



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO
PROACTIVO EN BASE AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS RECURRENTE Y NORMAS DE
MANTENIMIENTO DEL FABRICANTE BRUSH DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA UN
GENERADOR TRIFÁSICO MODELO BDAX 82.445 ERH DE 160 MVA**

Ronald Ottoniel Herrera Díaz

Asesorado por el Msc. Ing. Saúl Cabezas Durán

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO
PROACTIVO EN BASE AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS RECURRENTES Y NORMAS DE
MANTENIMIENTO DEL FABRICANTE BRUSH DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA UN
GENERADOR TRIFÁSICO MODELO BDAX 82.445 ERH DE 160 MVA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RONALD OTTONIEL HERRERA DÍAZ
ASESORADO POR EL MSC. ING. SAÚL CABEZAS DURÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

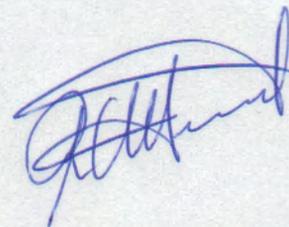
DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Francisco González
EXAMINADOR	Ing. Edgar Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Roberto Urdiales
SECRETARIO	Ing. Edgar Jose Bravatti Castro

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO EN BASE AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS RECURRENTE Y NORMAS DE MANTENIMIENTO DEL FABRICANTE BRUSH DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA UN GENERADOR TRIFÁSICO MODELO BDAX 82.445 ERH DE 160 MVA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha enero del 2017.



Ronald Ottoniel Herrera Díaz



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



AGS-MIMPP-004-2017

Guatemala, 25 de marzo de 2017.

Director
José Francisco González López
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Ronald Ottoniel Herrera Díaz** con carné número **80-12407**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"

M.B.A. Ing. Saul Cabezas Duran
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648

MBA Ing. Saul Cabezas Duran
Asesor (a)

Dra. Inga. Alba Maritza Guerrero Spindola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios
ALBA MARITZA GUERRERO DE LOPEZ
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611

MSc. Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF. EIME 17. 2017.

Guatemala, 19 de ABRIL 2017.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO EN BASE AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS RECURRENTE, Y NORMAS DE MANTENIMIENTO DEL FABRICANTE BRUSH DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA UN GENERADOR TRIFÁSICO MODELO BDAX 82.445 ERH DE 160 MVA**, presentado por el estudiante universitario Ronald Ottoniel Herrera Díaz considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Francisco Javier Gonzalez López
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

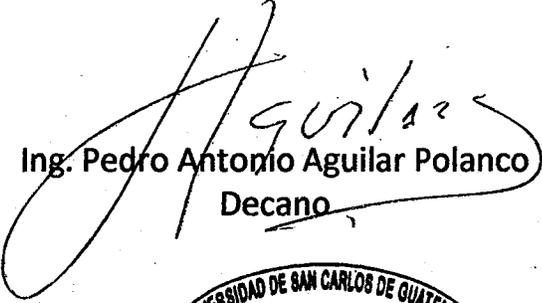




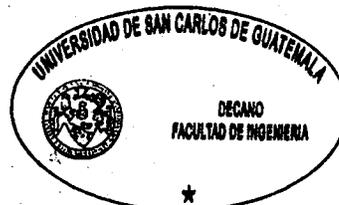
DTG. 254.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO EN BASE AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS RECURRENTES Y NORMAS DE MANTENIMIENTO DEL FABRICANTE BRUSH DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA UN GENERADOR TRIFÁSICO MODELO BDAX 82.445 ERH DE 160 MVA**, presentado por el estudiante universitario: **Ronald Ottoniel Herrera Díaz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2017



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser tan maravilloso en brindarme la vida y guiarme en mi carrera.

Mis padres

Jorge Herrera y Rosario Díaz de Herrera. Su amor será siempre mi inspiración.

Mi esposa

Violeta Enríquez de Herrera. Por ser una importante influencia en mi carrera.

Mis hijos

Ronald y Rubí. Por ser mi motivación a superarme.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Por permitirme la oportunidad de estudiar
en esa magna universidad.

Facultad de Ingeniería

Por tener el privilegio de pertenecer a ella y
llevar en mi corazón recuerdos maravillosos.

Mis amigos de la Facultad

Ing. Rogelio Solares, Ing. Leonel Enríquez
Gil e Ing. José Andrés Garcia.

A mi asesor

Msc. Ing. Saúl Cabezas Durán por su
valioso apoyo.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	I
LISTA DE SÍMBOLOS.....	III
GLOSARIO.....	V
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3. JUSTIFICACION.....	13
4. ALCANCES.....	15
5. MARCO TEÓRICO.....	17
5.1.1 Funcionamiento del generador sincrónico.....	17
5.1.2 Corriente alterna y corriente directa.....	18
5.1.3 Componentes de las máquinas eléctricas.....	18
5.1.4 Tipos de rotores en máquinas asíncronas.....	19
5.1.5 Tipos de rotores en máquinas síncronas.....	20
5.1.6 Funcionamiento de un generador eléctrico trifásico.....	22
5.1.7 Diagrama fasorial en función de factor de potencia de generador sincrónico.....	26
5.1.8 Curva de capacidad en generador trifásico sincrónico.....	28
5.1.9 Componentes y especificaciones de generador BDAX 82.445 ERH de 160 MVA.....	31
5.1.10 Gestión de mantenimiento de generador único en planta de generación de energía eléctrica.....	33
5.1.11 Mediciones importantes para conocer estado de condición de generadores eléctricos trifásicos.....	35
6. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	41
7. METODOLOGÍA.....	43

8.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	45
9.	CRONOGRAMA	47
10.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	49
	BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Formas en que se presenta la excentricidad.....	03
2.	Armónicos lateral inferior y lateral superior de las corrientes.....	05
3.	Generación de onda senoidal de corriente alterna por el movimiento giratorio de una armadura.....	18
4.	Máquina asíncrona.....	19
5.	Distribución de la densidad del flujo debajo del polo saliente.....	21
6.	Estructura de rotor de polos salientes y rotor de polos lisos o cilíndrico.....	22
7.	Componentes principales de generador eléctrico trifásico.....	23
8.	Diagrama fasorial de generador con cargas de factor de potencia unitario.....	26
9.	Diagrama fasorial generador de factor de potencia: a) en atraso; b) en adelante.....	27
10.	Triángulo de potencias.....	28
11.	Diagrama de capacidad.....	29
12.	Espacio para montar sensor de flujo magnético en estator.....	36
13.	Equipo analizador a conectar sensor en campo.....	37
14.	Bobina # 6 en corto con bobina #. Arreglo de conexión típica de medición con el RSO.....	37
15.	Arreglo de conexión típica de medición con el RSO.....	38

TABLAS

I.	Nombre de componentes y su función.....	31
II.	Características del rotor.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
A/m	Amperios/metro
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CID	<i>Core Imperfection Detector</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
Hz	<i>Hertz</i>
KV	Kilovoltio
KPI's	<i>Key Performance Indicators</i>
M.A.V.R.	<i>Manual Automatic Voltage Regulator</i>
MVA	<i>Megavolt Ampere</i>
MVAR	<i>Megavolt Ampere Reactive</i>
MW	<i>Megawatt</i>
RPM	Revoluciones Por Minuto
V	Voltio
VA	<i>Volt Ampere</i>
W	<i>Watt</i>
Wb	Weberio
Wb/A.m.	Weberio por amperio metro

GLOSARIO

Análisis espectral	Tiene por objeto descomponer una señal en sus diversos componentes dentro del dominio de frecuencias. Es usada comúnmente para encontrar una señal que está contaminada por otras, por ejemplo, ruido.
Bobina	Alambre de cobre o aluminio aislado enrollado con un número determinado de vueltas sobre un núcleo de hierro o de aire. Sobre esta se aplica e induce el voltaje del generador sincrónico.
Campo magnético	Fuerza dada por el movimiento relativo entre cargas eléctricas, producida por unidad de polo magnético. Se encuentra en forma natural en un imán permanente o aparece por medio de una corriente variable que fluye en un conductor eléctrico, es decir formando un electroimán. Unidades dadas en amperios/metro (A/m).
Carga	La demanda de potencia eléctrica a un generador eléctrico.
Contactador	Accionador de tipo electromecánico formado por una bobina con núcleo de hierro que, al energizarse, cierra o abre mecánicamente unos contactos eléctricos. Para abrir o cerrar un circuito, la bobina es actuada con voltaje

y corriente bajos pero sus contactos pueden soportar voltaje y corrientes mayores.

Corriente	Flujo de carga que pasa por un conductor. Unidad de medida columbios/segundo equivalente a un amperio (A).
Corriente alterna	Corriente que cambia cíclicamente su forma de onda de un nivel positivo a un nivel negativo.
Corriente de excitación	Corriente directa aplicada al devanado de campo. Induce un voltaje al devanado de armadura por medio del movimiento del rotor y la inducción magnética resultante.
Corriente directa	Corriente con forma de onda como línea recta u onda que pulsa y se mantiene constante sobre un nivel determinado fluyendo en una sola dirección.
Devanado	Un número determinado de espiras de alambre conductor que forman una bobina.
Diagrama fasorial	Diagrama que muestra uno o varios fasores en un plano de dos dimensiones.
Diodo	Semiconductor que permite el flujo de corriente en una sola dirección.

Entrehierro	Espacio de aire entre la parte fija de un generador llamado estator y la parte móvil llamada rotor.
Escobilla de tierra	Elemento normalmente fabricado de carbón que roza el eje del rotor y está conectado por medio de un cable a tierra física.
Espira	Vuelta de alambre conductor aislado que forma el devanado de una bobina.
Excentricidad	La no coincidencia entre el eje de rotación y el eje de simetría puede tener lugar en el posicionamiento relativo entre dos piezas concéntricas, caso del rotor y del estator de un generador eléctrico.
Factor de potencia	Relación de potencia activa sobre la potencia reactiva, es la eficiencia de realizar trabajo por la potencia entregada por el generador. Es el coseno del ángulo entre la potencia activa y la potencia reactiva.
FFT	Por sus siglas en inglés <i>Fast Fourier Transform</i> , algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier Discreta (DFT) y su inversa. Se usa en tratamiento digital de señales y filtrado digital, establece algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante.
Flujo magnético	Líneas de campo magnético que atraviesan un área determinada. Unidad de medida Weber (Wb).

Frecuencia Eléctrica	Número de ciclos de la onda de corriente o voltaje por segundo.
Fusible	Componente eléctrico que tiene un punto de fusión muy bajo y se coloca en un punto del circuito eléctrico para interrumpir la corriente cuando esta es excesiva.
Impedancia	Unidad de medida en <i>ohmios</i> . Es la suma de una componente resistiva, debida a las resistencias, y una componente reactiva debida a las bobinas y capacitores es $Z = R + jX$.
No. de polos en generador	El número de polos de un generador corresponde a una velocidad en revoluciones por minuto determinada. Dos polos 3 600 rpm, 4 polos es igual a 1 800 rpm, 6 polos es igual a 1 200 rpm, 8 polos corresponden a 900 rpm.
Permeabilidad	Es una forma de representar la facilidad con que se fijan las líneas de flujo magnético en un material dado. Unidad de medida Weber por amperio metro (Wb/A.m.).
Polo de generador	Terminales o bornes en que un generador es capaz de mantener una diferencia de potencia eléctrica entre dos de ellos.
Potencia activa	Puede efectuar trabajo al ser tomada por una carga, componente real de la potencia aparente. Unidad de medida Watt (W).

Potencia aparente	Resultado de multiplicar el voltaje y la corriente aplicados a una carga. Es un número complejo, la parte real es la potencia activa y la imaginaria es conocida como potencia reactiva. Unidad de medida voltamperio (VA).
Potencia reactiva	Flujo de energía que va hacia la carga y regresa de ella, no hace trabajo real, pero se necesita para hacer funcionar máquinas con núcleo: transformadores o motores. Es la componente imaginaria de la potencia aparente.
Reactancia	En un circuito eléctrico representa un atraso o adelanto de la corriente respecto al voltaje, sea que se trate de una carga inductiva (atraso) o capacitiva (adelanto). La unidad de medida es el <i>ohmio</i> .
Rectificador	Elemento o circuito que convierte corriente alterna en corriente continua.
Reluctancia	Resistencia que un circuito ofrece al paso del flujo magnético.
RTD	Detector de temperatura por resistencia. Por sus siglas en inglés <i>Resistance Temperature Detector</i> .
Tierra	Potencial eléctrico cero y usado como referencia para medir todos los voltajes.

Transductor

Dispositivo que recibe energía de naturaleza eléctrica, mecánica o acústica y suministra otra energía de naturaleza distinta, pero con características dependientes de la que recibió.

Voltaje

Cuantifica o mide la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos. La unidad de medida es el voltio (V).

RESUMEN

Uno de los equipos más importantes en las plantas de generación de energía eléctrica son los generadores eléctricos trifásicos, ya que transforman el movimiento mecánico de una turbina acoplada a ellos en energía eléctrica.

Se realiza un análisis de la actual gestión de mantenimiento de un único generador eléctrico trifásico modelo BDAX 82.445 ERH de 160 MVA en una planta de generación de energía eléctrica

Dicho análisis se basa en el diagnóstico e investigación de fallas recurrentes de generadores eléctricos de diferentes potencias en MVA y en el historial de fallas de este generador que se ha obtenido de la experiencia desde su puesta en marcha en el año 2000.

La secuencia del análisis inicia con la revisión de las actuales tareas de mantenimiento preventivo incluyendo las tomas de lectura por turno de variables con las que se cuenta equipo de monitoreo en línea de la actual gestión de mantenimiento para identificar oportunidades de mejora continua al incluir tareas basadas en las normas de mantenimiento sugeridas por fabricante y experiencia de fallas sufridas en busca de mejorar el índice de disponibilidad y confiabilidad.

La empresa de generación de energía eléctrica donde se realizó el estudio se enfrenta al reto de mantener y mejorar su índice de disponibilidad del generador, esto porque es el único generador con el que cuenta y la falla de éste representa

indisponibilidad completa de la planta con el consecuente incumplimiento y penalidades de contrato con la empresa que le compra la energía eléctrica. Esto sumado a los costos elevados que representan el enfrentarse a una falla inesperada para la cual no se encuentre preparado el departamento de mantenimiento, en cuanto a disponibilidad de repuestos, falta de personal especializado en reparar la falla, tiempo que lleva el diagnosticar la falla y tiempo que lleva en la reparación cuando ya se tiene el personal especializado, herramientas y repuestos necesarios.

El departamento de mantenimiento tiene la tarea delicada de actualizar constantemente su gestión de mantenimiento lo que involucra el conocimiento de nuevas técnicas de monitoreo de condición tanto en línea como monitoreo de condición con el generador fuera de operación y en el caso de la empresa de generación de energía eléctrica con la fuente invaluable de la experiencia de su personal en cuanto a las fallas que se han experimentado durante la operación del generador que ha sido un tiempo mayor a los diez y seis años. Dicha experiencia ha permitido ver la falla catastrófica de corto circuito entre espiras del rotor del generador.

Por lo que el conocimiento de fallas frecuentes del generador, de las normas de mantenimiento sugeridas por fabricante, la medición en línea de variables claves del generador, mediciones sugeridas por fabricante y empresas contratistas de alta experiencia al generador para conocer su estado de condición son eslabones importantes para actualizar y hacer más eficiente la gestión del mantenimiento actual.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la gestión de mantenimiento proactivo investigando fallas frecuentes del generador eléctrico modelo BDAX 82.445 ERH y marca BRUSH de 160 MVA, las cuales lo han hecho salir de línea, apoyándose en el historial de fallas que ha sufrido por más de quince de años de operación, para mejorar el indicador clave de desempeño, que es su disponibilidad.

Objetivos específicos

1. Diseñar los formatos específicos que permitirán recolectar los datos de medición en línea del generador a diferentes potencias y que permitan tener tendencias para monitorear el estado de condición del generador eléctrico.
2. Realizar una revisión de todas las normas de mantenimiento sugeridas por el fabricante Brush de generadores, y ver cuáles ya están incluidas en el programa de mantenimiento actual y la viabilidad de adaptar las normas que faltan para actualizar y mejorar dicho programa de mantenimiento.
3. Generar el plan de mantenimiento proactivo actualizado, usando el diagnóstico de normas de mantenimiento del fabricante, las tendencias que muestran el estado del generador y la investigación de fallas recurrentes del mismo, para mejorar la gestión de mantenimiento,

buscando elevar el índice clave de desempeño que es la disponibilidad de la máquina.

INTRODUCCIÓN

En el área de gestión de mantenimiento de un único generador eléctrico de 160 MVA de una planta de generación de energía eléctrica con combustible a base de carbón mineral, es importante la afinidad del mantenimiento preventivo producto de la sugerencia del fabricante, junto con la experiencia que se ha obtenido desde el año 2000. Es importante la investigación de las fallas catastróficas que se pueden presentar en un generador eléctrico por el impacto negativo en su funcionamiento, que provoca la indisponibilidad total de la planta generadora y consecuencias como: incumplimiento y penalidades de contrato con la empresa que compra la energía eléctrica, costos elevados de una reparación debido a una falla catastrófica y el tiempo largo que dicha reparación llevaría.

El modelo de gestión de mantenimiento que se plantea para lograr el menor impacto cuando se presenta una falla catastrófica se basa en tener una investigación completa de todas las fallas que sufren los generadores eléctricos. Se apoyará en la investigación del historial de fallas del generador eléctrico modelo BDAX 82.445 ERH, marca Brush, de 160 MVA, que ha operado por más de dieciséis años en la planta generadora Energías San José, situada en el Municipio de Masagua del departamento de Escuintla. Esta planta aporta al mes de septiembre del año 2016, 134,1 MW al sistema interconectado nacional.

Existe la ventaja de contar con las normas de mantenimiento sugeridas por el fabricante Brush del generador eléctrico, lo cual aporta de manera positiva conocimientos a la gestión de mantenimiento, al poder incluir las mismas en el plan de mantenimiento proactivo, además de las frecuencias de mediciones de

mantenimiento recomendadas por el fabricante para tener un conocimiento del estado de condición del generador eléctrico. Como beneficio directo en el control del equipo se tiene instrumentación instalada que monitorea variables importantes como: voltaje de excitación, corriente de excitación, factor de potencia, temperaturas de devanados del estator, corriente del estator, voltaje de salida del generador, así como variables cuyos valores se trasladarán a una base de datos en la cual se analizarían tendencias de la operación normal del generador, lo cual permitiría ver cuándo una variable se sale de los parámetros normales de operación.

En el primer capítulo se tiene el marco teórico del funcionamiento básico del generador eléctrico trifásico síncrono, así como el funcionamiento de la excitatriz principal sin escobillas rozantes y la excitatriz piloto de imanes permanentes. Se detalla la teoría de mediciones importantes del generador: factor de potencia, capacitancia, descargas parciales y el CID, que por sus siglas en inglés significa *core imperfection detection* (detección de imperfección del núcleo).

En el segundo capítulo se realiza un diagnóstico de las normas de mantenimiento que provee el manual del fabricante del generador marca Brush, modelo BDAX 82.445 ERH, de 160 MVA. En este capítulo también se incluye el diagnóstico de mediciones en línea del generador, aquellas que se tienen al momento, además de los límites de operación que sugiere el fabricante y que permiten una vida prolongada de este activo.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de la investigación de las fallas frecuentes del generador y las mediciones implicadas en dichas fallas. Se hace énfasis en la falla catastrófica de corto circuito entre espiras del rotor, la cual hizo salir de operación por un largo tiempo al generador. Se menciona cómo se

determinó, después de análisis de técnicos expertos, dicha falla, y la recomendación del fabricante de instalar monitoreo en línea de corto circuito entre espiras después de reparado el rotor.

En el cuarto capítulo se tiene la propuesta del plan de mantenimiento proactivo que une lo sugerido por el fabricante con las tendencias que tienen su base en los equipos de monitoreo en línea del estado de condición de generadores eléctricos de potencias mayores o iguales a 160 MVA, tomando en cuenta la experiencia valiosa adquirida por medio de la investigación de las fallas recurrentes del generador eléctrico y las mediciones implicadas con este.

1. ANTECEDENTES

Para poder implementar la propuesta de programa de mantenimiento preventivo actualizado, deben tomarse en cuenta las normas sugeridas por el fabricante y amalgamarlas con la experiencia del investigador, además de haber observado fallas recurrentes, sobre todo fallas catastróficas del generador eléctrico trifásico y del uso de tecnologías modernas disponibles. También se deben revisar artículos científicos, investigaciones previas y análisis de las metodologías empleadas para poder verificar su efectividad y aplicabilidad en lo que se propone.

En las máquinas giratorias hay generación de voltaje en las bobinas, al girar de manera mecánica a través de un campo magnético. Adicionalmente, se obtiene el voltaje al girar mecánicamente un campo magnético por el devanado o al diseñar un circuito magnético, de manera que la reluctancia varíe con la rotación del rotor. (FITZGERALD, 2004)

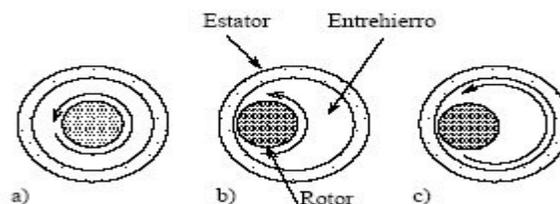
En general, cualquier máquina giratoria consta de un estator y un rotor separados por un entrehierro, el cual es de vital importancia en las interacciones magnéticas entre estas partes que dan lugar a los voltajes mencionados. Sin embargo, en máquinas giratorias modernas existen desviaciones pequeñas entre la posición que debe guardar el rotor con respecto al estator, lo que origina que se modifique el entrehierro de la máquina y, por ende, afecte el voltaje inducido. Este efecto se debe al desgaste normal de cojinetes y bases, a la clase de carga o al tipo de acople mecánico de la máquina, y provoca el incremento y el desajuste entre el rotor y el estator. Es un fenómeno que puede implicar excentricidad, desalineación, entre otros problemas que repercuten negativamente en el desempeño de la máquina. (FITZGERALD, op. cit. y ALBINO, 2004.)

Con el fin de garantizar que la máquina eléctrica giratoria opere en forma continua, es necesario contar con técnicas de medición que, además de permitir detectar la falla, no impliquen el sacarla de operación. Una de las técnicas de medición en línea adecuada para el fin es el análisis espectral de corriente medida a través de la transformada rápida de Fourier (FTT), (FERNÁNDEZ, 2000). contenida en algunos equipos de medición que tienen la función instalada. Hay varias fallas mecánicas en las máquinas eléctricas giratorias, una falla importante es el desequilibrio. Un sistema mecánico giratorio se dice que está equilibrado si durante su funcionamiento la resultante de todas las fuerzas y sus respectivos pares tienen relación con magnitud, reacción y sentido constantes. Lograda la constancia en módulo, dirección y sentido de las fuerzas, mediante una homogénea distribución de las masas de la parte móvil, la máquina se puede sujetar mediante anclajes que opongan una fuerza y un momento de reacción a la resultante del sistema. (FERNÁNDEZ, op. cit.) El desequilibrio entonces se puede presentar de dos formas: una debida a una distribución no homogénea de masa, que se puede ver con el rotor estático, y otra debida al movimiento del rotor cuando este opera.

Otra falla mecánica es el desalineamiento, el cual se debe a que es imposible que los ejes de la máquina eléctrica rotatoria bajo estudio y la máquina acoplada se encuentren perfectamente alineados en todos los planos. (FERNÁNDEZ Y ALBINO, op. cit.) Otra falla mecánica es la falla de cojinetes. Toda máquina giratoria apoya las partes finales de su eje en sendos cojinetes que le servirán de base y sobre los cuales girará. Puesto que los elementos del sistema están sometidos a una continua fricción y movimiento, dan origen a las vibraciones causadas por cualquier defecto de la máquina o agentes externos que se les transmiten, por lo que son los componentes con un porcentaje de falla más elevado. (Ibídem)

Las fallas mencionadas producen deformaciones en el entrehierro, dando lugar al fenómeno conocido como excentricidad. (CARVAJAL, 1999 y ALBINO, op. cit.). Se conocen dos tipos de excentricidad: la estática y la dinámica. La excentricidad estática consiste en una distorsión en el tamaño del entrehierro, en el cual el valor mínimo se encuentra en una posición fija en el espacio. La distorsión puede ser causada por la forma oval del estator o por un incorrecto posicionamiento del rotor dentro del estator, causado por un mal apoyo de los rodamientos, desgaste, malformación de los alojamientos, excesiva tolerancia, entre otros motivos. (FERNÁNDEZ, op. cit. y TORBAR, 1998) En la excentricidad dinámica el punto de entrehierro mínimo no permanece fijo en una posición en el espacio, sino que gira con el rotor. La causa de la excentricidad puede ser la forma ovalada del rotor o que el centro de giro del rotor no sea su centro geométrico de rotación (ver figura 1).

Figura 1. **Formas en que se presenta la excentricidad**



Fuente: FLORES Y ASIAÍN. *Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales*. Información tecnológica, vol. 22 (4), 2011. Págs. 73-84

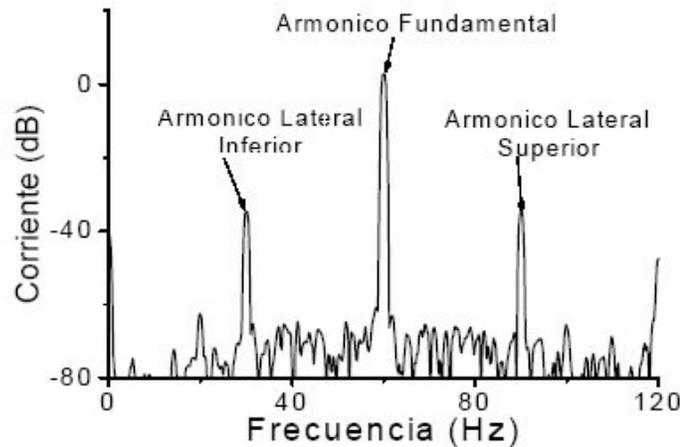
Nota: a) máquina sana, b) excentricidad estática y c) excentricidad dinámica.

En las máquinas rotatorias, para cualquiera de los dos tipos de excentricidad los efectos producidos sobre su funcionamiento son los mismos. (FERNÁNDEZ, op. cit.) Los efectos comunes producidos por los dos tipos de excentricidad son:

- a) Formación de armónicos de alta y baja frecuencia en el espectro de las corrientes del estator.
- b) Formación de fuerzas pulsantes de origen eléctrico originando vibraciones anormales.
- c) Aumento general de vibración en la máquina.

El análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de las corrientes de la máquina refleja claramente los efectos de la excentricidad, por el hecho de que el análisis permite detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud. (Ibídem) Para el análisis en el dominio de la frecuencia se usa el FTT, que es un programa para el cálculo de la transformada discreta de Fourier. La técnica se ha empleado en el diagnóstico de motores para detectar fallas en el rotor, mediante el análisis de las corrientes en el dominio de la frecuencia. Los armónicos más analizados son los situados al lado de la frecuencia fundamental. A las frecuencias se les llama armónico lateral inferior f_i y superior f_s , y sus magnitudes están en función del grado de asimetría que presenta el rotor tipo jaula de ardilla. (Ibíd y THOMSON, 2001)

Figura 2. **Armónicos lateral inferior y lateral superior de las corrientes**



Fuente: FLORES Y ASIAÍN. *Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales*. Información tecnológica, vol. 22 (4), 2011. Págs. 73-84

Según Chapman, “los generadores eléctricos trifásicos ampliamente usados en la industria son los llamados síncronos y están compuestos principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator. Su principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday” (CHAPMAN, 2005):

“Al crear un voltaje inducido en el estator del generador eléctrico, debemos crear un campo magnético en el rotor o circuito de campo alimentándolo con voltaje en corriente continua, el campo magnético al estar girando al ser movido por un dispositivo externo inducirá un voltaje en el devanado del estator por lo que tendremos una corriente alterna fluyendo a través del estator”. (CHAPMAN, op. Cit)

Debido a la importancia del generador eléctrico dentro de la gestión de mantenimiento basado en condición, se trata de buscar mediciones que puedan predecir y reducir el impacto hasta de fallas catastróficas en el rotor. Una falla

catastrófica y que hace salir de operación al generador eléctrico es la falla de cortocircuito entre espiras del rotor. Varios autores explican:

“Durante la operación del generador eléctrico, el flujo magnético del rotor de cada ranura induce una corriente en el sensor de flujo magnético cuando el rotor pasa por él. Al pasar una corriente en cada ranura del rotor, se provoca un pico en la corriente inducida provocada por el flujo magnético de fuga de la ranura. Los picos en la corriente pueden ser registrados en un osciloscopio digital. Cada pico de la forma de onda representa el flujo magnético de fuga alrededor de una ranura del rotor.

Un cortocircuito entre espiras reduce los picos asociados con las dos ranuras que contienen a la bobina con falla, esto provoca que haya menos flujo magnético de fuga y, por lo tanto, una corriente inducida reducida en el sensor de flujo magnético. De esta manera, los datos en la forma de onda registrada al analizarse pueden indicar la bobina y ranuras que tienen el cortocircuito entre espiras y, aún más, el número de espiras en corto circuito”. (STONE, et al, 2004. Pág. 309)

“Las razones por las cuales se hace mantenimiento en las industrias pueden ser resumidas en las siguientes categorías (con base en los beneficios logrados):

- a) Prevenir o disminuir el riesgo de fallas
- b) Recuperar el desempeño
- c) Aumentar la vida útil/diferir inversiones
- d) Seguridad, ambiente y aspectos legales” (DURÁN, 2013. Págs. 21-22)

Collado menciona “que una de las razones principales de la lista es lograr la mayor disponibilidad de la empresa, alcanzando obtener mayores utilidades y además prolongar la vida útil de los equipos”. (COLLADO, 2016). Además:

“La metodología diseñada toma en cuenta las incertidumbres relacionadas a las variables requeridas para la determinación de los costos asociados a las actividades de mantenimiento o reemplazo, así como para la determinación del riesgo asumido en caso de la ocurrencia de eventos no deseados como consecuencia de la no ejecución de dicha actividad de mantenimiento o reemplazo, lo que permite al tomador de decisiones evaluar los escenarios posibles a lo largo del ciclo de vida del activo, garantizando la rentabilidad del negocio”. (GUTIÉRREZ URDANETA Y ROMERO BARRIOS, 2014. Pág. 1)

Por el tipo de negocio se debe invertir en equipo de monitoreo de la más alta tecnología, que apoye la gestión del mantenimiento para garantizar el indicador clave del proceso de mantenimiento conocido como disponibilidad. En un artículo, Pablo Viveros argumenta que un modelo de gestión de mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportuno, se debe alinear a los objetivos impuestos con base en las necesidades de la empresa, minimizando los costos indirectos de mantenimiento, generando actividades que permitan mejorar los indicadores claves del proceso de mantenimiento. (VIVEROS, et. al, 2013) El cumplimiento de los lineamientos administrativos en el mantenimiento por parte de personal entrenado y calificado es fundamental para mejorar la gestión del mantenimiento. Se considera, por lo tanto, que el generar procedimientos estándares es la solución de los problemas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de generación de energía eléctrica, el generador eléctrico trifásico es uno de los equipos más importantes y críticos para el funcionamiento adecuado de la planta. El generador eléctrico transforma el movimiento mecánico transmitido por el acoplamiento directo de una turbina de vapor en energía eléctrica. El voltaje de salida del generador es de 13 800 voltios y es transformado por medio de un transformador trifásico elevador de 13 800 voltios a 230 000 voltios. Para el día 16 de septiembre del 2016 se entregan 134,1 *mega* Watts al sistema interconectado nacional. En el caso de la empresa generadora de energía eléctrica, se tiene un único generador eléctrico trifásico, de allí la importancia de tener bajo control el indicador clave de funcionamiento conocido como disponibilidad, el más importante para la toma de decisiones y selección de mantenimientos predictivos a realizar.

En una empresa generadora de energía eléctrica de Guatemala, situada en Masagua, municipio de Escuintla, a base de combustible de carbón mineral, la generación de potencia eléctrica requiere 24 horas al día, los siete días de la semana, y solo se tiene autorización para salidas de mantenimiento programado una vez al año. El envejecimiento del generador y el no poder cambiarlo, esto aunado a disparos en la unidad, provocan fuerzas anormales y altas dentro de los devanados tanto del rotor como del estator. En generadores eléctricos trifásicos de alta potencia como este, una de las fallas catastróficas y que provocan indisponibilidad total y por largo tiempo, es la falla por cortocircuito entre espiras del rotor del generador, lo cual implica mandar a reparar o comprar un rotor nuevo.

El problema radica en cómo hacer para minimizar el impacto de fallas comunes y fallas catastróficas del generador eléctrico con base en fallas que es necesario investigar, y también preparar un plan de mantenimiento que permita tener los repuestos necesarios para reparar algunas fallas comunes en el menor tiempo posible, así como tener equipos de monitoreo en línea y pruebas adicionales con el generador fuera de línea, lo que permita analizar tendencias del estado de condición del estator, del rotor y del equipo auxiliar del generador, para así tomar decisiones acertadas para hacer intervenciones correctivas a tiempo.

Es importante hacer notar que el problema no se soluciona solo con tener los equipos de última tecnología, o con los reportes especializados que se generan con dichos equipos, sino que se necesita una gestión adecuada de mantenimiento para lograr entrenar y tener personal calificado, incluso externo, para el correcto análisis, interpretación y seguimiento, así como una estrategia adecuada frecuente para obtener los reportes que permitan ver el estado de la condición del generador en períodos determinados y así lograr la alta disponibilidad requerida y el alargamiento de la vida del generador eléctrico.

- Pregunta general

¿Qué beneficios se obtienen al efectuar análisis de la gestión de mantenimiento al generador eléctrico crítico, modelo BDAX 82.445 ERH y marca BRUSH de 160 MVA, con base en investigación de fallas frecuentes que hacen salir de línea al generador?

- Pregunta específica 1

¿Qué se necesita para tener tendencias del estado de condición, tanto del rotor como del estator del generador eléctrico, empleando las mediciones en línea del generador a diferentes potencias?

- Pregunta específica 2

¿Qué normas de mantenimiento del fabricante Brush se usan actualmente en el programa de mantenimiento del generador eléctrico?

- Pregunta específica 3

¿Qué se obtiene de unificar diagnósticos de normas de mantenimiento de fabricante, tendencias que muestran estado de condición del generador e investigaciones de fallas recurrentes del generador?

3. JUSTIFICACION

La alta disponibilidad del generador es requerida para que la empresa generadora cumpla con el contrato convenido con la empresa que compra la energía eléctrica, pues toda indisponibilidad es penalizada. Esto lleva a la problemática de integrar a las mediciones existentes, las temperaturas de devanados en línea, la corriente de excitación de campo a varias potencias del generador y las vibraciones de los cojinetes del generador en línea, para poder llevar una base de datos con tendencia que pueda dar la condición tanto del estator como del rotor del generador eléctrico. Si ocurre una falla catastrófica en el rotor del generador, la empresa generadora tendría una total indisponibilidad, por ser el único generador eléctrico con el que cuenta. Esto provocaría altos costos al pagar penalidades por incumplimiento del contrato. El alto costo de mandar a reparar el rotor a Inglaterra, que es el lugar de fabricación del generador eléctrico en mención, o el alto costo de comprar uno nuevo, implican además un largo tiempo de espera, pues se entraría a un proceso de producción.

Las altas pérdidas por la falta de generación eléctrica obligan a evaluar el tener equipo de monitoreo en línea de cortocircuito entre espiras del rotor del generador eléctrico, ya que, de acuerdo a lo investigado, para septiembre de 2016 existe equipo que puede ser montado en el estator y, mediante cableado al exterior del generador, dejar un conector al cual puede conectarse un analizador que tome la información necesaria y la procese con un *software* especial, para así generar reportes en forma de gráficas de formas de onda que muestren las corrientes inducidas por cada ranura del rotor que pasa por el sensor, mostrando si hay cortocircuito entre espiras del rotor. Todo esto se hace en línea sin necesidad de sacar de operación el generador.

4. ALCANCES

Uno de los requerimientos base para que el equipo opere a una capacidad de trabajo adecuada es hacer procedimientos para que los técnicos aprendan a analizar los reportes especializados que genera el equipo de monitoreo en línea de cortocircuito entre espiras, y puedan generar reportes analizados del estado del rotor del generador eléctrico para poder llevar tendencias. El presente estudio se limita a generadores eléctricos trifásicos de 160 MVA, realizando la investigación de la nueva tecnología de monitoreo en línea de cortocircuito entre espiras del rotor del generador, y apoyándose en la tecnología de medición de vibraciones en línea de los cojinetes del generador eléctrico, para llegar a determinar el estado del rotor del generador eléctrico en operación y no esperar a tener una salida programada de mantenimiento. Adicionalmente, se requiere investigar las nuevas tecnologías de medición con el generador eléctrico fuera de línea, que son RSO (osciloscopio de variables repentinas repetitivas) y pruebas EL CID (*Core Imperfection Detector*). Con mediciones fuera de línea y mediciones en línea se prevé tener un conocimiento adecuado del estado de condición del generador eléctrico trifásico.

Se deben analizar las fallas catastróficas del generador eléctrico que provocan el mayor impacto en la operación de la planta de generación de energía eléctrica, basándose en la historia de más de 15 años de trabajo y también de fuentes nacionales como internacionales. La actualización de la tecnología pretende lograr una mejor disponibilidad de los equipos y la operación medible, ayudando en el conocimiento del estado de condición del equipo y permitiendo que la gerencia de mantenimiento pueda tomar decisiones acertadas y a tiempo,

para realizar mantenimientos programados que reducen costos de mantenimiento al estar preparados con repuestos y mano de obra calificada.

En el acondicionamiento del equipo se busca una estandarización de procedimientos y, consecuentemente, diseñar formatos para llevar un registro que permita tener la base de datos para generar tendencias del análisis, enfocadas en los reportes especializados que proporciona el equipo de medición en línea de cortocircuito entre espiras del rotor. Al generar formatos de las diferentes mediciones en línea del generador eléctrico, se ayudará a obtener la base de datos que consecuentemente sirva para analizar las mediciones versus la tendencia obtenida del equipo de medición en línea del cortocircuito entre espiras del rotor, enfocadas a la obtención de la condición del rotor del generador eléctrico en operación.

La necesidad de realizar formatos de medición recae en el objetivo de obtener las tendencias del comportamiento del estado del rotor del generador eléctrico trifásico de 160 MVA durante marzo de 2017, medidas que se implementarán y cuyo enfoque será de ayuda a los técnicos para que realicen las mediciones apropiadas durante el mes siguiente. Una oportunidad del estudio y su alcance es hacer el procedimiento para que técnicos electricistas puedan analizar los reportes especializados generados por el medidor de cortocircuito de espiras del rotor en línea y generen reportes con análisis también durante mayo y junio de 2017.

5. MARCO TEÓRICO

En el marco teórico se incluye teoría y práctica que resulta de revisar literatura, experiencias propias y otras fuentes de información relacionadas con el problema a resolver. Esto será la base del tema de este trabajo.

5.1.1 Funcionamiento del generador sincrónico

El generador eléctrico trifásico es una máquina rotativa que convierte la energía mecánica que le transmite el movimiento mecánico de una turbina de vapor directamente acoplada al sistema en energía eléctrica. Según Chapman, “los generadores eléctricos trifásicos ampliamente usados en la industria son los llamados sincrónicos y están compuestos principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator. Su principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday”. (CHAPMAN, 2005):

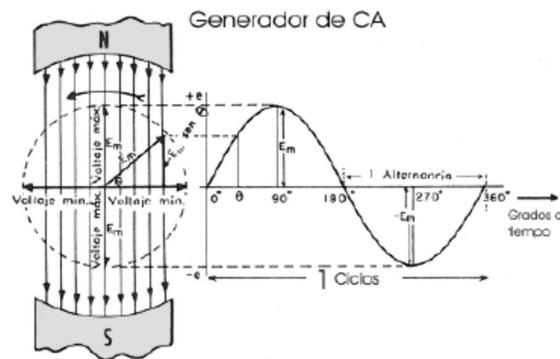
“Al crear un voltaje inducido en el estator del generador eléctrico, debemos crear un campo magnético en el rotor o circuito de campo alimentándolo con voltaje en corriente continua, el campo magnético al estar girando al ser movido por un dispositivo externo inducirá un voltaje en el devanado del estator por lo que tendremos una corriente alterna fluyendo a través del estator”. (CHAPMAN, op. cit.)

Como se puede ver en los párrafos anteriores, la corriente de excitación y el voltaje de excitación juegan un papel muy importante en la operación de un generador eléctrico.

5.1.2 Corriente alterna y corriente directa

La corriente es la rapidez a la cual fluye la carga a través de una superficie.
(SEARS ZEMANSKI, 1999)

Figura 3. **Generación de onda senoidal de corriente alterna por el movimiento giratorio de una armadura**



Fuente: Sapiens. *Conceptos de electrotecnia*. www.sapiensman.com. Consulta: noviembre de 2015.

“De acuerdo a la dirección de la corriente eléctrica, esta se divide en dos, cuando la dirección es constante se obtiene corriente directa (CD), y cuando la dirección de la corriente es variable o cambia periódicamente se le llama corriente alterna (CA)”. (SEARS ZEMANSKI, op. cit.)

5.1.3 Componentes de las máquinas eléctricas

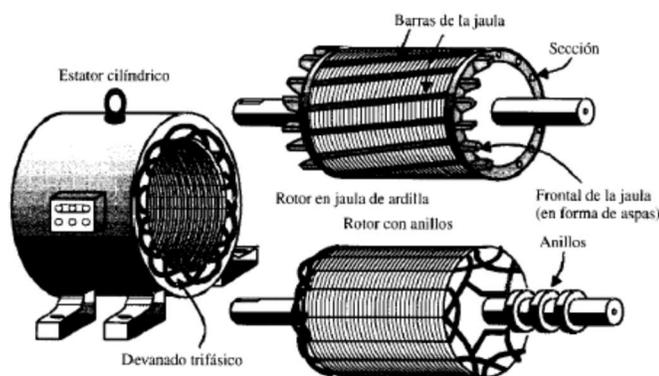
“Todas las máquinas eléctricas (incluidas, bajo una perspectiva general, los transformadores) están constituidas por uno o varios circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Para la construcción de los mismos se utilizan materiales ferromagnéticos para dos funciones: ser el camino de baja reluctancia para el campo magnético y ser el soporte físico estructural al resto de

componentes”. (FEITO, 2002) “Como todas las máquinas eléctricas, las maquinas asíncronas o de inducción constan de una parte fija o estator, y una parte móvil o rotor, separadas por un pequeño espacio de aire denominado entrehierro”. (FEITO, op. cit.)

5.1.4 Tipos de rotores en máquinas asíncronas

“Existen en las máquinas de corriente alterna dos tipos de rotores: bobinado y jaula de ardilla, cuyo devanado está formado por varillas conductoras alojadas en ranuras practicadas en el hierro del propio rotor y cortocircuitadas en ambos extremos mediante los dos platos conductores a los lados del rotor. La principal característica y ventaja de los motores de inducción es la sencillez y robustez de la construcción del rotor”. (FITZGERALD, et. al., 1980)

Figura 4. **Máquina asíncrona**



Tipos de máquinas asíncronas o de inducción.

Fuente: *Electrotecnia aplicada a la ingeniería mecánica UD 4. Principios de electromagnetismo y funcionamiento y aplicaciones de las diferentes máquinas eléctricas.* umh1791.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/242/. Consulta: 2016.

5.1.5 Tipos de rotores en máquinas síncronas

En las máquinas síncronas pueden encontrarse claramente diferenciados dos tipos de rotores: polos salientes y rotor liso o cilíndrico. En el primer tipo de rotor se verá principalmente en máquinas de velocidad menor a 1 200 revoluciones por minuto. Puede señalarse básicamente dos causas que limitan el diseño de máquinas de polos salientes para alta velocidad:

1. La concentración de masa en los polos donde a grandes velocidades se producirían fuerzas centrífugas excesivas.
2. Por pérdidas de ventilación que en este tipo de rotor serían considerables, sumándole que serían máquinas muy ruidosas. Es frecuente encontrar máquinas con este tipo de rotor movidas por turbinas hidráulicas (baja velocidad).

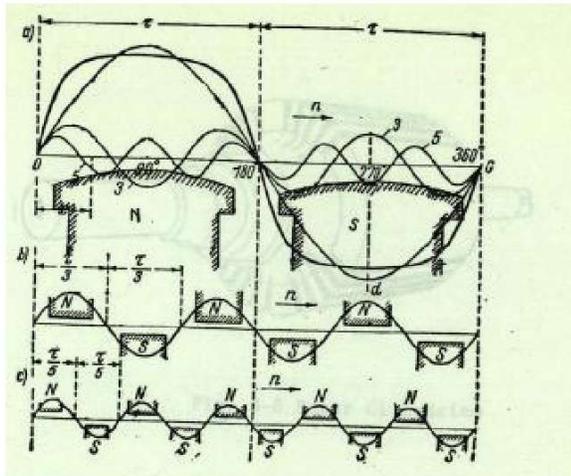
El tipo de devanado que se acostumbra para el rotor de polos salientes es el devanado concentrado. Sin embargo, con el fin de que la densidad de flujo producida por la fuerza magneto motriz se aproxime un poco a una onda senoidal, los polos se fabrican con dos características especiales:

1. Una expansión polar donde habrá mayor reluctancia que en el centro del polo.
2. Un entrehierro mayor en los extremos del polo comparado con el centro del mismo.

Fuerzas magneto motrices armónicas, según el análisis de Fourier, o una onda periódica no sinusoidal, pueden ser consideradas como la suma de muchas ondas senoidales que en la medida en que aumenta su frecuencia disminuyen su amplitud. Entonces, la distribución de la densidad de flujo en una máquina de

polos salientes podría ser como se ilustra en la figura que se muestra a continuación (solo se dibujaron la onda fundamental, la primera, la tercera y la quinta armónica).

Figura 5. **Distribución de la densidad del flujo debajo del polo saliente**

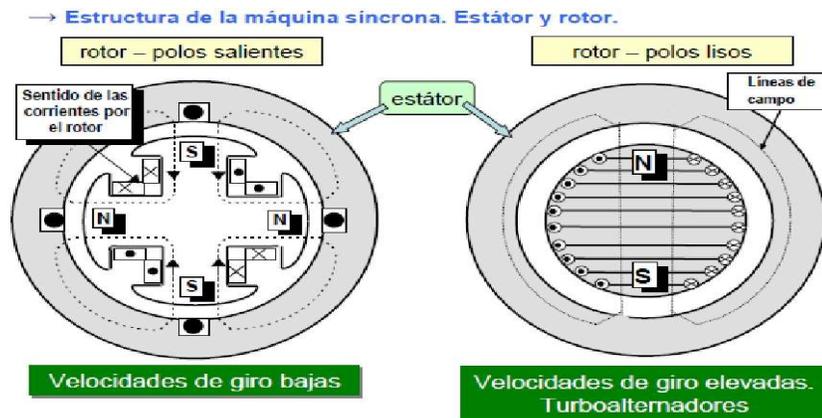


Fuente: MALDONADO, Domingo. *Teoría de polos salientes de las máquinas síncronas*.

Máquinas eléctricas II. <https://www.u->

[cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id). Consulta: abril de 2016.

Figura 6. Estructura de rotor de polos salientes lisos o cilíndricos



Fuente: MALDONADO, Domingo. *Teoría de polos salientes de las máquinas síncronas.*

Máquinas eléctricas II. <https://www.u->

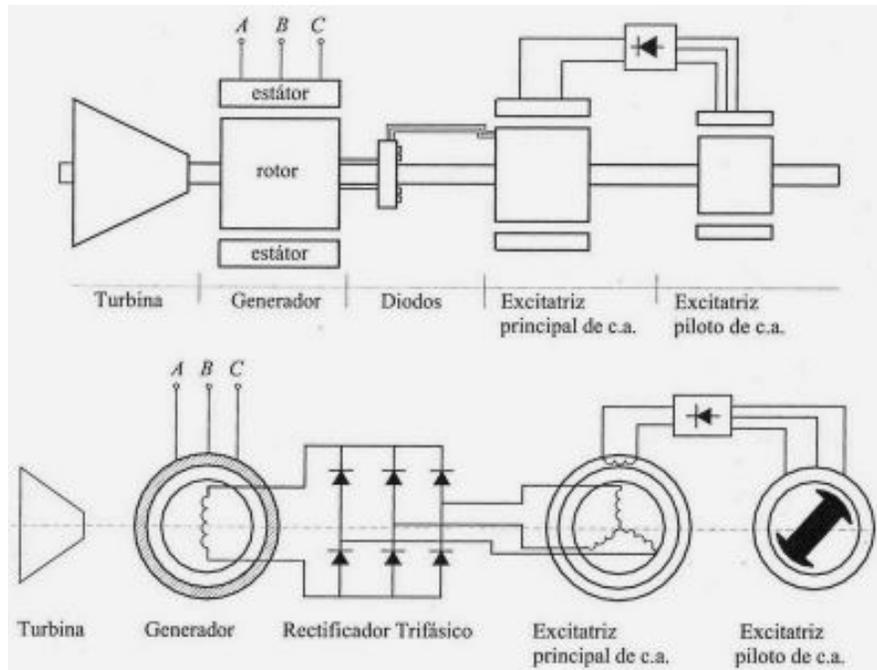
[cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id). Consulta: abril de 2016.

Se ve que, tanto los motores como los generadores, trabajan bajo los mismos principios, de allí que un generador eléctrico puede llegar a motorizarse, lo cual ocurre cuando el voltaje de línea del sistema interconectado nacional es mucho mayor que el voltaje que este está entregando y comienza a girar en sentido contrario. Claro está que dentro de sus protecciones está una que detecta esto y dispara el generador para que lo anterior no ocurra.

5.1.6 Funcionamiento de un generador eléctrico trifásico

Se verá a continuación el funcionamiento práctico de un generador eléctrico trifásico:

Figura 7. **Componentes principales de un generador eléctrico trifásico**



Fuente: Brush. *Operating and maintenance manual for generator electric model BDAX 82.445*
ERH. 1997. Consulta: 2016.

Del lado izquierdo de la figura 1 se ve una turbina a vapor que hará mover todas las partes móviles del generador. Primero se ve el rotor del generador eléctrico, y montada sobre el rotor va la excitatriz principal de corriente alterna, la cual está formada por tres bobinas haciendo una conexión en estrella, de manera que se tiene una excitatriz trifásica. El voltaje generado en corriente alterna es convertido en corriente directa por el rectificador trifásico que se ve en la figura 1 y que está formado de seis diodos. La excitatriz principal de corriente alterna es llamada “sin escobillas” porque el voltaje en corriente directa es llevado directamente a través de cables que salen del rectificador trifásico y pasan por un agujero del rotor y llegan directamente a la bobina principal, es decir dicha conexión o cableado se mueve al mismo tiempo con el rotor. Cuando a la única bobina del rotor es aplicado voltaje en corriente directa se genera un campo

magnético que gira a la velocidad de la turbina a la cual está acoplado. Este campo magnético atraviesa las espiras de los devanados trifásicos del estator, generando un voltaje en las terminales del estator del generador que en este caso son 13 800 voltios en las terminales A, B, C.

El amperaje en el rotor es de 1 730 amperios, un amperaje bastante alto que pasa por el rotor, pero la bobina del rotor está diseñada para soportar este amperaje, de allí que cualquier condición que provoque un incremento en dicho amperaje crea un alto riesgo, al producirse altas temperaturas que dañarían el aislamiento entre espiras del rotor y provocarían una falla catastrófica. La excitatriz principal sin anillos rozantes, para generar un voltaje de corriente alterna, igualmente necesita de un campo magnético rotativo que atraviese las espiras de su bobina trifásica. El campo magnético que atraviesa las espiras de la excitatriz principal se obtiene al aplicar voltaje a la bobina monofásica de campo fija en el estator, y el voltaje que se aplica es conocido como voltaje de excitación, muy importante en la operación del generador.

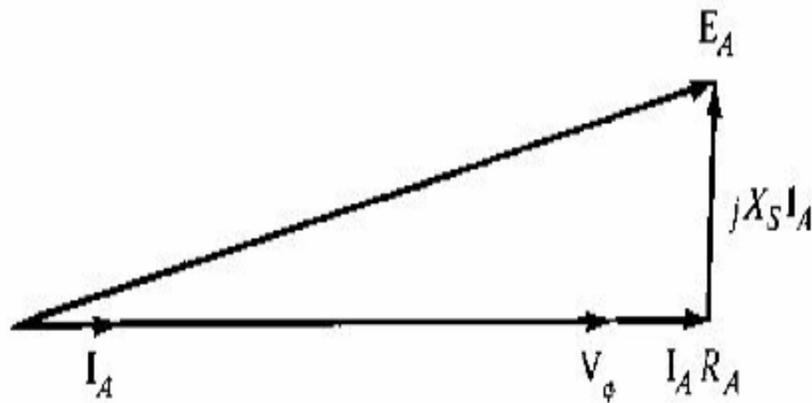
La corriente que circula por la bobina monofásica de campo fija en el estator es conocida como la corriente de excitación, igualmente de importante porque son valores muy bajos de corriente del rango de cero a 10 amperios. En el caso del generador Brush, la corriente de excitación no debe sobrepasar el límite superior de 7,5 amperios. Si este valor es superado crea un riesgo al subir el amperaje en el rotor y, por lo tanto, la temperatura y el riesgo de dañar el aislamiento entre espiras, pudiendo llegar a provocar un cortocircuito entre estas.

El voltaje aplicado a la bobina monofásica de campo fija en el estator es obtenido de la excitatriz piloto de imanes permanentes. Al tener imanes permanentes hay campos magnéticos siempre en la excitatriz piloto. La bobina monofásica de la excitatriz piloto va montada sobre el rotor y se mueve a la misma

velocidad del rotor del generador. Siempre que el rotor esté en movimiento, la excitatriz piloto de imanes permanentes va a generar un voltaje de corriente alterna y es rectificado por el rectificador que se muestra en la figura 1, y convertido en voltaje de corriente directa y aplicado a la bobina monofásica de campo fija en el estator, apareciendo el voltaje y corriente de excitación tan importantes en la operación del generador. Este voltaje de corriente directa aplicado a la bobina monofásica de campo fija en el estator es controlado por un sistema electrónico automático llamado M.A.V.R. (*Manual Automatic Voltage Regulator*), cuya función es muy delicada, por lo que se vio anteriormente que controla la corriente de excitación, que es tan pequeña pero que tiene gran impacto en el funcionamiento adecuado del generador.

5.1.7 Diagrama fasorial en función de factor de potencia de generador sincrónico

Figura 8. Diagrama fasorial de generador con cargas factor potencia unitario



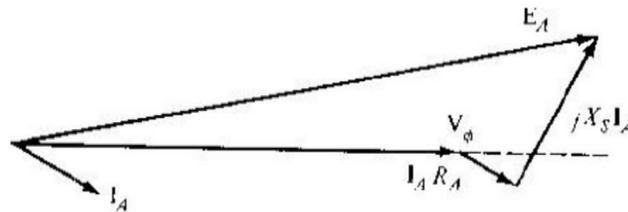
Fuente: CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. 2005. Pág. 455

Aquí:

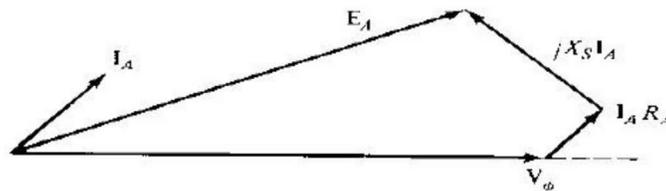
- E_a es voltaje generado dentro del generador
- I_a la corriente en amperios que recorre el devanado de armadura
- V_o es voltaje de fase
- X_s es reactancia sincrónica del generador
- R_a es resistencia de bobinas de la armadura

El voltaje en terminales del generador es el voltaje interno menos la caída de voltaje interna del generador, y la corriente en la bobina de la armadura está en fase con el voltaje en terminales.

Figura 9. Diagrama fasorial de generador factor de potencia: a) en atraso;
b) en adelanto



(a)



(b)

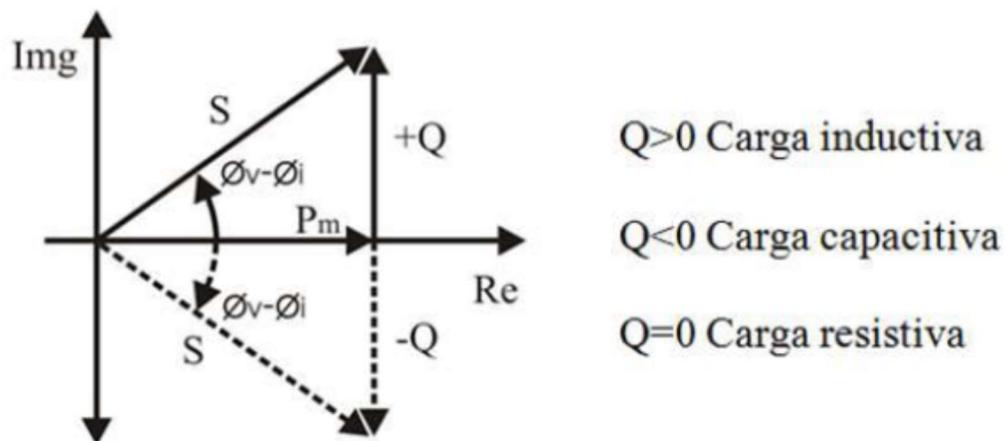
Fuente: CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. 2005. Pág. 456

En las figuras se puede notar que el ángulo de la corriente de armadura ha cambiado. Esto provoca cambio en magnitud del voltaje generado y en la posición angular del voltaje generado internamente, así como en el voltaje en terminales. Para poder controlar el voltaje en terminales se debe disminuir o aumentar la excitación del campo. La potencia en Watts que absorbe una carga en cierto instante es el producto de la caída de voltaje instantáneo a través de la carga en *volts*, y de la corriente instantánea que entra a la carga, en amperes. (GRAINGER, 1996)

En los circuitos sinusoidales la definición de potencia se torna compleja, debido a que puede haber una diferencia entre el voltaje y la corriente alterna suministrada a la carga. Con esta diferencia de fase en los circuitos de corriente alterna aparecen tres tipos de potencia: real, activa y aparente. (CHAPMAN, op. cit) Estas potencias se relacionan por medio del denominado triángulo de

potencia. Este es un método gráfico para obtener P , Q y el ángulo de fase para cargas en paralelo si se conoce que $\cos \Theta$ es $P/|S|$.

Figura 10. **Triángulo de potencias**

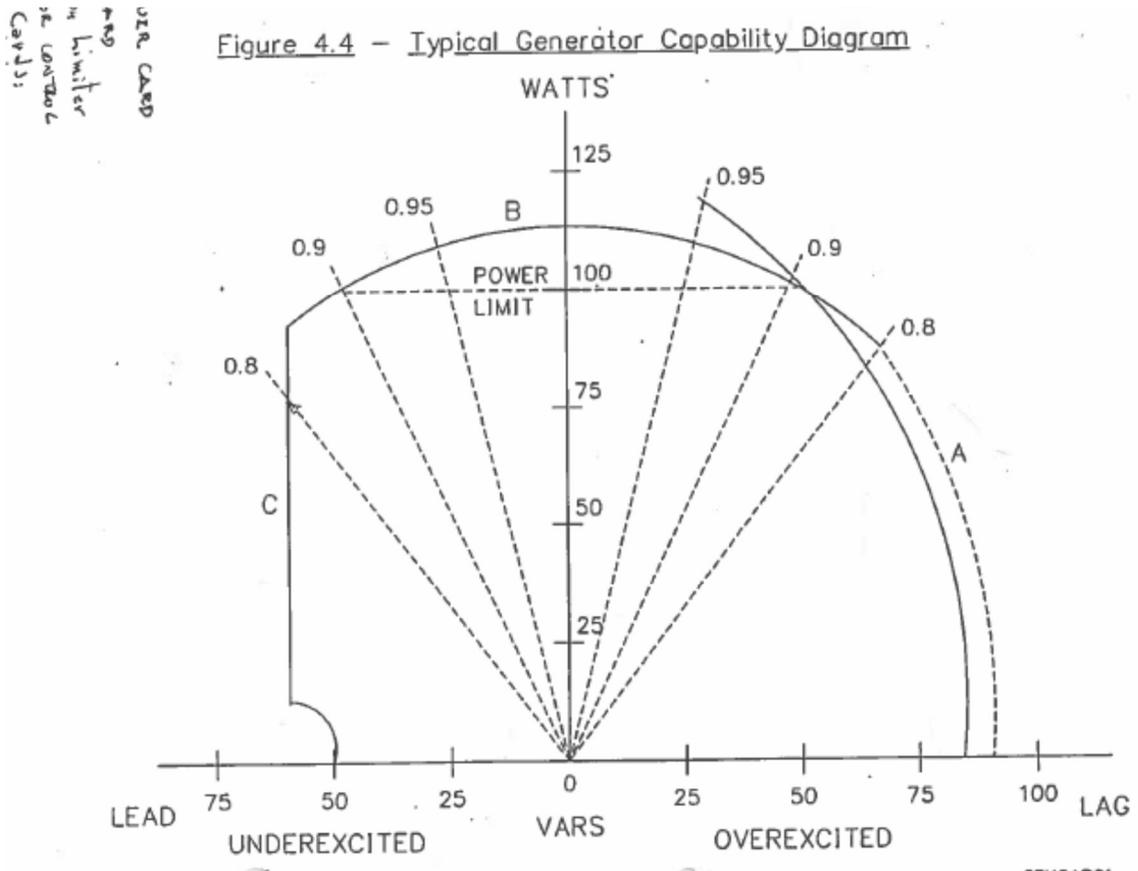


Fuente: Universidad Miguel Hernández. *Análisis de circuitos y sistemas lineales*. 2013. umh1219.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/70/2013/.../ejstema1a-modificado.pdf. Consulta: 2016.

5.1.8 Curva de capacidad en generador trifásico sincrónico

Ahora se verá la curva de capacidad que determina los rangos de operación dentro de los cuales es segura la operación del generador, donde puede apreciarse el papel importante de la corriente de excitación.

Figura 11. Diagrama de capacidad



Fuente: Brush. *Operating and maintenance manual for generator electric model BDAX 82.445*
 ERH. 1997. Consulta: 2016.

El diagrama de capacidad muestra el área donde el generador puede trabajar de forma segura, al entregar potencia activa Watts y potencia reactiva Varsen, función de la corriente de excitación del rotor. La sección A indica el límite reactivo necesario para prevenir sobrecalentamiento de los devanados de excitación (potencia reactiva en atraso). La corriente de campo estacionario cuyo campo magnético hace que la armadura de la excitatriz principal genere un

voltaje dc es aplicada al rotor (miles de amperios) y el campo magnético de este hace que el estator genere 13,8 KV.

La sección B indica el límite colocado por la corriente del estator nominal, (potencia activa). La sección C indica el límite de subexcitación, y con niveles de excitación debajo de esta máquina no puede desarrollar suficiente torque de sincronización para permanecer sincronizado con el sistema, así que puede haber un deslizamiento de polos (potencia reactiva en atraso).

Un límite superior que puede ser indicado en el diagrama es el límite de potencia que corresponde al rango máximo de la turbina. Es normal para el rango de potencia de una turbina y el generador incrementar a una temperatura de ambiente más baja, y juegos diferentes de curvas pueden ser dibujadas en el diagrama que corresponde a diferentes temperaturas ambientes. Reguladores de voltaje modernos tienen circuitos de control incluidos, los cuales automáticamente previenen excitación, sea incrementada a un nivel que provocaría que los devanados de excitación sobrecalienten o también que prevenga que la excitación sea reducida a un nivel que provocaría peligro de deslizamiento o pérdida de sincronización. Es también bastante normal para el avr incluir circuitos para el control automático de factor de potencia y potencia reactiva.

Los gobernadores incorporados a las turbinas usualmente tienen circuitos de control que limitan la salida de potencia de la máquina de acuerdo a temperaturas ambiente u otros parámetros asociados con la máquina. Con los parámetros vistos anteriormente, se nota la importancia de conocer el funcionamiento y componentes asociados al generador eléctrico, ya que se ve que fácilmente puede salirse del rango de operación seguro y provocar una falla que puede ser detectada por circuitos de protección, pero que cualquier disparo

produce fuerzas grandes estresantes, tanto en los devanados del rotor como del estator del generador eléctrico, y fundamental saber los valores base normales de operación y saber cuándo las tendencias se salen de los límites permisibles para poder saber el estado de condición del generador.

5.1.9 Componentes y especificaciones de generador BDAX 82.445 ERH de 160 MVA

Tabla I. Nombre de componentes y su función

Generador	Es una máquina de rotor cilíndrico enfriado por aire, diseñada para generar cargas base o cargas pico de acuerdo con las particularidades de la placa de identificación, hojas de datos y curvas de este manual.
Excitatriz principal	Es del tipo sin escobillas y el eje de la armadura está montado en el mismo eje del rotor. La base del imán de la excitatriz es ajustada con los polos del campo de acero laminado y cada bobina con alambre de cobre cubierto con vidrio y encapsulado con resina epóxica. Las terminales del campo son llevadas de las bobinas a una caja de terminales al lado de la base. La armadura trifásica tiene núcleo de acero laminado con ranuras abiertas, ajustada con barras de cobre sostenidas en las ranuras con cuñas laminadas de tela con resina epóxica. Las terminales de fase son conectadas al ensamble del rectificador rotativo con diodos protegidos por fusibles. Las conexiones eléctricas entre el rectificador y el rotor del generador son llevadas por un agujero central a través del eje del mismo rotor.
Excitatriz piloto	La excitatriz piloto es un generador monofásico de imán permanente.
Rectificador	El rectificador rotativo forma parte de la excitatriz principal.
Cojinetes	Los dos cojinetes son aislados eléctricamente.

Continuación de la tabla I

Monitor de velocidad por proximidad	Un sistema transductor espacio libre-voltaje sin contacto usado para medidas de la posición del eje y vibración.
Sensores de proximidad	Son ajustados a cada uno de los dos cojinetes.
Modulo aceite de lubricación	El modulo de aceite y su equipo asociado circula aceite para lubricación y enfriamiento de los dos cojinetes del generador.
Modulo aceite levanta eje	Asegura que los cojinetes son lubricados adecuadamente en el arranque.
Interruptor de baja presión aceite	Este dispara y protege al eje y cojinetes del generador cuando hay baja presión de aceite.
RTD	Instalados para medir temperatura en devanados del estator, entrada y salida de aire al estator, salida de aire de la excitatriz, metal de cojinetes, drenaje de aceite de cojinetes, salida y entrada de agua.
Escobilla de carbón de tierra del eje del rotor	Este va instalado rozando con el eje del rotor haciendo y la otra terminal va conectado a la tierra del generador.
Enfriador de agua	El agua circula a presión adentro de los tubos del enfriador haciendo bajar la temperatura del aire recirculando.

Fuente: Brush. *Operating and maintenance manual, Cylindrical rotor AC generator Vol. 1.* October, 1998. Consulta: 2016.

Tabla II. **Características del rotor**

Tipo de rotor	Redondo o circular
Voltaje de excitación	189 voltios corriente directa
Amperaje del rotor	1 730 amperios
Número de polos	2 polos
Revoluciones por minuto	3 600

Fuente: Brush. *Operating and maintenance manual for generator electric model BDAX 82.445*
ERH. 1997. Consulta: 2016.

5.1.10 Gestión de mantenimiento de generador único en planta de generación de energía eléctrica

La gestión de mantenimiento debe ser enfocada en el indicador disponibilidad, por lo que se requiere investigar y usar equipos de medición que apoyen a detectar fallas y reducir el impacto que estas provocan. En la industria hay varios indicadores clave de desempeño, por sus siglas en inglés KPI's (*key performance indicators*), los cuales cada tipo de industria adopta según sus necesidades. Según William Thomson, "no podemos controlar o administrar lo que no podemos medir", por lo tanto, si no hay medición no es posible controlar mucho menos administrar, pero se debe estar seguro de que lo medido es realmente importante y no perder tiempo en mediciones que no van a aportar valor. "Los indicadores de desempeño para el mantenimiento son seleccionados asegurando una correlación directa entre las actividades de mantenimiento y el indicador que se está midiendo". (WEBER, 2005) De aquí la importancia que desde el inicio de toda gestión se debe invertir tiempo en elegir dichos indicadores clave de desempeño, que sean de utilidad para tener una buena gestión de mantenimiento enfocada a mantener la planta en conjunto disponible lo más cerca del cien por ciento. "Un modelo de gestión de mantenimiento debe ser

eficaz y oportuno, se debe alinear a los objetivos impuestos con base en las necesidades de la empresa, minimizando los costos indirectos de mantenimiento, generando actividades que permitan mejorar los indicadores claves del proceso de mantenimiento”. (VIVEROS, et al., 2013)

En el modelo de gestión de una planta de generación de energía eléctrica la disponibilidad es lo más importante por las altas penalidades por contratos contraídos con la empresa compradora de energía eléctrica, de allí que no es de extrañar que en la bodega se encuentre un *stock* normal de repuestos muy costosos, y que cualquier persona que no esté involucrada con el tipo de estrategia pueda ver como “alto capital durmiendo”. Esto se ve en repuestos como un estator completo del generador, un regulador de voltaje automático completo solo para desconectar el actual e instalar el de repuesto, en caso de una falla, una excitatriz piloto completa, u otros.

Esta estrategia se ha tomado porque el fabricante es de Inglaterra y el tiempo en que se obtiene un repuesto crítico del generador es muy largo y eso afectaría a la disponibilidad de la planta. “La metodología diseñada toma en cuenta las incertidumbres relacionadas a las variables requeridas para la determinación de los costos asociados a las actividades de mantenimiento o reemplazo, así como para la determinación del riesgo asumido en caso de la ocurrencia de eventos no deseados como consecuencia de la no ejecución de dicha actividad de mantenimiento o reemplazo, lo que permite al tomador de decisiones evaluar los escenarios posibles a lo largo del ciclo de vida del activo, garantizando la rentabilidad del negocio”. (GUTIÉRREZ URDANETA Y ROMERO BARRIOS, 2014)

5.1.11 Mediciones importantes para conocer estado de condición de generadores eléctricos trifásicos

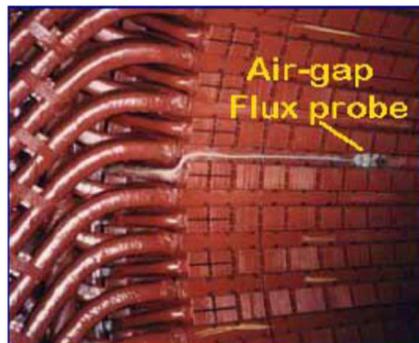
Una medición importante basada en la condición a monitorear es la vibración en los cojinetes del generador eléctrico. Las espiras en cortocircuito en devanados de campo de rotores cilíndricos de generadores pueden contribuir en problemas de vibración debido al torcimiento térmico del rotor y debido al calentamiento no uniforme asociado con flujos de corriente directa, no simétrica y con pérdidas de potencia en devanados con fallas de cortocircuito entre espiras. (Sumatron. *Manual analizador de espiras en cortocircuito de rotor de generador*. Versión 1.1, agosto de 2004)

Las espiras en cortocircuito pueden también provocar flujo magnético desbalanceado en el espacio de aire entre el estator fijo y el rotor en movimiento, lo cual puede también agravar problemas de vibración. Debido a que el análisis de vibraciones para problemas de rotor con falla de espiras en cortocircuito no siempre es una ciencia exacta, es deseable tener que confirmar datos de otras pruebas de tipo eléctrico antes de proceder con desmontajes costosos y reparaciones de máquinas grandes. Las pruebas adicionales que son aplicadas a los sistemas para confirmar la existencia de espiras en cortocircuito son comúnmente hechas antes de poner en marcha reparaciones costosas. El manual citado determina las siguientes tres pruebas adicionales usadas en la industria para determinar si un rotor tiene o no espiras en cortocircuito:

1. Pruebas de estabilidad térmica, esto implica cambiar parámetros de operación del generador (potencia activa en *Watts*, potencia reactiva en *Vars* y enfriamiento) y registrar y analizar su impacto en el análisis de vibración.
2. Análisis de sensor de flujo magnético, este utiliza un sensor instalado en el estator dejando un espacio de aire entre estator y rotor para medir y

analizar el flujo magnético de cada ranura del rotor cuando la ranura de este en movimiento pasa por el lugar donde está instalado el sensor. (Algunos generadores eléctricos de gran potencia están permanentemente equipados con sensores de flujo magnético en el espacio de aire entre estator y rotor, y la gran mayoría no necesitan el sensor que requiere de una salida de la unidad; ver figura 12).

Figura 12. **Espacio para montar sensor de flujo magnético en estator**



Fuente: Generatortech. *Manual de usuario: shorted turn detection and analysis system*. 1989. www.generatortech.com. consulta: 2016

Figura 13. **Equipo analizador para conectar sensor en campo**



Fuente: *Generatortech. Manual de usuario: shorted turn detection and analysis system*. 1989. www.generatortech.com. Consulta: 2016.

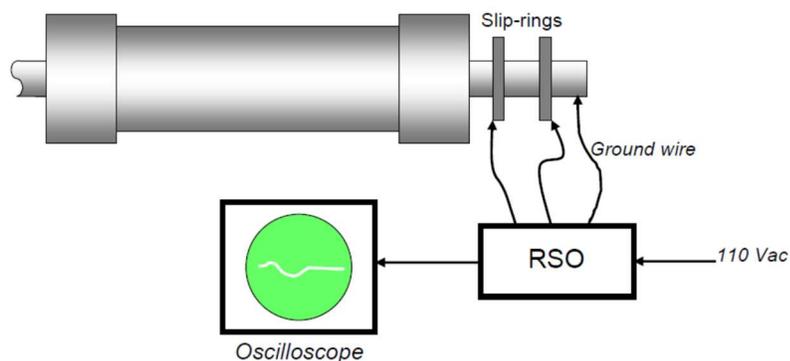
Figura 14. **Bobina # 6 en corto con bobina # 7**



Fuente: *Generatortech. Manual de usuario: shorted turn detection and analysis system*. 1989. www.generatortech.com. Consulta: 2016.

3. RSO (*Repetitive Surge Oscilloscope*). Osciloscopio de variables repentinas repetitivas, este es aplicado principalmente con el analizador de espiras en cortocircuito de rotor de generador marca Sumatron.

Figura 15. **Arreglo de conexión típica de medición con el RSO**



Fuente: Sumatron. *Manual de usuario: Generator rotor shorted turn analyzer for turbo-generator dc-fieldwindings*. 2004. Consulta: 2016.

Qué tan dañinas son las espiras en corto circuito:

- Quizás cerca del 50 % de todas las unidades en operación tienen por lo menos una espira en corto circuito.
- Algunas unidades permanecen estables (sin cortocircuitos adicionales) por muchos años.
- Algunas unidades pueden continuar desarrollando cortocircuitos y pueden eventualmente crear una falla a tierra catastrófica.
- Algunas unidades pueden severamente impactar en la operación después de solo desarrollar unas cuantas espiras en corto circuito.

Debe prestarse atención a esta línea crítica. Qué tan malo es y qué se necesita hacer depende de la construcción de la máquina, su historial, y las recomendaciones de operación y mantenimiento basadas en la historia de máquinas similares, requerimientos del sistema interconectado al que generen, la edad, entre otros aspectos. (KERSZENBAUM, 2011)

Debe notarse que ninguna de las pruebas, como el análisis de vibración, la estabilidad térmica, el análisis de sensor de flujo magnético y la prueba RSO, por sí solas proveen absoluta certeza de que hay un problema de espiras en cortocircuito en el rotor del generador. Sin embargo, cuando una de las pruebas es confirmada por una segunda prueba, la probabilidad de que el devanado de campo sea el problema de vibración aumenta significativamente. Las anomalías por espiras en cortocircuito pueden ser enmascaradas si estas están cerca del centro del devanado o, dicho de otra manera, si son espiras en cortocircuito balanceadas, o también si hay múltiples espiras en cortocircuito, si son intermitentes, si algunas están a tierra y si hay otros elementos que contribuyan a los niveles anormales de toda la máquina.

6. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

GLOSARIO

ANTECEDENTES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

ALCANCES

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1.1 Funcionamiento del generador sincrónico

1.1.2 Corriente alterna y corriente directa

1.1.3 Componentes de las máquinas eléctricas

1.1.4 Tipos de rotores en máquinas asíncronas

1.1.5 Tipos de rotores en máquinas síncronas

1.1.6 Funcionamiento de un generador eléctrico trifásico

1.1.7 Diagrama fasorial en función del factor de potencia de generador sincrónico

1.1.8 Curva de capacidad del generador trifásico sincrónico

1.1.9 Componentes y especificaciones del generador eléctrico trifásico modelo BDAX 82.445 ERH de 160 MVA

1.1.10 Gestión de mantenimiento de generador único en planta de generación de energía eléctrica

1.1.11 Mediciones importantes para conocer estado de condición de generadores eléctricos trifásicos

2. DIAGNÓSTICO DE NORMAS DE MANTENIMIENTO SUGERIDAS POR FABRICANTE

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN DE FALLAS FRECUENTES Y FALLAS CATASTROFICAS DE ROTOR EN CORTOCIRCUITO

4. PROPUESTA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO INCLUYENDO NORMAS DE FABRICANTE, HISTORIAL DE FALLAS RECURRENTES Y USO DE EQUIPO DE MEDICIÓN FUERA DE LÍNEA Y MONITOREO EN LÍNEA

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

7. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación usará una metodología de diseño no experimental, verificando resultados, por lo que se basará en un estudio de tipo descriptivo, con análisis de variables cuantitativas de medición de la operación normal del generador. Se colectarán datos de operación del generador de las mediciones en línea y datos de pruebas de mantenimiento con el generador fuera de operación, para verificar el estado de condición actual del generador, usando la herramienta Excel de Microsoft.

- Fase 1: fase de investigación y documentación. Se recopilará toda la información específica necesaria de los manuales de mantenimiento del fabricante para realizar el trabajo de investigación, así como información de los reportes de pruebas de medición realizadas en el tiempo al generador eléctrico. Se apoyará con investigación de libros físicos, libros virtuales, investigaciones de terceros relacionadas con el tema, tesis y otros para apoyar la documentación específica. Con toda la información recopilada y con el conocimiento de las nuevas tecnologías de medición en línea para generadores eléctricos, se procederá a realizar el diseño para actualizar el programa de mantenimiento proactivo del generador eléctrico.
- Fase 2: fase de análisis del estado de condición actual del generador. En ella se evaluarán las variables de medición actuales en línea del generador eléctrico en operación, a diferentes potencias entregadas al sistema interconectado nacional, así como los problemas o dificultades del generador cuando opera a potencias inferiores a la potencia nominal a la que fue diseñado.

- Fase 3: fase de recolección de las diferentes pruebas de medición en campo para ver el estado del generador fuera de operación. Estas variables de medición en campo se tomarán de los reportes realizados por personal contratista externo especializado, sobre los problemas y dificultades en los que se ha visto la planta cuando el generador ha sufrido una falla catastrófica.
- Fase 4: fase de análisis económico. Se usarán datos obtenidos de las dos fases anteriores para la justificación de la compra de equipo de medición en línea, y mediciones hechas al generador fuera de línea muy especializadas, para demostrar cómo ayudaría a la disponibilidad del generador el usar equipo de última tecnología para las mediciones mencionadas en esta fase.
- Fase 5: fase final del informe del programa proactivo de mantenimiento del generador eléctrico actualizado, con conclusiones después de realizar el análisis de las diferentes variables de medición eléctricas y el análisis operativo del generador a diferentes potencias inferiores a la potencia nominal de diseño. Se dejará constancia del programa proactivo de mantenimiento actualizado para lograr una óptima disponibilidad del generador eléctrico.

8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Las técnicas de análisis de información que se usan en el presente trabajo son de tipo descriptivo, análisis de la información bibliográfica, recopilación de datos de medición de campo y análisis de la información. Se describen a continuación:

- Técnica de análisis de información bibliográfica: recopilación de información relacionada a normas de mantenimiento del generador eléctrico de bibliografía del fabricante del generador. Investigación bibliográfica de los equipos de monitoreo en línea que puedan apoyar al mejor conocimiento del estado de condición del generador eléctrico.
- Trabajo en campo: se tomarán mediciones directamente de los instrumentos que monitorean las variables importantes del generador eléctrico en operación normal a diferentes potencias.
- Técnicas de análisis: se hará uso de herramientas computacionales para poder analizar en el tiempo las diferentes mediciones tomadas, y así presentar los resultados de forma gráfica, numérica o por medio de tablas usando programa Excel de Office, y técnicas estadísticas. Todo esto para determinar el comportamiento dentro de los límites aceptables de las diferentes mediciones del generador.

Conograma - Project Professional

GAANT CHART TOOLS

FILE TASK RESOURCE REPORT PROJECT VIEW FORMAT

Subproject Apps for Office Information Properties

Project Custom Links Between Fields Projects Working Time Schedule

Calculate Set Move Update Project

Status Date MA ABC Spelling



9. CRONOGRAMA

Task Mode	Task Name	Duration	Start	Finish	Resource
1	Resumir información de funcionamiento del generador	20 days	05/09/16 8:00 a. m.	30/09/16 5:00 p. m.	Ronald Herrera
2	Investigar las diferentes pruebas de medición para monitoreo de condición tanto en línea como fuera de operación del generador	20 days	03/10/16 8:00 a. m.	28/10/16 5:00 p. m.	1 Ronald Herrera
3	Reunir información del historico de fallas recurrentes del generador	20 days	31/10/16 8:00 a. m.	25/11/16 5:00 p. m.	2 Ronald Herrera
4	Normas de mantenimiento fabricante Brush trasladar a matriz de tareas vs frecuencia	20 days	28/11/16 8:00 a. m.	23/12/16 5:00 p. m.	3 Ronald Herrera
5	Información de fallas recurrentes con normas de mantenimiento del fabricante a matriz tareas vs frecuencia	20 days	26/12/16 8:00 a. m.	20/01/17 5:00 p. m.	4 Ronald Herrera
6	Recopilar y trasladar datos de mediciones de campo en operación a base de datos	20 days	23/01/17 8:00 a. m.	17/02/17 5:00 p. m.	5 Ronald Herrera
7	Analizar base datos de mediciones de campo en operación para obtener tendencias que nos den rangos de valores normales de operación y alarmas	20 days	20/02/17 8:00 a. m.	17/03/17 5:00 p. m.	6 Ronald Herrera
8	Manual de interpretación de tendencias de mediciones para emitir reportes de estado de condición del generador	20 days	20/03/17 8:00 a. m.	14/04/17 5:00 p. m.	7 Ronald Herrera
9	Actualizar gestión programa de mantenimiento del generador	20 days	17/04/17 8:00 a. m.	12/05/17 5:00 p. m.	8 Ronald Herrera

Fuente: elaboración propia.

10. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Se determina viable, debido a que estableciendo una mejor gestión de mantenimiento con base en la elaboración de un manual de interpretación de tendencias del comportamiento del generador eléctrico, con base a su vez en el historial de fallas e investigación nacional e internacional, incluyendo fallas catastróficas y de implementación de tareas de mantenimiento proactivo basado en normas de mantenimiento recomendadas por el fabricante, se obtendrá una mayor confiabilidad del equipo y una mejor disponibilidad, lo que se traduce en mayores ingresos monetarios a la empresa de generación de energía eléctrica.

- Recursos necesarios:
 - Recursos materiales:
 - Equipo de cómputo
 - Equipo y mobiliario de oficina
 - Internet
 - Bibliografía para consulta
 - Software Office
 - Cámara fotográfica
 - Impresora
 - Casco
 - Zapatos de seguridad con punta de acero
 - Lentes de seguridad
 - Recursos humanos:
 - Asesor de trabajo de graduación.

- Asesoría de catedráticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- Asesoría de catedrático del curso de Seminario de Metodología de Investigación 2 de la Escuela de Maestría de Ingeniería de Mantenimiento.
- Técnicos electricistas.

○ Recursos financieros:

No.	Descripción	Costo Q
1	Mobiliario y equipo	Q. 7 000,00
2	Gastos de movilización en automóvil	Q. 6 000,00
3	Equipo de protección personal	Q. 400,00
4	Pago de asesor	Q. 2 500,00
	Total	Q. 15 900,00

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBINO, P.I. *Impacto de la excentricidad estática en la estabilidad transitoria de un generador de polos salientes*. Trabajo de tesis, Programa de maestría en ciencias en Ingeniería Eléctrica, México, D.F., 2004.
2. BRUSH, (1,997, junio). *Operating and maintenance manual for generator electric model BDAX 82.445 ERH*. Inglaterra, junio de 1997.
3. CARVAJAL, F.A.; RAMIREZ, J.M.; ARCOS, L.F. *Boletín IIE: Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión*. México, D.F., marzo-abril de 1999.
4. CHAPMAN, S. J. *Máquinas eléctricas*. México, D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2005.
5. COLLADO, B. *Diseño de Investigación de actualización en motores eléctricos de corriente continua (CC) entre 50 y 220 HP por motores de corriente alterna (CA) trifásicos, utilizando variadores de frecuencia para maquinas extrusoras de plástico e implementación en equipo con motor de 50 HP para evaluar la mejora en los indicadores claves del departamento de mantenimiento en dos empresas guatemaltecas dedicadas a la manufactura de plásticos*. Trabajo de tesis, Facultad de Ingeniería, 2016. Pág. 5.
6. DUFFUAA, S.O.; RAOUF, A.D. *Sistemas de mantenimiento, planeación y control*_México, D.F.: Limusa, S.A. de C.V. 2000.

7. DURÁN, J. B. (2003). *Nuevas tendencias en el mantenimiento en la industria eléctrica*. IEEE Latin America Transactions, Vol.1, No. 1, 21-26, 2003.
8. FEITO, J.S. (2002). *Máquinas eléctricas*. Madrid: Prentice Hall, 2002.
9. FERNÁNDEZ, C.M.; GARCÍA, M.M.; ALONSO, O.G.; CANO, R.J.M.; SOLARES, S.J. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. ABB Service S.A., España: MarcomboBoixareu Editores, 2000.
10. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.J.; KUSKO, A. (1980). *Máquinas eléctricas*. Barcelona, España: Hispano Europea, 1980.
11. FLORES, R.; ISAIAN, T.I. *Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales*. [en línea] <http://dx.doi.org/10.4067/SO718-07642011000400009>. Revista de información tecnológica vol. 22 (4). Departamento de ingeniería eléctrica, SEPI-ESIME-IPN, México D.F., 2011. Págs. 73-84
12. FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.J.; UMANS, S.D. *Máquinas eléctricas*. Sexta edición, México, McGraw-Hill, 2004.
13. GENERATORTECH, Inc. *Shorted turn detection and analysis system*, New York, U.S.A., 1989.

14. GUTIÉRREZ URDANETA, E.E.; ROMERO BARRIOS, M.T. *Optimización costo riesgo para la determinación de frecuencias de mantenimiento o de reemplazo*. Predictiva 21, 2014. Págs. 6-17.
15. KERSZENBAUM, I. *Utilization of repetitive surge oscilograph (RSO) in the detection of rotor shorted-turns in large turbine-driven generators*. EIC Conference, june 2011.
16. SAPIENS. *Conceptos de electrotecnia para aplicaciones industriales*. [en línea] www.sapiensman.com>. [Consulta: 2015].
17. SEAR ZEMANSKY, Y.F. *Física universitaria*. México, Pearson Educación, 1999.
18. STONE, Greg C.; et al. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing and repair*. 2nd edition, 2004. Pág. 309
19. SUMATRON. *Manual de instrucciones del analizador de espiras en cortocircuito de rotor de generador marca Sumatron*. California, U.S.A., agosto de 2014.
20. THOMSON, W.T.; FENGER, M. *Current signature analysis to detect induction motor faults*. IEEE Industry Applications Magazine, 2001. Págs. 26-34.
21. TORBAR, T.W. *Online current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static air gap eccentricity in three-phase induction motors*. IEEE Trans. On energy conversion, vol. 14, no. 4, 1998. Págs. 347-357.

22. VIVEROS, P.; STEIGMAIER, R.; KRISTJANPOLLER, F.; BARBERA, L.; CRESPO, A. *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo*. *Ingeniare*, 2013. *Revista chilena de Ingeniería*. Págs. 125-138.

23. WEBER, A. *Key performance indicators*. Burlington Ontario, Ivara Corporation, 2005.