



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

**MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO**

**Roberto Barrios Rosales**

Asesorado por el Ing. Lyndon Emery Pichiyá Galindo

Guatemala, abril de 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ROBERTO BARRIOS ROSALES**

ASESORADO POR EL ING. LYNDON EMERY PICHYÁ GALINDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

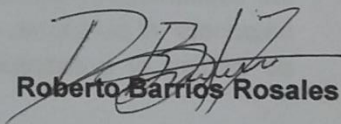


## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento a los preceptos que establecen las leyes de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de graduación titulado:

**MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de marzo de 2015.

  
Roberto Barrios Rosales







Guatemala 23 de octubre del 2015

Ingeniero Francisco González  
Coordinador de Área Eléctrica de EPS  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Ciudad Universitaria, Guatemala

Reciba usted un cordial saludo de Ingenio Palo Gordo, esperando que todas sus actividades sean exitosas.

Hago de su conocimiento que el estudiante Roberto Barrios Rosales, de la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, quien se identifica con carné universitario 2000-10807, realizó su EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO en el departamento de cogeneración; cumpliendo con las actividades que le fueron asignadas desde el inicio del EPS que fue realizado del 11 de marzo del 2015 al 23 de octubre del 2015. Así mismo el estudiante entregó a esta dependencia el estudio técnico:

- *MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO*

Dichos proyecto contiene, planos de la tierra física, cálculos matemáticos del cableado de alimentación y del diseño de la tierra física, y detalle de la ejecución del proyecto, así como el resumen de las pruebas realizadas a la unidad de generación.

Por lo anterior extendiendo el presente FINIQUITO. Agradeciendo su colaboración y apoyo a esta entidad. Sin otro particular me suscribo.

Atentamente,

*(f) Lyndon Emery Pichiyá Galindo*  
*Coordinador del departamento de electricidad de cogeneración*  
*Ingenio Palo Gordo, S.A.*

EMERY PICHİYÁ GALINDO  
ING. ELECTRICISTA  
COLEGIADO No. 8629





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 18 de noviembre de 2015.  
Ref.EPS.DOC.778.11.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Rodríguez Serrano.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Roberto Barrios Rosales** de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con carné No. **200010807**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO"**.

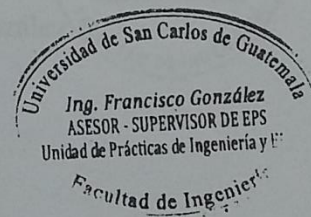
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Francisco González  
Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Eléctrica



c.c. Archivo  
FG/ra



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 74.2015.  
Guatemala, 3 de NOVIEMBRE 2015.

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

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA  
UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR  
MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO, del  
estudiante Roberto Barrios Rosales, que cumple con los requisitos  
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
Cordialmente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco González  
Coordinador Área Potencia



S/O





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



CULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala 18 de noviembre de 2015.  
Ref.EPS.D.616.11.15.

Ing. Francisco Javier González  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero González.

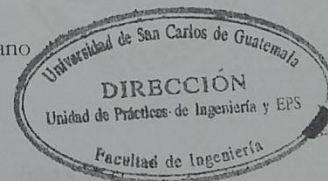
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Roberto Barrios Rosales**, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ing. Francisco González.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvia José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS



SJRS/ra





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 74. 2015.

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; ROBERTO BARRIOS ROSALES, Titulado: MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 23 DE NOVIEMBRE 2015.



Universidad de San Carlos  
De Guatemala

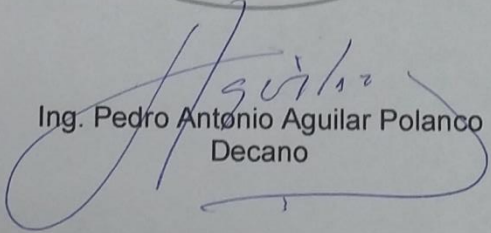


Facultad de Ingeniería  
Decanato

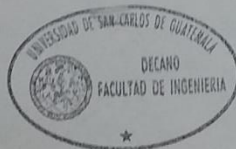
Ref. DTG.D.203.2016

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 Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 46 MW POR MEDIO DE BIOMASA EN EL INGENIO PALO GORDO**, presentado por el estudiante universitario: **Roberto Barrios Rosales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, abril de 2016



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Carlos Barrios y Reyna Rosales de Barrios, por su amor, apoyo y confianza que han depositado en mí.

### **Mi esposa**

Ana Alicia Velasco, por su amor, apoyo y comprensión en toda mi etapa de estudios.

### **Mis hijos**

Pablo Roberto y José Alejandro, por ser dos ángeles en mi vida.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por ser una guía en mi camino y las bendiciones derramadas en mí.
<b>Mis hermanos</b>	Por sus consejos, ayuda y compañía durante mi carrera.
<b>Mis compañeros y amigos</b>	Quienes me brindaron su ayuda y amistad.
<b>Ing. Erick Castillo</b>	Por el apoyo que me brindó para que pudiera desarrollar este trabajo de graduación.
<b>Ing. Emery Pichiyá</b>	Por su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo.
<b>Ingenio Palo Gordo</b>	Por su apoyo al permitirme elaborar este trabajo de graduación y brindarme la información relacionada con el proyecto.





## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES DEL INGENIO PALO GORDO, S. A. ....	1
1.1. Historia de la empresa.....	1
1.2. Actividades de la empresa.....	2
1.3. Estructura organizacional .....	2
1.4. Ubicación.....	3
2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS TURBOGENERADORES. ....	5
2.1. Generalidades de un turbogenerador.....	5
2.2. Descripción general de sus componentes. ....	6
2.2.1. La turbina de vapor.....	6
2.2.2. Partes de la turbina de vapor.....	8
2.2.2.1. El rotor de la turbina .....	8
2.2.2.2. La carcasa .....	9
2.2.2.3. Alabes.....	9
2.2.2.4. Válvula de regulación .....	10
2.2.2.5. Cojinetes de apoyo, de bancada o radiales .....	10
2.2.2.6. Cojinete de empuje o axial .....	10

2.2.2.7.	Sistema de lubricación .....	11
2.2.2.7.1.	Bomba mecánica principal.....	11
2.2.2.7.2.	Bomba auxiliar .....	11
2.2.2.7.3.	Bomba de emergencia .....	12
2.2.2.8.	Sistema de refrigeración de aceite .....	12
2.2.2.9.	Sistema de aceite de control .....	12
2.2.2.10.	Sistema de sellado de vapor .....	13
2.2.2.11.	Virador.....	13
2.2.2.12.	Compensador.....	13
2.3.	El generador síncrono.....	14
2.3.1.	Conexión de generadores a un sistema de potencia.....	16
2.3.1.1.	Conexión directa. ....	16
2.3.1.2.	Conexión unitaria .....	17
2.3.2.	Modelo de corto circuito del generador síncrono.....	17
2.3.2.1.	Secuencia positiva ( $X_1$ ).....	18
2.3.2.2.	Secuencia negativa ( $X_2$ ) .....	19
2.3.2.3.	Secuencia cero ( $X_0$ ).....	20
2.3.3.	Decaimiento de la corriente de falla del generador.....	21
2.3.3.1.	Período subtransitorio .....	22
2.3.3.2.	Período transitorio .....	23
2.3.3.3.	Período de estado estable.....	23
2.4.	Prácticas de puesta a tierra del generador.....	25
2.4.1.	Puesta a tierra de baja impedancia .....	25
2.4.2.	Puesta a tierra de alta impedancia .....	26
2.5.	Normas para la instalación de generadores.....	27

3.	MONTAJE DEL TURBOGENERADOR DE 46 MW. ....	29
3.1.	Diseño y cálculo para la puesta a tierra .....	30
3.1.1.	Premisas adoptadas .....	31
3.1.2.	Descripción del método de cálculo .....	31
3.1.3.	Desarrollo del cálculo .....	34
3.1.3.1.	Cálculo del conductor de la malla .....	34
3.1.3.2.	Determinación de los coeficientes km, ki y ks .....	36
3.2.	Descripción del montaje de la unidad de generación .....	42
3.2.1.	Instrumentos de montaje de la unidad de generación .....	42
3.2.1.1.	Grúa puente o viajera eléctrica .....	42
3.2.1.2.	Grúa automóvil hidráulica o motogrúa .....	43
3.2.2.	Montaje del turbogenerador de 46 MW .....	44
3.2.3.	Montaje del tanque de condensado .....	44
3.2.4.	Montaje de turbina .....	47
3.2.5.	Montaje del generador .....	49
3.3.	Alineamiento de turbina y generador .....	51
3.4.	Cálculo del cableado de salida del generador .....	52
3.5.	Descripción de los paneles de control a instalar .....	56
3.5.1.	Panel de control de la turbina .....	57
3.5.2.	Panel de control del generador .....	65
4.	PROCEDIMIENTO PARA ARRANQUE Y APAGADO DEL TURBOGENERADOR .....	69
4.1.	Limpieza del aceite de la turbina .....	69
4.2.	Limpieza de la tubería principal de vapor. ....	70
4.3.	Rotación de la máquina, arranque y carga de la turbina .....	72

4.4.	Procedimiento de arranque de la turbina .....	74
4.5.	Procedimiento de apagado de la turbina.....	76
5.	PUESTA EN OPERACIÓN .....	79
5.1.	Prueba de sobrevelocidad.....	79
5.2.	Prueba por baja presión de aceite .....	81
5.3.	Prueba de cortocircuito .....	81
5.4.	Prueba de fase a tierra.....	82
5.5.	Prueba de circuito abierto .....	82
5.6.	Prueba de sobrevoltaje .....	82
5.7.	Prueba de bajo voltaje.....	83
5.8.	Prueba de sobrefrecuencia .....	83
5.9.	Prueba de baja frecuencia .....	84
5.10.	Prueba de sincronismo.....	84
5.11.	Prueba de carga a diferentes porcentajes.....	85
5.12.	Prueba de rechazo de carga .....	85
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES .....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	ANEXOS.....	93

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Organigrama .....	3
2. Central térmica ciclo de vapor .....	5
3. Ilustración de una máquina simple.....	14
4. Tipos de rotores de generadores .....	15
5. Tipos de conexión .....	16
6. Secuencia positiva. ....	19
7. Secuencia negativa .....	20
8. Secuencia cero .....	21
9. Tipos de fallas .....	22
10. Corrientes de corto circuito del generador. ....	23
11. Corriente de falla en terminales de generador .....	24
12. Puesta a tierra de baja impedancia.....	26
13. Puesta a tierra de alta impedancia .....	26
14. Factor de reflexión K .....	35
15. Diseño de la red de tierra .....	41
16. Grúa viajera eléctrica. ....	43
17. Grúa automóvil hidráulica.....	44
18. Tanque de condensado montado sobre estructura provisional.....	45
19. Tanque de condensado siendo arrastrado para su instalación.....	46
20. Tanque de condensado instalado en el punto.....	46
21. Balancín .....	47
22. Grúas puente en paralelo.....	48
23. Montaje de turbina.....	48

24.	Montaje del generador .....	50
25.	Capacidad del cable conductor instalado en el proyecto. ....	56
26.	Pantalla de inicio del panel de control de la turbina .....	57
27.	Pantalla de medición del sistema de vapor para la turbina.....	58
28.	Pantalla de medición del sistema de aceite en la turbina .....	59
29.	Pantalla de medición de los cojinetes o chumaceras.....	60
30.	Pantalla de inicio de arranque de turbina.....	61
31.	Pantalla de arranque de la turbina. ....	61
32.	Pantalla de control del gobernador de la turbina.....	62
33.	Pantalla de control de extracción y admisión del tubo. ....	63
34.	Pantalla de sistema de condensado de la turbina .....	64
35.	Tablero de control Woodward 505. ....	65
36.	Tablero de control del generador. ....	66
37.	Instrumentos de medición del panel de protección .....	67
38.	Instrumentos de medición del panel de excitación y sincronismo del generador. ....	68
39.	Tubería provisional para soplado.....	71
40.	Testigo de aluminio después del primer soplado.....	72

## **TABLAS**

I.	Especificación de datos de la turbina.....	29
II.	Especificación de datos del generador. ....	30
III.	Tabla general de las capacidades de los conductores de cobre. ....	54
IV.	Factores de corrección por temperatura ambiente. ....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Amp</b>	Amperaje o amperios
<b>B<sub>m</sub></b>	Ancho de malla
<b>A</b>	Área
<b>C</b>	Calor específico
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>Km</b>	Coeficiente de malla
<b>K</b>	Coeficiente de reflexión
<b>Sm</b>	Conductor de malla
<b>CA</b>	Corriente alterna
<b>I<sub>conductor</sub></b>	Corriente de conductor
<b>I<sub>s</sub></b>	Corriente de cortocircuito
<b>I<sub>m</sub></b>	Corriente de malla
<b>CD</b>	Corriente directa
<b>I<sub>nominal</sub></b>	Corriente nominal
<b>T''<sub>d</sub></b>	Decremento del tiempo en periodo subtransitorio
<b>T'<sub>d</sub></b>	Decremento del tiempo en periodo transitorio
<b>d<sub>c</sub></b>	Diámetro de conductor
<b>Ø<sub>c</sub></b>	Diámetro de conductor de malla
<b>d<sub>v</sub></b>	Diámetro de varilla
<b>F<sub>p</sub></b>	Factor de potencia
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>hs</b>	Grueso de la capa superficial

<b>Hz</b>	Hertz
<b>kV</b>	Kilo volt
<b>kVA</b>	Kilo voltamperio
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Lv</b>	Largo de la varilla
<b>Lc</b>	Largo del conductor
<b>A<sub>m</sub></b>	Longitud de malla
<b>MW</b>	Mega vatio
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mm<sup>3</sup></b>	Milímetro cúbico
<b>n</b>	Número de conductores
<b>Ω</b>	Ohmios
<b>g</b>	Peso específico del cobre
<b>Psi</b>	Pies sobre pulgada cuadrada
<b>% caída</b>	Porcentaje de caída de voltaje
<b>Em</b>	Potencial de contacto
<b>Es</b>	Potencial de paso
<b>h</b>	Profundidad de implantación
<b>PAT</b>	Puesta a tierra
<b>X<sub>d</sub></b>	Reactancia del generador
<b>X''<sub>d</sub></b>	Reactancia subtransitoria del generador
<b>X'<sub>d</sub></b>	Reactancia transitoria del generador
<b>AVR</b>	Regulador de voltaje y amperaje
<b>R<sub>me</sub></b>	Resistencia entre los conductores y los electrodos
<b>R<sub>m</sub></b>	Resistividad de la suma de todos los conductores
<b>R<sub>e</sub></b>	Resistividad de la suma de todos los electrodos
<b>V</b>	Voltaje



## GLOSARIO

<b>Alabe</b>	Elemento de una turbina de reacción y tiene forma de gota doblada.
<b>Armónica</b>	Deformaciones que sufre la onda de tensión.
<b>Bagazo</b>	La fibra que se obtiene después de haber pasado la caña por los molinos.
<b>Campo magnético</b>	Región del espacio donde se ponen de manifiesto los fenómenos magnéticos.
<b>Estator</b>	Parte fija del motor o generador para producir el campo giratorio.
<b>Frecuencia</b>	Ciclos por segundo de una onda periódica.
<b>Protección</b>	Sistema para evitar el daño severo de equipos.
<b>Rotor</b>	Parte móvil de un generador que produce un campo magnético.
<b>Soplado</b>	Proceso de limpieza de la tubería de vapor que va hacia la turbina.

<b>Tamiz</b>	Sirve para limpiar el vapor y está instalado en la entrada de vapor de la turbina.
<b>Testigo</b>	Lámina de referencia para hacer una evaluación de corrosión, erosión e impactos, entre otros.
<b>Tobera</b>	Sección por donde se inyecta el vapor que sirve para la expansión del mismo, aumentando su velocidad.
<b>Turbina</b>	Motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía del agua, gas o vapor.

## RESUMEN

En Guatemala existen industrias que generan energía eléctrica utilizando combustibles líquidos derivados del petróleo o combustibles sólidos, como el carbón.

Recientemente algunos ingenios azucareros aprovechan el bagazo de la caña para alimentar la caldera y generar vapor, el cual hace mover las turbinas de escape acopladas a generadores eléctricos.

En ese orden de ideas, el Ingenio Palo Gordo realizó el montaje de una planta de cogeneración de energía eléctrica, para lo cual integró un equipo de trabajo, que a pesar de estar dirigido por profesionales, desafortunadamente no contaba con personal técnico con la experiencia suficiente en esta labor, debido a que son procedimientos nuevos y desconocidos en el medio, por lo que las fábricas a las que se les compró la turbina y el generador, enviaron personal técnico capacitado para su montaje y validar de los parámetros de los equipos de protección, así mismo, para la realización de las pruebas necesarias, a efecto de garantizar su buen funcionamiento.

El presente trabajo de graduación recopila esta experiencia y resume toda la labor realizada por el equipo de trabajo, especialmente por el personal técnico que instaló y realizó las pruebas necesarias para garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos, por lo que pretende constituirse en una guía para el diseño, el montaje, la realización de pruebas y las consideraciones necesarias para arrancar una unidad de generación de este tipo.



# OBJETIVOS

## General

Sistematizar la experiencia del montaje y puesta en marcha de una unidad de generación eléctrica de 46 MW alimentado con biomasa (bagazo de caña) en el Ingenio Palo Gordo, San Antonio Suchitepéquez, Suchitepéquez.

## Específicos

1. Caracterizar de manera general los principales componentes de un turbogenerador.
2. Analizar las especificaciones técnicas de diseño y cálculo del sistema de generación implementado.
3. Dar a conocer cada uno de los procedimientos realizados para el montaje del sistema de generación.
4. Describir a detalle el procedimiento de arranque y apagado del turbogenerador
5. Presentar el procedimiento de realización y los resultados obtenidos en las diferentes pruebas previas a la puesta en operación del sistema, según las especificaciones de fabricación de los equipos.



## INTRODUCCIÓN

Los turbogeneradores son equipos que se utilizan cada vez más en la industria azucarera, dado que el uso del bagazo, residual del proceso fabril, en la actualidad está siendo utilizado en la alimentación de los mismos, dando muestras de satisfacer todas las demandas de mayor capacidad, velocidad y confiabilidad.

El capítulo 1 presenta una reseña histórica de la empresa, sus antecedentes, las actividades a las que se dedica, su estructura organizacional y su ubicación.

La caracterización de las unidades de generación, sus tipos y las partes importantes de que constan las turbinas y los generadores se presentan en el capítulo 2.

El capítulo 3 describe el cálculo y diseño de la red de tierras, los equipos e instrumentos utilizados para el montaje de la unidad de generación, los paneles a instalar y el cálculo del cableado de la alimentación.

El capítulo 4 hace mención del procedimiento que se realiza para poder arrancar y apagar la turbina, la limpieza del aceite de la turbina, los soplados y la rotación de la máquina para el arranque.

Las pruebas realizadas para la puesta en operación de la unidad de generación son descritas en el capítulo 5.





# **1. ANTECEDENTES DEL INGENIO PALO GORDO, S. A.**

## **1.1. Historia de la empresa**

Palo Gordo originalmente era una hacienda de 17 caballerías ubicada en Guatemala, Centro América, cerca del municipio de San Antonio, Suchitepéquez. Fue adquirido en 1929 por la Central American Plantations Corporation (CAPCO). La que comenzó a cultivar caña de azúcar en Palo Gordo, instalando un ingenio para moler mil toneladas de caña diaria, e inició operaciones en 1930.

Fue adquirido por el Gobierno de Guatemala y estuvo bajo la administración del Departamento de Fincas Rústicas Nacionales e Intervenidas. En la cosecha de 1961/62 molió 20 000 toneladas de caña propia y 162 957 toneladas de particulares, habiendo producido 342 820 quintales de azúcar de diferentes clases, con un rendimiento de 186 libras por tonelada de caña.

El 12 de julio de 1962, el Crédito Hipotecario Nacional lo puso en remate, siendo adquirido en subasta pública por un grupo de 186 agricultores cañeros y empresarios, organizados en la Cooperativa Agrícola Industrial Ingenio Palo Gordo, S. A., quienes entregaban su caña al ingenio.

En 1984, Ingenio Palo Gordo adquirió en Brasil una planta destiladora de alcohol carburante, fue la primera anexa a un ingenio en Guatemala.

El nuevo grupo propietario de Ingenio Palo Gordo inició programas para aumentar su capacidad de molienda a 8 000 toneladas diarias de caña de azúcar, cantidad que muele actualmente.

En el 2011 se implementó el área de cogeneración que genera 33 MW, utilizando un 8 MW para consumo propio en la zafra y 25 MW se entrega a la red eléctrica nacional, como aporte a la demanda del país, a un voltaje de 230 kV.

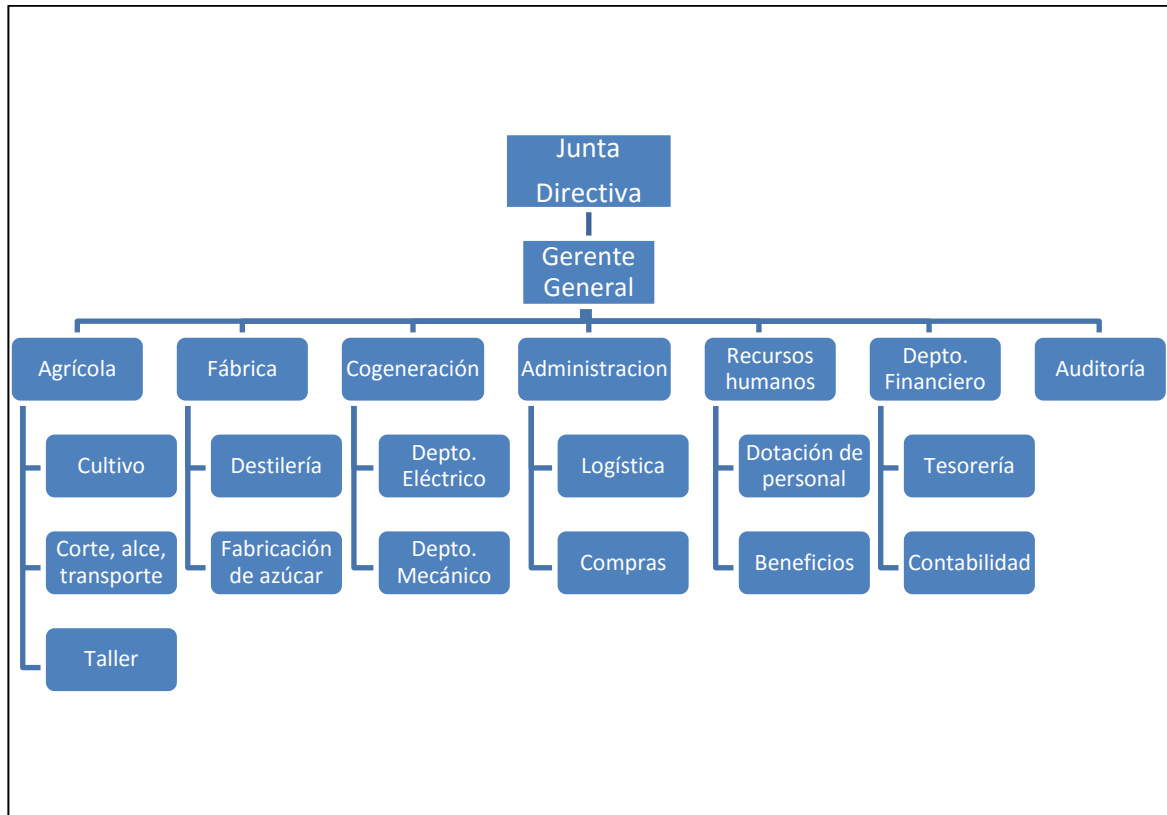
## **1.2. Actividades de la empresa**

El Ingenio Palo Gordo es una empresa agroindustrial dedicada a transformar la caña en: azúcar, alcohol y energía eléctrica.

## **1.3. Estructura organizacional**

El Ingenio Palo Gordo tiene la siguiente estructura organizacional.

Figura 1. Organigrama



Fuente: elaboración propia.

#### 1.4. Ubicación

La planta del Ingenio se ubica en el kilómetro 142,5 carretera al Pacífico, San Antonio, Suchitepéquez, con oficinas centrales en 7 avenida 12-23 zona 9 edificio Etisa 2do. nivel, Guatemala, C. A.



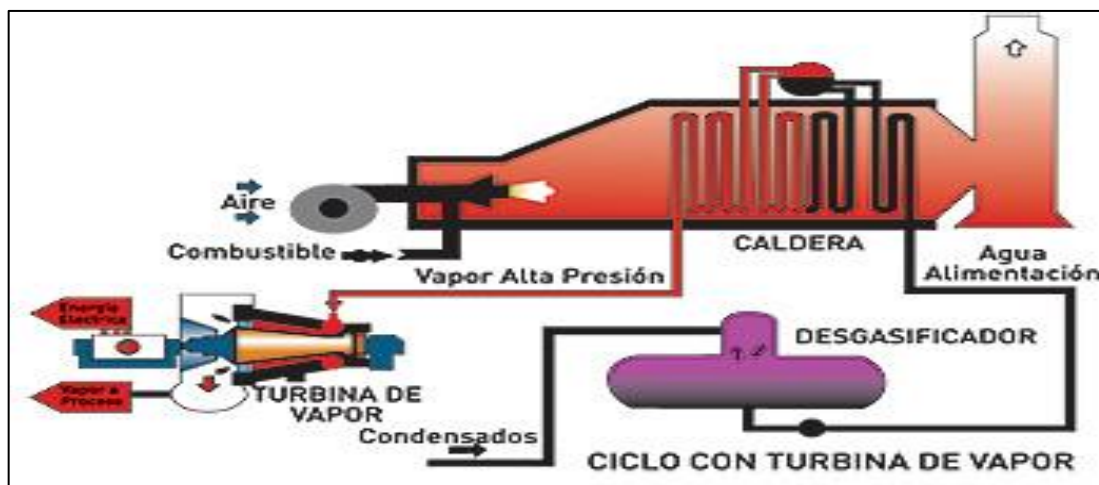
## 2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS TURBOGENERADORES

### 2.1. Generalidades de un turbogenerador

Un turbogenerador es una máquina utilizada en la generación de energía eléctrica, el termino turbo se aplica en su nombre porque es impulsado por una turbina ya sea de agua o gas, la cual se encuentra acoplada al generador eléctrico a través del eje del generador.

En la figura 2 se muestra el esquema simplificado de una central térmica.

Figura 2. Central térmica ciclo de vapor



Fuente: Empresa eficiente. <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/plantas-de-cogeneracion#ancla>. Consulta: 25 de abril de 2015.

## **2.2. Descripción general de sus componentes**

Los turbogeneradores se componen de dos partes importantes que son: la turbina y el generador de corriente alterna.

### **2.2.1. La turbina de vapor**

Es una máquina diseñada para producir energía mecánica en movimiento rotatorio a partir de la energía interna del vapor de agua a presión y temperatura por encima de aquellas de un determinado sumidero. La turbina es impulsada por vapor sobrecalentado a presiones que están comprendidas entre 600 y 850 psi y temperaturas de 750 a 900 °F, que son algunas de las condiciones de diseño comúnmente utilizadas.

El principio de funcionamiento es cuando el vapor de agua con un alto contenido entálpico y un elevado valor de presión se expande a través de una tobera, lo cual genera una corriente de fluido de alta velocidad (alto contenido de energía cinética). Esta corriente de vapor provee la fuerza necesaria para mover el rotor de la turbina, de esta manera el fluido realiza trabajo sobre los alabes a expensas de su energía cinética, el resultado global consiste en la expansión de fluido con producción de trabajo

Existen turbinas en las que se utilizan otros fluidos, pero, las más ampliamente utilizadas son aquellas que utilizan vapor de agua.

Las turbinas de vapor se suelen dividir en dos grandes clases, según su aplicación:

- Motrices de generadores de energía eléctrica.
- Motrices de máquinas como bombas, compresores, molinos, picadoras, entre otros.

A las velocidades de 1 800 y 3 600 rpm les corresponden las turbinas motrices de generadores eléctricos a 60 Hz.

Si se aplica una clasificación por el manejo de vapor en la turbina, se puede distinguir lo siguiente:

- Turbina sin condensación: el vapor entra a una presión dada de sobrecalentado y abandona la turbina a una presión superior a la atmosférica.
- Turbina con condensación: el vapor entra a una presión dada de sobrecalentado y abandona la turbina condensada en fase líquida a una presión menor a la atmosférica.
- Turbinas con extracción (con o sin condensación): se extrae parcialmente el vapor en una o más etapas intermedias.
- Turbinas con inyección (con o sin condensación): parte del vapor se inyecta en una o más etapas intermedias.
- Turbinas de presión mixta (con o sin condensación): el vapor ingresa a la turbina a dos o más diferentes presiones a través de entradas separadas.

- Turbinas con sobrecalentamiento: el vapor de agua que abandona la turbina es conducido a través de alguna sección de la caldera y se inyecta nuevamente a la turbina.

## **2.2.2. Partes de la turbina de vapor**

La turbina se compone de tres partes principales:

- El cuerpo del rotor: que contiene las coronas giratorias de alabes
- La carcasa: conteniendo las coronas fijas de toberas
- Alabes

Además, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares como: cojinetes, válvulas de regulación, sistema de lubricación, de refrigeración, de control, de extracción de vapor y de sellado del vapor.

### **2.2.2.1. El rotor de la turbina**

El rotor de una turbina de acción es de acero fundido con ciertas cantidades de níquel o cromo para darle tenacidad al rotor, y es de diámetro aproximadamente uniforme. Normalmente las ruedas donde se colocan los alabes se acoplan en caliente al rotor. También se pueden fabricar haciendo de una sola pieza forjada al rotor, maquinando las ranuras necesarias para colocar los alabes.

Los alabes se realizan de aceros inoxidable, aleaciones de cromo-hierro, con las curvaturas de diseño según los ángulos de salida de vapor y las velocidades necesarias. Son críticas las últimas etapas por la posibilidad de existencia de partículas de agua que erosionarían a los alabes. Por ello se fija



una cinta de metal satélite soldado con soldadura de plata en el borde de ataque de cada alabe para retardar la erosión.

#### **2.2.2.2. La carcasa**

Se divide en dos partes: la inferior, unida a la bancada y la superior, desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen las coronas fijas de toberas o alabes fijos. Las carcasas se fabrican de hierro, acero o de aleaciones de este, dependiendo de la temperatura de trabajo, obviamente las partes de la carcasa de alta presión son materiales más resistentes que en la parte del escape. La humedad máxima debe ser de un 10 % para las últimas etapas.

Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina. Esta manta aislante suele estar recubierta de una tela impermeable que evita su degradación y permite desmontarla con mayor facilidad.

#### **2.2.2.3. Alabes**

Los alabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y carcasa. Se pueden asegurar solos o en grupos, fijándolos a su posición por medio de un pequeño seguro, en forma de perno o mediante remaches. Los extremos de los alabes se fijan en un anillo donde se remachan, y los más largos a veces se amarran entre sí con alambres o barras en uno o dos lugares intermedios, para darles rigidez.

#### **2.2.2.4. Válvula de regulación**

Regula el caudal de entrada a la turbina, siendo de los elementos más importantes de la turbina de vapor. Es accionada hidráulicamente con la ayuda de un grupo de presión de aceite (aceite de control) o neumáticamente. Forma parte de dos lazos de control: el lazo que controla la velocidad de la turbina y el lazo que controla la carga o potencia de la turbina.

#### **2.2.2.5. Cojinetes de apoyo, de bancada o radiales**

Sobre ellos gira el rotor. Suelen ser de un material blando y recubierto de una capa lubricante que disminuya la fricción. Son elementos de desgaste, que deben ser sustituidos periódicamente, bien con una frecuencia establecida si su coste es bajo respecto de su producción, o bien por observación de su superficie y cambio cuando se encuentren en un estado deficiente.

#### **2.2.2.6. Cojinete de empuje o axial**

El cojinete axial o de empuje impide el desplazamiento del rotor en la dirección del eje, evitando así el empuje axial que sufre el eje por el efecto del vapor y que repercute en el reductor, dañándolo seriamente. No se encuentra en contacto con el eje sino que hace tope con un disco que forma parte solidaria con el eje.

El cojinete está construido en un material blando y recubierto por una capa de material que disminuya la fricción entre el disco y el cojinete. Además, debe encontrarse convenientemente lubricado.

Para comprobar el estado de ese cojinete, además de la medida de la temperatura y de las vibraciones del eje, se mide de forma constante el desplazamiento axial. Si se excede el límite permitido, el sistema de control provoca la parada de la turbina o impide que esta complete su puesta en marcha.

#### **2.2.2.7. Sistema de lubricación**

Proporciona el fluido lubricante, generalmente aceite. Para asegurar la circulación del aceite en todo momento el sistema suele estar equipado con tres bombas, que se describen a continuación:

##### **2.2.2.7.1. Bomba mecánica principal**

Está acoplada al eje de la turbina, de forma que siempre que esté girando la turbina está girando la bomba, asegurándose así la presión de bombeo mejor que con una bomba eléctrica. No obstante, en los arranques esta bomba no da presión suficiente, por lo que es necesario que el equipo tenga al menos una bomba adicional.

##### **2.2.2.7.2. Bomba auxiliar**

Se utiliza exclusivamente en los arranques y sirve para asegurar la correcta presión de aceite hasta que la bomba mecánica pueda realizar este servicio. Se conecta antes del arranque de la turbina y se desconecta a unas revoluciones determinadas durante el arranque, cambiándose automáticamente de la bomba auxiliar a la bomba principal. También se conecta durante las paradas de la turbina.

### **2.2.2.7.3. Bomba de emergencia**

Si se produce un problema de suministro eléctrico en la planta, esta queda sin tensión, durante la parada habría un momento en que la turbina se quedaría sin lubricación, ya que la bomba auxiliar no tendría tensión. Para evitar este problema, las turbinas suelen ir equipadas con una bomba de emergencia que funciona con corriente continua proveniente de un sistema de baterías.

### **2.2.2.8. Sistema de refrigeración de aceite**

El aceite en su recorrido de lubricación se calienta modificando su viscosidad, y por tanto, sus características lubricantes; llegando a degradarse si el calor es excesivo. Para evitarlo, el sistema de lubricación dispone de unos intercambiadores que enfrían el aceite, estos intercambiadores pueden ser aire-aceite, de forma que el calor del aceite se evacúa a la atmósfera, o agua-aceite, de forma que el calor se transfiere al circuito cerrado de refrigeración con agua de la planta.

### **2.2.2.9. Sistema de aceite de control**

Cuando la válvula de regulación se acciona hidráulicamente el conjunto de turbina va equipado con un grupo de presión para el circuito de aceite de control. Este debe mantener la presión normalmente entre los 50 y los 200 bares de presión hidráulica. El sistema de control gobierna la válvula de salida del grupo, que hace llegar al aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada.

#### **2.2.2.10. Sistema de sellado de vapor**

Las turbinas de vapor están equipadas con sellos de carbón, que se ajustan al eje, con laberintos de vapor. Con esto se consigue evitar que el vapor salga a la atmósfera y disminuya la eficiencia térmica de la turbina.

#### **2.2.2.11. Virador**

El sistema virador consiste en un motor eléctrico o hidráulico (normalmente el segundo), que hace girar lentamente la turbina cuando no está en funcionamiento. Esto evita que el rotor se curve, debido a su propio peso o por expansión térmica en parada. La velocidad de este sistema es muy baja (varios minutos para completar un giro completo de turbina), pero se vuelve esencial para asegurar la correcta rectitud del rotor. Si por alguna razón este sistema se detiene (avería del rotor o de la turbina, inspección interna con desmontaje), es necesario asegurar que, antes de arrancar, estará girando varias horas con el sistema virador.

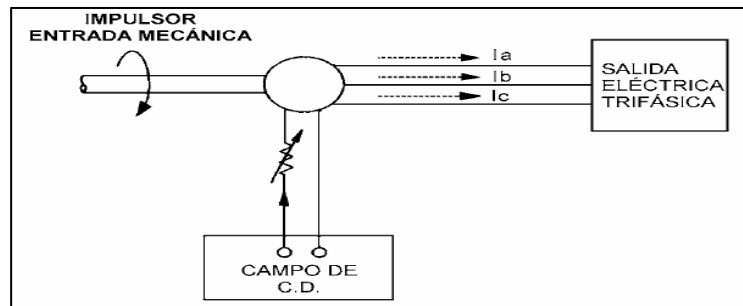
#### **2.2.2.12. Compensador**

Es el elemento de unión entre la salida de la turbina y el resto de la instalación (generalmente las tuberías que conducen al condensador o el propio condensador), ya que la carcasa de la turbina sufre grandes cambios de temperatura, este elemento de unión es imprescindible para controlar y amortiguar el efecto de dilataciones y contracciones.

### 2.3. El generador síncrono

Un generador síncrono convierte energía mecánica en energía eléctrica. La potencia mecánica del impulsor gira la flecha del generador en el cual el campo de corriente directa (CD) está instalado.

Figura 3. Ilustración de una máquina simple



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. <https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

La energía del impulsor puede ser obtenida de la quema de combustibles fósiles tales como carbón, petróleo o gas natural. El vapor producido gira la flecha del generador (rotor) a velocidades típicas de 1 800 o 3 600 rpm.

La conversión de la energía del vapor a rotación mecánica es hecha en la turbina. En plantas nucleares, el uranio a través del proceso de fusión, es convertido en calor, el cual produce vapor.

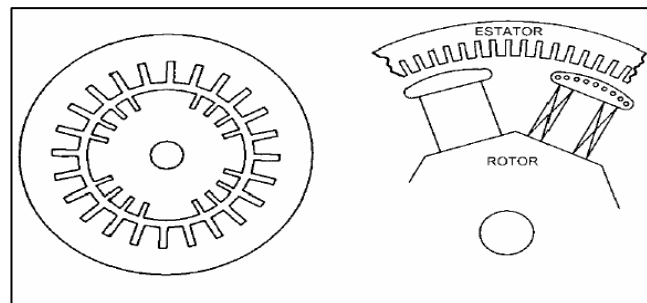
El vapor es forzado a través de la turbina de vapor para rotar la flecha del generador. La energía del impulsor puede ser obtenida por caída o movimiento

del agua. Los generadores hidroeléctricos giran más lento (alrededor de 100-300 rpm), que las turbinas de vapor.

Las máquinas sincrónicas son clasificadas en dos diseños principales: máquinas de rotor cilíndrico y de polos salientes. La figura 4 proporciona una vista de la sección transversal de ambos tipos de construcción.

Los generadores impulsados por turbinas de vapor tienen rotores cilíndricos con ranuras en las cuales son colocados los devanados de campo distribuidos. La mayoría de los rotores cilíndricos están hechos de acero forjado sólido. El número de polos es típicamente dos o cuatro.

Figura 4. **Tipos de rotores de generadores**



a) Rotor cilíndrico      b) Rotor polos salientes

Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

Los generadores impulsados por turbinas hidráulicas tienen rotores de polos salientes laminados con devanados de campo concentrados y un gran número de polos. Cualquiera que sea el tipo del impulsor o diseño de la máquina, la fuente de energía usada para girar la flecha es mantenida en un

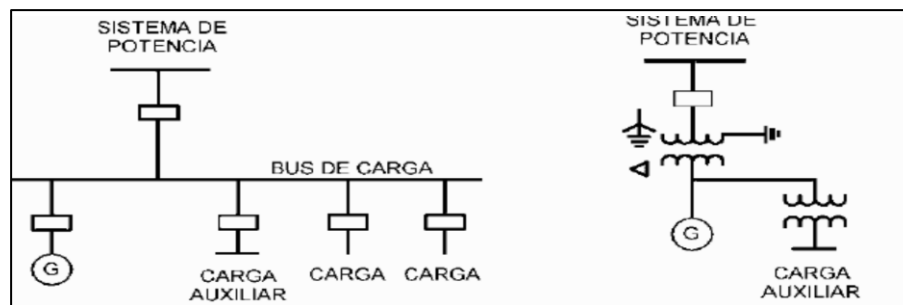
nivel constante a través de un regulador de velocidad conocido como gobernador.

La rotación del flujo de CD en el campo del generador reacciona con los devanados del estator y, debido al principio de inducción, se genera una tensión trifásica.

### 2.3.1. Conexión de generadores a un sistema de potencia

Existen dos métodos básicos usados en la industria para conectar generadores al sistema de potencia: Conexiones directa y unitaria.

Figura 5. Tipos de conexión



a) Conexión directa.

b) Conexión unitaria.

Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

#### 2.3.1.1. Conexión directa

La figura 5, inciso a muestra el diagrama unifilar para una conexión directa de un generador a un sistema de potencia. Los generadores son



conectados directamente al bus de carga sin transformación de tensión de por medio. Este tipo de conexión es un método recientemente usado en la industria para la conexión de generadores de tamaño pequeño.

### **2.3.1.2. Conexión unitaria**

La figura 6, inciso b muestra el diagrama unifilar para un generador en conexión unitaria. El generador es conectado al sistema de potencia a través de un transformador elevador.

La carga auxiliar del generador es suministrada desde un transformador reductor conectado a las terminales del generador. La mayoría de los generadores grandes son conectados al sistema de potencia, usando un transformador elevador principal con conexión estrella-delta. Al tener la generación conectada a un sistema delta, las corrientes de falla a tierra pueden ser dramáticamente reducidas usando puesta a tierra de alta impedancia.

### **2.3.2. Modelo de corto circuito del generador síncrono**

El circuito eléctrico equivalente de un generador síncrono es una tensión interna en serie con una impedancia. La componente de resistencia de la impedancia del generador es pequeña comparada con la reactancia y es usualmente despreciada para cálculos de corriente de falla.

El análisis de componentes simétricas es una herramienta matemática importante para calcular las corrientes y tensiones del generador bajo condiciones de desbalance.

### **2.3.2.1. Secuencia positiva ( $X_1$ )**

Se usan tres valores diferentes de reactancia de secuencia positiva en el circuito equivalente de secuencia positiva:  $X''_d$  es la reactancia subtransitoria,  $X'_d$  es la reactancia transitoria y  $X_d$  es la reactancia del generador en eje directo.

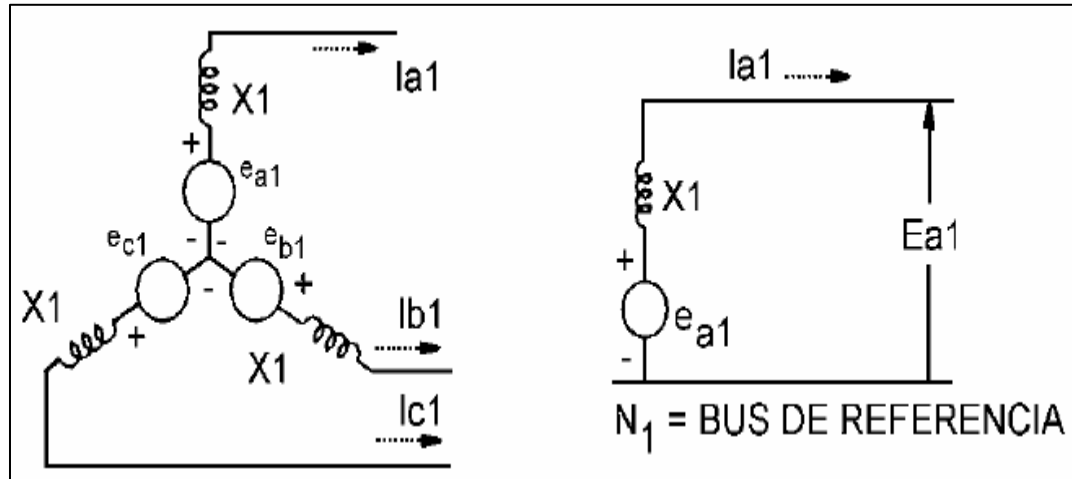
Todos estos valores de eje directo son necesarios para calcular los valores de corriente de corto circuito en diferentes tiempos después de ocurrido un corto circuito. Estos valores son proporcionados por el fabricante del generador como parte de la hoja de datos de prueba del generador.

Puesto que el valor de la reactancia subtransitoria produce el valor de corriente inicial mayor, es generalmente usado en cálculos de corto circuito para aplicación de relés. El valor de reactancia transitoria es usado para consideraciones de estabilidad.

Los valores de reactancia no saturada son usados para calcular las corrientes de falla debido a que la tensión se reduce por debajo de la saturación durante fallas cercanas a la unidad.

Puesto que los generadores típicos son operados ligeramente saturados, la corriente de falla sostenida (estado estable) será menor que la corriente de carga máxima, a menos que los reguladores de tensión refuercen el campo durante una falla sostenida.

Figura 6. **Secuencia positiva**



a) Representación trifásica.

b) Equivalente monofásico.

Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

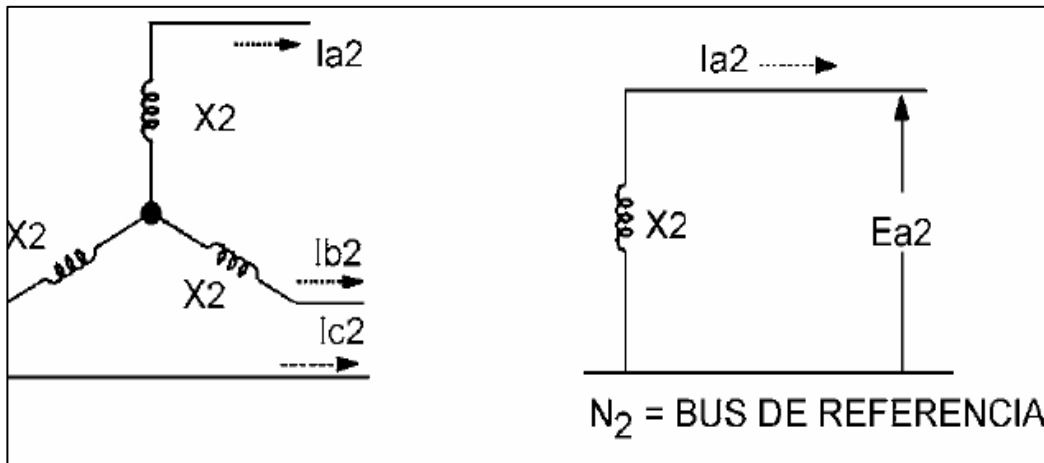
<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edici3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

### 2.3.2.2. **Secuencia negativa ( $X_2$ )**

El flujo de corriente de secuencia negativa es de rotación de fase opuesta a través de la máquina y aparece como una componente de doble frecuencia en el rotor. El promedio de la reactancia subtransitoria de eje directo bajo los polos y entre los polos da una buena aproximación de la reactancia de secuencia negativa.

En una máquina de polos salientes, la secuencia negativa es el promedio de la reactancia subtransitoria de eje directo y eje en cuadratura [ $X_2 = (X''_d + X''_q) / 2$ ], pero en una máquina con rotor cilíndrico,  $X_2 = X''_d$ .

Figura 7. **Secuencia negativa**



a) Representación trifásica.

b) Equivalente monofásico.

Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edici3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

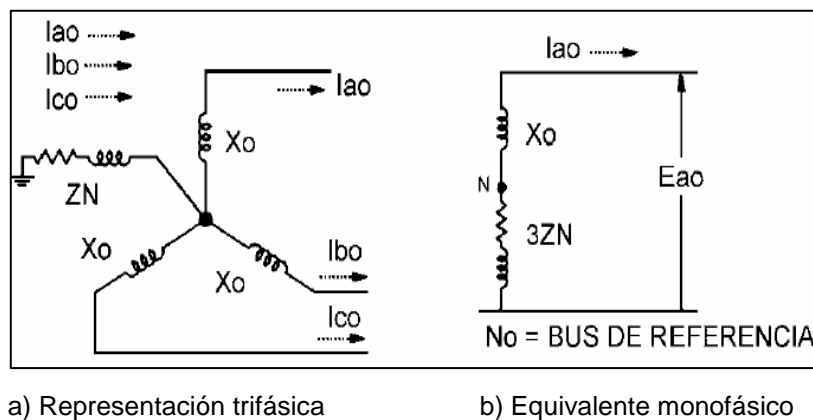
### 2.3.2.3. **Secuencia cero ( $X_0$ )**

La reactancia de secuencia cero es menor que los valores de secuencia positiva y negativa. Debido a los altos valores de corriente de falla a tierra disponibles para una máquina sólidamente puesta a tierra.

Una impedancia (reactancia o resistencia) es casi siempre insertada en la trayectoria de puesta a tierra del neutro, excepto en generadores muy pequeños donde el costo de proporcionar tales puestas a tierra en relación a los costos de la máquina son significativos. Como se estableció previamente, la resistencia del devanado del estator es, generalmente, lo suficientemente pequeña para ser despreciada en los cálculos de corto circuito.

Esta resistencia, sin embargo, es importante en la determinación de las constantes de tiempo de CD de una corriente de corto circuito asimétrica. Para calcular fallas o condiciones de generación anormales desbalanceadas, las redes de secuencia positiva, negativa y cero son interconectadas.

Figura 8. **Secuencia cero**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

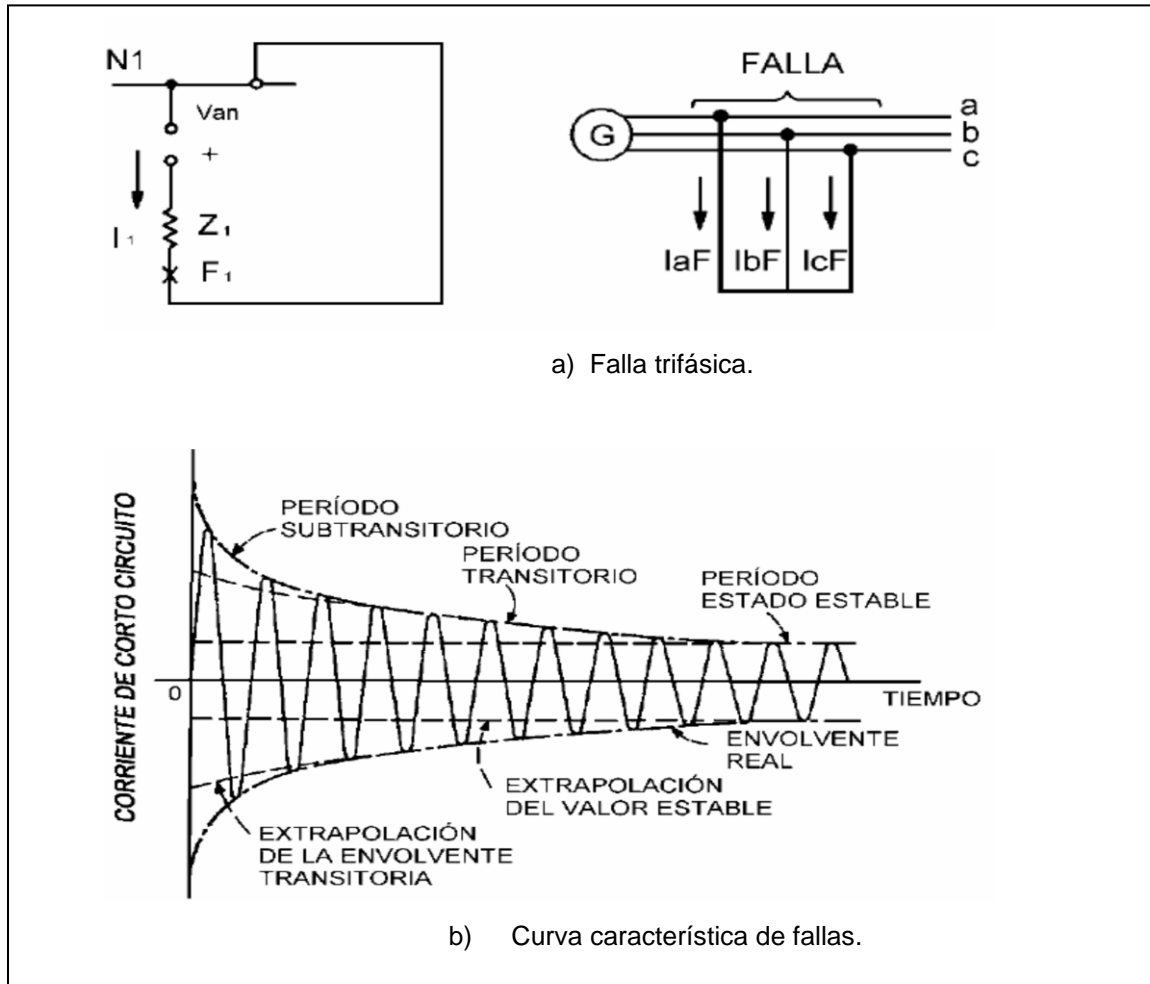
<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edici3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

### 2.3.3. Decaimiento de la corriente de falla del generador

Debido a que la secuencia positiva del generador es caracterizada por tres reactancias con valores que se incrementan con el tiempo, sus corrientes de falla disminuyen con el tiempo.

La figura 9 ilustra un trazo simétrico monofásico de una forma de onda de corto circuito trifásico (ausencia de la componente de CD) tal como puede ser obtenido oscilo-gráficamente. La forma de onda puede ser dividida en tres periodos o regiones de tiempo.

Figura 9. Tipos de fallas



a) Falla trifásica.

b) Curva característica de fallas.

Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

### 2.3.3.1. Período subtransitorio

Este período se mantiene por pocos ciclos, durante los cuales la magnitud de corriente es determinada por la reactancia subtransitoria del generador ( $X''_d$ ) y el decremento del tiempo por la constante de tiempo  $T''_d$ .

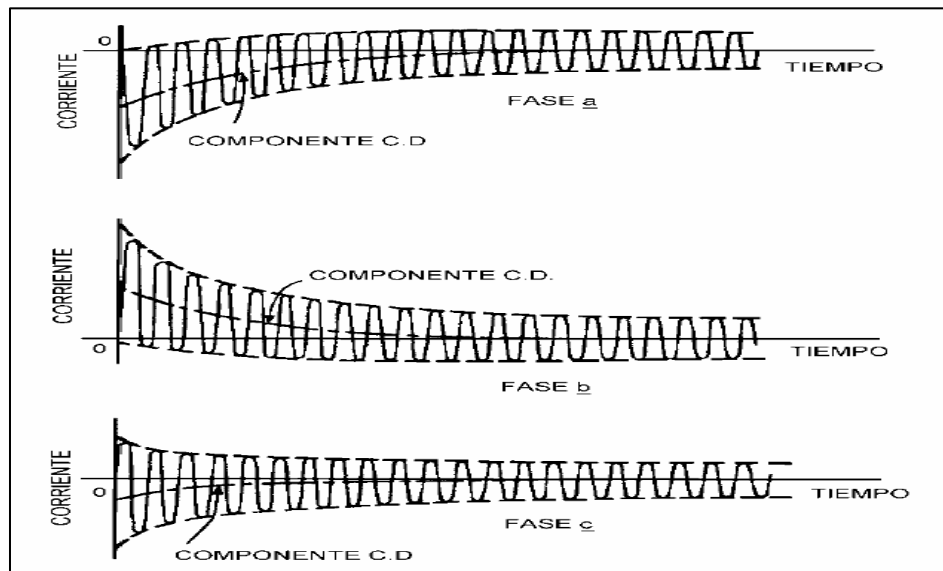
### 2.3.3.2. Período transitorio

Cubre un tiempo relativamente largo durante el cual la magnitud de corriente está determinada por la reactancia transitoria del generador ( $X'd$ ) y el decremento del tiempo por la constante de tiempo  $T'd$ .

### 2.3.3.3. Período de estado estable

Es el nivel de tiempo más largo de corriente de falla del generador, cuya magnitud es determinada por la reactancia del eje directo del generador ( $X_d$ ), cuando los desplazamientos de CD son considerados, las corrientes del generador para una falla trifásica serán como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Corrientes de corto circuito del generador

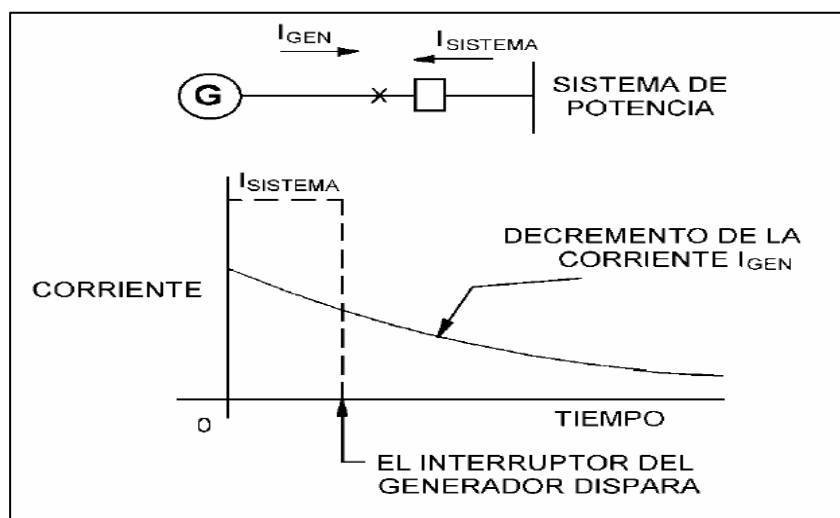


Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

Cuando una falla en el generador es detectada por los relés de protección, el generador es separado del sistema de potencia disparando el interruptor del generador por medio del relé de protección, el interruptor de campo y el impulsor.

Figura 11. **Corriente de falla en terminales de generador**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edicic3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 5 de mayo de 2015.

La contribución del sistema a la falla será inmediatamente removida cuando dispara el interruptor del generador, como se ilustra en la figura 11. Sin embargo, la corriente del generador continuará fluyendo después del disparo.

La corriente de cortocircuito del generador no puede ser apagada instantáneamente debido a la energía almacenada en la máquina rotatoria. El flujo de la corriente de falla dañina en el generador continuará por un periodo de varios segundos después de que el generador ha sido disparado, haciendo que



las fallas del generador sean extremadamente dañinas. Los conductores de las terminales del generador son usualmente aislados por la construcción del bus, para minimizar las fallas multifase en terminales.

El generador es también puesto a tierra en tal forma, que se reducen sustancialmente las corrientes de falla a tierra. Esto se hace incrementando la impedancia de secuencia cero, con la inserción de una impedancia a tierra en el neutro.

## **2.4. Prácticas de puesta a tierra del generador**

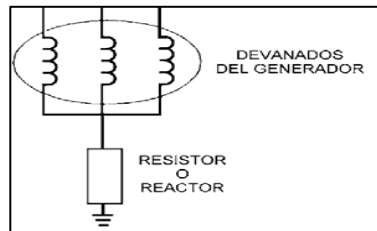
Dos tipos de prácticas de puesta a tierra representan los principales métodos usados en la industria para aterrizar los devanados del estator del generador. Estos son la puesta a tierra de alta y baja impedancia.

### **2.4.1. Puesta a tierra de baja impedancia**

La figura 12 ilustra un generador puesto a tierra a través de un resistor o reactor. El resistor o reactor de puesta a tierra es seleccionado para limitar la contribución de la corriente de falla a tierra del generador entre 200 amp y 150 % de la corriente nominal del generador.

La puesta a tierra de baja impedancia es generalmente usada cuando unidades generadoras múltiples son operadas sobre un bus común o cuando están directamente conectadas a buses de carga sin una transformación de tensión, proporcionando así la fuente de tierra para el sistema.

Figura 12. **Puesta a tierra de baja impedancia**



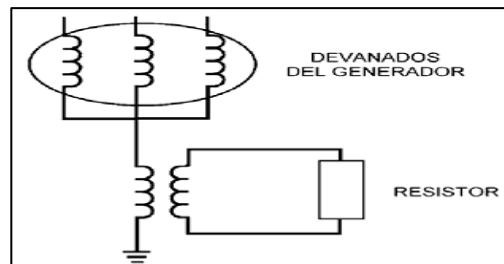
Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edici3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 12 de mayo de 2015.

#### 2.4.2. **Puesta a tierra de alta impedancia**

La figura 13 ilustra un generador puesto a tierra utilizando un transformador de distribución con un resistor secundario. Este método de puesta a tierra permite que las corrientes de falla a tierra sean reducidas a bajos niveles, típicamente 5-25 amperios. Es usada en generadores conectados en forma unitaria.

Figura 13. **Puesta a tierra de alta impedancia**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J.

<https://dhramosfigueroa.files.wordpress.com/2014/02/mc3a1quinas-elc3a9ctricas-3ra-edici3b3n-stephen-chapman.pdf>. Consulta: 12 de mayo de 2015.

## **2.5. Normas para la instalación de generadores**

La norma básica para todos los motores y generadores es la NEMA MG-1, la cual se divide en 3 partes, la primera es estándares aplicados a todas las máquinas, la segunda es estándares aplicados a máquinas pequeñas y medianas. La última parte habla sobre los estándares aplicados a máquinas grandes.

Los estándares IEEE 112,113 y 115 muestran las pruebas y procedimientos para motores polifásicos de inducción, motores DC y máquinas síncronas, respectivamente. La IEEE 43, 117 y 275 cubren la parte de las pruebas de aislamiento. La IEEE 85 y la NEMA MG3, hablan sobre los niveles de ruido y predicción del nivel de ruido después de la instalación.

Los estándares ANSI/IEEE para las protecciones de los generadores está en, C37.101 es la guía para la protección de tierra del generador; C37.102 es la protección para generadores de C.A. y C37.106 es la guía para la protección de frecuencias anormales para plantas de generación.



### 3. MONTAJE DEL TURBOGENERADOR DE 46 MW

La unidad de generación está compuesta de dos componentes la turbina y el generador, en las tablas siguientes describen los datos de identificación de fábrica de cada uno de los componentes de la unidad de generación que se instaló en el Ingenio Palo Gordo, las cuales se muestran a continuación:

Tabla I. **Especificación de datos de la turbina**

<b>Turbina</b>	
Marca	TGM
Modelo	CTE 63
Fabricado en	Brasil
Fecha de fabricación	2014
Potencia ( en el acople)	48 930 kW
Presión de vapor vivo	104,4 bar
Temperatura de vapor vivo	537,7 °C
Presión de vapor de escape	0,11 bar
Rotación nominal	3 600 rpm
Velocidad de disparo	3 960 rpm

Fuente: elaboración propia, especificaciones tomadas de la placa de identificación de fábrica de la turbina.

Tabla II. **Especificación de datos del generador**

<b>Generador</b>			
Marca	BRUSH	Tipo	Turbogenerador
Fabricado en	Inglaterra	Armazón	BDAX 7-290ERH
Fecha de fabricación	2014	Núm. máquina	924762.010
Capacidad	57 500 kVA	Régimen	Continuo
rpm	3 600	Especificación	IEEE C50.13
Voltaje	13 800 V	Temp. ambiente	37 °C
Amperios	2 406 A	Refrigerante	Agua en 32,2 °C
Factor de potencia	0,8	Aislamiento rotor	Clase F
Fases/Hz	3/60	Aislamiento estator	Clase F
Conexiones de fase	Estrella	Protección	IP 54
Voltios exc.	161	Secuencia de fases	T1-T2-T3
Amperios exc.	836	Peso de la máquina	78500 kg

Fuente: elaboración propia, especificaciones tomadas de la placa de identificación de fábrica del generador.

### 3.1. **Diseño y cálculo para la puesta a tierra**

La presente memoria de cálculo, es para dimensionar el sistema de puesta a tierra (PAT) en la planta de turbogenerador de 46 MW, ubicada en el Ingenio Palo Gordo en San Antonio Suchitepéquez.

Para el cálculo se han seguido los lineamientos de las siguientes normas:

- VDE 0141: Earthing Systems in A.C.

- ANSI/IEEE STD. 80-2000: IEEE Guide for Safety in A.C. Substation Grounding.

### **3.1.1. Premisas adoptadas**

- Como sistema de protección se adoptó una malla alrededor de conductores de cobre desnudo.
- Para el cálculo de la tierra física mencionada se adoptó una corriente de cortocircuito de 14 500 amp.
- De acuerdo al tipo de suelo predominante en la zona, arcillas compactas, arena arcillosa y rocas, se adoptó un valor de resistividad del suelo de 100 ohm/m.
- Se adopta el criterio de vincular la nueva malla de puesta a tierra con la malla existente en la subestación.
- Todos los equipos de la nueva planta se conectaron rígidamente a la malla de puesta a tierra existente y se mantienen a un mismo potencial de tierra.

### **3.1.2. Descripción del método de cálculo**

- Solicitaciones térmicas del conductor para el cálculo de la sección del conductor:

Se aplicó la fórmula siguiente:

$$S_{\min} = \frac{1000 \cdot I_s \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\left(9,64 \cdot \frac{c \cdot g}{P \cdot a} \cdot \log(1 + a \cdot T_g - T_1)\right)}} \quad (\text{KCMIL}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

- $I_s$  (KA) = valor eficaz de la corriente de cortocircuito promedio durante el tiempo  $t$
- $t$  = duración del cortocircuito
- $c$  (cal/g x °C) = calor específico del cobre es de 0,0925
- $g$  (g/cm<sup>3</sup>) = peso específico del cobre es de 8,92
- $P$  (Ωx mm<sup>2</sup> /m) = resistividad del cobre a temperatura  $T_1$  es de 0,172
- $T_g$  = temperatura final del conductor (se adopta  $T_g = 450$  °C)
- $T_1$  = temperatura inicial del conductor (se adopta  $T_1 = 35$  °C)
- $a$  = 0,004 es el coeficiente de temperatura por °C

- Cálculo de la resistencia de la malla

Para calcular la resistencia total de la malla se utiliza la siguiente fórmula:

$$R_T = \frac{R_m R_e - R_{me}^2}{R_m + R_e - 2R_{me}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L M} * \left[ \ln \left[ \frac{2 \cdot L M}{\sqrt{\phi C} \cdot 0,5} \right] + K_1 \left[ \frac{L M}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$R_e = \frac{\rho_a}{2n\pi L} \left[ \ln \frac{8L}{d} - 1 + 2K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 2)^2 \right] \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$R_{me} = \frac{\rho_a}{\pi L m} \left[ \ln \frac{2Lm}{L} + K_1 \frac{Lm}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (\text{Ecuación 5})$$



$$\rho_a = \frac{L \rho_1 \rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho(L-h-H)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

- Rm = resistividad de la suma de todos los conductores (ohms)
- Re = resistencia de la suma de todos los electrodos de tierra (ohms)
- Rme = resistencia mutua entre los conductores de la malla y los electrodos (ohms).
- L = largo de la varilla (m) = 2,43
- d = diámetro de la varilla (m) = 0,016
- $\rho_2$  = resistividad media del terreno ( $\Omega/m$ ) = 100
- $\rho_1$  = resistividad superficial del terreno ( $\Omega/m$ ) = 87,3 (concreto)
- LM = longitud total de los conductores enterrados (m) = 180
- $\Phi_c$  = diámetro del conductor de la malla = 0,0134 m
- n = número de electrodos en el área A = 26 electrodos enterrados
- h = profundidad de implantación, se adopta h= 0,5 m
- hs = grueso de la capa superficial = 0,2 m
- A = área de la malla ( $m^2$ ) = 936  $m^2$
- K1 y K2 = coeficientes obtenidos en los gráficos que pertenecen a la norma IEEE.

- Distribución de corrientes

En el diseño de tierra física existen dos anillos conectados, por lo que la corriente de falla se drenará en partes proporcionales, según el valor de resistencia de la malla existente, conectada rígidamente entre sí.

$$I_m = \frac{I_s \times R_T}{R_m} \quad (\text{Ecuación 7})$$

### 3.1.3. Desarrollo del cálculo

Se calculó el valor de la resistencia de la malla de puesta a tierra, adoptando una longitud de 180 m de cable de cobre trenzado y desnudo, calibre núm. 4/0 AWG, enterrado a una profundidad de 0,5 m en forma de anillo; conectados a su vez con soldaduras exotérmicas en 26 barras tipo Copperweld, de 2,43 m de longitud y un diámetro de 16 mm (5/8"). El área equivalente adoptada es de 936 m<sup>2</sup>.

#### 3.1.3.1. Cálculo del conductor de la malla

Aplicando los valores a la ecuación 1, da el siguiente resultado

$$S_{\min}(\text{mm}^2) = \frac{1000 * 14500 * \sqrt{0,5}}{\sqrt{\left(9,64 * \left(\frac{0,0925 * 8,9}{0,172 * 0,004}\right) * \log(1 + 0,004 * 415)\right)}} = 31,05 \text{ (KCMIL)}$$

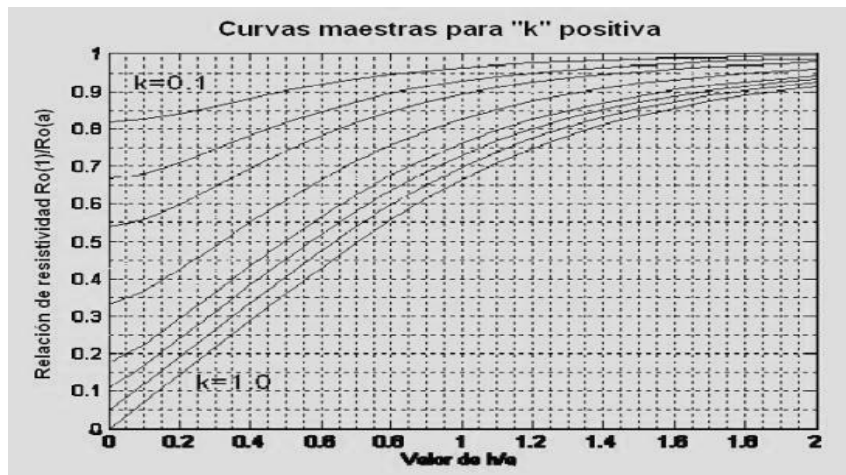
Equivale a un conductor de calibre número 2. El resultado da un valor mínimo sin embargo, se adoptó a una sección de trabajo de S= 107,22 mm<sup>2</sup> por razones mecánicas para el montaje (el calibre mínimo a usar en las mallas de tierra es de 4/0 AWG).

El factor de reflexión K es igual a:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} = \frac{100 - 87,3}{100 + 87,3} = 0,06 \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Se tomó la curva correspondiente al valor  $K = 0,06$  y donde la curva se cruza con abscisa  $h_s = 0,2$ , se corta con el eje de las ordenadas  $C_s$ , que para este caso se obtiene  $C_s = 1$ .

Figura 14. Factor de reflexión K



Fuente: PICHUYA, Emery. <http://www.sectorelectricidad.com/8437/sistemas-de-puesta-a-tierra-y-proteccion-contra-descargas-atmosfericas-parte-1/>. Consulta: 15 de mayo de 2015.

Este factor es igual a uno cuando no existe capa superficial o esta es muy delgada o la capa superficial es de resistividad muy alta.

Para el cálculo de los potenciales tolerables y del método de dos capas se utilizaron las siguientes ecuaciones, que difieren al método de una capa, en que se considera  $C_s$ .

Considerando la fórmula para una persona de 70 Kg se tienen los voltajes tolerables:

$$E_{s(\text{paso})} = \frac{(1\,000 + 6C_s \rho_s) * 0,157}{\sqrt{3}} = \frac{(1\,000 + 6 * 1 * 87,3)}{\sqrt{3}} = 2\,782,06\text{ V} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$E_{m(\text{contacto})} = \frac{(1\,000 + 1,5C_s \rho_s) * 0,157}{\sqrt{3}} = \frac{(1\,000 + 1,5 * 1 * 87,3)}{\sqrt{3}} = 2\,064,82\text{ V} \quad (\text{Ecuación 10})$$

### 3.1.3.2. Determinación de los coeficientes km, ki y ks

Para poder calcular el potencial de la malla es necesario determinar los coeficientes Km, Ki y Ks.

Elección del anillo

A = longitud del malla (m) = 43 m

B = ancho de la malla (m) = 21 m

L = longitud total del conductor (m) = 178 m

D = espacio entre conductores (m) = 6 m

h = profundidad de enterramiento (m) = 0,5 m

d = diámetro del conductor (m) = 0,0134 m

n = número de conductores en paralelo = 2

Por lo tanto:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{[D^2]}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \dots \frac{17}{18} \right] \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$k_m = \frac{1}{2 * 3,1416} \ln \frac{6^2}{16 * 0,5 * 0,0134} + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \dots \frac{17}{18} \right] = 0,468$$

ki es:

$$k_i = 0,65 + 0,172n \quad n \leq 7; \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$k_i = 2,0 \quad n > 7;$$

$$k_i = 0,65 + 0,172 * 2 = 0,494$$

ks es:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right] \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$k_s = \frac{1}{3,1416} \left[ \frac{1}{2 * 0,5} + \frac{1}{6 + 0,5} + \frac{1}{2 * 6} + \frac{1}{3 * 6} + \dots \right] = 0,419$$

Potencial de la malla:

$$E_m = E_{\text{contacto}} = K_m K_i \rho I_M \frac{1}{L_m} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$E_m = E_{\text{contacto}} = 0,468 * 0,494 * 100 * 14500 * \frac{1}{180} = 1862,38 \text{ V}$$

$$E_s = K_i K_s \rho I \frac{1}{L_m} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$E_s = 0,419 * 0,494 * 100 * 14500 * \frac{1}{178} = 1667,38 \text{ V}$$

Comparación de potenciales:

Debe ocurrir  $E_{m(\text{calculado})} < E_{\text{contacto}(\text{tolerable})}$

Ocurre  $1862,38 \text{ V} < 2064,82 \text{ V}$  lo cual es correcto.

Debe ocurrir  $E_{s(\text{calculado})} < E_{\text{paso}(\text{tolerable})}$

Ocurre  $1667,38\text{V} < 2782,06\text{ V}$  lo cual es correcto.

Por lo tanto, al comparar los potenciales se observa que la malla de tierra es correcta.

Calculando la resistencia de la suma de todos los conductores en la malla, la resistencia de malla es la que ofrece el terreno hacia la corriente en un sistema de puesta a tierra, esta resistencia depende de la resistividad del terreno y área de los conductores.

Se aplicará la ecuación de Severac para el cálculo de resistencia de tierra.

$$R = \rho \left( \frac{1}{Lm} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right) \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde

$$R = 100 \left( \frac{1}{180} + \frac{1}{\sqrt{20 * 936}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 * \sqrt{\frac{20}{936}}} \right) \right) = 1,9737 \Omega$$

Ahora se aplicará la ecuación de Schwartz, cuyos elementos son los siguientes, se debe encontrar una resistencia de tierra del mismo orden.

Coefficiente de profundidad de enterramiento h.

$$h_s = \sqrt{ds * h} = \sqrt{0,0134 * 0,5} = 0,0818 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Relación longitud–ancho

$$\frac{b}{a} = \frac{43}{21} = 2,04$$

Las ecuaciones para encontrar los coeficientes de reflexión K1 y K2 son:

$$K_1 = -0,05 \frac{b}{a} + 1,2 = 1,072 \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$K_2 = 0,10 \frac{b}{a} + 4,68 = 4,94 \quad (\text{Ecuación 19})$$

Analizando cada una de las resistencias de la ecuación de Schwartz, considerando que:  $\rho_1 = \rho_2 = 100$

Aplicando valores en las fórmulas 2, 3, 4, 5 y 6, se obtiene lo siguiente:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi LM} * \left[ \ln \left[ \frac{2 * LM}{\sqrt{\phi C * 0,5}} \right] + K_1 \left[ \frac{LM}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \right]$$

$$R_m = \frac{100}{\pi * 180} * \left[ \ln \left[ \frac{2 * 180}{\sqrt{0,0134 * 0,5}} \right] + 1,072 \left[ \frac{180}{\sqrt{936}} - 4,94 \right] \right] = 1,20 \Omega$$

$$R_e = \frac{\rho_a}{2n\pi L} \left[ \ln \frac{8L}{d} - 1 + 2K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 2)^2 \right]$$

$$R_e = \frac{100}{2 * 26\pi * 2,43} \left[ \ln \frac{8 * 2,43}{0,016} - 1 + 2 * 1,072 \frac{2,43}{\sqrt{936}} (\sqrt{26} - 2)^2 \right] = 1,15 \Omega$$

$$R_{me} = \frac{\rho_a}{\pi Lm} \left[ \ln \frac{2Lm}{L} + K_1 \frac{Lm}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_{me} = \frac{100}{\pi * 180} \left[ \ln \frac{2 * 180}{2,43} + 1,072 \frac{180}{\sqrt{936}} - 4,94 + 1 \right] = 0,5 \Omega$$

Finalmente, la resistencia total se obtuvo de:

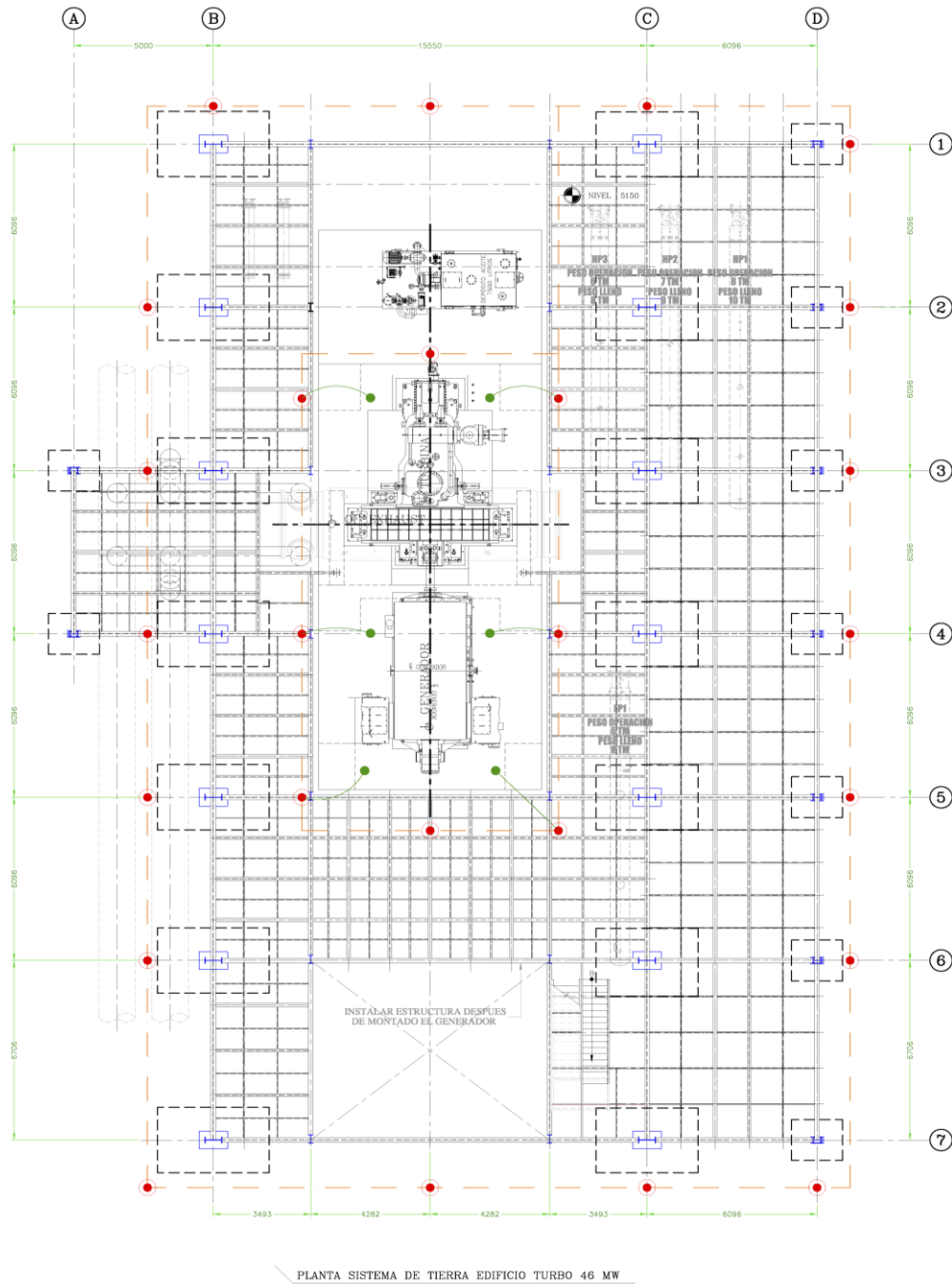
$$R_T = \frac{R_m R_e - R_{me}^2}{R_m + R_e - 2R_{me}}$$

$$R_T = \frac{1,20 * 1,15 - 0,5^2}{1,20 + 1,15 - 2 * 0,5} = 0,84 \Omega$$

Como  $R_T < 1 \Omega$  se considera que la red está dentro de la Norma del IEEE1986, para subestaciones de potencia en alta tensión a nivel de transmisión y subtransmisión.



Figura 15. Diseño de la red de tierra



Fuente: Ingenio Palo Gordo.

## **3.2. Descripción del montaje de la unidad de generación**

Para el montaje se utilizaron máquinas e instrumentos que se describen a continuación.

### **3.2.1. Instrumentos de montaje de la unidad de generación**

Para este montaje se utilizó maquinaria y equipo de trabajos pesados, este turbogenerador venia en dos partes: turbina y generador, por lo cual se utilizó el siguiente equipo y maquinaria.

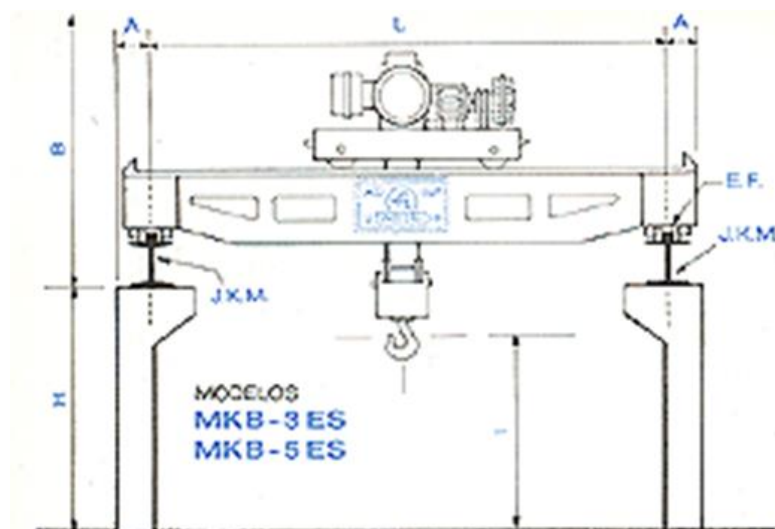
#### **3.2.1.1. Grúa puente o viajera eléctrica**

Las grúas viajeras eléctricas que se utilizaron en este montaje son marca Abus, con capacidad de 65 000 kg cada una, es tipo de doble riel, tal como lo muestra la figura 16 y consta en dos vigas puente, en la parte superior de las cuales están los rieles sobre los que rueda la unidad compacta de izamiento integral, llamada trole cargador.

Las vigas están soportadas en los extremos por carros con dos o cuatro ruedas, según el tamaño de la grúa. La grúa se mueve a lo largo de la vía por medio del motor a través del árbol (flecha) y se engrana a las ruedas del carro. La cabina del operador está suspendida de las vigas en uno de los lados y en ella se encuentran el controlador o interruptores maestros, el cilindro maestro del freno hidráulico, los dispositivos de alarma, entre otros. Las vigas puente para las grúas pequeñas son del tipo de viga "I", pero en los claros grandes se usan vigas de caja para darles rigidez torsional y lateral.

Las vigas están unidas en forma rígida a los bastidores de extremos de los carros, los cuales llevan ruedas de doble pestaña o ceja para soportar el puente. Los bastidores de extremo sobresalen de los rieles, de modo que, en caso de rotura de una rueda o un eje, el bastidor descansa sobre el riel e impide la caída de la grúa. Uno de los ejes de rueda en cada carro tiene engranes para impulsar la grúa y está acoplado directo con el árbol que transmite la potencia hasta el reductor de engranes.

Figura 16. Grúa viajera eléctrica



Fuente: Gruas abus. <http://es.slideshare.net/ESCORPION110/gruas-abus>. Consulta: mayo de 2015.

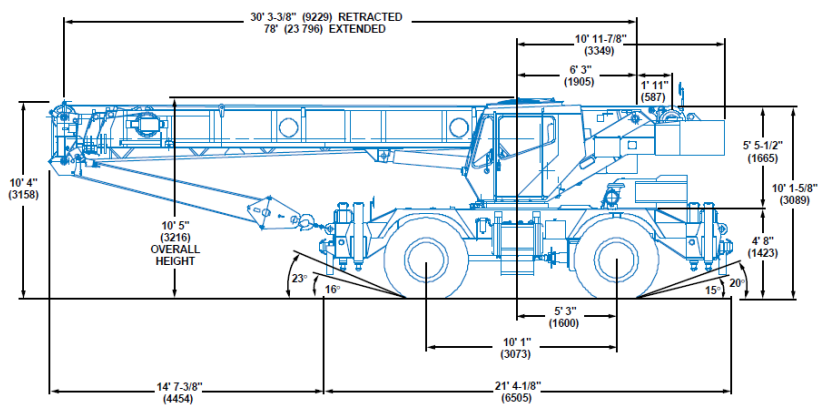
### 3.2.1.2. Grúa automóvil hidráulica o motogrúa

Esta motogrúa hidráulica es de 25 000 kg de capacidad marca Grove, modelo RT522, equipada con una pluma telescópica hasta de 23 m más una extensión de 7 m, dando un total de 30 m de pluma, tal como lo muestra la

figura 17 tiene cuatros ejes, una cabina; donde la grúa se controla desde la cabina superior.

Las extensiones hidráulicas ahorran el tiempo para montaje y permiten el traslado de un trabajo a otro.

Figura 17. **Grúa autom6vil hidr1ulica**



Fuente: Gruas grove. <http://gruasdehermosillo.com/gruas-de-hermosillo-grua-grove-tms-865>.

Consulta: mayo de 2015.

### 3.2.2. **Montaje del turbogenerador de 46 MW**

El proceso del montaje se realizó en tres etapas, los montajes fueron hechos con la motogrúa hidr1ulica y con dos grúas puente descritas anteriormente, la primera etapa fue el montaje del tanque de condensaci3n, la segunda fue el montaje de la turbina y la tercera fue el montaje del generador.

### 3.2.3. **Montaje del tanque de condensado**

Para este montaje ya se contaba con la cimentaci3n de la base del tanque, luego se fabric3 una estructura met1lica provisional que fuese capaz de

soportar el tanque, la que debería de cumplir con las siguientes características: tener la misma altura y ancho, que la base de donde se instaló el tanque, ya que es un lugar estrecho, de muy difícil acceso.

Para su montaje se utilizó una motogrúa hidráulica como la que se describió anteriormente, cadenas y polipastos. El tanque se colocó sobre la estructura metálica, luego con cadenas y polipastos se haló desde la parte de adentro donde se instaló el tanque hasta hacerlo llegar a su lugar. El tanque de condensado está asentado en la cimentación de concreto y en la parte superior como en la inferior cuenta con flanches con agujeros, los cuales sirven para anclar por medio de tornillos y tuercas, el tanque con las tolvas que conducen el vapor y el agua.

**Figura 18. Tanque de condensado montado sobre estructura provisional**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Figura 19. **Tanque de condensado siendo arrastrado para su instalación**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Figura 20. **Tanque de condensado instalado en el punto**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.



### 3.2.4. Montaje de turbina

Para realizar el montaje de la turbina primero se tuvo que conocer el peso de la misma, para poder determinar la capacidad de la maquinaria a utilizar, se determinó que el peso de la turbina es de 110 000 kg, por lo tanto, se usaron dos grúas puente eléctrica con capacidad de 63 000 kg cada una, estas trabajaron en paralelo teniendo capacidad entre las dos de 126 000 kg, como se muestra en la figura 22.

Para que las grúas puente puedan trabajar en paralelo es necesario usar un balancín para que las dos trabajen y carguen a la misma altura, con la finalidad de que la carga no se mueva de un lado a otro. La parte superior del balancín se sujetó a las grúas puente, por medio de dos ganchos en cada extremo y en la parte inferior donde fue sostenida la turbina, se le colocaron tres ganchos para equilibrar el peso, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Balancín



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Figura 22. **Grúas puente en paralelo**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Se colocó la turbina en el área donde se levantaría por las grúas puente hasta llevarlo al lugar donde se instaló, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. **Montaje de turbina**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.



### **3.2.5. Montaje del generador**

Al igual que en el montaje de la turbina, primero se tiene que conocer el peso del generador para poder determinar la capacidad de la maquinaria a utilizar, se determinó que el peso de la turbina es de 78 500 kg, por lo tanto, se usaron dos grúas puente eléctricas con capacidad de 63 000 kg cada una, estas trabajaron también en paralelo, teniendo capacidad entre las dos, de 126 000 kg.

Se utilizaron las dos grúas puente en paralelo, acopladas a un balancín, estas grúas eran accionadas por dos personas u operadores que estaban ubicados en dos puntos diferentes de la estructura del edificio, los cuales seguían órdenes de una persona responsable de dirigir el montaje en ese momento, la persona encargada de dirigir estaba ubicada en un punto clave para poder observar el equipo que se levantaría y que lo pudieran ver los operadores de las grúas, en la figura 24, se puede observar el momento en que el generador se encuentra levantado por las grúas y está siendo llevado a su punto de instalación.

Figura 24. **Montaje del generador**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Para efectuar el montaje del turbo y el generador, primero se realizó la cimentación de las bases con sus respectivos pernos para la sujeción del ambos componentes, ya que las bases de los mismos cuentan con los agujeros para los pernos y así anclar los equipos.

Dentro de los cuidados que se tienen para poder efectuar estas labores son los siguientes:

- El personal debe contar con equipo de protección como guantes, casco, lentes, botas, entre otros.
- Establecer un perímetro de seguridad de 10 a 15 metros de distancia para protección de personal, durante el levantado de la turbina y el generador, esto a nivel del suelo.
- Una sola persona encargada de dirigir a los operadores de las grúas y al personal de apoyo.
- Estar alerta a cualquier problema que se presente.

En el montaje del generador se tuvo el problema que durante el levantado del generador, se quemó un fusible de una de las grúas viajeras, lo cual dejó al generador suspendido a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo, fue necesario llamar a equipo técnico del fabricante de la grúa para que revisara cuál había sido la causa y reparar el problema, ya que en el ingenio no se contaba con el repuesto.

### **3.3. Alineamiento de turbina y generador**

Esto quiere decir, unir el rotor del generador y el rotor de la turbina por medio de un acoplamiento rígido. La base o el punto fijo es el rotor de la turbina, deber observarse que el manual pide la altura de la última chumacera o sea la del colector, esta altura está alrededor de 0,003 mm. Para el apriete del acople, también debe referirse al manual, ya que cada turbo tiene su altura y su forma diferente de tolerancias de medidas del acoplamiento; un chequeo que debe hacerse es acercar ambos acoples y medir la distancia entre ellos en los cuatro puntos (en la parte de arriba, abajo y en los extremos). Según el manual puede quedar abierto algunas milésimas arriba o abajo. Luego se mide la longitud de los tornillos que aprietan el acople, se ponen y se aprietan hasta que el tornillo estire su longitud más 1,5 milésimas de milímetro de longitud del mismo, este estiramiento sirve para que se afloje con el trabajo y la temperatura. Una vez acoplado se hicieron los siguientes chequeos:

- Para turbos de dos a tres chumaceras, se realizó *sling check*; levantando la última chumacera 0,002 mm, con cable largo y en un solo hilo, colocando un reloj comparador en los lados verificando que el rotor no se mueva hacia los lados, solo se acepta  $\pm 0,002$  mm de movimiento; si esto no está dentro de estos parámetros se corrige con el apriete de los tornillos del acople.

- Verificar que la chumacera está perfectamente alineada. Para ello se levanta el eje 0,002 mm y se desliza la última chumacera hacia arriba, para sacarla esta debe salir muy suave, con ayuda de un reloj comparador se observa que el eje no se mueva hacia ningún lado más de 0,002 mm, si se corriera más de esto se corre el pedestal de la chumacera hasta que esto no ocurra.
- Deben girarse ambos rotores a la vez y con ayuda de un reloj comparador se observa que ninguno de los cuatro puntos se salga de la concentricidad, es decir 0,0015 mm de corrimiento, si esto no se cumple, se corrige moviendo el generador y colocándose platinas de la medida y del lado que se necesite, hasta obtener la concentricidad necesaria.

### **3.4. Cálculo del cableado de salida del generador**

La transmisión de energía en forma segura y eficiente depende de una correcta selección del calibre del conductor.

La capacidad de conducción de corriente de los conductores eléctricos depende de muchos factores, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: tipo de instalación (*conduit*, bandeja, ducto subterráneo), del arreglo de los conductores (plano, trébol, entre otros), de la temperatura de operación de los conductores seleccionados, de la longitud del circuito, entre otros. Debido a lo anterior, se debe realizar un estudio completo de la instalación eléctrica diseñada.

A continuación se indica cómo calcular la capacidad de conducción de corriente para conductores eléctricos en tubería *conduit* de acuerdo con la Norma de instalaciones eléctricas NOM-001-SEDE-2005:

Elegir el tipo de producto requerido en función de su aplicación, materiales, construcción y temperatura del conductor.

Determinar la corriente nominal de la carga, utilizando las fórmulas indicadas en la tabla siguiente, de acuerdo con el tipo de sistema eléctrico (de corriente continua, de corriente alterna monofásico o trifásico) y del tipo de carga (motores, alumbrado u otras cargas).

$$I_{\text{nominal}} = \frac{\text{MW}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \text{fp}} = \frac{46,000,000}{\sqrt{3} \cdot 13800 \cdot 0,8} = 2\,406 \text{ amp} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Se seleccionó el calibre del cable que se utilizó para conducir la energía del generador hacia la subestación, siendo un cable calibre 350 MCM, que tiene una capacidad de 310 amp, se utilizó este calibre por la facilidad con la cual se puede maniobrar y por tener una buena capacidad de conductividad, luego se calculó la cantidad de cables por fase que se usará.

$$\text{Número de cables por fase} = \frac{I_{\text{nominal}}}{I_{\text{conductor}}} = \frac{2,406}{310} = 7,76 = 8 \quad (\text{Ecuación 21})$$

De acuerdo al artículo 110-14 de la NOM-001-SEDE-2005, si la corriente en el circuito es mayor a 100 amp, se elige la capacidad de corriente a una temperatura de operación del conductor de 75 °C. Si la corriente del circuito es menor de 100 amp, se elige la capacidad de corriente a una temperatura de operación del conductor de 60 °C.

Tabla III. **Tabla general de las capacidades de los conductores de cobre**

Calibre  AWG o kcmil	Área de la sección transversal nominal  mm <sup>2</sup>	Temperatura nominal del conductor					
		60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C
		TW TWD CCE	THW, RHW THW-LS THWN XHHW	RHH, RHW-2 THHN, THW-2 TTHW-LS, XHHW-2	UF	RHW XHHW	RHW-2 XHHW XHHW-2 DRS
		Cobre			Aluminio		
14	2,08	20*	20*	25*	-	-	-
12	3,31	25*	25*	30*	-	-	-
10	5,26	30	35*	40*	-	-	-
8	8,37	40	50	55	-	-	-
6	13,3	55	65	75	40	50	60
4	21,2	70	85	95	55	65	75
2	33,6	95	115	130	75	90	100
1/0	53,5	125	150	170	100	120	135
2/0	67,4	145	175	195	115	135	150
3/0	85,0	165	200	225	130	155	175
4/0	107	195	230	260	150	180	205
250	127	215	255	290	170	205	230
300	152	240	285	320	190	230	255
350	177	260	310	350	210	250	280
400	203	280	335	380	225	270	305

Fuente: General cable. <http://es.generalcable.com/>. Consulta: mayo de 2015.

Una vez elegido el calibre del conductor, se corrigió la capacidad de conducción de corriente tomada de la tabla III, en función de la temperatura ambiente del lugar de instalación, para ello se multiplicó por el factor de corrección que se indica en la tabla IV.

Tabla IV. Factores de corrección por temperatura ambiente

Temperatura ambiente en el lugar de la instalación °C	60°C	75°C	90°C
21 – 25	1,08	1,05	1,04
26 – 30	1,00	1,00	1,00
31 – 35	0,91	0,94	0,96
36 – 40	0,82	0,88	0,91
41 – 45	0,71	0,82	0,87
46 – 50	0,58	0,75	0,82
51 – 55	0,41	0,67	0,76

Fuente: General cable. <http://es.generalcable.com/>. Consulta: mayo de 2015.

Cálculo del calibre del conductor tomando en cuenta los factores de corrección de temperatura ambiente de 31 a 35 °C con un factor de corrección de 0,94.

$$I_{\text{conductor}} = \frac{I_{\text{nominal}}}{\text{conductores} * \text{factores}} = \frac{2406}{8 * (0,94)} = 319,94 \text{ A} \quad (22)$$

Se puede constatar que el cable que se empleó para conducir la corriente del generador hacia la subestación cumple con los resultados obtenidos del cálculo, ya que el cable calibre # 350 MCM tienen una capacidad de 415 a 460 amp instalado en bandeja, la marca del cable es general cable con las siguientes especificaciones: EPR/ escudo de cinta de cobre/PVC, de potencia de media tensión, blindado, 15 kV, UL tipo MV-105, 133 % nivel instalado 220 MILS, como se observa en la figura 25.

Figura 25. **Capacidad del cable conductor instalado en el proyecto**

COND. SIZE (AWG/kcmil)	NOMINAL CONDUCTOR DIAMETER	INSULATION DIAMETER INCHES		NOMINAL JACKET THICKNESS		NOMINAL CABLE				COPPER WEIGHT		AMPACITY					
						DIAMETER		WEIGHT				CONDUIT IN AIR (1)		UNDERGROUND DUCT (2)		TRAY (3)	
						INCHES	mm	LBS/1000 FT	kg/km			90°C	105°C	90°C	105°C	90°C	105°C
<b>15 kV<sup>l</sup>, UL TYPE MV-105, 133% INS. LEVEL, 220 MILS</b>																	
2	0.27	0.710	0.800	0.080	2.03	0.99	25.14	658	979	276	411	150	165	155	165	-	-
1	0.31	0.745	0.830	0.080	2.03	1.02	25.91	733	1090	332	494	170	190	175	185	-	-
1/0	0.34	0.780	0.865	0.080	2.03	1.06	26.92	825	1228	403	600	195	215	200	215	195	220
2/0	0.38	0.820	0.905	0.080	2.03	1.10	27.94	938	1396	492	732	225	255	230	245	225	250
3/0	0.43	0.865	0.955	0.080	2.03	1.14	28.95	1078	1604	603	897	260	290	260	275	260	290
4/0	0.48	0.920	1.005	0.080	2.03	1.21	30.73	1261	1876	743	1105	295	330	295	315	300	335
250	0.53	0.970	1.060	0.080	2.03	1.25	31.75	1407	2093	866	1289	330	365	325	345	335	370
350	0.62	1.070	1.155	0.080	2.03	1.35	34.29	1783	2653	1184	1761	395	440	390	415	415	460

Fuente: General cable. <http://es.generalcable.com/>. Consulta: mayo de 2015.

Se calcula ahora la caída de tensión con base al calibre del conductor que se seleccionará para esto se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta V = R_l * I = \rho \frac{L}{S} * I = 0,017 * \frac{8*130}{202,6} * 2\,406 = 210 \text{ V} \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$\% \text{ caída} = \frac{\Delta V}{V} * 100 = \frac{210}{13\,800} * 100 = 1,52 \% \quad (\text{Ecuación 24})$$

Tomando en cuenta que la caída de tensión no debe ser mayor al 5 %.

### 3.5. Descripción de los paneles de control a instalar

A continuación se detalla los paneles que utilizan los equipos eléctricos para operar la turbina y el generador.

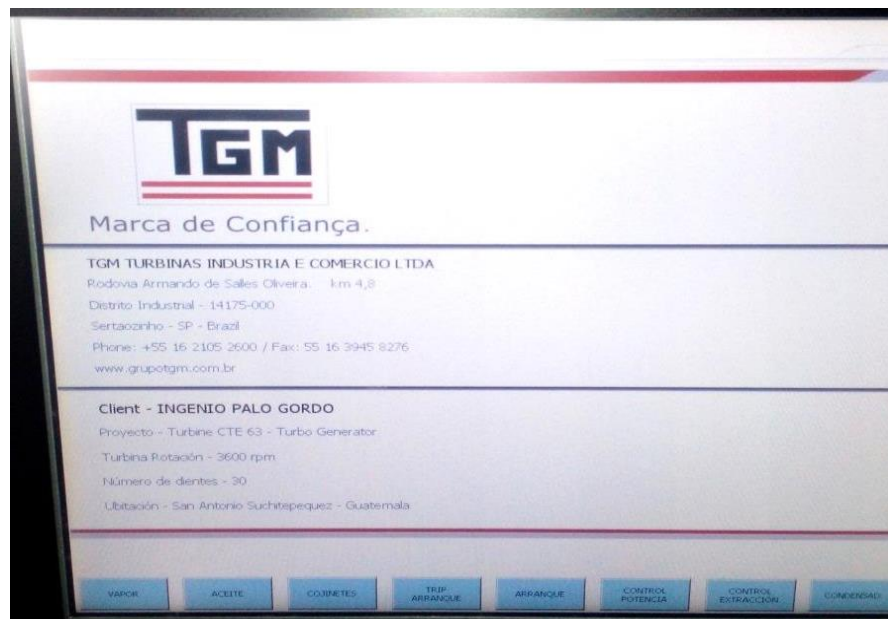


### 3.5.1. Panel de control de la turbina

Cada modelo de turbina tiene un tablero de control equipado con instrumentos de alta tecnología, garantizando alta seguridad y fácil operación.

El panel de control es marca Siemens y tiene una pantalla *touch* que despliega todas las mediciones y lecturas que se tienen de la turbina, a continuación, en la figura 26 se muestra en diferentes vistas que tiene la pantalla.

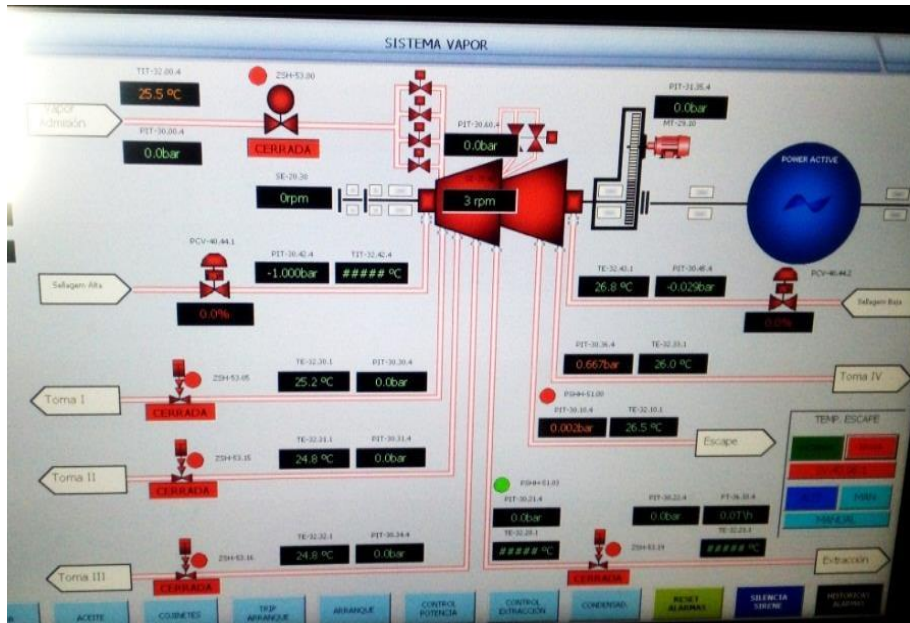
Figura 26. Pantalla de inicio del panel de control de la turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 27 se observa la descripción de la turbina, la marca, el modelo, la descripción del dueño de la turbina, la dirección donde fue instalada, el nombre del proveedor, su dirección y teléfono en Brasil.

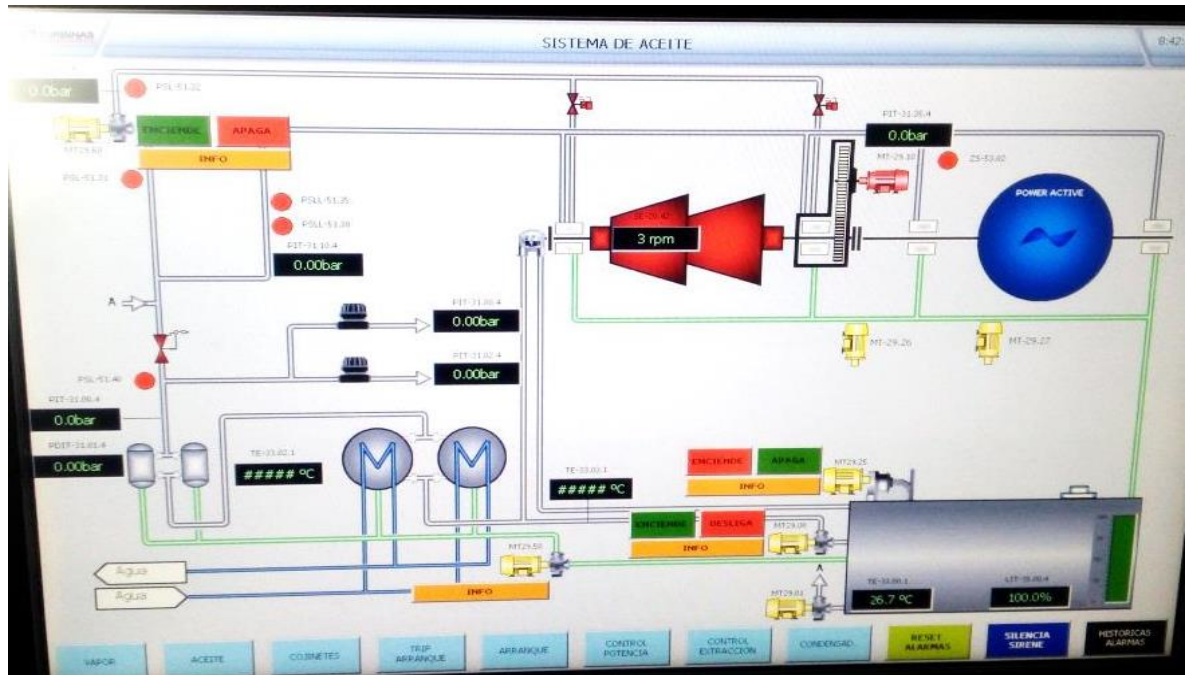
Figura 27. Pantalla de medición del sistema de vapor para la turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 28, se puede observar la pantalla de medición del vapor que utiliza la turbina, también los diagramas de la línea de vapor y las válvulas que accionan. Las lecturas que controla esta pantalla son las de flujo de vapor, la presión y la temperatura en toda la línea.

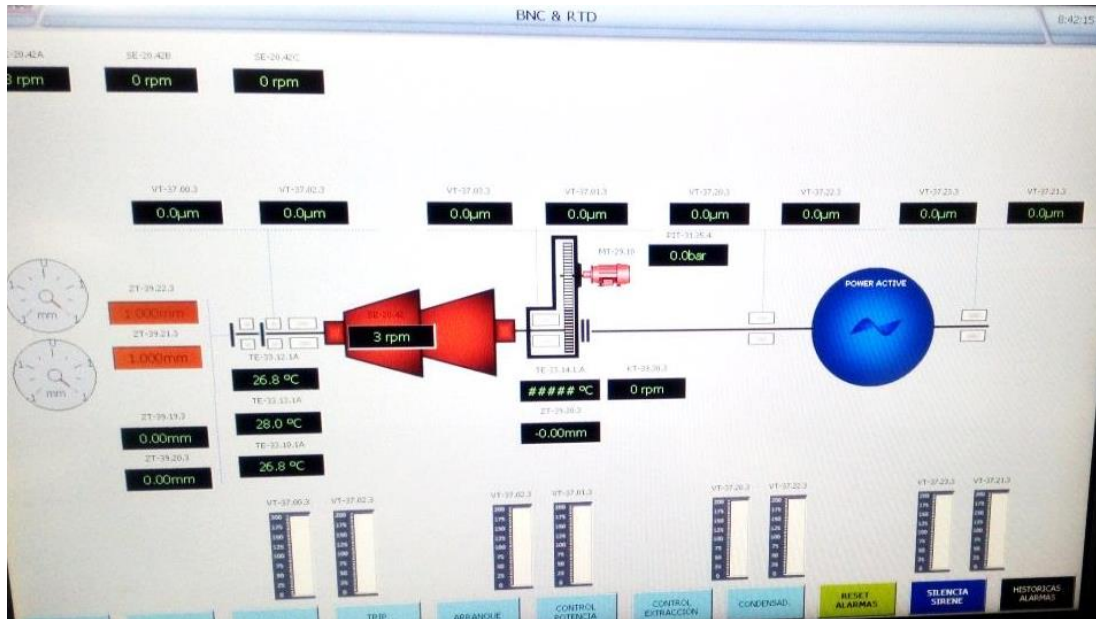
Figura 28. Pantalla de medición del sistema de aceite en la turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 28 se observa el sistema de lubricación de aceite en la turbina, las mediciones que despliega el panel son las de presión de aceite y temperatura del aceite en varias partes de la turbina, así como las válvulas y el tanque de aceite.

Figura 29. Pantalla de medición de los cojinetes o chumaceras



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 29 se observan las mediciones de vibración y de la temperatura de operación de los cojinetes o chumaceras de la turbina y del generador.

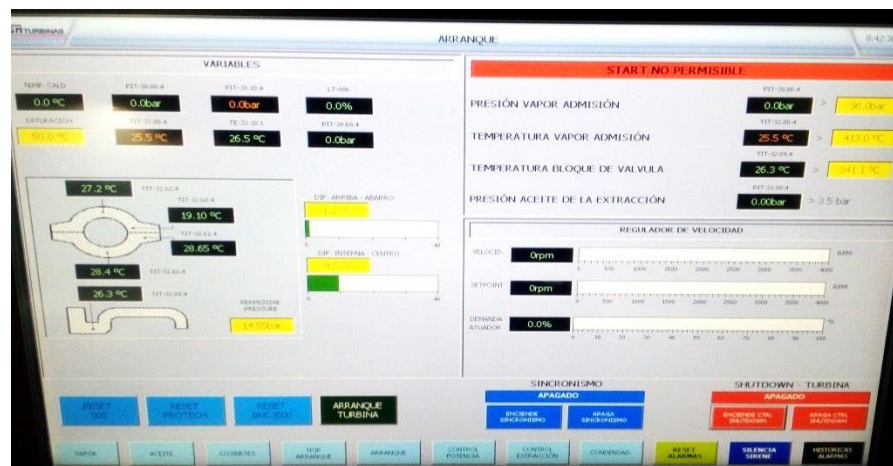
Figura 30. Pantalla de inicio de arranque de turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 30 se observa un listado de campos que se tienen que cumplir o haberse chequeado antes de realizar el arranque de la máquina.

Figura 31. Pantalla de arranque de la turbina

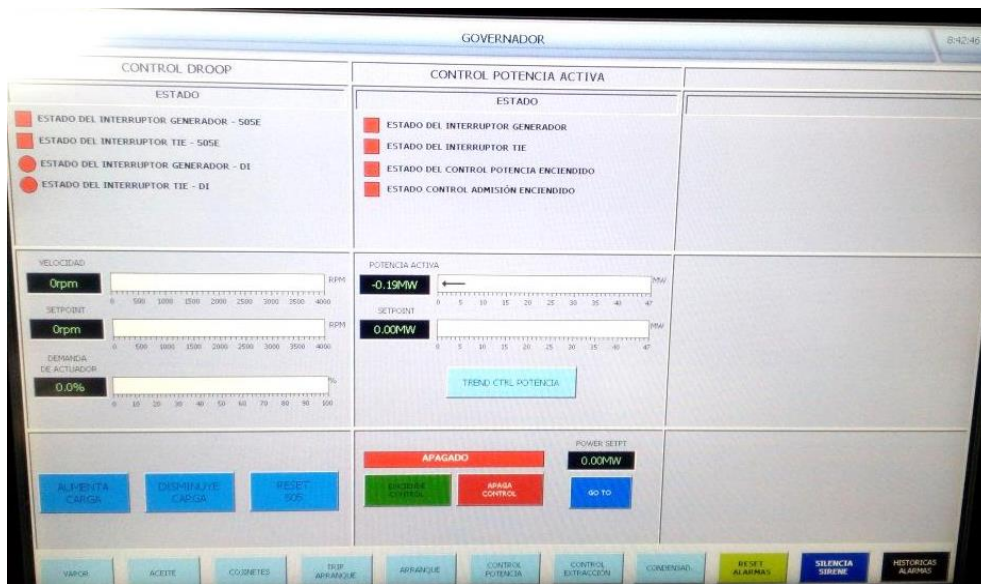


Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.



En la figura 31 se observa la pantalla de arranque, el sincronismo y apagado de la turbina, así como algunas mediciones que son esenciales para el arranque, como la presión de admisión de vapor, la temperatura de vapor de admisión, temperatura de bloque de válvula y la presión de aceite de la extracción.

Figura 32. Pantalla de control del gobernador de la turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 32 se observa la pantalla del gobernador de la turbina, esta controla la potencia activa y controla la velocidad de la turbina.

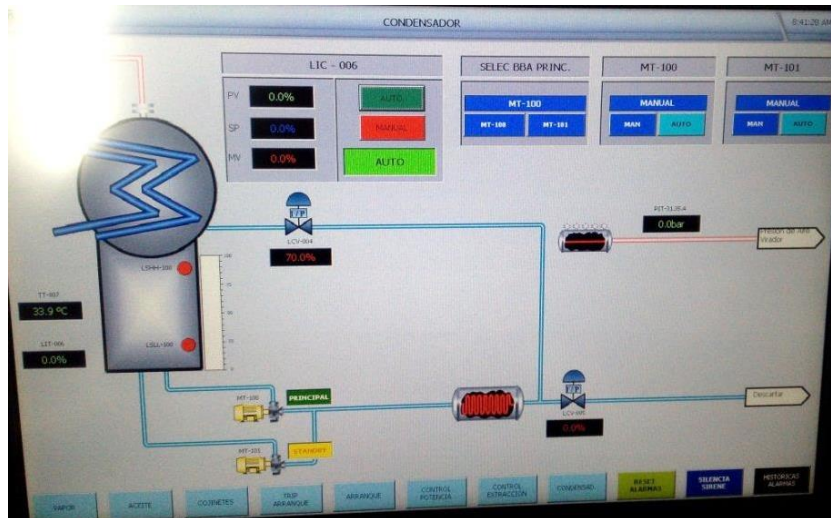
Figura 33. Pantalla de control de extracción y admisión del tubo



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 33 se observan las válvulas de extracción y admisión de vapor de la turbina, pudiéndose controlar las válvulas de acción rápida para apertura, por alguna falla.

Figura 34. Pantalla de sistema de condensado de la turbina



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En la figura 34 se observa la pantalla del sistema de condensado, esto quiere decir, la admisión del vapor al tanque de condensado y la extracción de agua del tanque de condensado, que es reinsertado nuevamente a la caldera, así como los motores y válvulas que se encuentran en la línea del sistema.

La pantalla tiene tres últimas opciones: el *reset* de la alarma, silenciar la sirena y el registro histórico de alarmas; que se han suscitado a lo largo de la vida útil de la turbina.

Para el control de potencia de la turbina y control de velocidad, directamente de la turbina, se utiliza un controlador 505 Woodward como el que se muestra en la figura 35.



Figura 35. **Tablero de control Woodward 505**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

### 3.5.2. **Panel de control del generador**

Al igual que las turbinas, cada modelo de generador tiene un tablero de control equipado con instrumentos de alta tecnología, garantizando alta seguridad y fácil operación, como se muestra en la figura 36.

Figura 36. **Tablero de control del generador**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

El panel de control que se observa en la figura 36 está compuesto de dos partes, la del lado izquierdo es el panel de protección del generador y la del derecho, es el panel de excitación y sincronismo del generador.

En el panel de protección del generador se encuentran los siguientes instrumentos de medición: La frecuencia en Hz, la potencia activa en MW, el factor de potencia, el amperaje en A y el voltaje en V. Existe un selector de posición para ver las lecturas por fase a fase o de fase a neutro según sea la necesidad, además de una luz de alarma, color ámbar, que significa alarma de protección, también cuenta con un relé de protección del generador, como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Instrumentos de medición del panel de protección

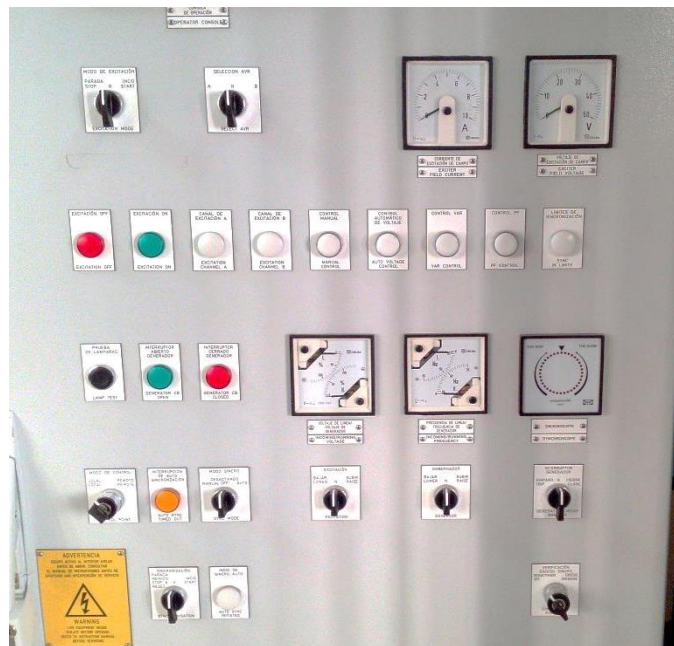


Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

En el panel de excitación y sincronismo del generador se encuentran los siguientes instrumentos de medición: el voltaje de línea *versus* voltaje del generador, la frecuencia de línea *versus* frecuencia del generador, sincronoscopio; también tiene 9 selectores de posición tales como: el modo de excitación (parada, normal o inicio), selección AVR (A, normal o B), el modo de control (local o remoto), modo de sincro (manual, *off* o automático), sincronización (parada, normal e Inicio), excitación (bajar, normal o subir), gobernador (bajar, normal o subir), interruptor del generador (disparo, normal o cierre), verificación de exceso sincro (desactivado, normal o exceso); también se encuentran 14 luces de alarmas, las cuales son: excitación *off* (rojo), excitación *on* (verde), canal de excitación A (blanca), canal de excitación B (blanca), control manual (blanca), control automático de voltaje (blanco), control VAR (blanca), control PF (blanca), límites de sincronización (blanca), botonera para prueba de lámpara (negra), interruptor abierto de generador (verde),

interruptor cerrado de generador (rojo), interrupción de auto-sincronización (ámbar), inicio de sincro auto (blanca), como se muestran en la figura 38.

Figura 38. Instrumentos de medición del panel de excitación y sincronismo del generador



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

## **4. PROCEDIMIENTO PARA ARRANQUE Y APAGADO DEL TURBOGENERADOR**

Previo al arranque de la unidad es necesario realizar las siguientes actividades.

### **4.1. Limpieza del aceite de la turbina**

Se entiende como una circulación de aceite a través de la tubería y conductos por donde circula el aceite con el propósito de limpiar la suciedad y partículas que en el montaje se formaron o ingresaron en la tubería; y que durante la operación del turbogenerador puedan tapar conductos del sistema de gobernación o alimentación de las chumaceras y cojinetes, como consecuencia, causando un problema de control de la velocidad de la turbina o daño en las chumaceras o cojinetes al quedarse sin aceite.

La limpieza de aceite hidráulico deberá hacerse por un periodo no menor de ocho días hasta no se tiene suciedad en el aceite. La limpieza del aceite se realiza de la siguiente forma:

- Es necesario a la entrada de cada chumacera colocar un filtro (con malla mesh 100) para evitar que entre suciedad a la misma y se recomienda limpiarlo diariamente. Es necesario retirar las chumaceras una por una y dejarle circulando aceite por dos días, para tener una mejor limpieza y un mayor flujo en cada una de las chumaceras.

- Golpear la tubería dándole énfasis en donde se realizaron trabajos de soldadura, para que bote el óxido, escoria y suciedad adherida.
- Se debe dar un *shock* térmico usando el enfriador de aceite; es decir dejar que se caliente el aceite y enfriarlo, esto ayuda a que la tubería suelte las impurezas.

#### **4.2. Limpieza de la tubería principal de vapor**

Un vapor limpio o libre de partículas extrañas debe ser provisto a la entrada de una turbina.

La experiencia ha demostrado la extrema importancia del soplado de la tubería principal y de admisión, antes de que la turbina de vapor sea puesta en operación. El soplado reduce grandemente el potencial de daño a la turbina por partículas de soldadura y por escoria. A menos que estas partículas sean expulsadas de las líneas de vapor antes del arranque de la turbina, ellas son transportadas por el vapor a través de las líneas de vapor hacia la turbina. El efecto del impacto de municiones de estas partículas extrañas puede causar desgaste de las líneas de vapor de la turbina, la cual operará por un corto período de tiempo de 15 o 20 años.

El método más satisfactorio de limpieza de la tubería de vapor es por medio de calentar a 350 °C y enfriar a 100 °C en un ciclo de soplado. La presión se genera en la caldera y es enviada a las líneas de vapor. Las líneas de vapor se enfrían mientras la presión se eleva de nuevo. El ciclo calentamiento-enfriamiento hace que la tubería se dilate y se contraiga, esto es repetitivo hasta que las líneas se observen limpias. El soplado se hace con una válvula de mariposa o de otro tipo tratando de dar abertura total en 15 minutos,

limitando la operación de limpieza a un número específico de ciclos de soplado o hasta que las líneas aparezcan limpias, esto se observa por los impactos en el testigo, cambiándolos a cada dos soplados. En la figura 40 se observan varias incrustaciones de escoria que expulsó la tubería después del primer soplado.

En la figura 39 se observa la tubería provisional que se instaló para realizar la prueba de soplado y la válvula donde se instaló el testigo.

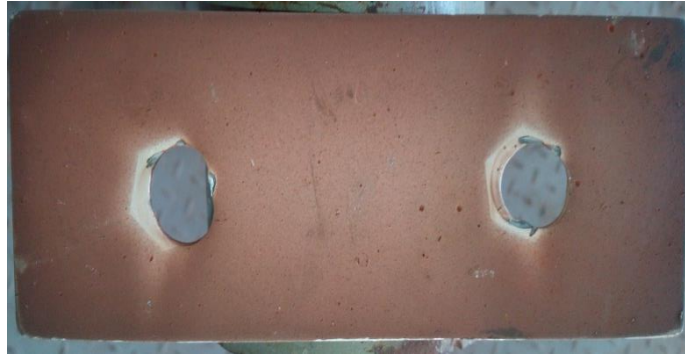
Figura 39. **Tubería provisional para soplado**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.



Figura 40. **Testigo de aluminio después del primer soplado**



Fuente: empresa Ingenio Palo Gordo.

Se ha encontrado que una efectiva limpieza puede ser después de hasta 25 soplados.

#### **4.3. Rotación de la máquina, arranque y carga de la turbina**

La vida de un turbogenerador depende de los procedimientos usados en el arranque, toma de carga y parada de la unidad. Procedimientos correctos significan operación libre de fallas y son especialmente importantes cuando la unidad está sujeta a frecuentes arranques y ciclos de carga.

Algunas veces, una turbina arranca sin dificultad, aun cuando un procedimiento incorrecto se ha seguido y ninguna falla se hará evidente durante el periodo inicial de servicio. No obstante, en una inspección posterior se pueden hallar daños incluyendo rozamiento en sellos, distorsión de la estructura y ruptura de partes de la turbina.

Los factores que gobiernan el arranque de muchas turbinas incluyen:



- Esfuerzo térmico: excesivo y repetitivo, puede agrietar el metal de la turbina. La ruptura es una función del número total de ciclos de temperatura y el tamaño de la deformación plástica por ciclo; esto es, la ruptura de un gran número de esfuerzos térmicos menos severos.
- Vibración: durante el periodo de rotación, particularmente en turbinas nuevas con sellos muy ajustados, un roce ligero se puede producir a pesar de tener buenos procedimientos y condiciones térmicas ideales. Tales roces es probable que ocurran durante operaciones cercanas a velocidades críticas cuando la deflexión en el centro del eje es máxima.

Se conoce que el roce existe debido a un incremento de la vibración (ruido), mientras se opera por debajo o muy cerca de las velocidades críticas. Si esto sucede, la turbina debe desactivarse inmediatamente cortando el suministro de vapor y ponerla a girar con el dispositivo de rotación eléctrica (*turning gear*) durante una o dos horas.

A velocidad arriba de la crítica el desbalance provocado por el arqueado tiende a disminuir el arco y consecuentemente a aliviar el roce.

- Expansión diferencial entre el rotor y la carcasa (distorsión térmica):

Se puede producir una gran expansión diferencial entre el rotor y la carcasa o diafragmas, que puede causar roces interiores. La distorsión térmica de los componentes mayores de la turbina puede causar fugas en los flanches de alineamiento, alabeo permanente de partes y pueden también, afectar el balance de la unidad.

En general, expansión diferencial o distorsión térmica no causan dificultades si un adecuado control de esfuerzos térmicos se mantiene. La vibración del eje puede mantenerse baja con una correcta temperatura del metal en la carcasa y el rotor durante el arranque.

#### **4.4. Procedimiento de arranque de la turbina**

Para entrar en funcionamiento la unidad de generación se deben seguir los siguientes pasos para el arranque de la turbina:

- Abrir las válvulas de drenaje hacia la atmósfera antes y después de la válvula manual de admisión para que empiece a generar un flujo de vapor.
- Se calienta la válvula de admisión por medio del flujo de vapor a través de la línea principal de vapor hasta alcanzar una temperatura de 335 °C, y a una presión de 1 226 Psi, luego que alcanza la temperatura y la presión adecuada, la válvula de admisión abre para dejar pasar el vapor.
- Luego, este vapor empieza a calentar el bloque de válvulas que se encuentra cerrado, por medio de un flujo de vapor. Para que este flujo de vapor pueda ocurrir se tienen que abrir las 5 válvulas de purga que sacan el vapor hacia la atmósfera, hasta que el bloque de válvulas haya alcanzado una temperatura de 366 °C, da el permiso para poder arrancar la turbina y abrir el bloque de válvulas, para que exista un flujo de vapor que la haga girar lentamente a una velocidad inicial de 125 rpm.
- Colocar en servicio la bomba de emergencia en modo automático.

- Colocar en servicio la bomba auxiliar de aceite en modo automático.
- Colocar en servicio el motor del extractor de niebla del taque de aceite.
- Oprimir el *switch* de encendido del motor de giro lento en el panel para ponerlo en servicio.
- Cuando la turbina alcanza la velocidad de 500 rpm se desconecta automáticamente el motor de giro lento y también se desconecta la bomba auxiliar de aceite, ya que para este momento la turbina es capaz de mantener por medio de la bomba mecánica de aceite la lubricación de la turbina.
- La velocidad de la turbina empieza a subir gradualmente hasta llegar a la velocidad de 721 rpm, la turbina entra en una rampa de espera 35 minutos a que se cumplan las siguientes condiciones:
  - Una presión de vapor de admisión de 96 bar
  - Una temperatura de vapor de admisión de 413,02 °C
  - Una temperatura de bloque de válvulas de 341,14 °C
  - Una presión de aceite de 3,5 bar
- Luego de que se han cumplido las condiciones anteriores, la velocidad de la turbina sube gradualmente hasta la velocidad nominal de 3 600 rpm, momento en el cual hay que esperar a que caliente por un tiempo de 25 minutos para poder sincronizar.
- Colocar en modo de inicio para iniciar la excitación del generador, con esto se puede observar en el panel de lectura las siguientes mediciones:

- Un voltaje de línea de 13,8 kv
  - La frecuencia de 60 Hz
  - Una potencia activa de 2 Mw
  - Una corriente de línea del generador de 250 amp
- Colocar en modo automático el *switch* de sincronismo.
  - El generador debe tener una carga de 2 a 5 MW al inicio para que el relé de protección no detecte una falla por baja potencia y pare el proceso de sincronismo.
  - Iniciar el sincronismo del generador por medio del *switch* de sincronismo, esperar a que el generador se sincronice y se cierre el interruptor automático del generador, en este momento ya se encuentra sincronizado el generador.
  - Elevar la carga de potencia gradualmente de 1 MW cada 4 minutos hasta llegar a los 46 MW nominales.

#### **4.5. Procedimiento de apagado de la turbina**

Para parar la unidad de generación se debe realizar el procedimiento contrario al de encendido.

- Disminuir la carga al generador gradualmente de 46 MW hasta llegar a 2 MW, disminuyendo 1 MW cada 2 minutos, el gobernador de velocidad de la turbina demandará menos carga de vapor de la caldera.

- En el momento que el generador alcanza los 2 MW de potencia el interruptor automático se abre y se saca de sincronismo al generador.
- Se apaga el *switch* de excitación del generador, con esto se apaga completamente el generador.
- Se disminuye gradualmente la velocidad de la turbina de 3 600 rpm hasta dejar la turbina en vacío o sin carga con una velocidad de 721 rpm.
- Se cierra la válvula principal de la caldera hasta que ya no se le envía flujo de vapor a la turbina, esto hará que la velocidad de la turbina empiece a disminuir, hasta llegar a una velocidad de 500 rpm donde automáticamente se enciende el giro lento.
- Se deja funcionar el giro lento a una velocidad de 125 rpm por un tiempo de 36 a 40 horas, para que la turbina se enfríe para apagarla, esto con la finalidad de que no se tuerza el eje de la turbina.



## 5. PUESTA EN OPERACIÓN

### 5.1. Prueba de sobrevelocidad

Para poder realizar esta prueba fue necesario hacer primero la de protección mecánica para determinar a qué velocidad se protege la turbina, para esto fue necesario modificar los parámetros de protección eléctrica de la turbina elevando el rango al cual esta dispararía.

La protección mecánica consiste en un elemento mecánico montado en el eje de la turbina, el cual tiende a desplazar hacia fuera la acción de la fuerza centrífuga con la cual acciona otro elemento que interrumpe el circuito hidráulico y se cierran las válvulas de admisión y de entrada de vapor mediante un resorte, este dispositivo es de vital importancia, pues es el único que prevé que la turbina no gire a velocidades mayores al 10 % de la velocidad nominal, es recomendable que la velocidad de disparo sea ajustada al 7 % de la velocidad nominal.

Para esta prueba se elevó la velocidad de la turbina hasta que se disparó por sobre velocidad, dando como resultado los siguientes valores:

- Velocidad teórica: 3 960 rpm
- Velocidad realizada: 4 180 rpm
- Variación: 1,05 %

La prueba de la protección mecánica realizada de disparo por sobre velocidad fue exitosa, habiendo un pequeño margen de variación, ya que disparó la turbina a una velocidad similar a la teórica.

Luego de realizar esta prueba de protección mecánica se regresaron a la normalidad los parámetros de protección eléctrica de 3 960 rpm, para realizar la prueba de protección eléctrica.

La segunda prueba de sobrevelocidad por medio de la protección eléctrica de la turbina, consiste en monitorear la velocidad de la turbina por medio de sensores de velocidad, los cuales envían la señal a un panel de protección que controla la velocidad de la turbina, este panel es el encargado de realizar el disparo de la turbina. El panel de protección de la turbina es el *Pro Tech – GII*, de la marca *Woodward*.

Se elevó nuevamente la velocidad arriba del parámetro nominal de la turbina hasta que se disparó por sobre velocidad dando como resultado los siguientes valores:

- Velocidad teórica: 3 960 rpm
- Velocidad realizada: 3 960 rpm
- Variación: 0 %

Se determinó que ambas pruebas de sobrevelocidad son exitosas y que cumplen con lo requerido por el fabricante.



## **5.2. Prueba por baja presión de aceite**

Esta consiste en un presostato que vigila la presión de aceite y que al decaer por debajo del valor nominal, interrumpe el circuito hidráulico y se cierran las válvulas de admisión y la válvula de entrada de vapor.

Se simuló una disminución en la presión de aceite del sistema hidráulico, hasta que se cerró la válvula de cierre rápido, el disparo del turbogenerador fue a una presión de 58 psi.

También se simuló una disminución en la presión de aceite del sistema de lubricación, hasta que se cerró la válvula de cierre rápido, el disparo de la turbina fue a una presión de 28 psi.

## **5.3. Prueba de cortocircuito**

Para realizar esta prueba es necesario conectar las tres fases del generador por medio de cables o barras con la misma capacidad de corriente que la nominal, se realizó la prueba, por lo que se obtuvieron los siguientes resultados en el momento del disparo de la protección del generador:

- Voltaje = 0 v
- La corriente varió desde 0 hasta que alcanzó los 2 400 amp.
- La prueba fue un éxito, ya que el voltaje se mantuvo en 0 y la corriente alcanzó los 2 400 amp, que se esperaba.

#### **5.4. Prueba de fase a tierra**

Para realizar esta prueba es necesario conectar a tierra una de las tres terminales del generador por medio de un cable desnudo de cobre calibre 4/0 AWG, se elevó gradualmente el voltaje y la corriente, la corriente alcanzó los 30 A, antes de que se disparara la protección, esta prueba se realizó sin carga siendo un éxito la misma.

#### **5.5. Prueba de circuito abierto**

La prueba de circuito abierto o prueba sin carga consiste en colocar el generador en vacío, es decir sin carga alguna en los bornes, haciéndolo girar a su velocidad nominal y con corriente de campo igual a cero. Al aumentar gradualmente el valor de la corriente de campo, se obtiene diversos valores, ya que la corriente de armadura siempre será cero debido a que se encuentra en vacío, el voltaje se irá incrementando hasta llegar al voltaje nominal que es 13 800 V, siendo esta prueba un éxito.

#### **5.6. Prueba de sobrevoltaje**

La característica de la protección de sobrevoltaje es que monitorea el voltaje sensado por el relé de protección y causa el paro del generador cuando este voltaje sensado excede el nivel prefijado de disparo de 115 % por 2 segundos.

Se hizo una modificación de la programación del relé de protección, haciendo creer al programa que el voltaje nominal era de 11 730 V y que el valor máximo de sobre voltaje permisible del generador al cual se deberá disparar la protección era de 13 489 V. Se realizó la prueba y el relé de

protección disparó el generador en el voltaje de 13 489 V, por lo que volvieron a la normalidad los parámetros de programación del relé de protección y se concluyó que la prueba fue un éxito.

### **5.7. Prueba de bajo voltaje**

Al igual que la prueba de sobrevoltaje, la de bajo voltaje utiliza los mismos instrumentos de sensado, pero con los siguientes parámetros; si el voltaje nominal disminuye al 85 % activará una alarma por un tiempo de 10 segundos, al finalizar este tiempo se disparará la protección. Segundo, si el voltaje nominal disminuye hasta un 80 % por un lapso de 3 segundos este disparará el relé de protección, protegiendo así el generador.

Se realizó la prueba reduciendo el voltaje de línea, primero a un 85 % (11,73 kV), por un tiempo de 10 segundos, esto hizo que se activara el relé de protección abriendo el interruptor automático, se volvió a reducir el voltaje de línea a un 80 % (11,04 kV) por un tiempo de 3 segundos, esto activo el relé de protección abriendo el interruptor automático, se concluyó que ambas pruebas fueron un éxito.

### **5.8. Prueba de sobrefrecuencia**

Para realizar esta prueba se tienen los siguientes parámetros, en la primera etapa 61,5 Hz con 2,5 segundos de retardo y la segunda etapa de 62 Hz con 0 segundos de retardo.

Se realizaron dos pruebas, en la primera se aumentó gradualmente la frecuencia de 60 Hz por medio del *switch* de selección del regulador de frecuencia hasta que llegó a 61,5 Hz, haciendo que se disparara la protección

del relé después de 2,5 segundos; en la segunda prueba nuevamente se elevó la frecuencia hasta los 62 Hz haciendo que se disparara la protección a los 0 segundos, dando como resultado ambas pruebas exitosas.

### **5.9. Prueba de baja frecuencia**

Para realizar esta prueba se tienen los siguientes parámetros de programación del relé de protección, la frecuencia mínima es de 57 Hz con 0 segundos de retardo, en la primera etapa y en la segunda una frecuencia de 57,5 Hz por un tiempo de 3 segundos de retardo.

Se realizó la prueba disminuyendo gradualmente la frecuencia de 60 Hz por medio del *switch* de selección del regulador de frecuencia hasta llegarla a 57.5 Hz haciendo que se disparara la protección después de 3 segundos, así mismo, se disminuyó la frecuencia hasta llegar a 57 Hz, haciendo que la protección se active después de 0 segundos, dando como resultado ambas pruebas como exitosas.

### **5.10. Prueba de sincronismo**

Se realizó de dos formas, la primera fue de forma manual colocando en encendido la excitación del generador, luego de que se estabilizaran los niveles de voltaje y frecuencia del mismo, se procedió a encender el modo sincro en forma manual, esto activó el sincronoscopio. Por medio de la manipulación de los reguladores de frecuencia y reguladores de excitación se logró igualar el voltaje y la frecuencia del generador con el de línea, el sincronoscopio comparó las secuencia de fases del generador y el de la red, en el momento que el sincronoscopio marca 0 indica que el generador está en sincronía y permite que el interruptor se cierre para quedar sincronizado con la red.

La segunda forma en que se logró la sincronización, fue de una forma más rápida y sencilla, ya que fue de forma automática, para ello se colocó nuevamente en encendido la excitación del generador, luego de que se estabilizaran los parámetros de voltaje y frecuencia del generador, se procedió a encender el modo de sincro en forma automática, esto activo el sincronoscopio, y se dio inicio al *switch* de sincronización automático, después de un breve tiempo la máquina igualo los valores de voltaje y frecuencia del generador con los de línea automáticamente en un tiempo mucho menor que en la forma manual, concluyendo que ambas pruebas fueron exitosas.

#### **5.11. Prueba de carga a diferentes porcentajes**

Para realizar esta prueba se hizo trabajar el generador con carga a diferentes potencias desde 5, 10, 20, 30 hasta 46 MW durante un tiempo de 30 minutos cada uno, esto con la finalidad de observar si se presentaba alguna falla del generador y en la turbina que pudiera haber sido detectada por las protecciones, la prueba fue un éxito ya que no se presentaron fallas.

#### **5.12. Prueba de rechazo de carga**

Esta prueba se realiza teniendo sincronizado el generador con carga a una potencia del 100 % de la carga nominal (46 MW), lo que se hace es abrir el interruptor del generador para liberar la carga, simulando una falla del lado del generador.

Se procedió a abrir el interruptor del generador llegando inmediatamente a tener cero de carga en el turbogenerador, en ese momento la frecuencia llegó a 64,2 Hz y la velocidad alcanzó las 3 900 rpm, el gobernador posteriormente reguló la velocidad a 3 600 rpm y a 60 Hz, la prueba de rechazo de carga fue

exitosa, la turbina no disparó, luego se procedió a sincronizar nuevamente el turbogenerador.

## CONCLUSIONES

1. Antes de iniciar el montaje de un turbogenerador, el personal que esté a cargo, debe estudiar detenidamente los manuales, a efecto de conocer los componentes y su funcionamiento, también deben reunir los conocimientos científicos de la mecánica y la termodinámica, ya que son básicos para la interpretación de los manuales para lograr un buen montaje.
2. Durante el montaje es necesario fabricar estructuras indispensables para realizar el montaje, algunas de las cuales serán temporales y otras permanentes.
3. Algunos equipos necesitan calibraciones especiales que en los manuales del fabricante no se indican, ello hace necesario contar con la presencia de asesores de las respectivas fábricas.
4. Es importante que, para lograr una operación eficiente de la unidad de generación, debe tenerse una buena automatización y protecciones contra fallas que puedan ocurrir, para proteger los equipos.
5. La turbina debe operar dentro de los parámetros de presión y temperatura de vapor recomendado, de no ser así podrían provocarse disparos o salidas repentinas del sistema.

6. Chequear constantemente los dispositivos de protección y seguridad es extremadamente importante, debido a que de esta manera se puede tener confianza en el funcionamiento del turbogenerador.
7. Para realizar las pruebas de arranque y operación de la unidad de generación, debe contarse con la presencia de los asesores técnicos de las empresas fabricantes, a efecto de hacer los ajustes necesarios dentro de los rangos permisibles de operación de la máquina, para garantizar el buen funcionamiento de la unidad.
8. La aplicación de la protección de respaldo del generador involucra tener mucho cuidado en las consideraciones entre sensibilidad y seguridad.
9. Las pruebas del funcionamiento del generador y la turbina realizadas, resultaron totalmente exitosas, satisfechos con el montaje y puesta en marcha del sistema de generación, estando únicamente a la espera de iniciar zafra para poder empezar operaciones formales.



## RECOMENDACIONES

1. Capacitar al personal operativo del turbogenerador a efecto de disminuir el riesgo de que se presenten problemas en el funcionamiento de los equipos, garantizando con ello el buen funcionamiento de la planta de generación.
2. Verificar constante y sistemáticamente, que las variables de monitoreo de los equipos, se encuentren dentro de los rangos aceptables descritos por el fabricante.
3. Crear un plan de mantenimiento preventivo y correctivo al equipo para detectar fallas y prevenir daños irreparables en este. Si es posible iniciar el mantenimiento predictivo, para alargar la vida útil del equipo.



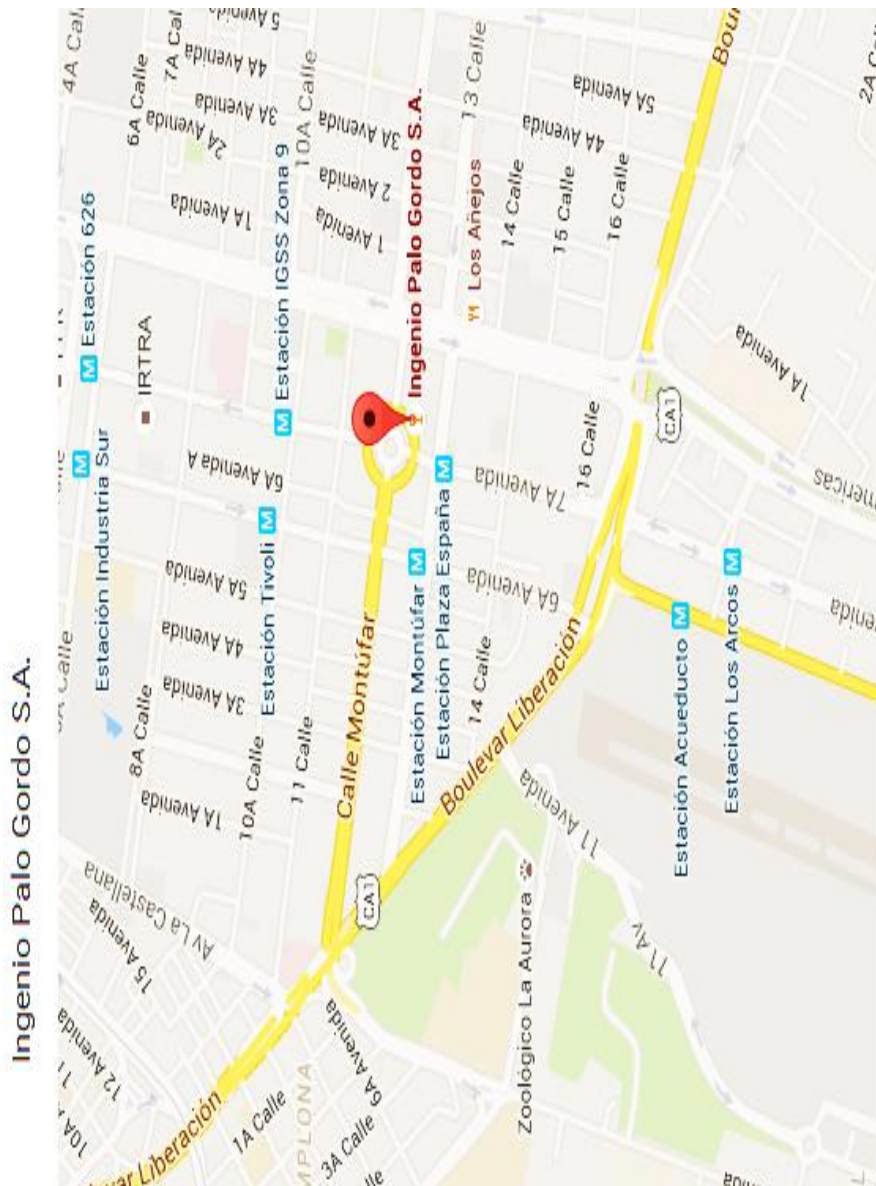
## BIBLIOGRAFÍA

1. AVALLONE, Eugene; THEODORE Baumeister III. *Manual del ingeniero mecánico*. 9a ed. México: McGraw-Hill, 1995. 435 p.
2. BLOCH, Heinz. *Guía práctica para la tecnología de las turbinas de vapor*. México: McGraw-Hill, 1998. 348 p.
3. C.J. Mozina. *IEEE tutorial on the protection of synchronous generator*. EE.UU., No. 95 TP 102. 1995.
4. FINK, Donald; WAYNE, Bety. *Manual de ingeniería eléctrica*. McGraw-Hill. México. 1995. 126 p.
5. *Guide for ac generator protection*. EE.UU., ANSI/IEEE C37.102. 1993. 118 p.
6. *IEEE guide for abnormal frequency protection for power generating plants*. EE.UU. ANSI/IEEE C37.106.1993. 310 p.
7. ——— . *Std 80-2000. Guide for safety in AC Substation Grounding*, New York, 2000.109 p.
8. STEPHEN J. Chapman. *Máquinas eléctricas*. 3a ed. Colombia: Nomos. 2000. 768 p.



## ANEXOS

### Anexo 1. Oficinas centrales



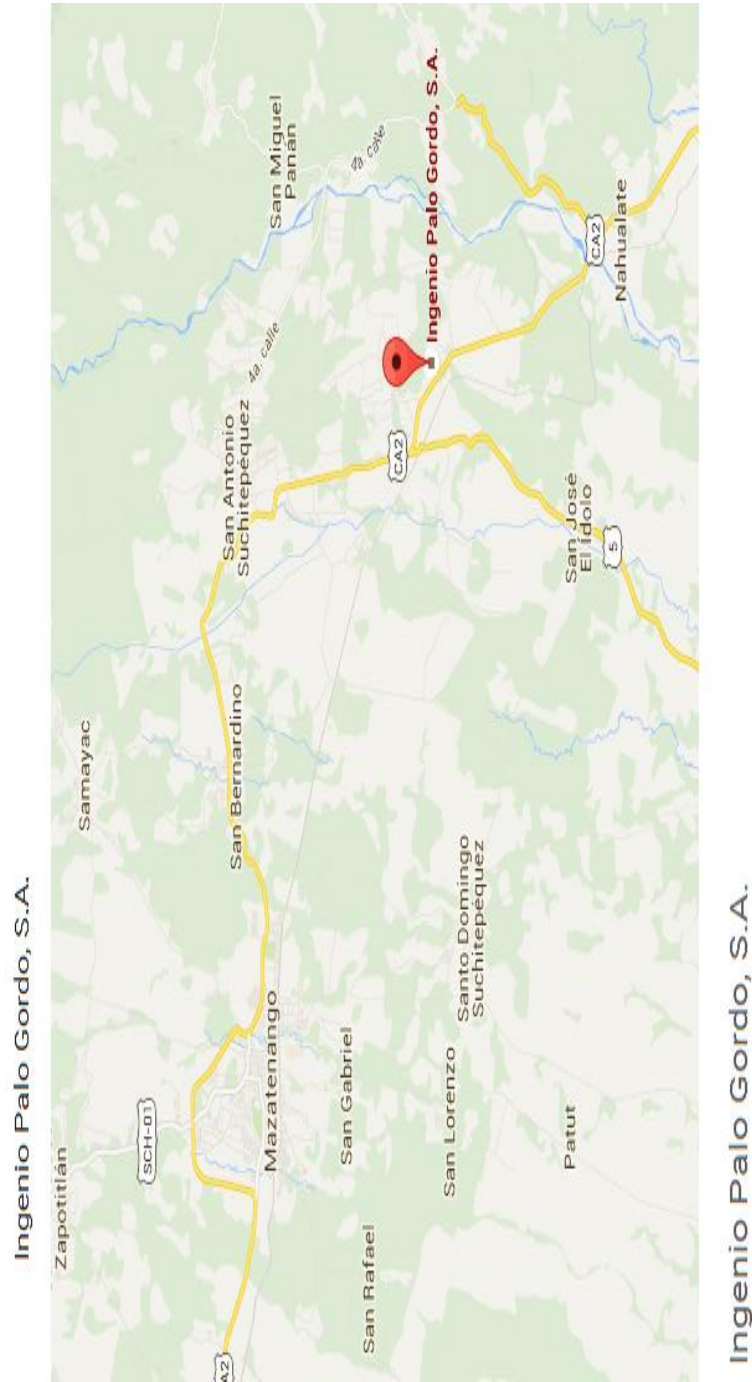
Ingenio Palo Gordo S.A.

Ingenio Palo Gordo S.A.

Edificio Etisa, Segundo Nivel, 7A Avenida 12-23, Guatemala

Fuente: Ingenio Palo Gordo.

## Anexo 2. Planta Ingenio



Fuente: Ingenio Palo Gordo.