueba. Para este caso describiremos dos tipos de pruebas de resistencia de aislamiento

### **2.4.2.1. Prueba de corto tiempo o lectura puntal**

En este método se conecta simplemente el instrumento de medición a través del aislamiento que se va a probar y lo opera por un periodo corto de tiempo específico (generalmente se recomienda 60 segundos).

Simplemente toma un punto en una curva de valores crecientes de resistencia; con frecuencia el valor sería menor para 30 segundos, más para 60 segundos. Tome en cuenta también que la temperatura y la humedad, así como la condición de su aislamiento afectan su lectura.

Figura 39. **Curva típica de resistencia de aislamiento (en megaohms) con tiempo para el método de lectura puntual**



Fuente: Avo International. Guía para pruebas de aislamiento eléctrico. p. 13.

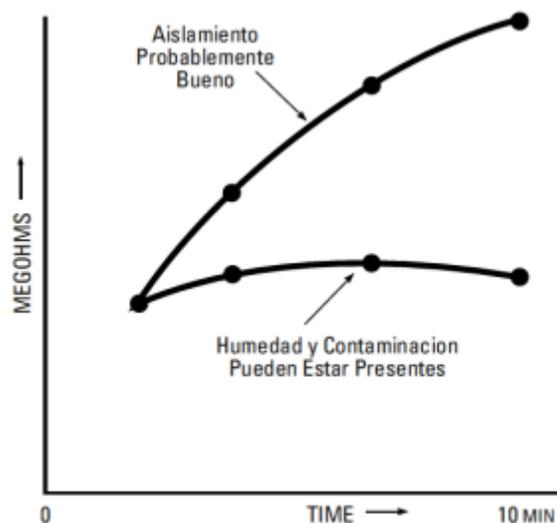
La resistencia de aislamiento debe ser aproximadamente un mega ohm por cada 1 000 volts del voltaje de operación, con un valor mínimo de un mega ohm.

#### **2.4.2.2. Método Resistencia Tiempo**

Este método es casi independiente de la temperatura y con frecuencia puede darle información concluyente sin registros de las pruebas anteriores. Se basa en el efecto de absorción de buen aislamiento. Simplemente toma lecturas sucesivas en tiempos específicos y nota las diferencias en lecturas. Las pruebas de este método se refieren a veces como pruebas de absorción. Note que el buen aislamiento muestra un incremento continuo de resistencia en un periodo de tiempo del orden de 5 a 10 minutos. Esto es ocasionado por la

corriente de absorción de la que hablamos anteriormente; el buen aislamiento se observa en un periodo de tiempo mucho más largo que el tiempo requerido para cargar la capacitancia del aislamiento. Si el aislamiento contiene mucha humedad o contaminantes, el efecto de absorción se enmascara por una corriente de fuga alta que permanece en un valor casi constante, manteniendo baja la lectura de resistencia (recuerde:  $R = E/I$ ).

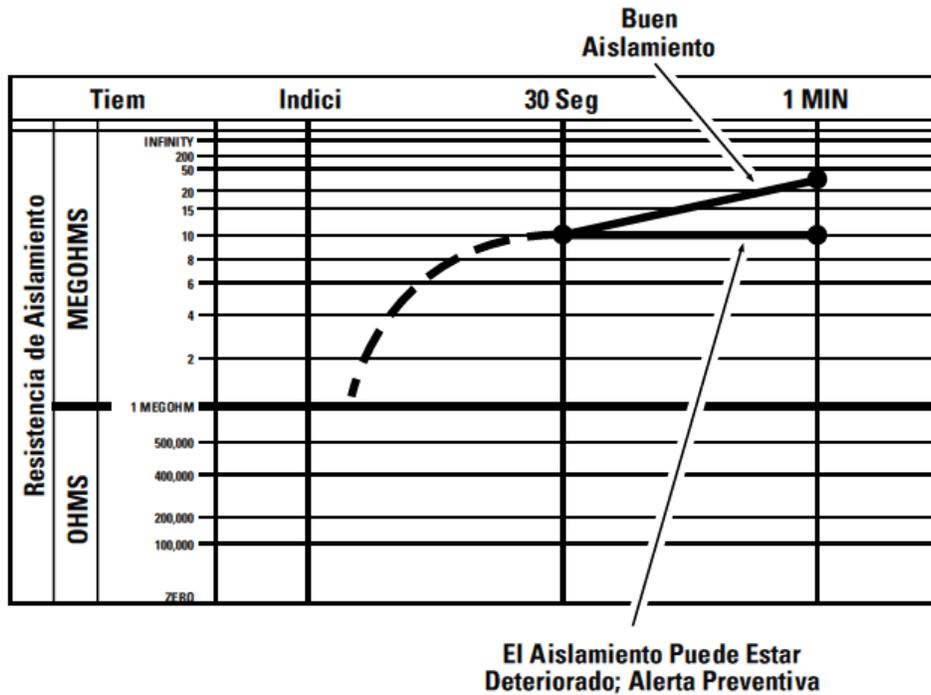
Figura 40. **Curvas típicas que muestran el efecto de absorción dieléctrica en una prueba tiempo – resistencia**



Fuente: Avo International. Guía para pruebas de aislamiento eléctrico. p. 16.

La figura 41 muestra cómo una prueba de 60 segundos aparecería para buen y mal aislamiento. Cuando el aislamiento está en buenas condiciones, la lectura de 60 segundos es mayor que la lectura de 30 segundos.

Figura 41. Trazo típico de una prueba de tiempo



Fuente: Avo International. Guía para pruebas de aislamiento eléctrico. p. 17.

La relación de dos lecturas tiempo – resistencia, tal como una lectura de 60 segundos dividida entre una lectura de 30 segundos, se llama una relación de absorción dieléctrica. Es útil en el registro de información sobre aislamiento. Si la relación es una lectura de 10 minutos dividida entre una lectura de un minuto, el valor se llama el índice de polarización. Con instrumentos operados manualmente, es mucho más fácil para usted realizar la prueba solamente para 60 segundos, tomando su primera a 30 segundos. Si se cuenta con un aparato de medición operado eléctricamente, obtendrá mejores resultados realizando la prueba de 10 minutos, tomando lecturas a 1 minuto y a 10 minutos, para obtener el índice de polarización. La tabla VIII da los valores de las relaciones y las condiciones relativas correspondientes del aislamiento que ellas indican.

Tabla VIII. **Condiciones de aislamiento indicadas por la absorción dieléctrica\***

<b>CONDICIÓN DEL AISLAMIENTO</b>	<b>RELACIÓN 60/30 SEGUNDOS</b>	<b>RELACIÓN 10/MINUTOS (ÍNDICE DE POLARIZACIÓN)</b>
<b>PELIGROSO</b>	-----	<b>MENOS DE 1</b>
<b>DUDOSO</b>	<b>1.0 a 1.25</b>	<b>1.0 a 2.0***</b>
<b>BUENO</b>	<b>1.4 a 1.6</b>	<b>2.0 a 4.0</b>
<b>EXCELENTE</b>	<b>ARRIBA DE 1.6**</b>	<b>ARRIBA DE 4.0***</b>

Fuente: elaboración propia.

\* Estos valores se deben considerar tentativos y relativos - sujetos a la experiencia con el método tiempo - resistencia en un periodo de tiempo.

\*\* En algunos casos, con motores, los valores aproximadamente 20 % más altos que los mostrados aquí indican un embobinado quebradizo seco que fallará en condiciones de choque o durante los arranques. Para prevenir el mantenimiento, el bobinado debe limpiarse, tratarse y secarse para restaurar las condiciones de flexibilidad.

\*\*\* Estos resultados serían satisfactorios para equipo con muy baja capacitancia tal como tramos cortos de alambrado doméstico.

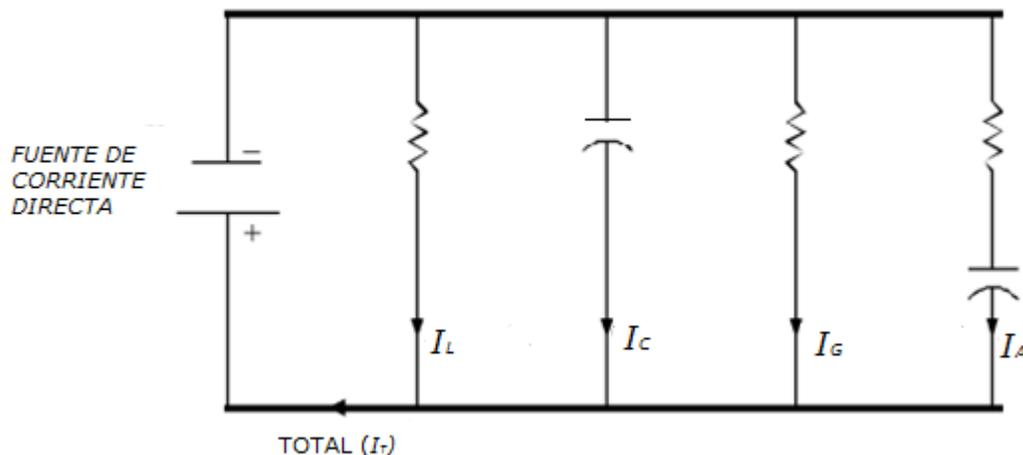
### **2.4.3. Prueba de alto voltaje**

Por definición, la resistencia de aislamiento es el cociente de la tensión aplicada directo a través del aislamiento dividido por la resultante total actual en un momento dado.

La corriente total resultante  $I_T$  es la suma de cuatro corrientes diferentes, corriente de fuga superficial  $I_L$ , corriente de capacidad geométrica  $I_C$ , Conductancia  $I_G$ , y corriente de absorción  $I_A$ .

Un circuito equivalente para las diversas corrientes en una prueba de resistencia de aislamiento se muestra en la figura 42. La capacidad actual geométrica  $I_C$  no suele influir en las mediciones, ya que desaparece por el tiempo de la primera lectura es tomada en un minuto.

Figura 42. **Circuito equivalente prueba de resistencia de aislamiento**



Fuente: IEEE, Std 46-2000(R2006). p. 5.

La absorción de corriente  $I_A$  o la polarización actual decae a una tasa decreciente. La relación tiempo vs corriente es una función de potencia, que se muestra en la ecuación 2.1 y puede plotearse en una gráfica como una línea recta.

$$I_A = K t^n \quad (2.1)$$

Donde:

$I_A$  = es la corriente de absorción

K: es una función particular del sistema de aislamiento cuando se le aplica voltaje.

t = es el tiempo de aplicación del voltaje directo.

n = es una función del sistema de aislamiento.

La corriente de absorción tiene dos componentes. La primera componente es debido a la polarización de los materiales de impregnación, porque las moléculas orgánicas, tales como epóxicos, poliéster, y el asfalto, tienden a cambiar la orientación en la presencia de un campo eléctrico directo.

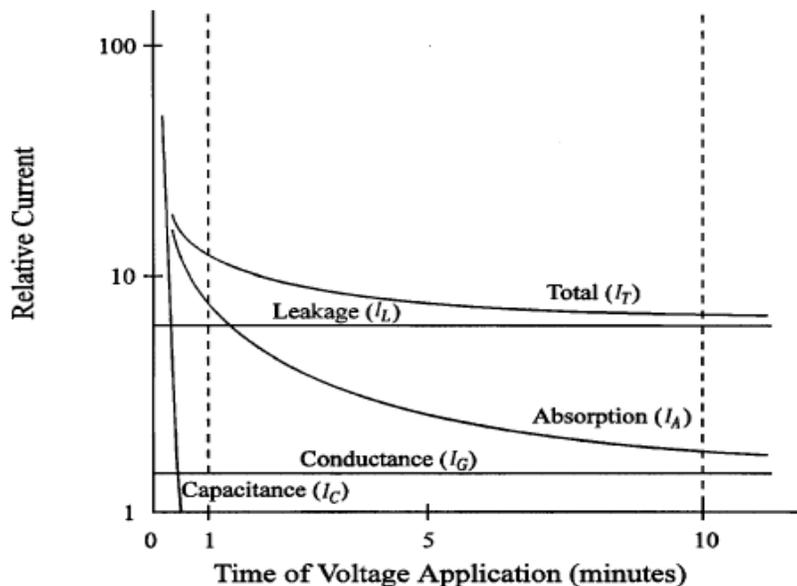
Dado que estas moléculas tienen que esforzarse contra las fuerzas de atracción de otras moléculas, por lo general toma varios minutos después de la aplicación del campo eléctrico para las moléculas que se vuelva a orientar, y, por tanto, para la energía de corriente de polarización se reduce casi cero. Un segundo componente de la corriente de absorción se debe a la desviación gradual de los electrones y los iones a través de la mayoría de los materiales orgánicos. Estos electrones y los iones se desvían hasta que quedan atrapados en las superficies de la mica que comúnmente se encuentra en sistemas de aislamiento de máquinas rotativas.

La corriente de conducción  $I_G$  en régimen de trabajo en aislantes de poliéster y epoxi-mica esencialmente cero, a menos que el aislamiento se ha saturado con la humedad. Los antiguos sistemas de aislamiento, como asfálticas-mica o laca-folium puede tener una corriente natural y superior de

conducción debido a la conductividad de las cintas que respaldan la mica. La fuga de corriente superficial  $I_L$  es constante en el tiempo. Una fuga de superficie elevada corriente, es decir, la resistencia de aislamiento bajo, generalmente es causada por la humedad o algún otro tipo de contaminación presente en la máquina.

Al comparar el cambio en la resistencia de aislamiento o de la corriente total con la duración de la aplicación de tensión de prueba puede ser útil en la evaluación de la limpieza y lo secado del bobinado. Si las bobinas están contaminadas o mojadas, la corriente total  $I_T$  será aproximadamente constante con el tiempo, ya que la  $I_L$  y / o  $I_G$  serán mucho mayores que la corriente de absorción  $I_A$ . Si las bobinas están limpias y secas, la corriente total  $I_T$  normalmente disminuyen con el tiempo ya que la corriente total es dominada por la corriente de absorción es decir, la polarización.

Figura 43. Tipos de corrientes para aislamientos asfáltico-mica



Fuente: IEEE, Std 46-2000(R2006). p. 6.

La medición de resistencia de aislamiento constituye una prueba directa de tensión y deberá limitarse a un valor apropiado a la tensión nominal del bobinado y la condición de aislamiento base. Esto es particularmente importante en el caso de máquinas pequeñas de baja tensión o que tengan el bobinado mojado. Si la tensión de prueba es demasiado alto, la tensión de ensayo puede aplicarse sobre el estrés del aislamiento, dando lugar a fallas en el aislamiento. Las pruebas de resistencia de aislamiento se realizan normalmente en tensión directa de 500 a 10 000 voltios con polaridad negativa polaridad negativa, se prefiere para dar cabida al fenómeno de la electro endósmosis.

Tabla IX. **Directrices para las tensiones continuas que se aplicarán durante el ensayo de resistencia de aislamiento**

Rango de voltaje en el bobinado Voltaje (V) <sup>a</sup>	Prueba de Resistencia de aislamiento Voltaje directo (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-1000

Fuente: IEEE, Std 46-2000(R2006). p. 7.

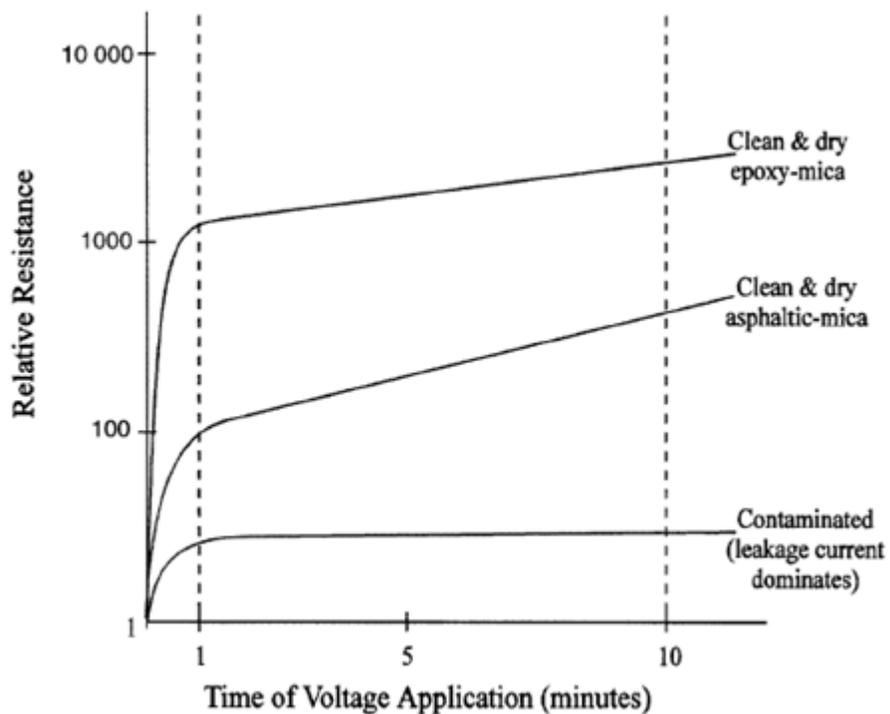
En la resistencia de aislamiento medida por lo general aumenta rápidamente cuando el voltaje es aplicado por primera vez, y luego enfoque gradual de un valor relativamente constante a medida que transcurre el tiempo. Las lecturas de un bobinado seco en buen estado pueden seguir aumentando

durante horas con una tensión de prueba que permanezca constante. Para aislamientos viejos, un valor razonablemente estable se alcanza generalmente en 10-15 minutos.

Los tipos modernos de alambre cubiertos de alguna película así como epoxi-mica o mica de poliéster con aislamiento de bobinados del estator, podrá dirigirse a valor constante de resistencia de aislamiento en 4 minutos o menos. Si el bobinado está mojado o sucio, un valor estable de baja por lo general se llegó a 1 minuto o 2 minutos después de la tensión de prueba se aplica. El índice de polarización es indicativo de la pendiente de la curva característica y se puede utilizar para evaluar la condición de aislamiento.

Para proporcionar una mayor precisión en torno al punto de 1 minuto y permitir que los datos que se trazan por el papel de registro, también es común tomar las lecturas a intervalos de como por ejemplo 15 segundos, 30 segundos, 45 segundos, 1 minuto, 1,5 minutos, 2 minutos, 3 minutos, 4 minutos, hasta 10 minutos.

Figura 44. **Mediciones típicas de resistencia de aislamiento para tres máquinas diferentes**



Fuente: IEEE, Std 46-2000(R2006). p. 8.

Tabla X. **Valores recomendados de índice de polarización**

Tipo de Aislamiento	P.I. Mínimo
Clase A	1.5
Clase B	2.0
Clase F	2.0
Clase H	2.0

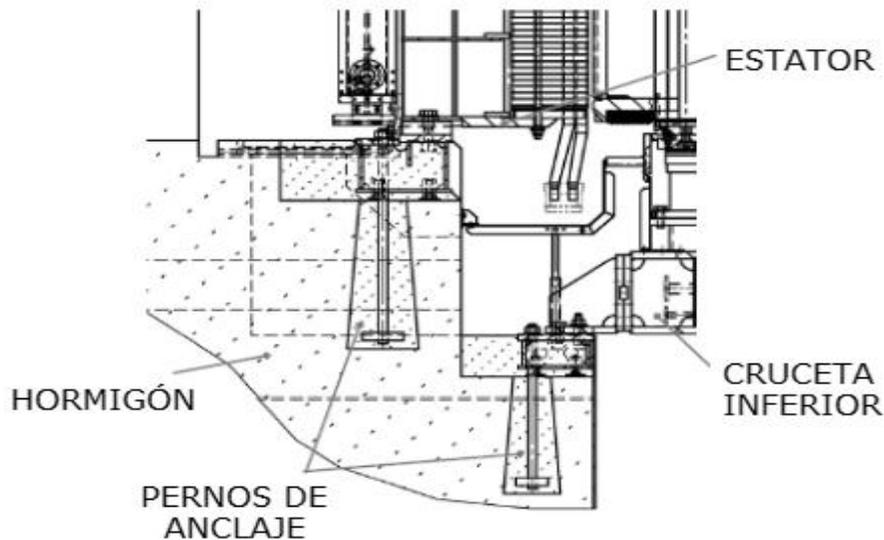
Fuente: IEEE, Std 46-2000(R2006). p. 16.

## **2.5 Montaje de estator en el foso**

Para poder montar el estator en el foso se deben nivelar y alinear las bases sobre las cuales estará montado, este procedimiento debe hacerse con la ayuda de equipo de topografía antes de ser hormigonadas. Como el estator fue armado en el área de montaje en el sitio, la nivelación de las superficies mecanizadas inferiores del marco del estator para placas de base, deben ser copiadas en la elevación del nivel superior de las placas de base en espera. Los calces adicionales deben ser montados en las placas de base. Ellos son necesarios para compensar una posible corrección axial para la centralización magnética y geométrica del rotor.

Después que los componentes de la máquina hayan sido colocados en posición en las placas de base, reajuste la elevación hasta el valor correcto, utilizando una llave en las tuercas de ajuste de los tornillos de nivelación. La rosca fina permite ajuste muy preciso con mínimo esfuerzo. El diámetro del orificio en la placa de base para pernos de anclaje es inferior al diámetro de los pernos de anclaje; por lo tanto, es posible mover las placas de base después de la cimentación de los pernos de anclaje. El montaje centralizado de los pernos de anclaje en los orificios, permite un ajuste en la posición correcta, axial y transversalmente con relación a los ejes de la máquina, por medio de gatos hidráulicos o mecánicos. Antes de bajar el componente hasta las placas de base, las llaves deben ser montadas. Las placas de base deben ser apretadas en la abertura del hormigón antes de bajar el componente hasta ellas, para evitar deslizamiento lateral.

Figura 45. **Corte transversal del montaje de placas base**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de montaje del generador. p. 71.

Por último se debe realizar la maniobra de traslado del estator de la sala de montaje al foso, dicha maniobra tiene que ser ejecutada por personal altamente calificado en mover cargas pesadas, en este caso el estator pesa un aproximado de 55 toneladas. Se deben colocar los cables y los soportes requeridos para la maniobra y se procede a levantar el estator con la grúa puente, con la grúa se posiciona el estator arriba del foso para proceder a bajarlo lentamente hasta llegar a las placas base.

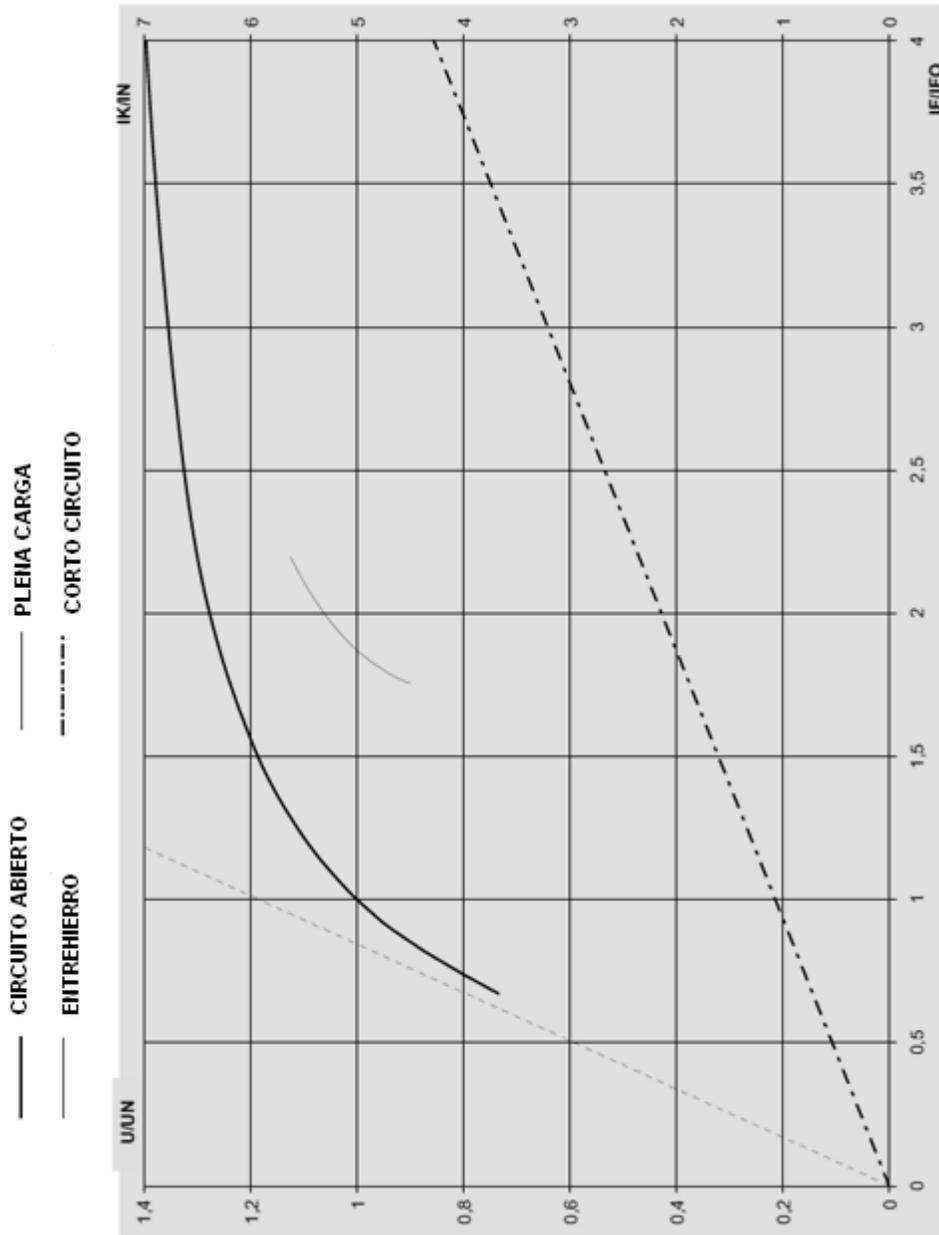
Después de bajar el estator, la firmeza de los calces debe ser verificada y si es necesario, algunos pueden ser adicionado o retirados para compensar eventuales holguras y apretarlos. La centralización del estator debe ser verificada con un hilo de plomada en la línea central, referida en el centro de la turbina. Posteriormente se procede a fijarlo a las bases para dar por finalizado el montaje del estator.

Tabla XI. Datos de placa del generador

Potencia (SN)	55300 KVA
Voltaje generado (UN)	13,800 V
Frecuencia (FN)	60 Hz
Factor de potencia (P.F.)	0.85
Factor de servicio	1.15
Fases	3
Número de polos	16
Revoluciones por minuto (NN)	450
Clase de aislamiento	F
Corriente de excitación	890 A
Corriente de excitación sin carga (IFO)	476 A
Corriente nominal (IN)	2314 A
<b>REACTANCIAS ( en PU )</b>	
Xd	1.11
X'd	0.31
X''d	0.26
Xq	0.71
X'q	0.71
X''q	0.23
X2	0.24
X0	0.10
<b>CONSTANTES DE TIEMPO</b>	
T'do	7.04
T'd	1.98
T''d	0.14
T''do	1.16
T''q	0.14
T''qo	0.44
Ta	0.23

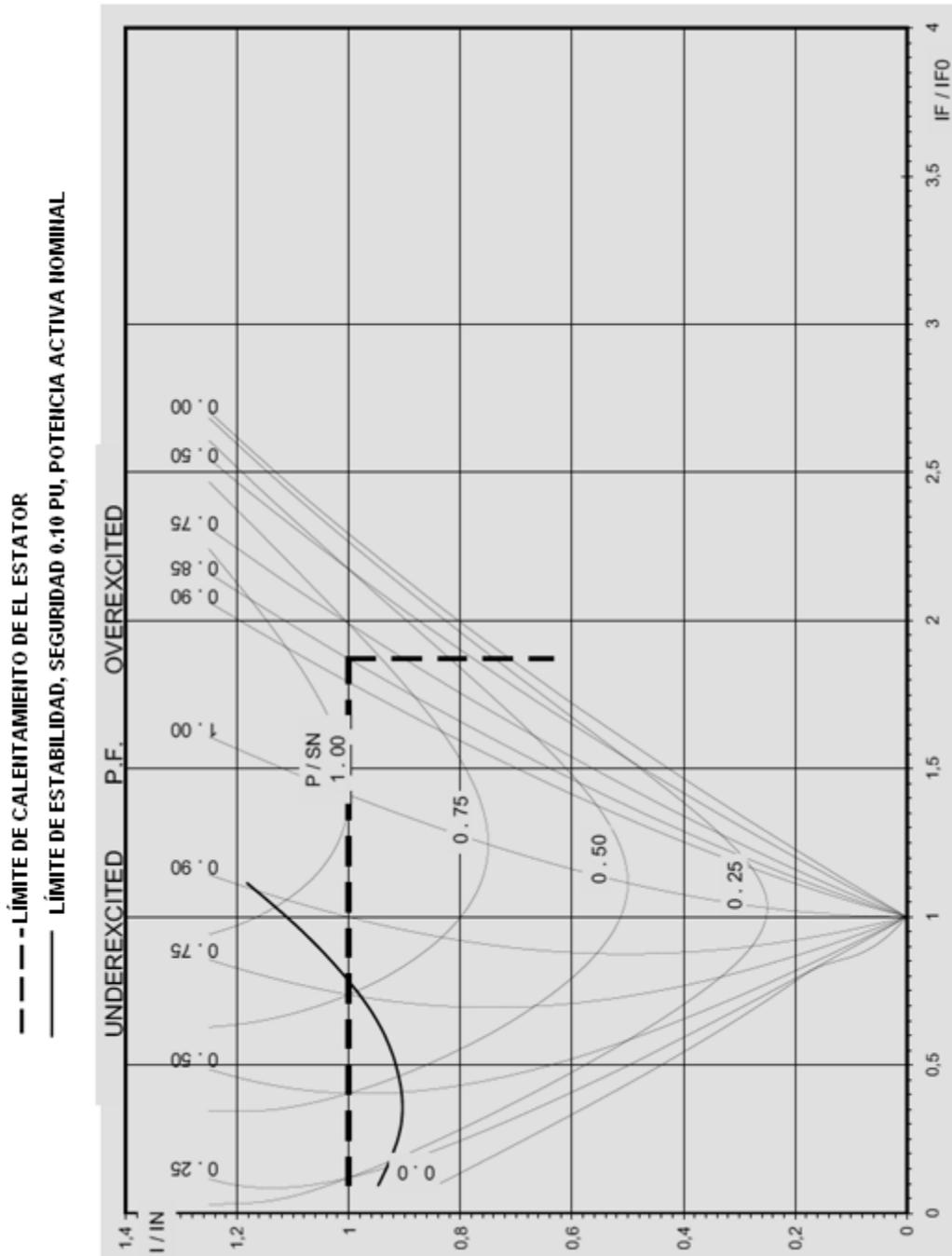
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Características de saturación sin carga y corto circuito



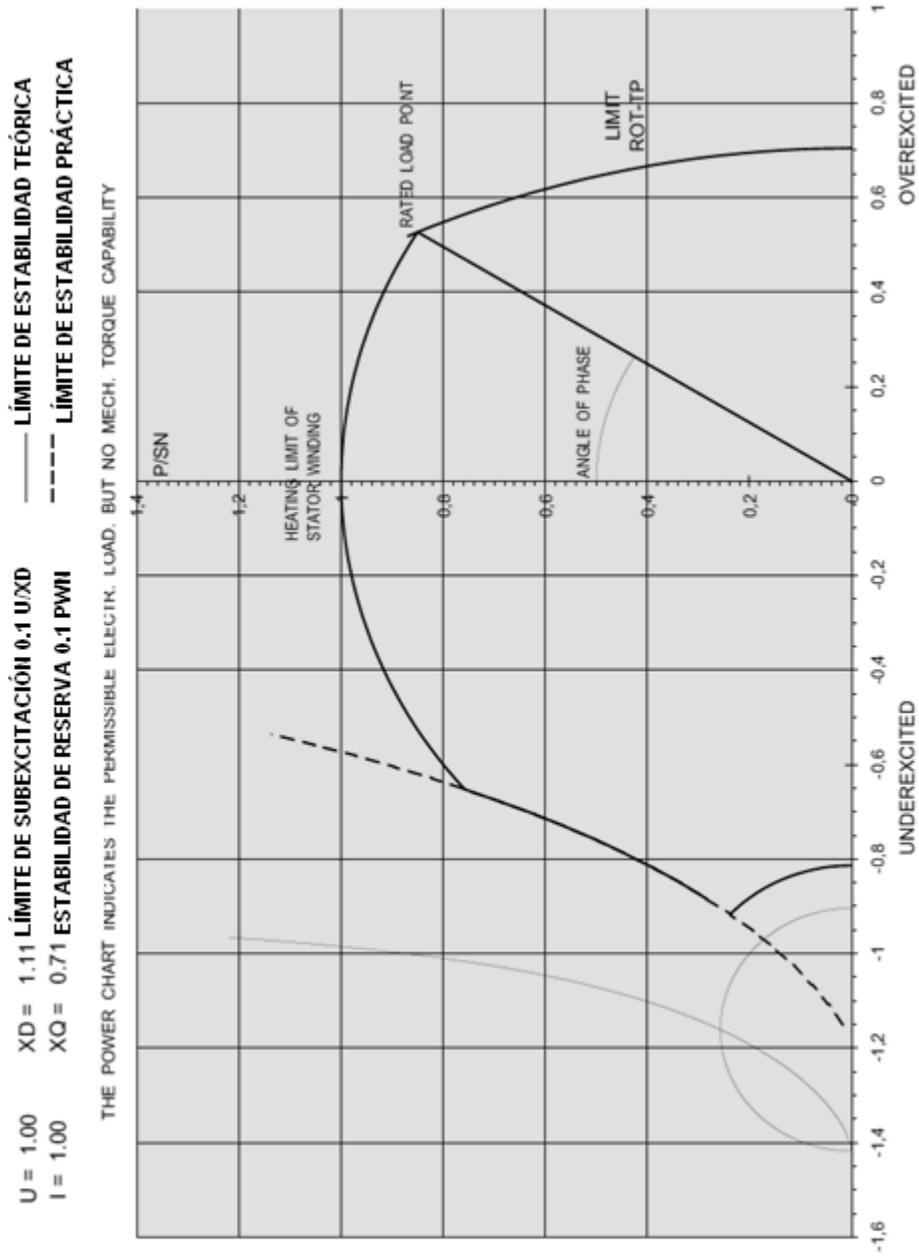
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 60.

Figura 47. Curvas en V y rango de voltaje



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 61.

Figura 48. Curvas de capacidad



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 62.

### **3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECUENCIA DE MONTAJE DEL ROTOR**

El rotor es la parte giratoria del generador, está acoplado al eje de la turbina y es donde se encuentra el devanado de armadura o inducido, según el tipo de máquina y las velocidades nominales de trabajo pueden ser de polos lisos o polos salientes, en los generadores de centrales hidroeléctricas por la velocidad de trabajo son polos salientes.

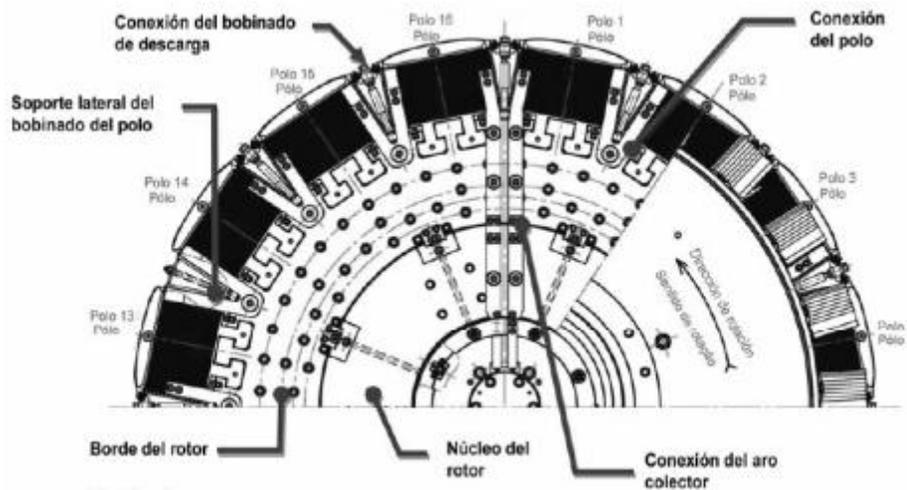
#### **3.1. Instalación de los polos del rotor**

Los polos del rotor son los componentes del devanado de campo. Las piezas polares son construidas con láminas de acero, apretadas con pernos y comprimidas en sus extremos por placas de apriete de acero fundido. Se fijan a un anillo magnético mediante ranuras, y se mantienen en su lugar con chavetas especiales. Cada polo tiene una bobina de cobre, los polos vecinos siempre tienen un campo magnético diferente, alternando polo norte o sur.

El devanado de campo es una conexión serial de todos los polos del generador, el primero y el último polo se conectan a los anillos colectores, donde a través de las escobillas es conectado el sistema de excitación. Los números de los polos dependen directamente de la rotación de la unidad. Las unidades lentas tienen un alto número de polos y las veloces tienen menos polos.

Los polos deben ser montados y ajustados al diámetro externo del rotor, según el diámetro interno del estator, para lograr obtener el valor del entrehierro del diseño del generador.

Figura 49. Vista de planta de un rotor de polos salientes



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 203.

El polo de los generadores de la central hidroeléctrica Xacbal tiene una orientación hacia arriba tipo martillo. La orientación transmite las fuerzas tangencial (torsión) y radial (centrífuga), incluso en condiciones de cortocircuito o durante un exceso de velocidad como en el caso de rechazo de carga o fuga. Los polos tienen también un devanado de amortiguación interno y están interconectados con los polos vecinos a ambos lados. Para compensar la fuerza centrífuga las conexiones del devanado de amortiguación deben fijarse también al borde del rotor. Controlar el entrehierro de montaje, también el radio y el diámetro interno reales del estator. Considerando el valor promedio del radio del estator y el entrehierro de montaje especificado es posible determinar, por resta, el valor teórico preliminar del entrehierro. Esto significa que los polos

deben montarse de manera tal que el diámetro o el radio final del rotor alcance este valor.

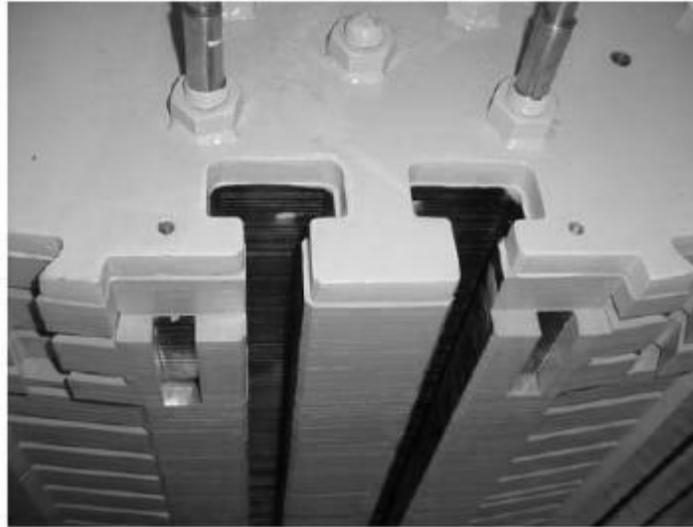
La placa de presión inferior del borde del rotor no tiene un perfil recortado como la placa superior donde se introduce el perfil del polo orientado hacia arriba (doble martillo). En la placa de presión inferior hay una rosca donde se puede ajustar el perno de distancia axial.

Terminado el montaje de todos los polos, y el control de la posición vertical, los pernos de distancia se sueldan a la placa de presión inferior, en la parte inferior.

Para mover los polos de la posición de montaje horizontal a la vertical se debe montar y usar el mecanismo especial de montaje de los polos. El dispositivo se monta a ambos lados de los polos y se eleva con la grúa de la central eléctrica o con una grúa auxiliar.

Colgar el polo en posición vertical y realice una inspección ocular. Los polos son pesados, verifique la capacidad del cable. Cada polo tiene un número de serie. Cada polo se pesa en la fábrica. Además, también se provee de fábrica una tabla que muestra qué polo debe montarse en cada posición, considerando una distribución simétrica según su peso. Levante los polos individualmente e introdúzcalos en las ranuras del borde del rotor previstas. Bájelos lentamente evitando dañarlos. El polo se apoya en el perno de ajuste de altura.

Figura 50. **Ranura de martillo doble para los polos**

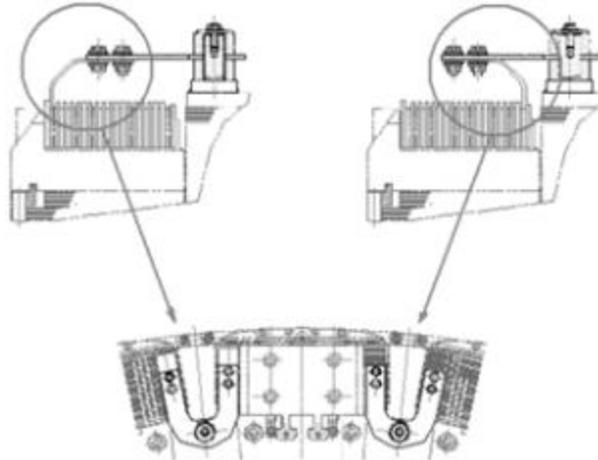


Fuente: sitio de montaje.

### **3.2. Conexiones entre polos**

Para conectar los polos se proveen unas conexiones en forma de “U” que deben ser atornilladas en la placa superior de presión del borde del rotor para evitar que la fuerza centrífuga las desprenda del núcleo del rotor. Luego de montar todos los polos y de controlar el diámetro externo final del rotor, se puede colocar la parte metálica del soporte para los tornillos y premontar los conectores para encontrar la posición final de estos soportes. Entonces se pueden soldar los soportes a la placa superior de presión. Monte el soporte aislado y la conexión en U y atorníllelas.

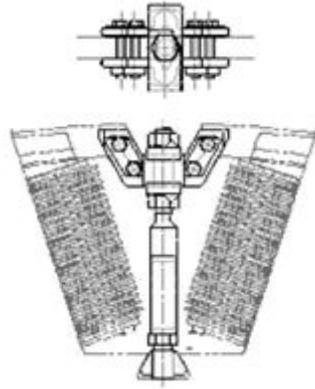
Figura 51. **Montaje de conexiones en U**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 213.

Los polos tienen un devanado de amortiguación. Por lo general, se los interconecta, formando una jaula. En los generadores con velocidad más alta donde la fuerza centrífuga marca la diferencia, estas conexiones se anclan al borde del rotor, a través de un perno radial que se monta en una ranura prevista en el laminado del rotor.

Figura 52. **Conexión del devanado de amortiguación**



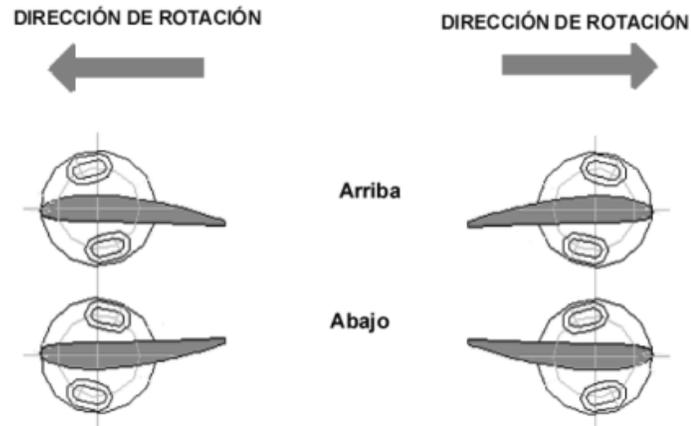
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 213.

### **3.3. Instalación de aletas para ventilación en el rotor**

El aire frío de los generadores con ventilación axial sopla por el entrehierro entre el estator y el rotor para enfriar las partes activas de la unidad. Para lograr el flujo de aire frío correcto sin turbulencias en las partes superior e inferior, las áreas de los cabezales del devanado se cubren con una guía de aire. En la parte superior hay segmentos entre los brazos de la cruceta superior y en el lado inferior hay un círculo completo que cierra la base de hormigón y tiene el soporte de pedestales adicionales.

El movimiento de aire de ventilación lo generan las aletas en el rotor del ventilador, montadas de manera tal que el aire sople a través del entrehierro. Las aletas del ventilador deben montarse respetando la dirección de rotación del rotor y la inversión, considerando los lados superior e inferior del rotor. La circulación del aire es dirigido a los puntos necesarios a través de las guías de aire superiores e inferiores montadas sobre la carcasa del estator de la máquina.

Figura 53. **Dirección de montaje de aletas de ventilación**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 217.

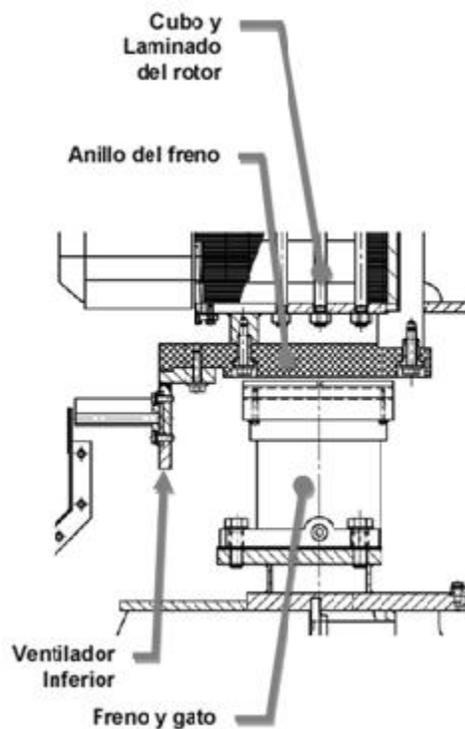
### 3.4. **Instalación del sistema de freno en el rotor**

El sistema de frenos y elevación del rotor en unidades verticales de baja velocidad está formado por un conjunto de cilindros y pistones que operan a aire comprimido durante la operación de frenado la cual se realiza por presión de aire entrando en los gatos, que presionan el freno hasta el anillo de freno, montado bajo el rotor del generador, activado a 30 % de la velocidad nominal, produciendo el frenado de la unidad.

El anillo de freno es suministrado en sólo una pieza, él debe ser colocado en el piso antes de iniciar el montaje del rotor o el rotor debe ser levantado después del montaje, para el posicionamiento del anillo en el piso alrededor de los pedestales de soporte principales y después nuevamente colocarlo en los pedestales para el montaje del anillo. El ventilador inferior es montado junto con el anillo de freno.

Montar el anillo y apriete los tornillos solamente lo suficiente para que toque los puntos de apoyo. Si incluso con los tornillos tensionados, el anillo no toca el punto de soporte, esta holgura deberá llenarse con calces después de concluir el montaje.

Figura 54. **Ubicación del disco de frenado**

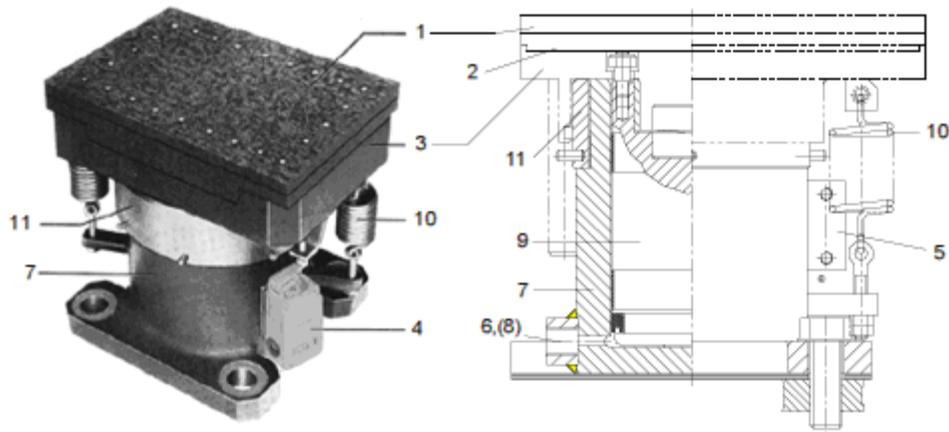


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 220.

La elevación máxima del émbolo de los gatos de freno es de 40 milímetros. Dentro de esta medida, el émbolo se puede fijar en cualquier posición mediante una tuerca. Sobre el émbolo se posiciona la zapata de frenado con la cual se atornilla la placa intermediaria de apoyo, siendo ella remachada a la lona de frenado. La lona de frenado está libre de metal y su desgaste admisible es de 8 milímetros.

La zapata de frenado se fuerza para su posición de reposo a través de dos muelles de tracción, cuya pre-tensión es regulable. La zapata de frenado acciona también las llaves de límite cuyos dos pares de contactos se cierran en la posición de reposo o de funcionamiento, conforme a los requisitos contractuales.

Figura 55. **Gatos hidráulicos para frenar el rotor**



Fuente: VOITH SIEMENS, Manual de operación del generador. p. 222.

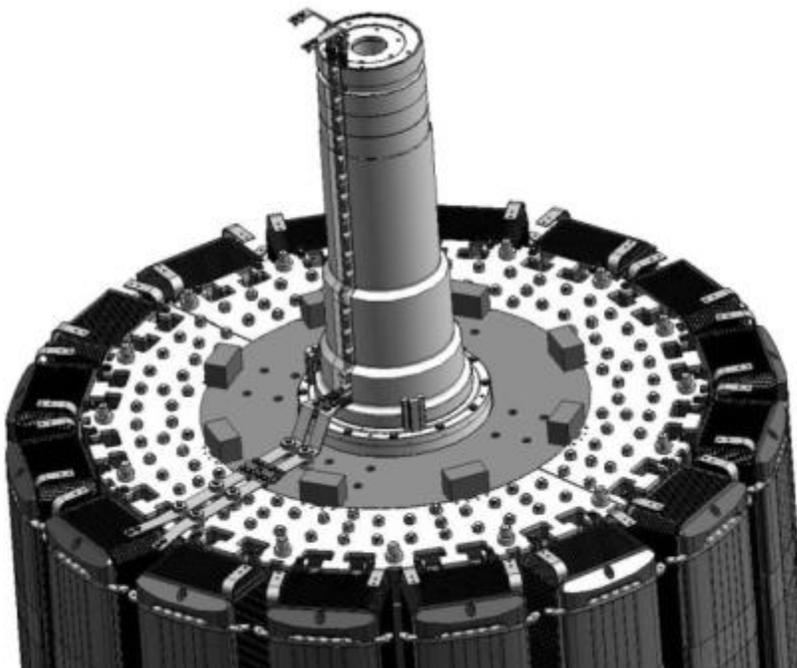
- |  |  |
|--|--|
| 1 - Lona de freno                          | 7 - Cilindro                             |
| 2 - Placa intermedia de apoyo              | 8 - Conexión de presión de aire o aceite |
| 3 - Zapata de freno                        | 9 - Émbolo                               |
| 4 - Llave de límite                        | 10 - Muelle de tracción                  |
| 5 - Chapa fijadora para la llave de límite | 11 - Tuerca fijadora                     |
| 6 - Conexión de desaeración                |  |

### 3.5. Instalación de barras conductoras en el eje del rotor

Cuando un sistema de excitación estática es suministrado, las conexiones de los anillos colectores se conectan al bobinado de campo del rotor con los anillos colectores. Las uniones son cerradas y si es necesario, aisladas en el campo durante el montaje final.

Como existe cojinete superior, el acoplamiento de los conductores se hace por un canal mecanizado en el eje. El canal mecanizado debe ser cerrado por una chaveta de acero en T.

Figura 56. **Conexión de anillo colector de rotor y eje**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 228.

Las barras tienen un orificio para fijación de soporte. En esta región, el espesor de las barras de cobre debe ser reforzado por una barra doble de cobre, para mantener la misma densidad de flujo de corriente. Monte los soportes en las barras. Posicione las piezas aislantes inferiores en los pernos de soporte y lleve los orificios de la barra de tal forma que los tubos aislantes puedan ser insertados y las piezas de fijación, encajadas en los tubos aislantes. Inserte los tornillos de fijación en conjunto con arandelas y tornillos de trabado. Apriete y trabe los tornillos firmemente.

Posicione las barras de cobre con los soportes montados en el rotor del generador. Los polos inicial y final (primero y último) son entregados en el campo con orificios en sus terminaciones, proyectados para conexión de conductores de excitación.

Durante toda la instalación de las barras de cobre, preste especial atención en las indicaciones del dibujo de proyecto, relativas a la distancia mínima permitida a partir de la superficie metálica, hasta la barra de cobre (distancia de escape) y también la menor distancia entre las barras de cobre y las conexiones de campo positivas y negativas (distancia de aire).

Los conductores de cobre deben ser aislados en el campo. El estándar utilizado es aislarlos para 6,6 kV, independientemente de que sea menor. Para este aislamiento, deben ser aplicadas diferentes cintas aislantes y debe ser utilizada resina. Existen tres tipos de cinta aislante utilizadas en ese proceso:

- Cinta de mica – abreviación Gli
- Cinta de poliéster – abreviación H
- Cinta de fibra de vidrio – abreviación Gs

El montaje de las cintas es manual. La cinta específica debe estar incorporada en la resina y ser manualmente envuelta en la pieza. Es necesaria una superposición del 50 %. Deben colocarse 4 capas de cinta de de la siguiente manera:

Gli + H + Gli + Gs

Como las conexiones del anillo colector, son de un tipo instalado en una ranura en el eje, la ranura y las dimensiones de barra, deben en primer lugar, ser medidas para controlar el espesor de aislamiento que debe, o puede, ser aplicado. Debe aplicarse un aislamiento mínimo de 6,6 kV, pero el espesor de este aislamiento, después de la aplicación, puede ser inferior al espesor necesario. Las barras de conexión no deben quedar libres dentro de la ranura. Deben asentarse firmemente. Se debe aplicar suficiente cinta aislante, para llenar la ranura del orificio y la barra de conexión debe ser montada con el aislamiento aun húmedo y cubierto; apriete la cubierta de la ranura para curar internamente. Por lo tanto, es recomendable medir el espesor antes de aplicar la última cinta (Gs) y si es necesario, aplicar más de un compuesto de cinta H + cinta Gli y después, aplicar la cinta Gs final. Antes de aplicar esta cinta Gs final, es recomendable medir nuevamente el espesor, si existe más espacio a ser llenado, proceda como lo descrito anteriormente.

En este caso, cuando la resina cura dentro de la ranura, debe ser aplicada una capa de cinta H seca (sin resina) después de todo aislamiento en la barra de conexión. Esta última cinta es para evitar que la resina se pegue a la cubierta de la ranura después de endurecer; es como una protección, permitiendo que la barra sea removida de la ranura sin daño al aislamiento.

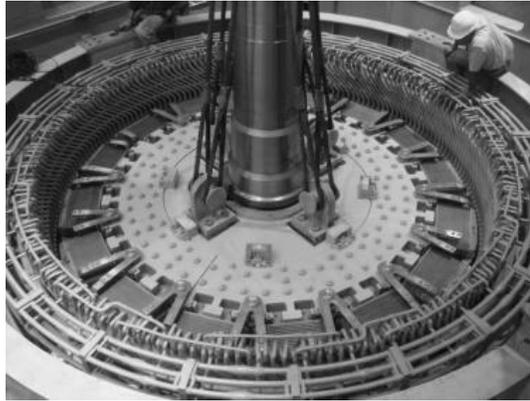
Se debe medir la resistencia de aislamiento de los conductores completos del anillo colector. Utilice un megohmetro con 1 000 V. Desacople los conectores de los anillos colectores y polos. La medición debe hacerse en cada conductor separadamente.

### **3.6. Montaje de rotor**

El rotor completo del generador es levantado e introducido en el foso, dentro del estator y bajado hasta el eje de la turbina. El movimiento consiste en la suspensión del rotor por su dispositivo de levantamiento por el foso de la unidad, con la grúa de la casa de fuerza. Posiciónelo cerca del centro de la unidad y baje lentamente. Algunos trabajadores equipados con reglas de madera, deben estar posicionados alrededor del rotor sobre el estator. Las reglas de madera deben tener la largura de la altura axial del estator, aproximadamente 50 a 80 milímetros de ancho y espesor de 1 o 3 milímetros menor que el entrehierro de montaje de la unidad.

Durante el descenso del rotor dentro del estator, los operarios deben mover de forma axial y continua esas reglas de madera, para asegurar que el rotor no salga mucho de la línea central. Si las reglas se fijan a un lado, los operarios deben indicar inmediatamente al operador de la grúa y parar el movimiento axial del rotor. El movimiento horizontal del rotor hasta el lado opuesto, debe ser realizado con todas las reglas libres nuevamente, y sólo entonces el movimiento axial hacia abajo debe continuar.

Figura 57. **Rotor en posición final**



Fuente: sitio de montaje.

Los ejes acoplados temporales aguardan el rotor. Después de que el rotor es introducido en el foso, él se asentará en los gatos de freno algunos mm encima de la elevación, para acoplamiento con el eje del generador. Para colocar chavetas en el cubo del rotor con el eje integral.

### **3.6.1. Centralización axial del rotor respecto al estator**

Después que el peso del rotor es cargado sobre el cojinete de empuje y finalmente acoplado a la turbina, deberá ser controlado el desplazamiento axial hasta el estator. Contrólole en las dos extremidades, superior e inferior, del rotor (o estator) en 4 puntos alrededor de la circunferencia. Si los valores en las extremidades superior e inferior no son simétricos, algún lugar deberá ser compensado para ecualizarlos. Como el cojinete de empuje está arriba del rotor, él será soportado por una cruceta superior, apoyado por el marco del estator, por lo tanto, cualquier cambio en la posición axial del estator, no hará ninguna alteración. En este caso, la altura/elevación deberá ser compensada por la adición o retiro de calces bajo el soporte, en cada brazo de la cruceta

superior en el marco del estator. Se debe tener especial cuidado, en esta condición descrita y será necesaria una nueva prueba de límite máximo (*runout*). Después, podrá ser alterada la nivelación del cojinete de empuje.

Después de terminar el montaje de los cojinetes guía, sin las guías de aire del generador montadas, pueden ser ejecutadas la medición del entrehierro, control de circularidad del estator y del rotor. El entrehierro, debe ser medido en dos alturas de plano, normalmente axialmente medida a 1/3 de la largura axial total del centro del estator. El rotor deberá estar posicionado de forma estacionaria, con el polo 1 al lado de aguas arriba. La medición consiste en controles individuales, frente a cada polo, en cada plano y todos los valores deben ser anotados. Las mediciones en los polos, deberán ser hechas siempre al mismo nivel (alturas de plano). El valor promedio, deberá ser calculado con todos los valores medidos en un plano de altura. Por lo tanto, un desvío en cada punto medido de + / - 5 % del valor promedio, es aceptable.

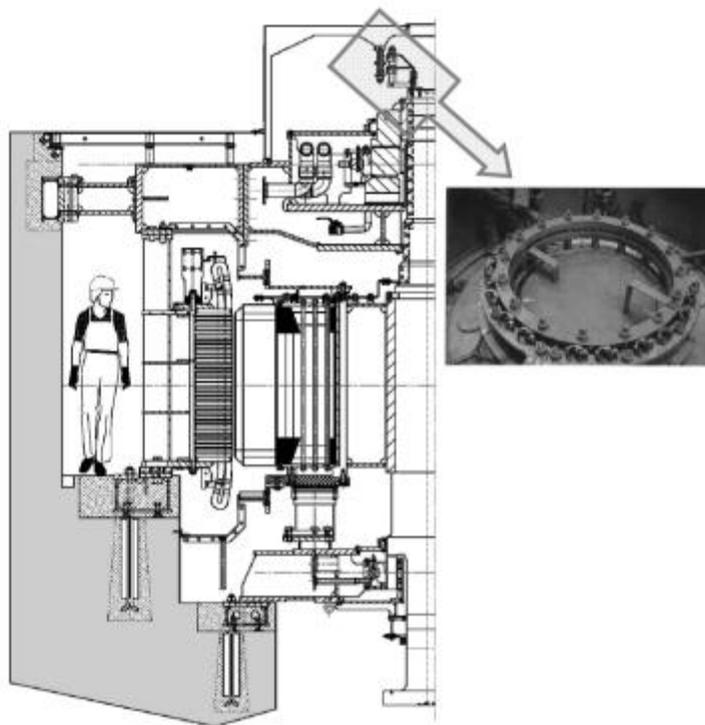
### **3.7. Instalación de anillos colectores en el eje**

En un sistema de excitación estática, la corriente de excitación es transferida de la parte estática al rotor, a través de escobillas de carbón hasta los anillos colectores. Normalmente, hay dos anillos colectores, uno para corriente positiva y otro para el lado negativo.

Montar el grupo del anillo colector en el eje o rotor del generador. Los Anillos colectores deben ser montados con excentricidad mínima. Para controlar la circularidad y la excentricidad, la unidad debe ser girada en velocidad lenta.

Determinar la cantidad de excentricidad, verificando la superficie del anillo colector con un calibre con mostrador o instrumento de medición de precisión, mientras el rotor gira lentamente. En anillos colectores con surcos espirales, encaje una zapata grande al indicador de calibre con mostrador. La excentricidad permitida de los anillos colectores, debe tener valor inferior a la holgura diametral del cojinete guía. Es aceptable, cerca de 0,1 milímetro menos que la holgura de cojinetes diametrales.

Figura 58. **Corte transversal del conjunto de rotor**

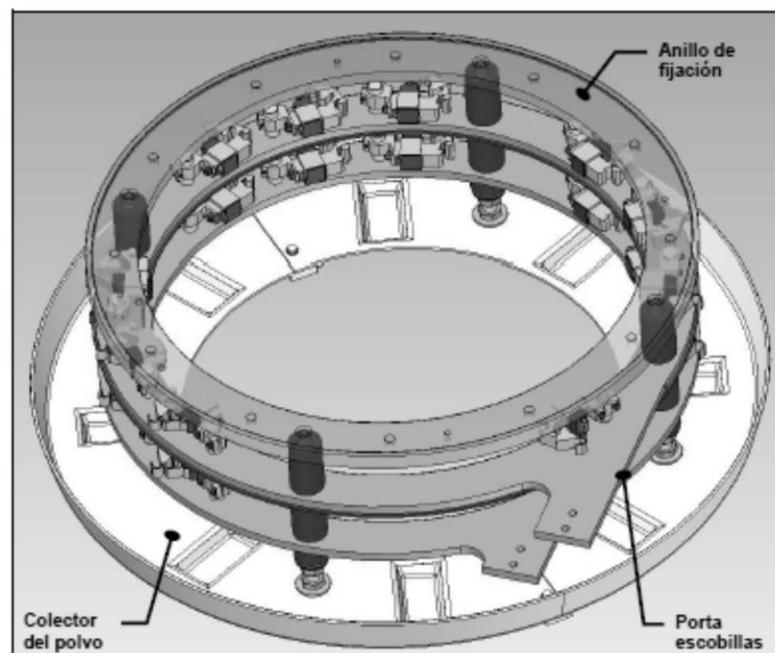


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 245.

La transferencia de la corriente de las partes fijas para las partes rotativas ocurre a través contactos deslizantes formados por escobillas estacionarias y anillos colectores rotativos.

El conjunto de los anillos colectores está dispuesto arriba del rotor, normalmente fijado por tornillos a una extensión del eje, de forma tubular, o en el bloque de empuje del cojinete combinado (axial y radial), o en el anillo girante en el caso de cojinete de guía.

Figura 59. **Anillos colectores**



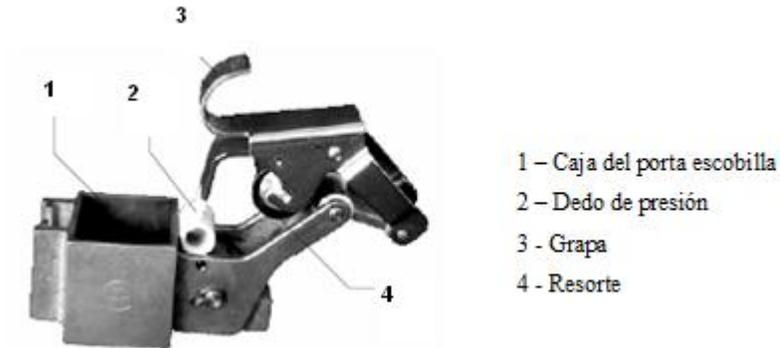
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 232.

### **3.7.1. Montaje y conexión de escobillas**

El montaje de los porta escobillas consiste en anillos de base con cantidad igual como la cantidad de los anillos de desliz. Ellos están separados y fijos unos a los otros por espigas de fijación aisladas para que cada anillo de base lleve una camada de porta escobillas para poner en contacto el anillo de desliz correspondiente. Anillos de base que son mayores que un semicírculo, pueden ser radialmente bipartidos, para facilitar el montaje. Las escobillas que son aseguradas en los porta escobillas dirigen la corriente a los anillos de desliz. Se requiere una presión de contacto de aproximadamente  $2 \text{ N/cm}^2$ . El porta escobilla se suministra con una sola caja y la escobilla se aprieta por un resorte espiral para que la presión de contacto no sea dependiente del uso de la escobilla.

El porta escobilla de presión constante como el de la figura 60, y la tapa aislada del anillo de desliz permite reemplazar las escobillas de este tipo de porta escobillas mientras la máquina está en funcionamiento. La presión de contacto se obtiene por medio de un resorte de compresión. Un tornillo sujetador afianza al porta escobilla a la espiga y permite precisión de ajuste de los porta escobillas en ambos los planos radial y tangencial. La presión de contacto se obtiene por medio de un resorte de tensión helicoidal.

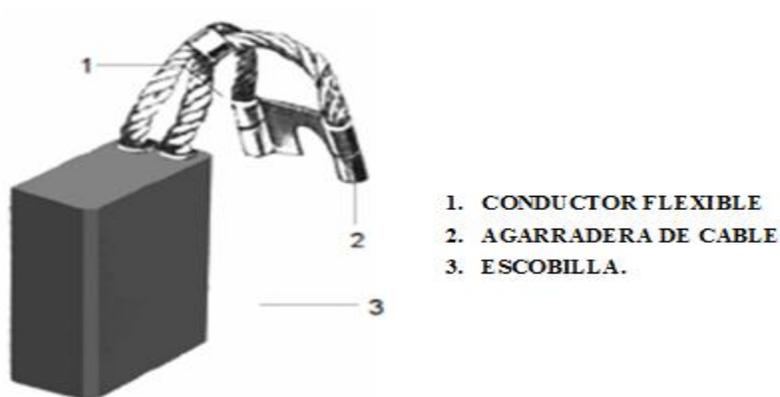
Figura 60. **Porta escobilla de presión constante**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 240.

Dos conductores de cobre muy flexibles conectan la escobilla de carbono a los porta escobillas del tipo caja y del tipo brazo; ellos o están desnudos, o aislados, para los ambientes agresivos estañados. Los conductores se afianzan a la escobilla por una conexión de obturación y a la pinza por medio de una agarradera de cable de presión.

Figura 61. **Escobilla de conductores flexibles**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 241.

Las dimensiones de los anillos colectores son optimizadas en función de la corriente eléctrica transmitida. Durante el funcionamiento, hay una formación de película de carbón en la superficie deslizante y pulida de los anillos, esta película es una condición necesaria para la buena transmisión de corriente y para la reducción de la fricción entre las escobillas y anillos colectores.

La densidad de corriente depende del tipo de escobilla usada y varía entre 6 y 20 A/cm<sup>2</sup> (valor recomendado 10 A/cm<sup>2</sup>, para escobillas electro gráficas), con velocidad periférica del anillo colector de 50 m/s, por lo máximo. El valor recomendado para la densidad de corriente es experimental, basada en el equilibrio entre formación y desgaste de la película.

### **3.8. Sistema de excitación**

La función básica de un sistema de excitación es proveer corriente directa al devanado de campo de una máquina síncrona. Además, el sistema de excitación lleva a cabo funciones de control y protección esenciales para el funcionamiento satisfactorio del sistema de potencia por medio del control del voltaje de campo y de la corriente de campo. Los sistemas de excitación mantienen la magnitud de voltaje y controlan el flujo de potencia reactiva en el sistema. El requerimiento básico es que el sistema de excitación provea y ajuste automáticamente la corriente de campo del generador para mantener el voltaje en terminales a un valor dado.

El sistema de control de excitación debe ser capaz de responder a disturbios transitorios con esfuerzos en el devanado de campo consistentes con las capacidades instantáneas y de corto plazo del generador. Las capacidades del generador están limitadas por varios factores como aislamiento y calentamiento del rotor, calentamiento del estator, etc. Los límites térmicos

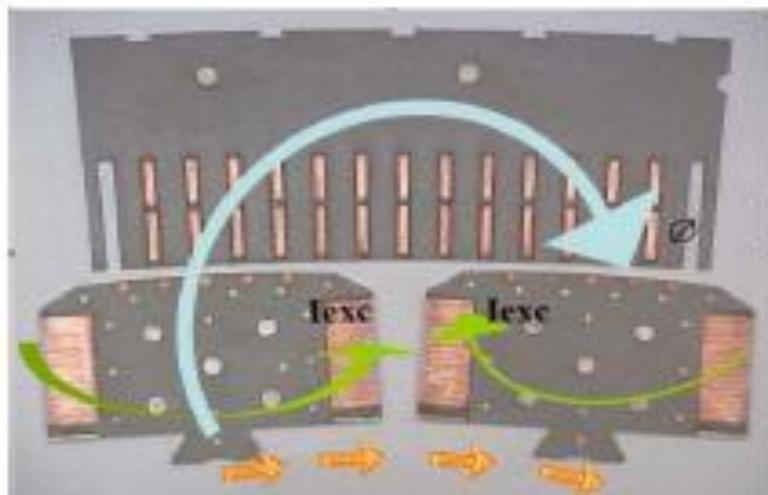
tienen características dependientes del tiempo, y la capacidad de sobrecarga de corto plazo puede tardar hasta sesenta segundos. Para asegurar la mejor utilización del sistema de excitación. Este debe ser capaz de sobreponer las necesidades del sistema tomando las ventajas de corto plazo del generador, sin exceder los límites.

Los sistemas de excitación pueden ser clasificados de acuerdo con la fuente primaria de potencia de excitación en las siguientes categorías:

- Sistema de excitación de corriente directa
- Sistemas de excitación de corriente alterna
- Sistemas de excitación estáticos

Para el caso del generador de hidroeléctrica Xacbal se utiliza un sistema de excitación estático.

Figura 62. **Sección transversal del estator y de los polos del rotor**

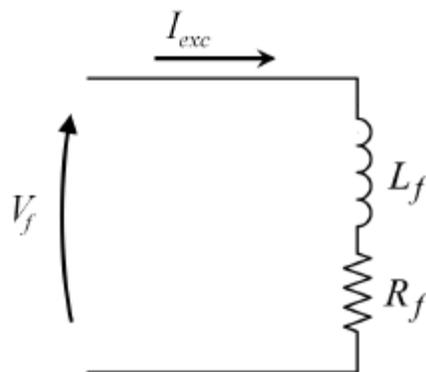


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 251.

La corriente representada por las flechas verdes en la figura anterior, es la corriente que el sistema de excitación estática proporciona al rotor a través del sistema de escobillas y anillos colectores. Esta corriente produce un flujo magnético representado por una flecha de color azul claro. Si el rotor está girando, el flujo magnético del estator barre cada espira, es decir, cada espira ve una variación en el flujo en su interior que a su vez produce una tensión alternada.

La frecuencia de esta tensión alternada inducida es proporcional a la velocidad angular del rotor. El sistema de excitación impone una tensión CD en el circuito del rotor, ya que los conductores tienen una resistencia del rotor, una corriente continua de excitación circula en el circuito del rotor.

Figura 63. **Circuito equivalente del rotor**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. P. 14.

Del circuito de la figura 63 se puede deducir la ecuación de la corriente de excitación en función del campo magnético.

$$V_f = R_f * I_{exc} + L_f \frac{dI_{exc}}{dt} \quad (3.1)$$

Donde:

$V_f$ : tensión de campo, la que el sistema de excitación impone al circuito del rotor

$I_{exc}$ : corriente de excitación o corriente de campo

$R_f$ : resistencia de los conductores del circuito del rotor

$L_f$ : inductancia del circuito del rotor

$\frac{dI_{exc}}{dt}$  : tasa de variación de la corriente de excitación en el tiempo.

La corriente que fluye en el circuito del rotor impone un flujo magnético, de acuerdo con la ley de Ampere. Este flujo es constante en el tiempo, y proporcional a la corriente de excitación, el flujo en función de la corriente de excitación está dado por la ecuación

$$\phi = k_\phi * I_{exc} \quad (3.2)$$

Donde:

$k_\phi$  : constante que depende de las características constructivas de la máquina

$\phi$  : flujo resultante en la máquina

Como el rotor está girando, el flujo, aunque constante, es visto por las espiras como variable. Así que, como el rotor gira, la tensión es inducida en las bobinas del estator, la ecuación que representa el voltaje interno generado es la siguiente:

$$E_A = k\phi f \quad (3.3)$$

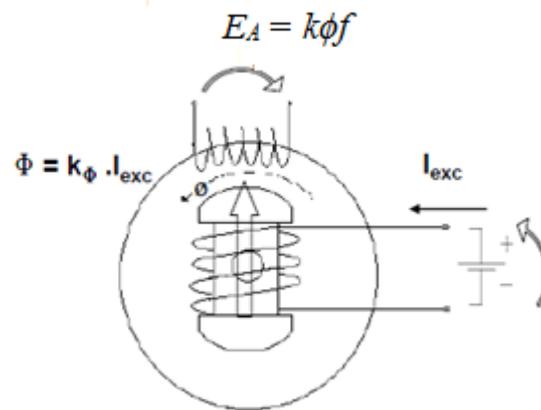
Dónde:

$K$  : constante que depende de las características constructivas de la máquina

$f$  : frecuencia de rotación del rotor

$\phi$  : flujo en el interior de cada espira en cada fase

Figura 64. **Diagrama equivalente rotor de polos salientes**



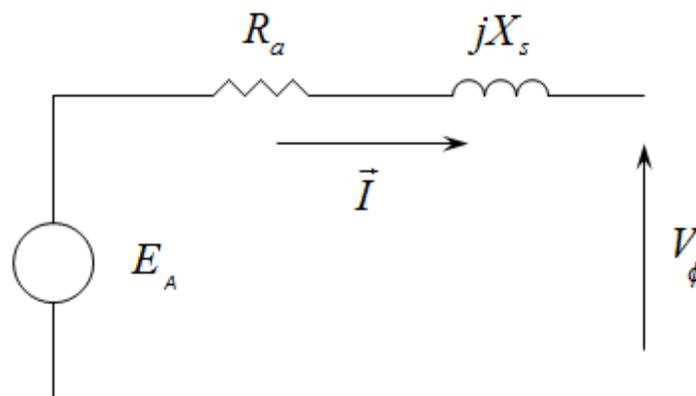
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. p. 28.

Así, cuando el generador está en vacío, es decir, desconectado de la red, con el interruptor de la unidad abierto, su tensión es proporcional al corriente de excitación y la velocidad del rotor. A medida que el regulador de velocidad mantiene la velocidad del generador a su valor nominal ( $f$  es constante), cuando la corriente de excitación es modificada, también es modificada la tensión en los terminales del generador. El voltaje interno generado es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo magnético depende de la corriente que fluye en el circuito de campo del rotor.

El voltaje interno generado  $E_A$  no es el mismo que aparece en las terminales del generador, la única vez en el cual  $E_A$  es el mismo que  $V_\phi$  (voltaje de salida) es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina. Existen varios factores que ocasionan diferencia entre  $E_A$  y  $V_\phi$  son los siguientes:

- La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, a esta corriente se le llama reacción de inducido.
- La auto inductancia de las bobinas de armadura
- La resistencia de las bobinas de armadura
- El efecto de la forma de los polos salientes del rotor

Figura 65. **Circuito equivalente de estator**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. p. 58.

La ecuación del voltaje en las terminales se deduce analizando el circuito equivalente del generador síncrono.

$$V_\phi = E_A - I_A ( R_a + jX_s ) \quad (3.4)$$

Donde:

$E_A$  : voltaje interno generado

$R_a$  : resistencia de armadura

$X_s$  : reactancia síncrona

$V_\phi$  : voltaje en terminales

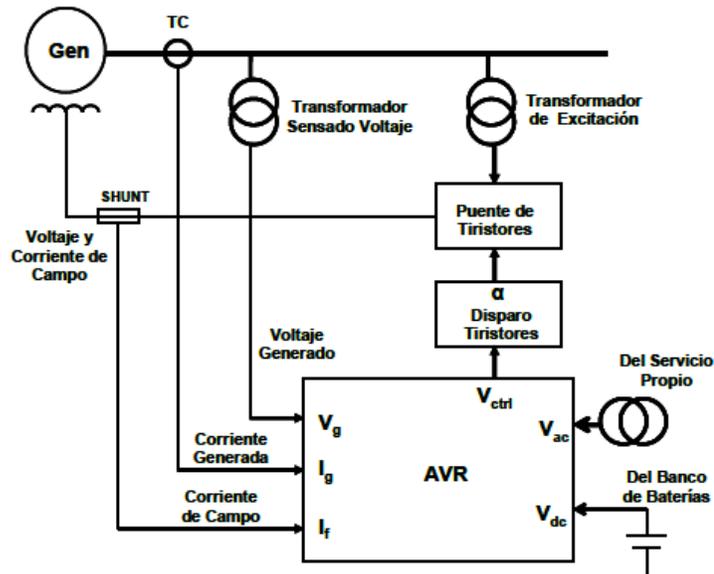
$I_A$  : corriente en armadura

### **3.8.1. Sistema de rectificadores estacionarios**

Cuando se utilizan rectificadores estacionarios, la salida de corriente directa es alimentada al devanado de excitación del generador principal a través de anillos rosantes. Cuando se utilizan rectificadores no controlados, el regulador (AVR) controla el devanado de campo del excitador de corriente alterna, al mismo tiempo que el excitador de AC controla el voltaje de salida del excitador.

El excitador del alternador es manejado desde el rotor del generador; el excitador en sí mismo es auto excitado, su potencia es alimentada al devanado de campo a través de rectificadores de tiristores, el regulador de voltaje, obtiene su potencia de la salida de voltaje del excitador.

Figura 66. Diagrama general de sistema de excitación



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual sistema de excitación. p. 62.

### 3.8.2. Voltaje máximo y mínimo de excitación

Es el máximo voltaje de corriente directa que el sistema de excitación es capaz de suministrar bajo condiciones definidas. El voltaje máximo es un indicador de la capacidad de esfuerzo de campo del sistema de excitación, los voltajes máximos muy altos tienden a mejorar la estabilidad transitoria. Según la Norma IEEE Std 100-1998 / IEC 34-16-1, el máximo voltaje DC positivo del sistema está dado por la siguiente ecuación:

$$U_{cp} = K_{cp} * U_{fn} \quad (3.5)$$

Donde:

$K_{cp}$  : factor de voltaje positivo máximo

$U_{fn}$  : voltaje de campo nominal

$$U_{cp} = 2 * 171 = 342 \text{ V} \quad (3.6)$$

El voltaje DC negativo máximo es necesario para controlar la máquina en condiciones de sobretensión, según la Norma IEEE Std 421.4-1990 está dado por ecuación:

$$U_{cn} = K_{cn} * U_{cp} \quad (3.7)$$

Dónde:

$K_{cn}$  : factor de voltaje negativo máximo según IEEE Std 421

$U_{cp}$  : máximo voltaje positivo

$$U_{cn} = -0,7 * 342 = - 239,40 \text{ V}$$

### 3.8.3. Corriente de excitación nominal

La corriente directa en el campo del bobinado de la maquina síncrona cuando está operando a cierto rango de voltaje, corriente, factor de potencia y velocidad. Según IEEE Std 421.1-1986 / IEC 34-16-1, se calcula de la siguiente manera:

$$I_{en} = K_{in} * I_{f \max} \quad (3.8)$$

Donde:

$I_{en}$ : máxima corriente de excitación

$K_{in}$ : factor de corriente nominal

$I_{fmax}$ : máxima corriente de campo

$$I_{en} = 1,1 * 1\ 196 = 1\ 315,60\ A$$

#### **3.8.4. Corriente de excitación máxima**

La máxima corriente de excitación que el sistema es capaz de suministrar durante un tiempo determinado. Cuando las perturbaciones prolongadas son de preocupación, la corriente máxima se basa en el esfuerzo térmico máximo del sistema de excitación; según IEEE Std 421.1 – 1986 / IEC 34-16-1, se calcula de la siguiente manera:

$$I_{ec} = K_{ic} * I_{fn} \tag{3.9}$$

Donde:

$I_{ec}$ : máxima corriente de excitación

$K_{ic}$ : factor de máxima corriente

$I_{fn}$ : corriente nominal de campo

$$I_{ec} = 1,6 * 979 = 1\ 566,4\ A$$

Tabla XII. Factores de diseño para sistema de excitación según fabricante

Condiciones	Símbolo	Valor	Unidad	Nota
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	40	°C	
Altura	H	<1000	m	
Número de Puentes rectificadores	$N_{Bridge}$	1		
Factor de corriente de excitación nominal	$K_{In}$	1,1		
Factor máximo de corriente	$K_{ic}$	1,6		
Tiempo de aplicación máxima corriente	$T_{cf}$	10	Segundos	
Factor de máximo voltaje positivo	$K_{cp}$	2		x $U_{fn}$
Factor de máximo voltaje negativo – IEEE	$K_{cn\_IEEE}$	0,7		x $U_{cp}$
Ángulo mínimo de disparo de thiristor	$\theta_{min}$	5	Grados Eléctricos	

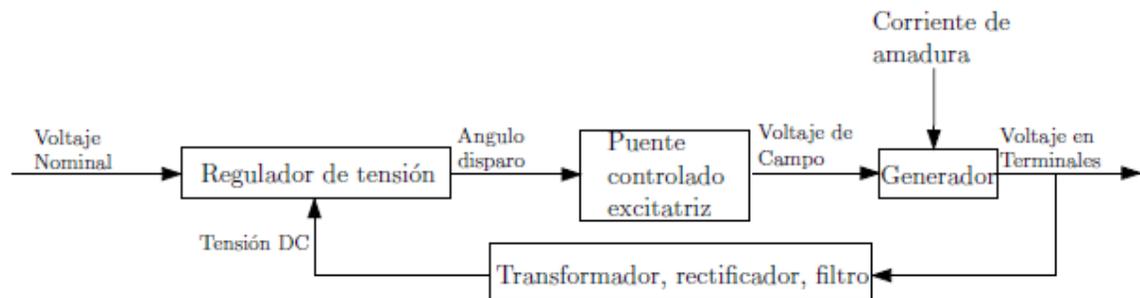
Fuente: elaboración propia.

### 3.9. Regulador automático de voltaje (AVR)

La función principal del AVR (*automatic voltage regulator*) es mantener la magnitud de voltaje en terminales de un generador síncrono a un nivel específico. Un aumento de la demanda de potencia reactiva está acompañado por una caída de la magnitud de voltaje en las terminales del generador. La magnitud de voltaje es detectada a través de un transformador de potencial en una de las fases de la máquina. El voltaje es rectificado y comparado con una señal de corriente directa.

La señal amplificada de error controla el devanado de campo y aumenta el voltaje en las terminales del excitador. Por lo que la corriente del devanado de campo aumenta, lo cual resulta en un aumento de la FEM generada. La generación de potencia reactiva es aumentada y se alcanza un nuevo equilibrio al mismo tiempo en que se aumenta el voltaje en las terminales a un valor deseado.

Figura 67. **Lazo de control de un regulador de voltaje**



Fuente: elaboración propia.

Los generadores que cuentan con AVR de muy alta ganancia pueden producir oscilaciones ante pequeñas perturbaciones y bajo amortiguamiento. Este análisis de estabilidad aplica para fenómenos de pequeña señal y una adecuada sintonización de los sistemas de regulación de las plantas. Debido a los efectos de la no-linealidad del sistema, la magnitud de las oscilaciones debe limitarse porque de lo contrario podrían incrementarse hasta perder sincronismo y el sistema saldrá de operación, a menos de que se den acciones correctivas.

En el análisis de estabilidad dinámica se asumen las siguientes condiciones:

- A. La potencia mecánica de entrada permanece constante durante el período transitorio.
- B. Se desprecian los efectos del amortiguamiento.
- C. El ángulo mecánico del rotor de la máquina síncrona coincide con el ángulo eléctrico de fase atrás de la reactancia transitoria  $X'$ .
- D. La máquina síncrona es representada por un voltaje constante atrás de la reactancia  $X'$ .

En la planta hidroeléctrica Xacbal se utiliza el regulador de voltaje Thyricon™ el cual tiene cuatro modos de control diferentes que pueden ser agrupados en dos categorías principales:

- Modo automático
- Modo manual

Los modos automáticos son los modos de operación normales del sistema además de ser los que recomienda el fabricante para la correcta operación de las unidades generadoras, ellos realizan la regulación de la tensión en los terminales, regulación de la potencia activa o del factor de potencia del generador. En el modo manual, la corriente de campo del generador es controlada directamente. El modo manual es usado principalmente para respaldo de los modos automáticos.

El sistema Thyricon™ está equipado con funciones de seguimiento que fuerzan los modos inactivos a rastrear el modo activo. Esa característica asegura que las transiciones entre los modos de control, solicitadas por el operador o causadas por un componente defectuoso, serán siempre suaves.

### **3.9.1. Modo automático del regulador de voltaje**

El modo automático cubre tres diferentes métodos de controlar la tensión terminal del generador:

- AVR - Regulación automática de tensión
- VAR - Regulador Voltio - Ampere
- PF - Regulador PF (control del factor de potencia)

Los modos automáticos controlan la tensión, la potencia reactiva o el factor de potencia del generador. El AVR contiene la rutina básica de control de tensión. VAR y PF usan la red de control del AVR como estructura subordinada, cambiando referencia de tensión del generador para obtener la potencia reactiva o el factor de potencia deseados.

El AVR controla la tensión del generador usando un controlador PID (proporcional-integral-derivativo). La diferencia entre la tensión de referencia y la del generador es la entrada del PID, su salida controla el ángulo de disparo del puente de tiristores y consecuentemente la tensión y corriente del bobinado de campo. La corriente de campo interfiere en el campo magnético dentro del generador y así en la tensión del estator. El intervalo de referencia del AVR típicamente está entre 90 % a 110 % de la tensión nominal. La referencia puede ser aumentada o disminuida localmente, a través de la IHM en la puerta del panel de excitación, o remotamente por la sala de control.

Complementando la estructura del AVR, existen compensadores de caída (estatismo o lazo) de reactivos y activos. Esos ítems compensan caídas de tensión activa y reactiva en el transformador elevador y/o en la línea de transmisión. La compensación reactiva también ayuda en el equilibrio de la

potencia reactiva entre las máquinas sincrónicas conectadas en paralelo o conectadas a la red.

El regulador de reactivos VAR usa el AVR como estructura subordinada; él usa el mismo PID y limitadores usados en el AVR. El regulador VAR aumenta o disminuye la referencia de tensión del AVR para alcanzar la potencia reactiva consumida o suministrada por la máquina sincrónica.

El regulador de factor de potencia PF Como el regulador VAR, utiliza el AVR como estructura subordinada, él aumenta o disminuye la referencia del AVR para obtener el factor de potencia deseado

### **3.9.2. Modo manual del regulador de voltaje**

El modo manual del permite que la tensión terminal del generador sea controlado manualmente por el operador. El modo manual actúa como un regulador de la corriente de campo. El operador controla indirectamente la tensión en los terminales ajustando la referencia de la corriente de campo. El modo manual funciona como respaldo del modo automático, pero tiene propósitos adicionales como hacer pruebas para obtener las características de cortocircuito y de vacío del generador y calibración de los dispositivos de protección durante el primer arranque de las unidades.

### **3.10. Regulador de corriente de campo**

El regulador de corriente de campo, FCR, usa un regulador proporcional-integral (PI) que es independiente de la rutina del AVR. El FCR puede ser parametrizado de acuerdo con las necesidades del cliente. El FCR controla la corriente de excitación sin la influencia de la tensión del generador. El ajuste de

referencia de la corriente de campo puede ser hecho remotamente por el sistema automático o localmente en el panel de operación.

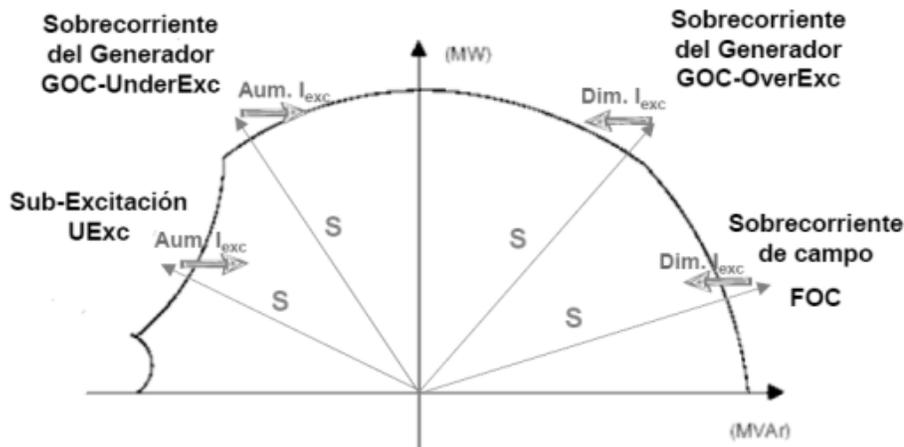
### **3.11. Limitadores**

Un limitador es un elemento que modifica o substituye una función de control de la excitación cuando circunstancias predeterminadas son alcanzadas. Los limitadores actúan para impedir condiciones de operación inapropiadas del sistema de excitación, del generador o del transformador elevador. El principal propósito de los limitadores es mantener el punto de operación del generador dentro de la curva de carga. Los limitadores permiten sobrecargas temporarias para aumentar la estabilidad y confiabilidad del sistema de potencia (generador y red).

Las intervenciones de los limitadores son señalizadas al sistema de automatización, pero no inician un disparo o un pedido de parada en caso de emergencias. Tales limitadores no deben ser considerados como funciones de protección. El regulador de tensión Thyricon utilizado en hidroeléctrica Xacbal ofrece los siguientes recursos para mantener el generador dentro de sus límites operacionales:

- GOC Limitador de sobrecorriente en el estator
- FOC Limitador temporizado de sobrecorriente de campo
- FCL Limitador instantáneo de sobrecorriente de campo
- UExc Limitador de subexcitación
- V/Hz Limitador de sobre flujo (Volts/Hertz)

Figura 68. **Controlador y regulador digital actuación de los limitadores**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. p. 68.

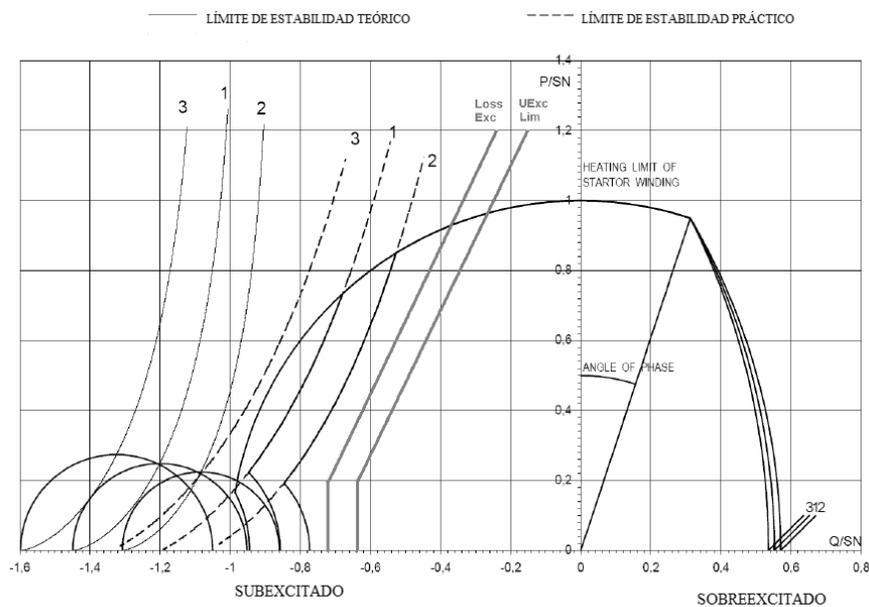
### 3.11.1. Limitador de sub excitación UExc

El limitador de subexcitación evita condiciones de operación que podrían causar sobrecalentamiento del estator o inestabilidad y pérdida de sincronismo. La acción del UExc es determinada por regiones definidas en la curva de carga de la máquina síncrona.

La región límite es programada en el controlador del Thyristor y coordinada con el límite de la función de protección de pérdida de excitación. La curva para el UExc puede ser definida con hasta 5 puntos diferentes. Cuando la potencia reactiva está fuera de esa curva, el UExc aumenta la referencia del AVR aumentando así la potencia reactiva, de modo que el punto de operación retorne al lado positivo del limitador.

La figura 69 ilustra la curva de carga para un generador síncrono y las configuraciones para el UExc coordinadas con las configuraciones de la protección de pérdida de excitación.

Figura 69. **Configuraciones para el limitador UExc y la protección de pérdida de excitación**



Fuente: VOITH SIEMENS, Manual de sistema de excitación. p 72.

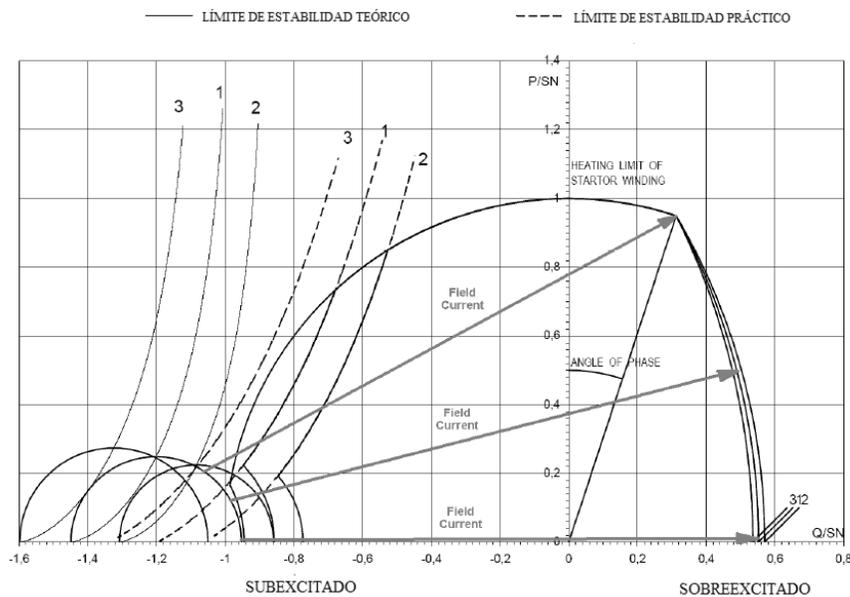
La función de protección de pérdida de excitación es ajustada para dar disparo en la unidad si llega al límite práctico de estabilidad. El limitador de subexcitación es ajustado de forma que, en condiciones normales, la unidad no llegue al límite de disparo de la protección de pérdida de excitación.

### 3.11.2. Limitador de sobre corriente de campo FOC

El limitador de sobrecorriente de campo o de sobreexcitación es usado primariamente para evitar el sobrecalentamiento en el bobinado de campo de la máquina síncrona. La corriente de campo puede ser representada en la curva de carga de acuerdo con la figura 70.

Forzando la disminución en el nivel de la corriente de campo, el Thyristor puede forzar a disminuir la potencia reactiva suministrada por la unidad, trayendo el generador hacia dentro de los límites de operación. La sobrecarga permitida en el bobinado es inversamente proporcional al tiempo, así el limitador permite una sobrecarga limitada del generador, la cual es necesaria para la estabilidad del sistema eléctrico.

Figura 70. Corriente de campo en la curva de carga



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. p. 81.

### **3.11.3. Limitador rápido de la corriente de campo FCL**

El limitador rápido de corriente de campo actúa para mantener la corriente de campo abajo de un valor predeterminado. El FCL no tiene tiempo de atraso. Las configuraciones estándares del FCL son 140 - 200 % de la corriente de campo nominal permitiendo alcanzar la condición de pico sin calentar el bobinado de campo. En el caso 1 de la figura 4.29, es el FCL que limita la corriente de campo a 1,4 p.u.

### **3.11.4. Limitador Voltio / Hertz V/Hz**

El limitador Volts/Hertz es usado para evitar sobrecalentamiento de la máquina síncrona y de los transformadores conectados a ella debido al exceso de flujo magnético causado por operación en subtensión, subfrecuencia o ambos. Esto es hecho a través de la reducción de la máxima referencia de tensión del generador. En la frecuencia nominal, el limitador V/Hz no tiene efecto. Como un ejemplo, para un sistema con frecuencia nominal de 60Hz, y máxima relación Voltios/Hertz de 1,1, el limitador V/Hz actúa como a continuación:

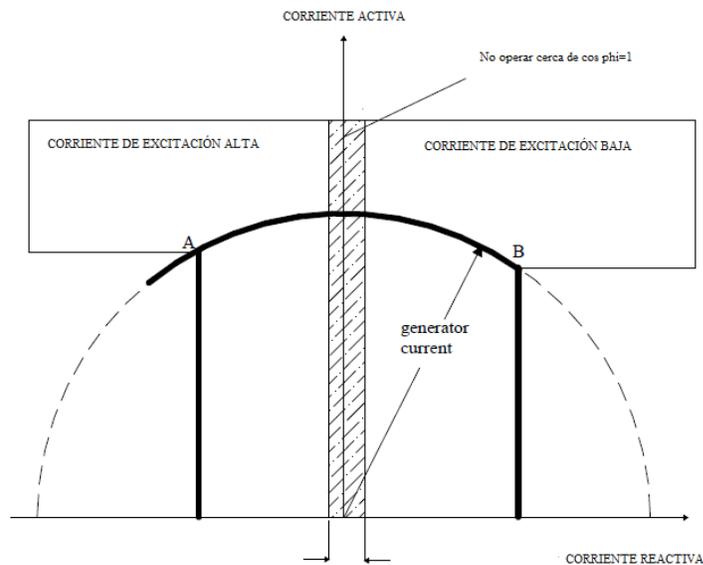
- En 60Hz, la máxima tensión permitida en el generador es 110 %;
- En 57Hz, la máxima tensión permitida en el generador es 104,5 %;
- En 54Hz, la máxima tensión permitida en el generador es 99 %

### 3.11.5. Limitador de sobre corriente del generador GOC

El limitador de sobrecorriente del generador es utilizado para evitar el sobrecalentamiento del estator debido al aumento de la corriente del generador. El GOC detecta sobrecorriente y la compara con la corriente reactiva para determinar como el regulador de tensión debe actuar.

Un tiempo de atraso permite pequeñas sobrecorrientes aumentando la estabilidad de la red La corriente del generador es limitada a un valor máximo indiferente al punto de operación del generador. Eso es ilustrado por la curva A-B como muestra la figura 71.

Figura 71. Límites máximos de corriente del generador



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de excitación. p. 82.

Una sobrecorriente capacitiva en el estator resulta en el aumento de la corriente de excitación y una sobrecorriente inductiva resulta en la disminución de la corriente de excitación. El área sombreada en la figura indica un área en la cual el sistema de excitación es incapaz de influenciar la corriente del generador pues hay poca potencia reactiva fluyendo de o para el generador. El GOC es deshabilitado en esta región para evitar oscilación entre operación sobre y subexcitada. Si el punto de operación está en esta área y la corriente del generador aún es muy alta, la corriente activa debe ser disminuida por el regulador de velocidad.



## **4. MONTAJE DE CRUCETAS SUPERIOR E INFERIOR**

La cruceta de guía transfiere para la fundición de concreto la fuerza radial causada por el movimiento de las piezas giratorias de la unidad. Las fuerzas horizontales son transmitidas a cruceta a través de segmentos del cojinete guía cuando un cojinete guía está previsto en el centro de la cruceta. Otra función de la cruceta de guía es apoyar otros componentes de la unidad, cojinete guía, líneas de tubo de aceite, sistema de extracción de vapor de aceite de los cojinetes y otros. La cruceta es compuesta por una parte central a la cual los brazos radiales son acoplados con soldaduras o por bridas. Los extremos externos de los brazos se apoyan en la fundición de concreto.

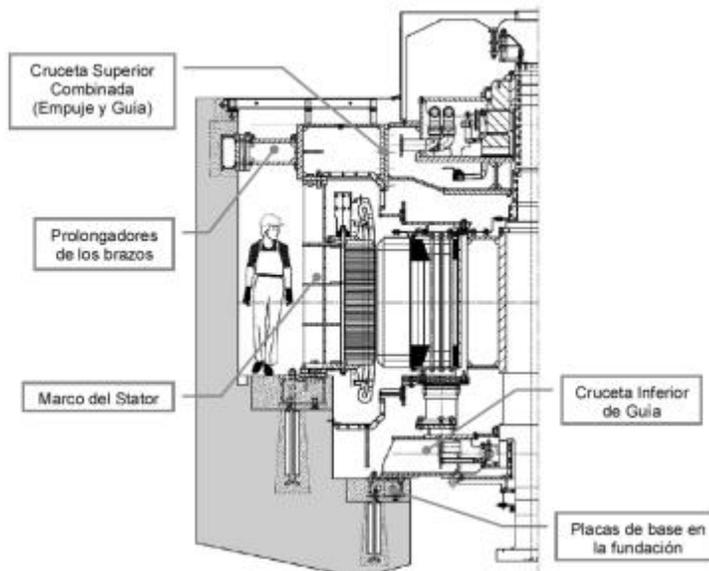
### **4.1. Montaje de cruceta inferior**

Levante la cruceta inferior y muévelo para el foso del generador. Verifique con un nivel de burbuja si la posición está realmente horizontal; corrija la posición de la cuerda, si es necesario. Es importante observar la marcación aguas arriba. Clasifique los calces de acuerdo con los datos mostrados en los planos de montaje. Insértelos entre los brazos y las superficies de asiento, alineándolos a los contornos externos de los brazos. Coloque la cruceta en las superficies de asiento. Realice la centralización preliminar y nivelación de la cruceta inferior, pasándolo por el eje inferior y colóquelo en las placas de base. Verifique y registre los resultados. Los orificios para fijación de tornillos son mayores que el diámetro externo del tornillo. Instale algunas calzas con esa diferencia de espesor para tener un recurso adicional de montaje para la centralización final de la cruceta.

Se debe realizar la centralización final de la cruceta sólo después del alineamiento final de la unidad (verificación de la plomada y límite máximo). Se deben perforar orificios de perno cónico después del alineamiento final para introducir guías cónicas.

En la cruceta inferior se debe montar el cojinete de guía, que asegura el funcionamiento centralizado y verdadero de la máquina a cualquier velocidad entre el cero y la velocidad de trabajo de la turbina.

Figura 72. **Corte transversal del conjunto de generador**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 280.

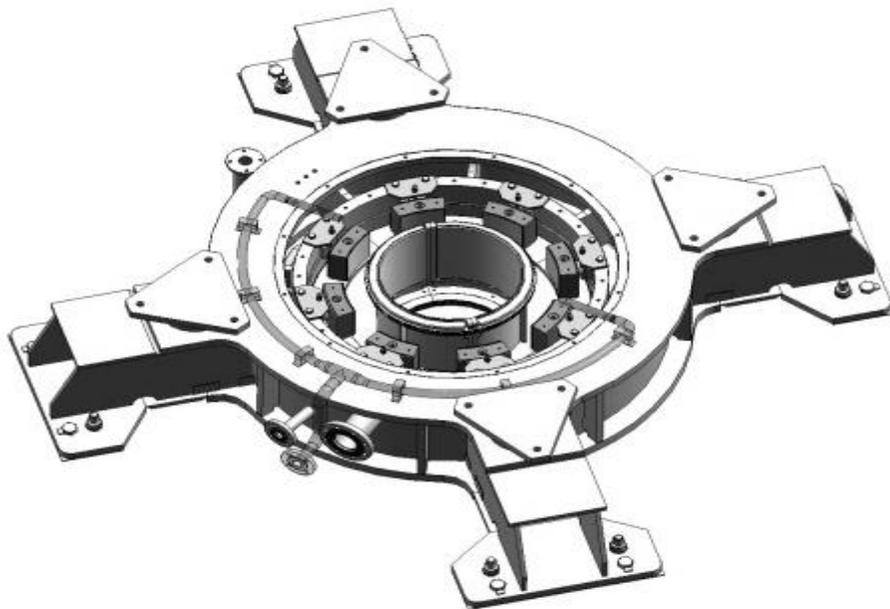
El cojinete guía absorbe las fuerzas radiales producidas por cualquier desequilibrio residual pequeño, inevitable del rotor y las pequeñas irregularidades magnéticas, que son el resultado de tolerancias de fabricación y montaje. Cualquier movimiento radial restante que se limita a unos centésimos

de un milímetro se causa por la holgura, necesaria en el cojinete, para el espesor de la película de aceite.

En un cojinete combinado guía, el enfriamiento y la lubricación del cojinete de guía se efectúan con el sistema de aceite del cojinete de empuje. El suministro requerido de aceite, se toma del proporcionado por el bloque de empuje. El aceite entra en el cauce de alimentación, al fondo del cojinete de guía y es distribuido sobre la superficie de trabajo. El cojinete de guía ajustado separadamente se desliza sobre el anillo, el cual suministra el aceite al cojinete, por una acción de auto bombeo.

El enfriamiento normalmente se efectúa por medio de intercambiadores de calor, instalados externamente al depósito de aceite del cojinete.

Figura 73. **Conjunto de cojinete guía y cruceta inferior**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 285.

Los segmentos guía deben instalarse secos (ni la superficie de contacto del árbol ni los segmentos deben estar engrasados de aceite); sea cuidadoso al marcar los segmentos correspondientes con la disposición en la vista en planta del cojinete. Monte los segmentos con el disco de presión, la cuña de ajuste y el plato de empuje con las mangas del espaciador sin fijar las cuñas al anillo de retención.

La superficie de revestimiento de metal antifricción (*babbitt*) debe estar absolutamente limpia y lisa. Si está áspera, opaca u oscura, debe acondicionarse. Sin embargo, antes de realizar cualquiera de esas tareas, debe ponerse en contacto con el departamento de ingeniería. Maneje con cuidado las partes durante la instalación para prevenir que se dañe el revestimiento de metal anti fricción. Coloque los segmentos del cojinete alrededor del árbol en la orientación y secuencia correctas.

Figura 74. **Segmentos de cojinete guía**



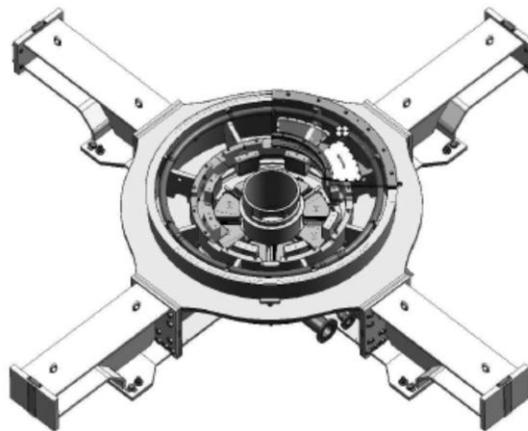
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 290.

## 4.2. Montaje de cruceta superior

La cruceta de empuje transfiere a la fundición las fuerzas axial y radial causadas por el peso de las piezas giratorias de la unidad, esta cruceta soporta el peso del conjunto de rotor y turbina completo. Como un cojinete guía está previsto en el centro de la cruceta, las fuerzas horizontales causadas por el movimiento de las piezas giratorias de la unidad son transmitidas a la cruceta a través de segmentos del cojinete guía. Las fuerzas verticales son transmitidas a la cruceta por los segmentos del cojinete de empuje. Otra función de la cruceta de empuje es apoyar otros componentes de la unidad, tales como, cojinete de empuje, bloque de empuje, líneas de tubo de aceite, sistema de vapor de extracción para cojinetes, conexión de excitación al porta escobillas, cubierta superior del generador, cubierta de protección del porta escobillas y otros.

Para la instalación de una cruceta superior en el foso, el estator y el rotor del generador ya deben estar en el foso y el generador y el eje deben estar alineados radial y axialmente para otros pasos del montaje.

Figura 75. **Vista general de la cruceta superior y cojinete combinado**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 296.

Para la instalación de los brazos de cruceta la cruceta debe ser montada, primero en el cubículo de montaje antes de ser bajada en el foso. Todos los brazos deben ser acoplados con tornillos, pernos de ajuste o chavetas atornilladas. Verifique la parte central de la cruceta de empuje o guía para posición realmente horizontal, utilizando un nivel de precisión tipo burbuja. Coloque el nivel en las superficies maquinadas en cuatro puntos espaciados uniformemente en la periferia. Si es necesario, corrija la posición de la cruceta insertando calces entre la cruceta y las bases niveladas. Aplique una capa fina y uniforme de pasta molykote g en las chavetas y pernos de encaje y sujételos con tornillos a las bridas para brazos. Encaje las piezas de acuerdo con las marcaciones suministradas.

Las chavetas y pernos de encaje deben apoyarse totalmente en parte inferior de la ranura; verifique con un calibrador de 0,03 milímetros. Acople el equipo de levantamiento con capacidad de carga suficiente, a los tornillos cáncamo que fueron fijados al colar en un brazo de la cruceta. Levante ligeramente brazo con la grúa y verifique la posición horizontal con un nivel de burbuja de madera; si es necesario, corrija la posición o la longitud de la cuerda.

Aplique una capa de pasta molykote en los lados de unión del brazo y del cojinete de las cabezas de tornillo hexagonales, roscas de tornillo y tuercas. Mueva cuidadosamente el brazo para la cruceta de empuje con un equipo de levantamiento utilice los pernos de encaje para guiar el montaje. Inserte los tornillos y tuercas elementos de traba y apriételos ligeramente.

#### **4.2.1. Ajuste axial cruceta superior**

Con la cruceta centralizada y ajustada previamente, verifique el nivel de los lados de apoyo de contacto donde los segmentos de empuje serán instalados a través del nivel óptico. Deben tomarse medidas de acuerdo con el número de brazos de la cruceta y de segmentos del cojinete (por lo menos 4 puntos con espacio equidistante en torno de la circunferencia deben ser medidos). Registre todos los valores en un protocolo de montaje adecuado. Para un ajuste de la región, inserte calces adicionales entre los brazos de soporte y los lados de apoyo de contacto. La cruceta debe estar libre del peso del rotor. Para un ajuste puntual, reduzca la altura total de las placas de ajuste del segmento de empuje retirando las hojas laminadas conforme sea necesario, antes de montarlo en la respectiva posición del punto medido.

Se deben soltar los tornillos apretados previamente antes de insertar los calces. Si el rotor del generador aún no está montado (cruceta inferior), la cruceta podrá ser levantada para inserción de calces adicionales por la grúa principal, gato hidráulico auxiliar o colocación de dos calces opuestos para levantar el respectivo brazo. De cualquier forma, con los tornillos de la cruceta apretados previamente (50 % del valor del par de fuerza nominal), verifique nuevamente el nivel de los lados de apoyo de contacto donde los segmentos de empuje serán instalados a través de nivel óptico. Para esta medición, las placas de calce de ajuste ya deben estar montadas. Registre todos los valores.

Después del acoplamiento del rotor del generador y de la verificación del alineamiento de la unidad, puede ser necesario compensar la perpendicularidad de la unidad con la inserción o retirada de calces bajo los brazos de la cruceta de empuje. En el caso de cruceta inferior, el peso del rotor debe ser transferido de la cruceta de empuje a otros dispositivos de apoyo.

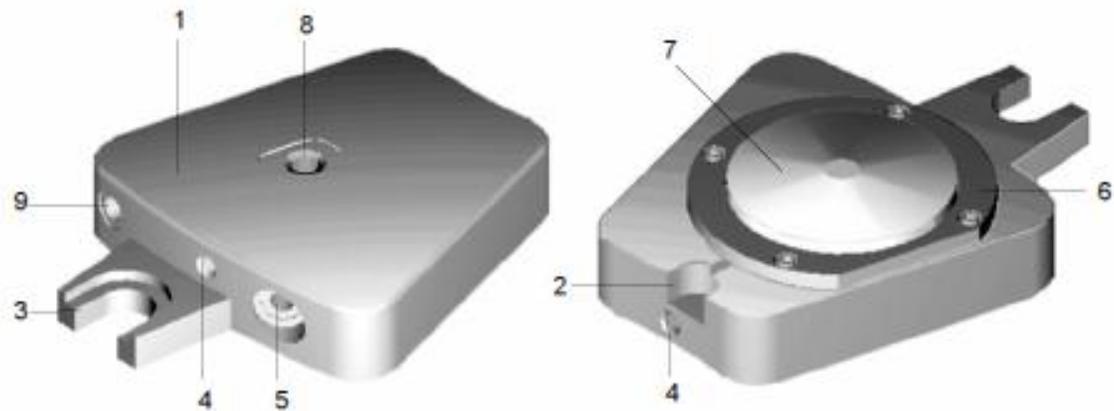
Como los gatos hidráulicos están instalados en los brazos de cruceta, levante el rotor a través de esos gatos hidráulicos, suministre algunos pedestales con la distancia entre el nivel más bajo del cubo del rotor levantado (circunferencia de la estructura fortalecida/reforzada, es decir: Anillo de freno) al hormigón, instalándolos y transfiriendo el peso del rotor para esos pedestales de apoyo. El hormigonado final de las placas de base de una cruceta inferior sólo será realizado, después del montaje final y del alineamiento de la unidad, para tener la misma condición de la subsiguiente, durante la operación. El alargamiento y la fijación de los pernos cónicos también deben ser realizados sólo después del alineamiento final de la unidad, además del apriete final de los tornillos con 100 % del valor de par de fuerza nominal.

#### **4.3. Montaje de cojinete de empuje**

El cojinete de empuje sostiene el peso total de los componentes giratorios del conjunto y también el empuje axial de la turbina. La parte principal de los cojinetes es el bloque de empuje. El empuje axial es transferido del bloque de empuje a los segmentos de los cojinetes que se apoyan en los platillos resorte en el soporte de empuje.

Si el cojinete es ajustado sobre el rotor, otro sello se instala debajo del soporte de empuje. Un sistema de extracción de vapor es proveído al cojinete, para mejorar el sellado (vapores que se levantan de la agitación y calentamiento del aceite). Por el peso del conjunto de la unidad giratoria es necesario un sistema de lubricación forzado para ayudar la formación de una película de aceite entre el bloque de empuje y los segmentos de empuje.

Figura 76. Segmentos del cojinete de empuje



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 305.

1. Superficie de deslizamiento
2. Hueco para el guía del segmento de empuje
3. Apoyo del guía del segmento de empuje
4. Agujero para fijación del dispositivo de montaje
5. Entrada de aceite de alta presión
6. Anillo de fijación del platillo resorte
7. Platillo resorte
8. Salida de aceite de alta presión
9. Agujero de inserción del termómetro / termostato

Como condición previa general, la cruceta de empuje superior debe estar colocada correctamente, centrada y nivelada. Los segmentos de empuje también deben estar instalados y nivelados. Antes de la instalación del bloque de empuje, limpie todos los orificios, soplelos con aire compensado y lávelos con kerosén. Verifique todas las superficies, especialmente para detectar

marcas de presión o rebabas. Si es necesario, elimínelas con una piedra de diamante.

Verifique la nivelación, y que no haya rebaba ni suciedad en las superficies de apoyo del bloque de empuje en el eje. Verifique la nivelación de la superficie de contacto del bloque de empuje que soportará los segmentos de empuje (espejo) y el peso total. Tome al menos 8 puntos equidistantes alrededor de la circunferencia. Mida el diámetro interno del bloque de empuje en sus superficies de contacto utilizando un micrómetro interno, a temperatura ambiente. Registre los valores medidos.

Mida el diámetro externo del eje en el área donde se instalará el bloque de empuje mediante un micrómetro externo, a temperatura ambiente. Registre los valores medidos. Se debe verificar la nivelación de las caras de los anillos de empuje segmentados. Mida el paralelismo entre las superficies inferior y superior con un micrómetro externo. Las diferencias no pueden ser superiores a 0,01 milímetro. Verifique la nivelación, y que no haya rebaba ni suciedad en las ranuras del anillo de empuje segmentado y las superficies de apoyo en el eje.

Retire de la ranura del eje la chaveta de ajuste del bloque de empuje y ajústela en la ranura del bloque de empuje. Si es necesario, limpie y desbarbe la chaveta y la ranura. Coloque nuevamente la chaveta en la ranura del eje y verifique la altura.

Fije la chaveta ajustable con tornillos cilíndricos y fíjelos martillando levemente. Aplique una capa generosa y uniforme de grasa en las superficies de apoyo del eje y del empuje.

#### **4.3.1. Montaje del bloque de empuje**

El diámetro interno del bloque de empuje es más pequeño en sus superficies de contacto (con diferencia mínima) que el diámetro externo del eje. Por lo tanto, el bloque de empuje debe calentarse (antes de montarlo al eje) para que su diámetro interno alcance un valor de 0,3 milímetros más alto que el medido a temperatura ambiente. Usar calentadores y / o mantas térmicas para lograr este objetivo.

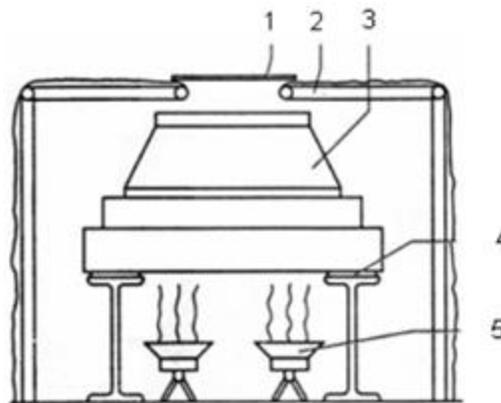
Para evitar daños en la superficie del cojinete, coloque el bloque de empuje con esa superficie en tres pedestales de acero (o soportes similares) a una altura de 500 milímetros aproximadamente. En los puntos de contacto, inserte calzos de cobre o de material antitérmico de un espesor de  $\pm 5$  milímetros.

Colocar los calentadores de manera tal que el diámetro interno del bloque de empuje y la superficie del cojinete se calienten de manera uniforme, como se muestra en la figura 77. El bloque de empuje está aislado y contraído en el núcleo del bloque de empuje en el taller por el mismo principio de calentamiento.

Cuando se calienta este tipo de bloque, se debe tener cuidado de observar que el núcleo del bloque de empuje no alcance una temperatura superior a la del bloque de empuje. Bajo ninguna circunstancia pueden colocarse los calentadores adentro o directamente debajo del diámetro interno del bloque de empuje.

Construya una estructura de madera o tubular alrededor del bloque de empuje colocado y cúbrala bien con mantas antitérmicas o con alfombras. Deje una abertura en la parte superior de la estructura para permitir la ventilación temporaria y la lectura del termómetro. Durante el proceso de calentamiento, el bloque de empuje no debe enfriarse unilateralmente.

Figura 77. **Calentamiento del bloque de empuje**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 327.

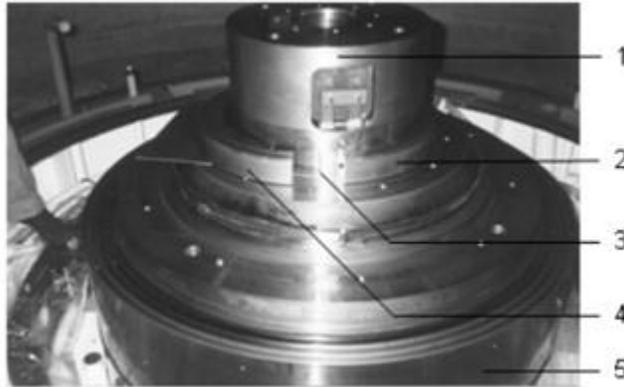
1. Abertura para ventilación temporaria y lectura de temperatura
2. Marco con alfombras aislantes de calor
3. Bloque de empuje
4. Embalaje
5. Calentador

En el caso de que el aire tenga una alta humedad – en el lugar de montaje – aplique una capa final de Vaselina libre de ácidos en el bloque de empuje antes de calentarlo, teniendo en cuenta que se forma una abundante condensación al comenzar el calentamiento, lo cual puede provocar la oxidación de las superficies pulidas. La temperatura necesaria para la contracción es de 70 K aproximadamente, sobre la temperatura ambiente.

Cuando se alcanzó la temperatura de contracción, mida el diámetro interno del bloque de empuje con un micrómetro interno. Es suficiente una expansión de 0,3 milímetros, si las actividades a realizar de inmediato se hicieren rápidamente. Por lo tanto, prepare la distribución de las herramientas, los componentes para montar (anillos de empuje y de fijación) y los elementos de fijación. No retire las mantas ni las alfombras antitérmicas antes de terminar el trabajo de preparación. Proteja el bloque de empuje de las corrientes de aire frío. Levante el bloque de empuje con una grúa con ganchos y eslingas en la misma posición que antes y verifique la posición horizontal con un instrumento de nivelación (2 puntos a 90°).

Pase con cuidado el bloque de empuje sobre el eje y alinéelo centralmente respecto de éste. Observe si la chaveta de ajuste está bien colocada. Baje el bloque de empuje lentamente y con mucho cuidado hasta que se apoye en los segmentos del cojinete. Afloje las eslingas de elevación y retire los pernos de ojo de elevación. Observe la introducción del núcleo sin pegarse en las puntas (observe que las eslingas de elevación estén tirantes). Inserte las dos mitades del anillo de empuje en la ranura del eje, observando que el bisel en el diámetro externo permanezca arriba. Coloque el anillo de fijación sobre el anillo de empuje segmentado y fíjelo a al bloque de empuje con tornillos. Coloque el eje en la posición original. El peso del rotor moverá el eje a través del bloque de empuje hasta que el anillo de empuje esté colocado correctamente en la ranura del eje contra la cara del bloque de empuje.

Figura 78. **Conjunto de bloque de empuje**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación del generador. p. 332.

1. Eje
2. Anillo de fijación (insertado)
3. Ranura del eje
4. Anillo de fijación (no insertado)
5. Bloque de empuje

## **5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

La operación de la unidad generadora se refiere a las maniobras necesarias para mantener la máquina funcionando y sincronizada al sistema nacional interconectado, y el mantenimiento se refiere a las actividades programadas para que la máquina esté en condiciones óptimas de funcionamiento

### **5.1. Operación del generador**

El término operación significa el uso de la máquina dentro de las condiciones para las que fue concebida. Esto requiere la ejecución de determinadas pruebas que permitan asegurar el giro eficiente de la máquina y su conformidad con las prescripciones concernientes. Para permitir la detección de fallas en estado precoz, y evitar por lo tanto mayores daños, se requiere un monitoreo continuo. Cualquier desvío del estado normal indica un desempeño comprometido.

#### **5.1.1. Sistema de automatización**

A través del sistema de operación y control, toda la hidroeléctrica puede ser monitoreada y controlada por el equipo de operación con mucha facilidad y seguridad a través del sistema HMI que es la abreviación en inglés de (Interfaz Hombre Máquina). Los sistemas HMI se pueden pensarlos como una ventana de un proceso, esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora, los sistemas HMI en computadoras se les conoce como software HMI o de monitoreo y control de supervisión. Las

señales de los procesos son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida, PLC, RTU o DRIVE, todos estos dispositivos deben tener una comunicación que entienda el HMI. Los paquetes de software del HMI contemplan la mayoría de las funciones estándares de los sistemas SCADA por ejemplo el FIX, WinCC. Las principales funciones del HMI son las de monitoreo, supervisión, control, indicaciones de alarmas y eventos históricos.

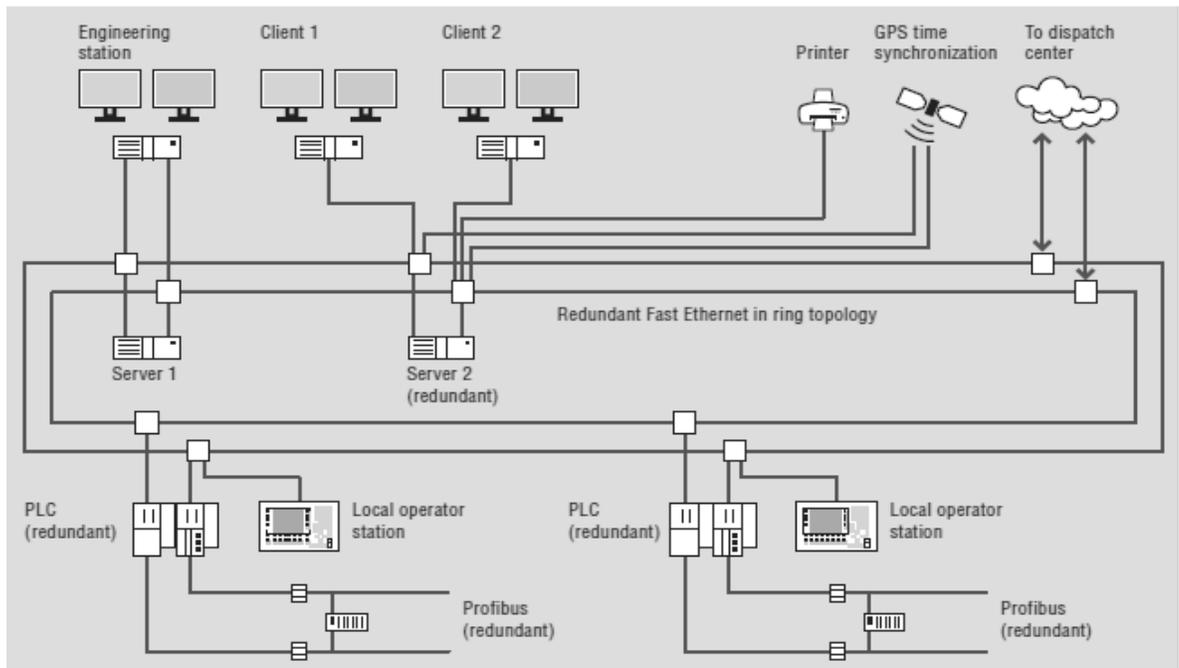
### **5.1.2. Arquitectura del SDSC**

La arquitectura típica del SDSC, que atiende las necesidades de operación, disponibilidad y seguridad del sistema, La arquitectura de red del SDSC está constituida por dos redes Ethernet Industrial: la primera, llamada de Terminal Bus, conecta los terminales de operación a los servidores, y la segunda, llamada de Process Bus, interconecta las Unidades de Adquisición y Control (UAC) a los servidores, posibilitando de esa forma la visualización de los datos de proceso en los terminales de operación.

En ambas redes se utiliza la topología de anillo óptico, que asegura la redundancia, garantizando así la alta disponibilidad de la red.

Esa estructura con dos redes Ethernet Industrial separadas posibilita una optimización en el tráfico de red, en que los servidores son los responsables por la comunicación con las UAC's y por la disponibilidad de datos para las estaciones de operación, no permitiendo el acceso directo de las estaciones a las UAC's, lo que disminuye considerablemente el volumen de accesos a los controladores. Todas las estaciones que componen el sistema tienen su reloj interno sincronizado a través del GPS (servidor de sincronismo de tiempo), que permite la sincronización de los equipos por red Ethernet. Los principales componentes de la arquitectura del SDSC son los servidores.

Figura 79. **Arquitectura de red SDSC**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de control. p. 15.

### 5.1.3. Servidores

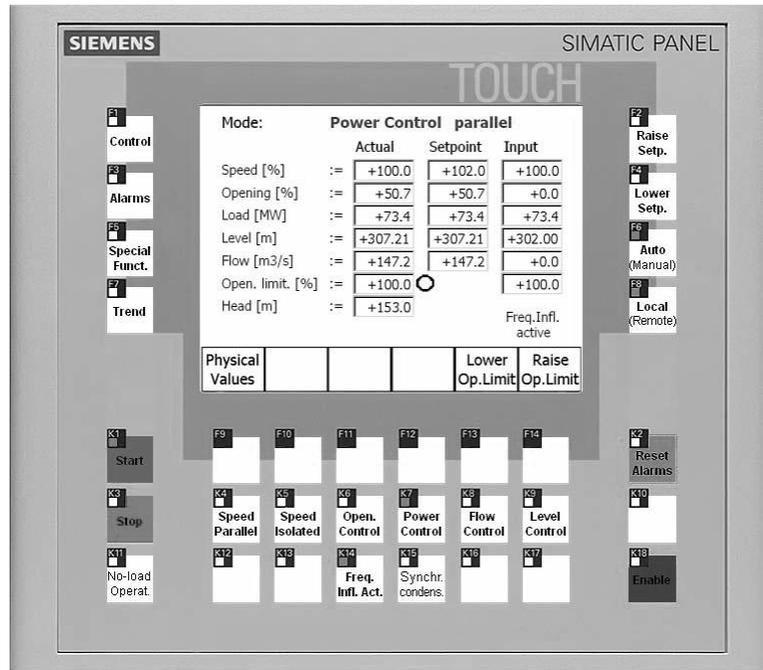
Estas estaciones son responsables por el almacenamiento de las pantallas de proceso, por la interfaz entre los PLC's y los clientes del sistema, el gerenciamiento de clientes, y el gerenciamiento y almacenamiento reciente de las alarmas y curvas del sistema, entre otras funciones. Por medidas de seguridad y disponibilidad del sistema, fue implementada la función de redundancia entre los dos servidores. La configuración sigue la filosofía maestro/*stand-by*, en que la base de datos es actualizada igualmente en los dos servidores. Cuando ocurre alguna falla en el servidor maestro, el servidor de respaldo asume las funciones de maestro y el sistema continúa disponible para operación.

#### **5.1.4. Estaciones de operación local (HMI local)**

De la misma forma que las estaciones de operación, las estaciones de operación locales son utilizadas para visualización y control del proceso. Ellas son HMI's locales de operación, y están ubicadas en el cuadro de adquisición y control respectivo de cada área. En situación normal de proceso, esas estaciones trabajan como cliente de las estaciones servidoras, así como las estaciones de operación, y están conectadas a los servidores por la red Terminal Bus.

Sin embargo, en situaciones de emergencia, en que ambos servidores están fuera de operación, las estaciones de operación portátiles pueden trabajar como estación simple, pudiendo obtener conexión directa a la UAC de la respectiva área a través de la red process bus. Para esa situación de emergencia, por lo tanto, las HMI's locales poseen proyectos locales, que a su vez se conectan a la respectiva UAC. En esa situación, los sistemas de archivo no están completamente disponibles para operación, una vez que esos equipos no están conectados a la red de proceso en tiempo integral. Solamente las alarmas y tendencias momentáneas estarán disponibles para visualización.

Figura 80. Pantalla táctil HMI local



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de sistema de control. P. 20.

### 5.1.5. Controlador de Secuencia

Los bloques de función MSEQCTL tienen como función el control de la secuencia de arranque y parada de las unidades generadoras, a través de controles de modos y operaciones básicas. Ese secuenciador hace las llamadas de las secuencias maestras (Master Sequence), que por su vez realizan las llamadas de las subsecuencias (Slave Sequence). El secuenciador puede trabajar en modo automático, haciendo la secuencia de arranque y parada automáticamente, o en modo paso a paso, lo que exige una confirmación a cada paso de la secuencia.

## **5.2. Secuencia de arranque**

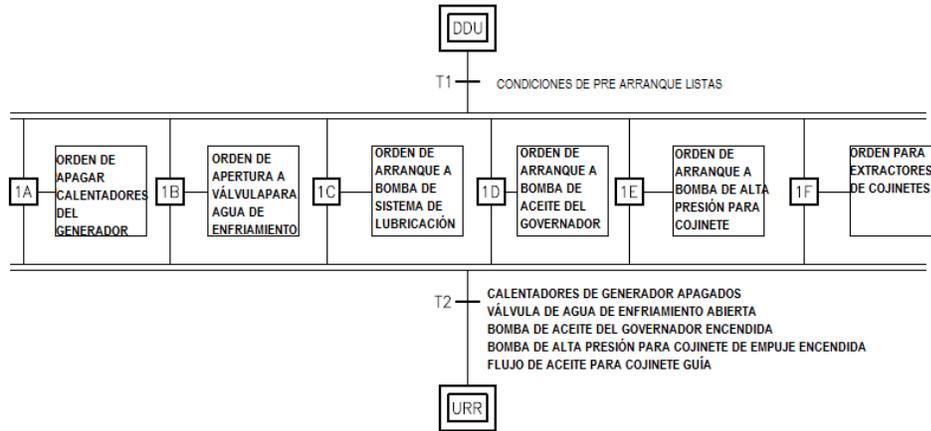
La secuencia de arranque indica cuáles son los procedimientos a seguir para arrancar la unidad generadora, normalmente se arranca en modo automático para evitar posibles errores de los operadores de planta, sin embargo al ocurrir algún problema en modo automático la unidad puede arrancarse en forma manual.

### **5.2.1. Secuencia de arranque de equipos auxiliares**

No importa si la unidad está en modo automático o manual la secuencia de arranque de los equipos debe ser la misma.

- A. La tubería de alta presión debe estar presurizada
- B. Se arrancan los sistemas de agua de enfriamiento
- C. Arranque de la bomba de alta presión para lubricación
- D. Apertura de la válvula de *by pass*, para igualar presiones
- E. Apertura de la válvula mariposa

Figura 81. **Secuencia de arranque auxiliares de generador**

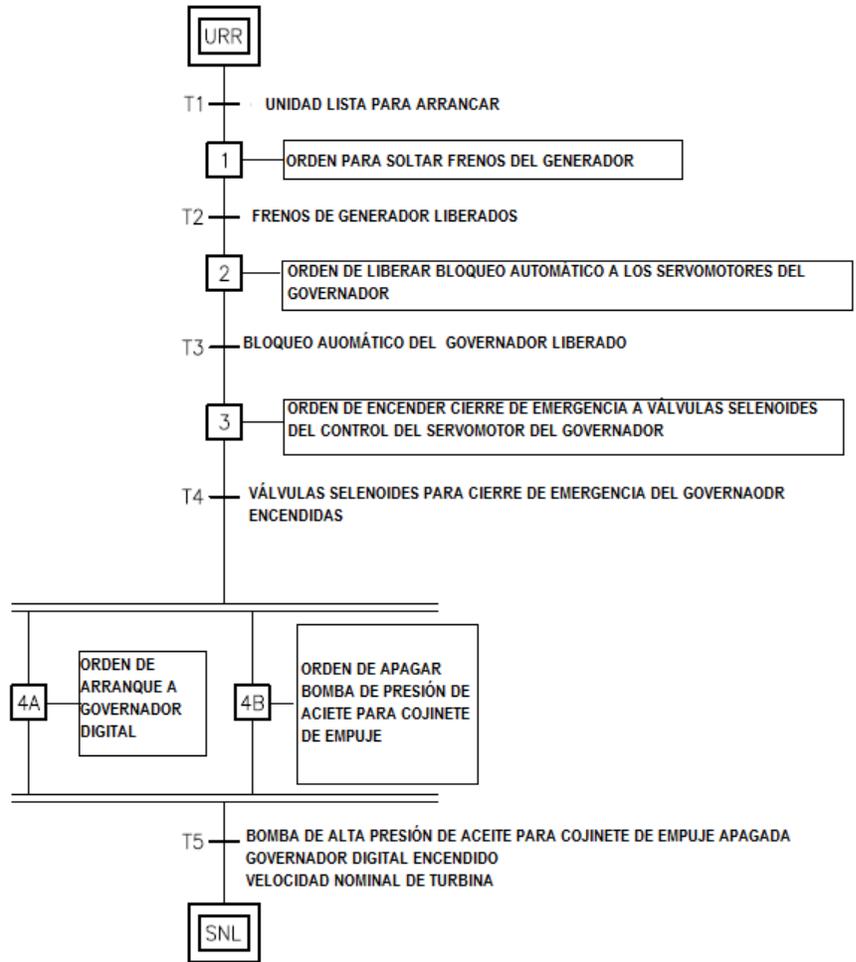


Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación y mantenimiento. p. 75.

### 5.2.2. **Secuencia de arranque de turbina**

- A. Liberar los frenos de la unidad
- B. Apertura del distribuidor
- C. El gobernador debe llevar la rotación de la máquina a la velocidad de sincronismo
- D. Cuando la turbina está girando a la velocidad de sincronismo da la señal para encender la excitación.

Figura 82. **Secuencia de arranque para la turbina**



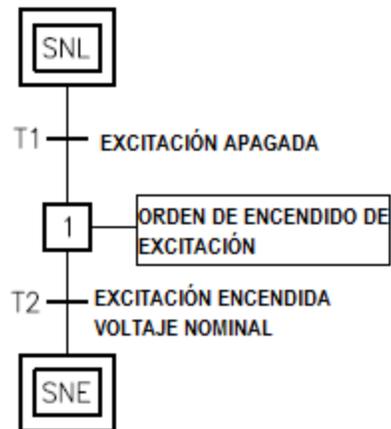
Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación y mantenimiento. p. 85.

### 5.2.3. **Secuencia de arranque del generador**

- A. Apagar el calentamiento de anti condensación o equipo de deshumidificación de aire.
- B. Constatar si hay salidas de aceite y agua disponibles.

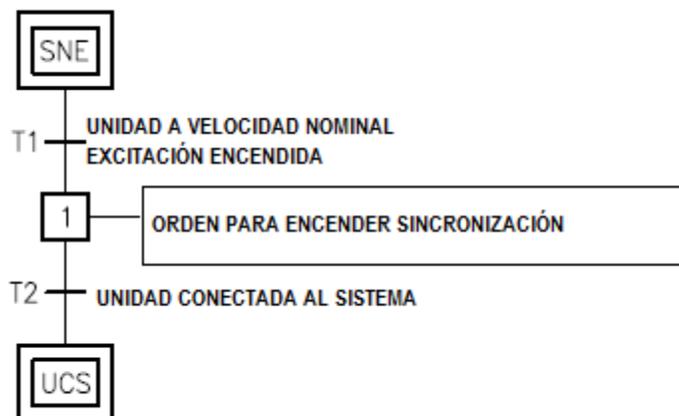
- C. Iniciar lentamente el encendido del generador, observando la suavidad del giro. Desconectar el generador en caso que se constate algún ruido o vibración anormal, determinando la causa durante la desaceleración.
- D. Desconectar el sistema hidráulico de lubricación forzada tan pronto como la máquina alcance cerca de 80 % de su rotación nominal. Al alcanzar la rotación nominal, observar las condiciones de giro, determinando las causas de eventuales anomalías: desalineación, desbalance, etc.
- E. Verificar las temperaturas en los cojinetes. Con las condiciones de giro mecánico satisfactorias, excitar lentamente el generador, verificando el ruido de la máquina. El eventual deterioro de las condiciones de giro indica la presencia de un defecto magnético, como por ejemplo, hueco de aire irregular o cortocircuito entre espirales en el enrollamiento de un polo.
- F. Con la máquina excitada y con las condiciones de giro satisfactorias, sincronizar el generador con el sistema y cargarlo. Verificar las condiciones de giro y el ruido.
- G. Recoger y registrar los valores de tensión, corriente, potencia y excitación. Mantener un control continuo sobre las temperaturas de los cojinetes, de las bobinas del estator, entrada y salida de aire y agua de refrigeración durante un período largo.
- H. Verificar la presión y la salida del aceite de lubricación de los cojinetes, corrigiéndolos en caso necesario. Observar las condiciones de giro cuando la máquina esté en su temperatura de operación. Verificar la operación de las escobillas.

Figura 83. **Secuencia de arranque excitación de la unidad**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación y mantenimiento. p. 88.

Figura 84. **Secuencia de sincronización de la unidad**



Fuente: VOITH SIEMENS. Manual de operación y mantenimiento. p. 89.

### 5.3. Puntos de carga del generador

Para sincronizar el generador al sistema nacional interconectado la condición previa esencial es que el interruptor de potencia esté cerrado.

- A. Después de realizar la maniobra de sincronización, la toma de carga deberá ocurrir moviendo el punto de carga dentro de la curva de capacidad de la unidad generadora.
- B. El movimiento de los ejes de las ordenadas =Potencia activa (sentido vertical) se obtiene por medio del desempeño en el regulador de velocidad, o sea, abriendo el distribuidor de la turbina; la posición del punto de carga en el diagrama de capacidad se mueve para arriba, e inversamente; si se disminuye la abertura del distribuidor de la turbina, la posición del punto de carga en el diagrama de capacidad se mueve para abajo.
- C. Nótese que la faja operacional del punto de carga es del lado positivo en el eje de las ordenadas, ya que abajo de “cero” sería la faja de motorización, en caso de máquinas reversibles. En esta condición la unidad estaría absorbiendo energía activa, lo que se monitorea e inhibe por medio de la protección de potencia inversa.
- D. Similarmente, el movimiento en el eje de las abscisas + potencia reactiva (sentido horizontal) se obtiene por medio de La actuación en el regulador de tensión, o sea, aumentando la corriente de excitación (corriente de campo), la posición del punto de carga en el diagrama de capacidad se mueve para la derecha, e inversamente, sise disminuye la corriente de excitación (corriente de campo), la posición del punto de carga en el diagrama de capacidad se mueve para la izquierda.

- E. Al trazar una recta entre el punto de carga y el origen de la curva de capacidad, punto “cero”, tendremos una recta que con el eje de las ordenadas (sentido vertical) forma el ángulo de carga  $\text{Cos}(\Phi)$ .
- F. La carga de un generador siempre se determina en MVA (mega volt amperes) y se le llama potencia aparente, la cual se obtiene a través de la ecuación del triángulo de Pitágoras.
- G. En la mayoría de las veces la definición del ángulo de carga,  $\text{Cos}(\Phi)$  de la unidad, se determina por medio del sistema de transmisión energía y el consumidor. Una pequeña alteración sería posible al alterarse el TAP del transformador elevador de la unidad.
- H. La curva de capacidad involucra todos los infinitos de los puntos de carga en que la unidad podrá operar dentro de sus características constructivas. Esto no quiere decir que la unidad no puede operar arriba, o sea, fuera de esta curva; si los limitadores así lo permiten, ella apenas operará fuera de su faja de temperaturas límites / estándares.
- I. El límite peligroso de la curva de capacidad para una unidad generadora es la línea de pérdida de sincronismo del lado izquierdo, para evitar que tal punto se sobre pasado existen dos protecciones, el limitador de subexcitación del regulador de tensión que tiende a crear un bloqueo, y una protección de retaguardia que desconectará el disyuntor de la unidad a través de la protección de pérdida de excitación.
- J. Para desconectar una unidad del sistema de transmisión de energía se deberá bajar la carga de la misma moviéndose el punto de carga para el punto “cero” de la curva de capacidad de la unidad generadora, y solamente después, abrir el disyuntor de la unidad.
- K. Después de abrir el interruptor, la unidad podrá detenerse o sincronizarse nuevamente, conforme programado.
- L. Todas las maniobras de sincronización, tomada o disminución de carga y generación o absorción de reactivos del sistema deberán realizarse

conforme a los procedimientos de planta, o el departamento responsable por el drenado de energía de la planta.

#### **5.4. Mantenimiento**

Mantenimientos e inspecciones cuidadosas permiten que cualesquiera defectos sean detectados y corregidos antes que los mismos puedan causar serios daños. De este modo, mantenimiento e inspecciones ayudan a preservar el valor de la máquina, así como a evitar interrupciones y aumentar la confianza y la disponibilidad de la máquina.

Las secuencias de mantenimiento e inspecciones siguientes cubren las etapas necesarias para la inspección de las partes mecánicas y eléctricas de la máquina. Desde que las condiciones sobre las cuales la máquina es sometida para trabajar puedan variar considerablemente, las secuencias de mantenimiento e inspección pueden apenas recomendar los intervalos que, a lo menos, una inspección debe ser realizada si las condiciones de operación fueron normales. Es recomendado que las partes accesibles sean inspeccionadas visualmente después de cerca de 500 horas de operación. Por otra parte, los intervalos de inspecciones dados en las secuencias de mantenimiento presupone un una operación sin disturbios. Si disturbios y condiciones no usuales de operación ocurren (sobrecarga, cortocircuito, sincronización incorrecta, disparo de la máquina, etc.) que sobrecarga la máquina, las inspecciones deben ser aplicadas inmediatamente.

Los sistemas de suministro deben ser mantenidos sobre supervisión continua. Lea regularmente los instrumentos suministrados para el control de temperatura, presión, índice de circulación, etc. Es recomendado, aparte de eso, que los elementos más importantes para una operación satisfactoria de la

máquina, como el desempeño de las escobillas de las máquinas de anillos deslizantes, elementos de sello, etc., sean inspeccionados visualmente en periodos cortos.

#### **5.4.1. Mantenimiento a partes mecánicas**

Las instrucciones siguientes especifican las inspecciones necesarias a ser realizadas en los componentes de la máquina, en los intervalos (A), (B), (C), como sigue:

- A. Primera inspección, después de 4 000 horas de operación o 1 000 funcionamientos, pero no más un año. Después de 16 000 horas de operación en funcionamiento continuo, pero no más de dos años.
- B. Las inspecciones subsecuentes, cada 4 000 horas de operación, pero no más de un año.
- C. Las inspecciones subsecuentes, cada 8 000 horas de operación, pero por lo menos cada dos años.

#### **5.4.2. Alineamiento de la máquina**

- A. Verifique el asentamiento de la fundición y que no haya grietas.
- B. Verifique la alienación del rotor y la tendencia del árbol a combarse;; compare con los valores en el “Protocolo de Dimensiones”.
- C. Realignar los cojinetes, si es necesario.
- D. Verifique la holgura de aire y el desplazamiento axial y compárelos con los valores en el “Protocolo de Dimensiones”. Reencuadre el estator, si es necesario.

### **5.4.3. Elementos de fijación de la máquina**

- A. Verifique la presión de la junta del núcleo del estator.
- B. Verifique la presión de la junta del núcleo del estator, particularmente, el ajuste y localización de los espaciadores de la junta. Corrija los espaciadores, si siendo necesario, reapriete los pernos de la junta.
- C. Verifique que las chavetas del cubo y corona del rotor, incluso los elementos de bloqueo, estén con ajuste apretado. Reapriete o coloque cuñas nuevas, si es necesario use elementos nuevos de bloqueo.

### **5.4.4. Inspección a sistemas de agua y aceite**

- A. Inspeccione el foso del estator y máquina para observar señales de daños incipientes. Si es necesario, localice el defecto y tome las medidas necesarias.
- B. Limpie los intercambiadores de calor. Determine los intervalos de limpieza, según el grado de contaminación. Inspeccione la protección anódica.
- C. Remplace y limpie los filtros del aire. Para los filtros de aceite, observe instrucciones de mantenimiento del proveedor.
- D. Limpie los filtros de aceite. Determine los intervalos de limpieza según el grado de contaminación.
- E. Verifique el funcionamiento correcto del sistema de suministro de aceite.
- F. Verifique el funcionamiento correcto de los instrumentos de control y dispositivos de contacto. Verifique la calibración. Verifique el cero de los manómetros.
- G. Limpie e inspeccione el aislamiento del cojinete y la cañería y conexión del termómetro, sustituya el aislamiento si fuese necesario. Determine los intervalos de inspección como sea requerido según el grado de

contaminación. Verifique la presión del aire de sello en las cámaras, donde son proveídas.

- H. Verifique el juego radial y axial y compárelos con los valores en el “Protocolo de Dimensiones”. Inspeccione las superficies de los cojinetes.

#### **5.4.5. Elementos móviles**

- A. Inspección visual de rodete, dependiendo la calidad del agua si no es muy abrasiva el rodete sufrirá poco desgaste.
- B. Inspección visual de álabes móviles, se deben inspeccionar los álabes y ajustarlos de ser necesario.
- C. Se debe verificar el estado de los sellos de la turbina.

#### **5.4.6. Mantenimiento al estator**

- A. Primera inspección después de 4 000 horas de operación o 1 000 de trabajo, pero no más de un año. Después s de 16 000 horas de operación, en el caso de funcionamiento continuo, pero no más dos años.
- B. Las inspecciones subsecuentes a cada 8 000 horas de operación (o 16 000 horas de operación, en el caso de funcionamiento continuo), pero por lo menos, cada dos años.
- C. Limpie los conductos de ventilación del devanado. Verifique las cuñas en las ranuras para el firme ajuste. Verifique los lazos en las cabezas de las bobinas. Verifique las condiciones del aislamiento del devanado, incluso los circuitos del anillo y conexiones de los terminales.
- D. Limpie los devanados del polo y los espacios entre ellos. Verifique algún daño eventual en el aislamiento del devanado y los cuadros aislantes de los polos.

- E. Verifique algún desplazamiento eventual del devanado y cortocircuitos entre espiras a tierra.
- F. Verifique todas las conexiones del polo y devanado amortiguador, para ver que estén limpias y firmes.
- G. Verifique los apoyos del devanado del polo, para un ajuste firme.
- H. Verifique la fijación de los circuitos de los anillos de conexión, devanados del estator, los conductores de los anillos colectores, barras terminales y de conexión, así como todos los elementos aislantes correspondientes, tornillos de fijación y elementos de bloqueo, para ver que estén limpios y firmes.
- I. Verifique la resistencia del aislamiento por medio de un Mega ohm metro. Mida la temperatura del devanado respectivo.
- J. Verifique el núcleo para el óxido de fricción y deformación. Verifique la tensión de los pernos de unión del núcleo y la sujeción del núcleo; reapriétese al valor de la torsión especificada, si necesario. Asegure que las placas de empuje están horizontales. Examine la costura de la soldadura en las tiras de fijación del núcleo del estator para asegurar que ellas están libres de grietas. Limpie los conductos de ventilación. Inspeccione la sujeción de la junta, sobre todo la estrechez y la posición correcta de los calzos; ajuste los calzos, si necesario. Inspeccione los pernos de la junta para la estrechez y reapriete, si necesario.

#### **5.4.7. Mantenimiento al rotor**

- A. Primera inspección después de 4 000 horas de operación o 1 000 operaciones, pero no después de un año. Después de 16 000 horas de operación en el caso de funcionamiento continuo, pero no después que dos años.

- B. Inspecciones subsecuentes cada 4 000 horas de operación, pero no después que un año.
- C. Inspecciones subsecuentes cada 8 000 horas de operación o 16 000 horas de operación en el caso de funcionamiento continuo, pero por lo menos cada dos años.
- D. Limpiar los devanados del polo y espacios intermediarios de ventilación. Examine el aislamiento para el desplazamiento y los devanados para cortocircuitos de la carcasa y entre vueltas, así como para el daño. Si hay cualquier sospecha de un cortocircuito entre vueltas, realice una prueba de cortocircuito entre vueltas y rectifique cualquier falla encontrada. Haga la medida y grabe los valores de resistencia del aislamiento. Verifique las conexiones del polo para la condición perfecta y estrechez y re-apriétese, si es necesario. Verifique los elementos de alivio de tensión radiales (si proporcionados) para la estrechez y, si necesario, afiance con nuevos elementos de traba.
- E. En el devanado amortiguador, verifique las conexiones para la condición perfecta y estrechez y reapriétese, si necesario. Examine los elementos de alivio de tensión radiales para la estrechez y re-apriétese, si necesario, usando nuevos elementos de traba.
- F. Verifique todos los pernos del acoplamiento y sus elementos de traba para la estrechez. Reemplace cualquier perno del acoplamiento y elementos de traba, si necesario.
- G. Verifique los porta escobillas y soportes para un ajuste firme y el disposición correcta. Verifique la abertura entre los porta escobillas y la superficie del anillo colector. Verifique la presión de las escobillas y reemplace el porta escobilla si es necesario.
- H. Verifique que los terminales de conexión de las escobillas, estén firmemente ajustados a los porta escobillas. Verifique que los porta

escobillas estén libres de defectos y puedan oscilar libremente en las bisagras.

- I. En los anillos colectores, verifique las superficies de contacto; ellas deben estar libres de arrugas o riscos y tener una superficie uniforme. Verifique los anillos por señales de calentamiento (decoloración), manchas. Verifique las ranuras del anillo y elimine cualquier rebaba.



## **6. GENERALIDADES DEL MERCADO ELÉCTRICO EN GUATEMALA**

El sistema eléctrico de Guatemala está compuesto por tres componentes: generación, oferta eléctrica, transporte y distribución eléctrica-, transporte, y distribución.

El sistema de generación está conformado por: centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y centrales geotérmicas. La actividad de generación no está sujeta a autorización del Ministerio de Energía y Minas, salvo aquellas que hacen uso de bienes de dominio público.

El sistema de transporte está conformado por el sistema principal y el sistema secundario. Estando el sistema principal compartido por los Generadores y las interconexiones a otros países, y operando básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138, y 69 kV. El sistema secundario es el medio de interconexión de un generador a la red principal. El sistema de distribución está integrado por la infraestructura de distribución, línea, subestaciones y las redes de distribución que opera en tensiones menores a 34,5 kV. Las principales empresas distribuidoras, coordinadas por la Asociación del Mercado Mayorista, son:

- Empresa Eléctrica de Guatemala. Presta el servicio en el área central del país.
- Distribuidora de Electricidad de Occidente. Presta el servicio en los departamentos del occidente.

- Distribuidora de Electricidad de Oriente. Presta el servicio en los departamentos del oriente.
- Empresas eléctricas municipales.

El marco regulatorio del sector eléctrico Guatemalteco se basa en un modelo de mercado competitivo a nivel de generación y comercialización, en el cual se ha privilegiado el libre acceso y la existencia de un sistema de precios que refleja equilibrios libres de oferta y demanda, debido a que en estos segmentos pueden darse condiciones efectivas de competencia. En aquellos segmentos en que la presencia de economías de escala da lugar a la existencia de monopolios naturales, los precios son fijados por el ente regulador sobre la base de costos económicos eficientes.

La generación se desarrolla en un ambiente libre y competitivo constituido por un mercado de oportunidad basado en un despacho a costo marginal de corto plazo, y por un mercado de contratos en donde los agentes y grandes usuarios pactan libremente las condiciones de sus contratos en cuanto a plazo, cantidades y precio. La transmisión y la distribución son actividades reguladas. El marco legal con el cual se rige el subsector eléctrico se basa en lo siguiente:

- Constitución Política de la República
- Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96
- Reglamento de La Ley General de Electricidad, Acuerdo Gubernativo No. 256-97 y sus reformas.
- Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, Acuerdo Gubernativo No. 299-98 y sus reformas.
- Normas de Coordinación Comercial y Operativa del Administrador del Mercado Mayorista.

La Ley General de Electricidad, es la ley fundamental en materia de electricidad y se sustenta a través de los principios que a continuación se detallan:

- Es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello autorización o condición previa por parte del Estado, más que las reconocidas por la Constitución Política de la República de Guatemala y las leyes del país. No obstante, para utilizar con estos fines los que sean bienes del Estado, se requerirá de la respectiva autorización del ministerio, cuando la potencia de la central exceda de 5 MW.
- Es libre el transporte de electricidad, cuando para ello no sea necesario utilizar bienes de dominio público.
- El transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad, estarán sujetos a autorización.
- Son libres los precios por la prestación del servicio de electricidad, con la excepción de los servicios de transporte y distribución, sujetos a autorización. Las transferencias de energía entre generadores, comercializadores, importadores y exportadores que resulten de la operación del Mercado Mayorista, estarán sujetas a regulación en los términos de la ley.

El mercado de energía eléctrica está constituido por el Mercado Regulado y el Mercado Mayorista. El Mercado Regulado está integrado de la siguiente manera:

- Por el lado de la demanda: todos aquellos usuarios con demanda de potencia menor a 100 kW.

- Por el lado de la oferta: distribuidoras autorizadas dentro de su zona de cobertura.

El Mercado Mayorista tiene las siguientes características:

- Generadores con potencia mayor a 5 MW.
- Distribuidores con 15 000 usuarios como mínimo.
- Transportistas que tengan 10 MW como mínimo de capacidad de transporte.
- Comercializadores que compren o vendan bloques de energía asociados a una oferta firme de por lo menos 2 MW.
- Grandes usuarios con demanda máxima de potencia por arriba de 100 kW.

Las operaciones de compra y venta del Mercado Mayorista se realizan bajo las Normas de Coordinación Comercial, a través de:

- El mercado de oportunidad o mercado spot.
- El mercado a término. Los grandes usuarios pactan los plazos, las cantidades y precios de energía.
- El mercado de transacciones de desvíos de potencias diarios y mensuales.

### **6.1. Coordinación de la operación**

Es función del administrador del mercado mayorista realizar el despacho o programación de la operación, la coordinación de la operación del sistema nacional interconectado, dentro de los requerimientos de calidad de servicio y

seguridad, el posdespacho y la administración de las transacciones comerciales del mercado mayorista.

El reglamento del administrador del mercado mayorista en el artículo 62, operación en tiempo real, dice que el administrador del mercado mayorista realizará la coordinación de la operación en el tiempo real del sistema nacional interconectado y de las interconexiones internacionales, e integra los servicios complementarios necesarios, con el objetivo de mantener el balance entre generación y demanda y preservar la seguridad y continuidad del servicio. Esta tarea será realizada por el centro de despacho de carga, de acuerdo a la condición en que se encuentre el sistema, ya sea condición de operación normal o condición de operación de emergencia, teniendo autoridad para desconectar carga y emitir órdenes de arranque y parada de unidades generadoras.

Basado en las normas de coordinación establecidas por el AMM específica que es responsabilidades de los generadores cumplir con:

- A. Mantener sus instalaciones de manera de poder cumplir con los contratos a término.
- B. Declarar cualquier modificación en su capacidad operativa respecto de los valores registrados; según las normas de coordinación.
- C. Coordinar el mantenimiento con el AMM.
- D. Seguir las instrucciones del AMM respecto de arranques, paradas y modificaciones en la carga según los requerimientos del SIN.
- E. Mantener el gobernador y el sistema de excitación de manera que cada unidad pueda brindar los servicios de control de frecuencia y tensión, dentro de la capacidad declarada.

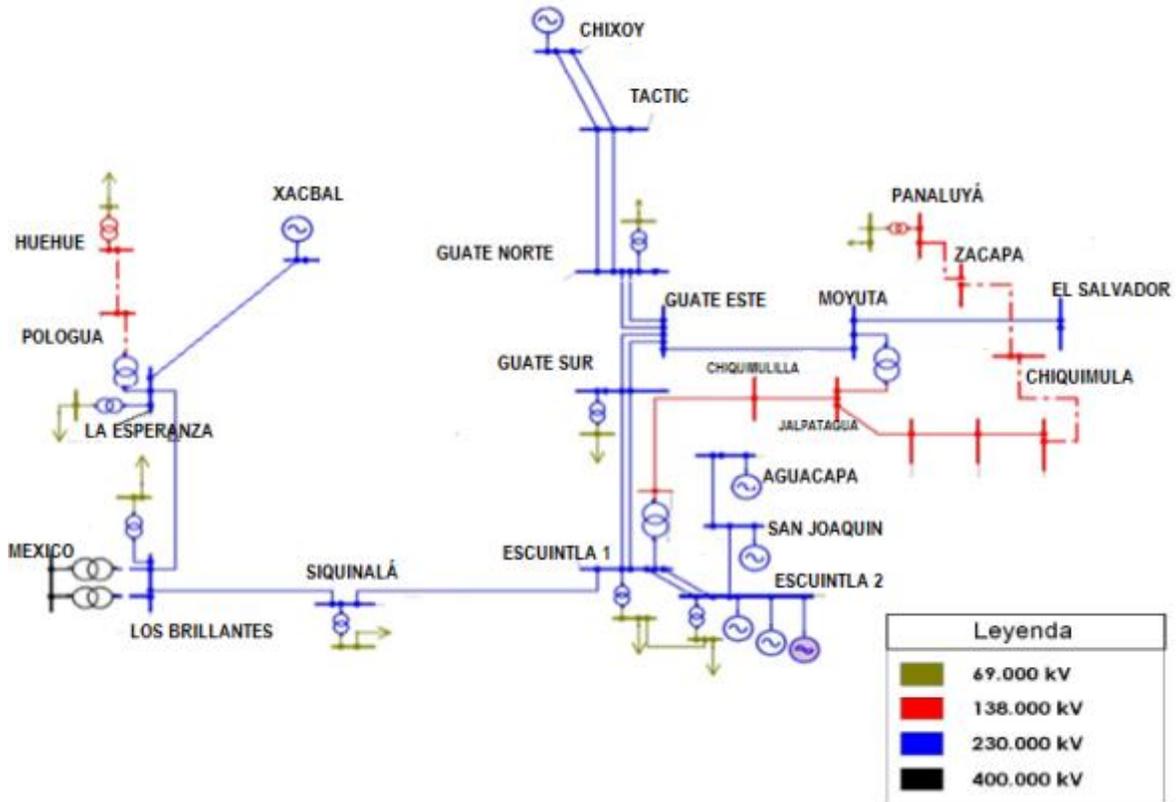
- F. Operar sus unidades generadoras de acuerdo a la curva de capacidad declarada al AMM.
- G. Para las unidades con control automático de generación, seguir las instrucciones del AMM relativas a la inclusión o no de aquél.
- H. Para las unidades con capacidad de arranque en negro, mantener esa posibilidad y efectuar todos los ensayos que periódicamente requiera el AMM.
- I. Para las unidades previstas para operación en isla, seguir las instrucciones del AMM para el restablecimiento del SNI luego de un apagón.
- J. Evitar la desconexión del SNI durante perturbaciones y emergencias, salvo que esa situación pudiera poner en riesgo las unidades generadoras.
- K. Proveer desconexión automática de cargas no esenciales de la central por baja frecuencia.
- L. Llevar un registro o bitácora de los eventos y acontecimientos relacionados con la operación de sus equipos e instalaciones.
- M. Registrar como mínimo a las horas en punto la potencia real y potencia reactiva entregada a la red por cada uno de sus generadores. En el período comprendido de las 18:00 a las 21:00 horas, estos registros se harán cada 15 minutos; también se hará un registro a las 11:30 horas.; esta información será transmitida al Centro de Despacho de Carga – CDC- a requerimiento de este.

## **6.2. Beneficios que aportará hidroeléctrica Xacbal en el sistema nacional interconectado**

La central hidroeléctrica Xacbal se ubica en el municipio de San Gaspar Chajul en el departamento del Quiché. Tiene una potencia instalada de 94 MW y se estima una generación anual de 486 GWh. Tiene un embalse de regulación diario con una capacidad máxima de 700 000 metros cúbicos; tiene un desarenador y un canal de conducción abierto hasta dicho embalse; así mismo el proyecto tiene un tanque de oscilación con 12,5 metros de diámetro y 54 metros de altura, un túnel de conducción de 4,65 metros de diámetro y 4,7 kilómetros de longitud, tubería de presión con 3,55 metros de diámetro y 615 metros de longitud, casa de máquinas 2x47 MW Francis vertical, subestación de 13,8k V a 230 kV y línea de transmisión de 120 kilómetros a 230kV desde subestación Xacbal hasta subestación La Esperanza ubicada en el departamento de Quetzaltenango.

Para generar la energía se utiliza el caudal del río Xacbal. Se espera que con la operación de esta central hidroeléctrica se abastezca electricidad a más de 405 mil casas. El proyecto ha estado operando desde junio del 2010, Hidro Xacbal es una planta de generación de energía cuyo propósito es la generación por medio de la utilización de recursos renovables, así como la contribución para el cubrimiento de la creciente demanda del sistema eléctrico nacional.

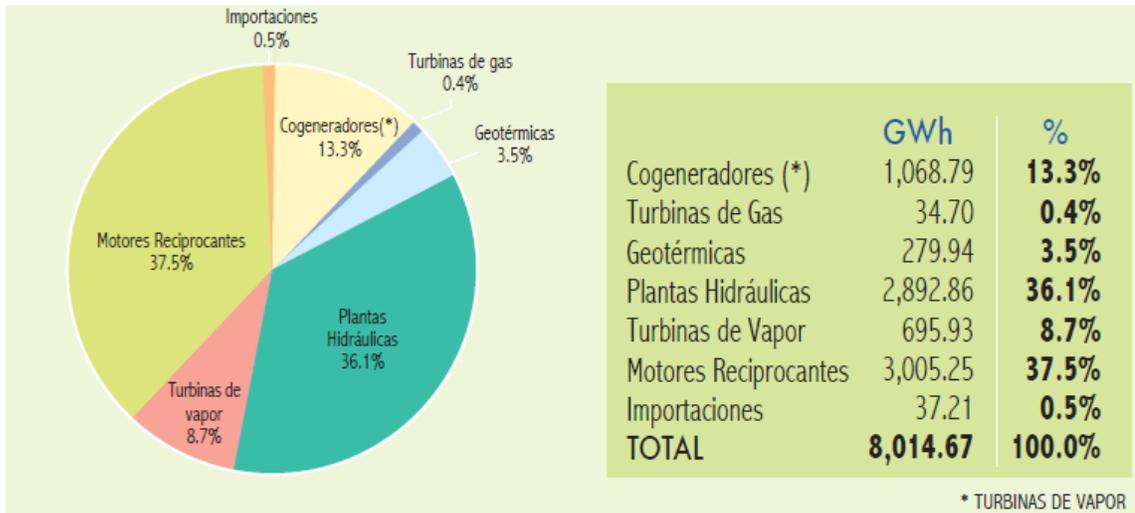
Figura 85. Diagrama unifilar sistema nacional interconectado 2010



Fuente: CNEE. Presentación PET, 2009. p. 8.

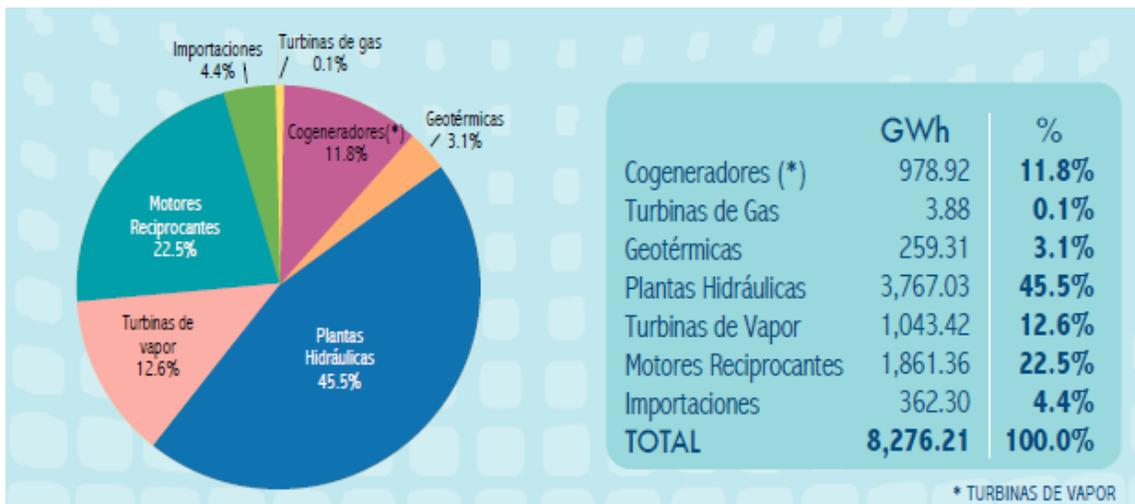
En las figuras 85 y 86 Se muestran las gráficas por tecnología en la generación de energía para Guatemala, se puede apreciar que para el 2009 la energía aportada por las centrales hidroeléctricas fue de un 36,1 % y para el 2010 fue de 45,5 %, dando un crecimiento de 9,4 % a los cuales hidroeléctrica Xacbal aportó un aproximado de 6,87 % al total de GWh (giga watts hora) generados.

Figura 86. **Composición por tecnología en la producción de energía del 2009**



Fuente: AMM. Informe estadístico, 2009. p. 2.

Figura 87. **Composición por tecnología en la producción de energía del 2010**



Fuente: AMM. Informe estadístico, 2010. p. 2.



## CONCLUSIONES

1. Es importante contratar personal calificado para ejecutar las actividades de montaje, siguiendo las instrucciones de supervisores e ingenieros en planta, que basados en su experiencia puedan dar la interpretación correcta a instrucciones y planos de armado de la máquina diseñados por él fabricante, para garantizar el óptimo funcionamiento de la unidad generadora.
2. Las partes fijas de la máquina que sirven de soporte y anclaje deben estar alineadas y niveladas correctamente, para evitar vibraciones y el mal funcionamiento de la unidad generadora.
3. Para alargar la vida útil de la máquina y mantener una producción de energía eléctrica constante deben realizarse los mantenimientos que el fabricante indica.
4. Si las aguas del río crecen y la calidad del agua no es adecuada para que pase por la turbina, se debe parar la máquina, porque esto acorta la vida útil de la turbina y puede ocasionarle daños severos.
5. Para el funcionamiento de la planta el personal técnico y de operación, tiene que ser capacitado previamente para aprender a operar la unidad generadora y evitar posibles fallas por mala operación.

6. Los operadores de turno en la sala de control tienen que tener conocimiento del reglamento del AMM para no incurrir en multas por mala operación o desconocimiento del funcionamiento del sistema interconectado nacional.

## RECOMENDACIONES

1. Establecer los procedimientos de arranque, operación y paro de la unidad generadora cuando funciona en modo manual.
2. Es importante mantener el sistema de lubricación y enfriamiento en condiciones óptimas de operación para evitar problemas severos en los cojinetes de la máquina.
3. En el sistema de control de la máquina mantener un monitoreo de temperaturas en las partes críticas de funcionamiento.
4. Se debe instalar un sistema con protecciones para que la unidad generadora tenga disparos automáticos al llegar a sus límites peligrosos de operación.
5. Es preferible operar la unidad en modo automático en todas las secuencias de operación para evitar posibles errores de los operadores.
6. Los manuales de operación y de funcionamiento deben estar en lugares de fácil acceso para el personal técnico de la planta.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. *Informe estadístico 2009*. Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista, 2009. 31 p.
2. \_\_\_\_\_. *Informe estadístico 2010*. Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista, 2009. 32 p.
3. ARAYA, Mauricio; COGHI, Adrian; PORRAS, Edgardo; ROJAS, Eric. *Metodología para la evaluación de sistemas de regulación y protecciones para centrales de generación*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2008. 225 p.
4. GE HYDRO INEPAR, *Manual de montaje y operación del generador*. Brasil: GE Hydro Inepar, 2003. 107 p.
5. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE Std 43-2000: Recommended practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. 27 p.
6. \_\_\_\_\_. *IEEE Std 95-2000: Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. 57 p.

7. VANFRETTI, Luigi. *Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 545 p.
8. VOITH SIEMENS. *Manual de montaje de turbina*, Brasil: Voith Siemens, 2009. 120 p.
9. \_\_\_\_\_. *Manual de operación y mantenimiento del generador*. Brasil: Voith Siemens, 2009. 321 p.
10. \_\_\_\_\_. *Sistema de excitación memoria de cálculos*. Brasil: Voith Siemens, 2009. 85 p.