



Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1 DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Código del proyecto: 2848			
Título del proyecto: MINIMIZACIÓN DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR DESEQUILIBRIO DE CARGA Y ARMÓNICOS, MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DEL DEVANADO DEL ESTATOR EN TURBOGENERADORES.			
Facultad o Instituto Académico: INGENIERÍA			
Departamento o Escuela: ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA			
Grupo (s) de investigación: CONVERGÍA			
Entidades: UNIVERSIDAD DEL VALLE			
Palabras claves: DESEQUILIBRIO, COMPONENTES SIMÉTRICAS, ARMÓNICOS, PUESTA A TIERRA, TURBOGENERADOR.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	HAROLD JOSÉ DIAZ M.	220	220
	JAIRO ARCESIO PALACIOS P	110	110
Coinvestigadores	CINDY JOHANA BUITRÓN M.		
	JENIFER SOFÍA PEJENDINO O.		
Otros participantes			

2 RESUMEN EJECUTIVO:

La mayoría de los procesos de cogeneración de energía en la industria se llevan a cabo utilizando turbogeneradores. Estas máquinas se caracterizan por tener un rotor macizo, con dimensiones

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

geométricas relativas, de gran longitud axial respecto al diámetro; por lo tanto, poseen bajo momento de inercia.

En las plantas de cogeneración la carga se halla muy cerca al alternador, y la conexión es directa o a través de un transformador al barraje de alimentación, y por lo regular, este tipo de plantas tiene cargas desequilibradas en magnitud, generalmente con alto contenido armónico, las cuales crean torques parásitos y calentamiento adicional en las máquinas rotativas.

Con el tiempo, el calentamiento continuo conlleva varios efectos como la creación de fuerzas de fricción entre las partes en contacto por efecto de dilataciones y a la variación de las propiedades fisicoquímicas del aislamiento, reduciendo el nivel de rigidez dieléctrica y desarrollando descargas parciales. Los torques parásitos debidos a los armónicos, producen vibraciones mecánicas de las partes y en general la maquina tendrá baja eficiencia, que junto al calentamiento reducen la vida útil de la planta.

Los devanados del estator normalmente están conectados en “Y” y el punto neutro de la conexión se conectan eléctricamente a tierra a través de una de las siguientes opciones: 1) circuito de baja resistencia, 2) circuito de alta resistencia, 3) circuito de baja inductancia, 4) circuito resonante, 5) circuito hibrido y por último se tendrán los casos de neutro flotante sin conexión a tierra. En este estudio se analizan las primeras cuatro opciones de conexión y como se evalúa la opción 5 hibrida como consecuencia de las anteriores.

Las conexiones del neutro a tierra de los generadores tienen aplicación cuando la maquina atiende cargas eléctricas desequilibradas en sus fases a frecuencia nominal, que elevan el potencial eléctrico del neutro de la máquina respecto al potencial de tierra. Esta situación empeora en los casos de tener armónicos circulando por las fases.

El objetivo general propuesto de este proyecto fue:

“Minimizar los efectos creados por cargas desequilibradas con y sin contenido armónico en los turbogeneradores de plantas de cogeneración mediante la variación del sistema de puesta a tierra del neutro del devanado del estator”.

Para llevar a cabo la investigación se propuso implementación de pruebas en el turbogenerador de 28KVA del laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela de ingeniería eléctrica de la cual se dispone de todos los parámetros: eléctricos, mecánicos y geométricos.

La metodología empleada para cumplir con el objetivo considero la realización de pruebas en el laboratorio implementando cada caso propuesto y paralelamente realizar el modelado en elementos finitos MEF. De forma detallada se realizaron las siguientes actividades:

1. recopilación bibliográfica, 2) Creación del modelo de un turbogenerador del laboratorio basado en el método de elementos finitos MEF, 3) Realización en el laboratorio de las pruebas de carga. Determinando como línea base la operación con carga equilibrada. Luego fueron realizadas las pruebas considerando 2 grados de desequilibrio con contenido armónico para cada una de las 4 opciones de conexión a tierra, 4) Se implementaron los mismos modelos realizados en el laboratorio de cada una de las pruebas en modelos MEF de la máquina en estudio, 5) Conclusiones.

Los principales resultados y conclusiones fueron:

Se evidenció que la componente de secuencia negativa crece con la magnitud de desequilibrio, sin importar el tipo de puesta a tierra implementado, incrementando el nivel de vibraciones mecánicas.

Se verificó que los sistemas de puesta a tierra de Baja Resistencia y Baja Inductancia son más permisibles a la circulación de la corriente de secuencia cero, hecho que se refleja en un mayor incremento de la temperatura del estator y neutro de la máquina.

Se identificó que el rotor es la parte del turbogenerador que presenta mayor elevación de temperatura, consecuencia de las corrientes parásitas que aparecen como resultado del potencial inducido sobre el núcleo y el devanado amortiguador, a causa de las componentes de secuencia negativa.

Se halló que el devanado amortiguador facilita la circulación de corrientes parásitas sobre su superficie, y, por ende, es quien más aporta al calentamiento y torque de la máquina y adicionalmente sufre los mayores esfuerzos debido a la expansión del material.

Se determinó que la puesta a tierra Resonante y alta resistencia reportan el mejor desempeño al limitar el 3er armónico de corriente en el neutro, presenta las pérdidas más bajas y por ende la menor elevación de temperatura de la máquina.

3 SÍNTESIS DEL PROYECTO:

3.1 TEMA

En Colombia existe un creciente número de plantas industriales que suplen parte o toda la energía eléctrica demandada en sus procesos industriales a través del proceso de cogeneración. El alternador utilizado para convertir la energía mecánica en eléctrica son los turbogeneradores.

Los turbogeneradores poseen un momento de inercia menor que otro tipo de alternadores, que, sumado a las altas velocidades de trabajo, hace necesario que el rotor sea completamente sólido, lo que trae como consecuencia que cualquier desequilibrio de densidad de flujo, sumado a una pequeña variación de reluctancia, induzca potenciales y corrientes circulantes en el rotor. Por lo tanto, poseen baja tolerancia a los disturbios eléctricos; es decir, son más inestables que otros tipos de alternadores, lo que los hace susceptibles a fatiga o daño mecánico y/o eléctrico. La salida de una unidad origina severas repercusiones en el sistema eléctrico y grandes pérdidas de producción, y la reparación de esta puede tomar meses para entrar en operación. [1], [2]

En plantas de cogeneración se conecta el alternador directamente o a través de un transformador al barraje principal y de este a la red y/o la carga eléctrica de la planta. Esta condición incrementa la posibilidad de deterioro del turbogenerador debido a que cualquier tipo de falla, desequilibrio de carga, etc., que ocurra dentro de la planta o la red, afectará directamente el turbogenerador.

En la actualidad, se encuentran elevadas corrientes en la conexión del neutro del devanado del estator a tierra y, adicionalmente, posee un alto contenido armónico. Los sistemas de protección y control tienen en cuenta las componentes fundamentales de tensión y corriente, de secuencia positiva, negativa, cero y algunas el tercer armónico de corriente, desconociendo la circulación de los armónicos superiores de corriente y tensión [3].

Las corrientes por el neutro del generador pueden ser originadas por: 1) causas externas: desequilibrio de carga y el incremento acelerado de cargas no lineales; y error en la especificación y/o instalación de la puesta a tierra del neutro del generador. 2) causas internas: características constructivas de la máquina (excentricidad, entrehierros etc.), fallas inherentes al generador (corto en los devanados entre espiras, a tierra, etc.)

Esto trae como consecuencia la aparición de corrientes del orden del fundamental de secuencia positiva, negativa, cero y armónicos de corriente que producen efectos no deseados tal como [4]:

- ✓ Corrientes circulantes entre el neutro del generador a otras máquinas que compartan la misma tierra, ocasionando peligrosos potenciales de paso.
- ✓ Calentamiento de la conexión de puesta a tierra del neutro de los generadores.
- ✓ Calentamiento en el devanado del estator de la máquina debido a la pérdida adicional de energía causada por las componentes de secuencia cero y negativa.
- ✓ El calentamiento adicional debido a la circulación de corriente capacitiva a través del devanado contribuye a la reducción de las propiedades fisicoquímicas del aislamiento, reduciendo el nivel de rigidez dieléctrica y aumento de descargas parciales.
- ✓ Debido a la componente de secuencia negativa, aparecen momentos de frenado, vibraciones y emisión de ruido acústico.
- ✓ Pérdidas adicionales en los núcleos de hierro y cobre del devanado de amortiguador.
- ✓ Altos potenciales eléctricos y corrientes entre el eje y tierra, deteriorando las características metalúrgicas del rotor y los puntos de contacto de los cojinetes.
- ✓ Problemas de funcionamiento en dispositivos eléctricos de regulación, tanto de potencia, como de control.
- ✓ Mal funcionamiento en dispositivos eléctricos de protección y medición.

Todo esto conlleva al incremento de riesgos operativos y disminución de la vida útil del generador y/o la capacidad de generación de energía, reduciendo la confiabilidad del sistema eléctrico.

Las formas de reducir los efectos por parte de los operarios son: no actuar ante esta perjudicial forma de trabajo, desconectar el neutro del generador o incrementar el valor de la impedancia de puesta a tierra para limitar la corriente. Esto trae como consecuencia la pérdida de la referencia del generador, estableciendo diferencias de potencial entre el generador y tierra, que no son deseables.

3.2 OBJETIVOS: GENERAL Y ESPECÍFICOS

3.2.1 Objetivo General

Minimizar los efectos creados por las cargas desequilibradas con y sin contenido armónico en los turbogeneradores de plantas de cogeneración mediante la variación del sistema de puesta a tierra del neutro del devanado del estator.

3.2.2 Objetivos Particulares

- Crear un modelo en el MEF, electromagnético y térmico, con el cual se valide el comportamiento en estado estable de un turbogenerador.
- Establecer mediante pruebas de laboratorio y el MEF la influencia de carga desequilibrada con y sin contenido armónico en el calentamiento de un turbogenerador bajo condiciones dentro y fuera de lo establecido por la norma ANSI IEEE Std C50-13.
- Determinar mediante pruebas de laboratorio y el MEF la influencia de carga desequilibrada con y sin contenido armónico en las vibraciones de un turbogenerador bajo condiciones dentro y fuera de lo establecido por la norma ANSI IEEE Std C50-13.
- Proponer una metodología que permita minimizar las consecuencias térmicas y de vibraciones de la puesta a tierra del neutro del devanado del estator ante la presencia de carga desequilibrada con y sin contenido armónico.
- Aplicar las metodologías propuestas en los turbogeneradores de dos empresas cogeneradoras del sector colombiano

3.3 METODOLOGÍA

- 3.3.1 Recopilación de información (normas, artículos, etc.) de procedimientos de cálculo para seleccionar y caracterizar la puesta a tierra de un generador. Se realizó una descripción de métodos de puesta a tierra y aplicación de acuerdo con la configuración del sistema. Revisión bibliográfica de los efectos: electromagnéticos, térmicos y de vibraciones que tienen los desequilibrios de carga y los armónicos de corriente en los turbogeneradores.
- 3.3.2 Cálculo, diseño e implementación de los 4 tipos de puesta a tierra de acuerdo a la norma
- 3.3.3 Puesta a punto del laboratorio de máquinas de la Universidad del Valle.
- 3.3.4 Realización de pruebas de laboratorio con carga equilibrada sin contenido armónico en condiciones de placa de un turbogenerador con puesta a tierra de baja Resistencia.
- 3.3.5 Recopilación de información de materiales y geometría del turbogenerador, se construye el modelo MEF térmico y electromagnético. Tomando como condiciones de frontera los valores obtenidos en 3.3.4 mediante termocuplas, termografías, corrientes, tensiones, Etc. Los datos de prueba también permiten validar los modelos.
- 3.3.6 En el Laboratorio. A partir de carga equilibrada, se desequilibra la carga gradualmente de manera tal que se obtengan valores de I_2 y TIF dentro y fuera de los valores establecidos por norma.
- 3.3.7 Se cambia de tipo de puesta a tierra y nuevamente a partir de carga equilibrada, se desequilibra la carga gradualmente de manera tal que se obtengan valores de I_2 y TIF dentro y fuera de los valores establecidos por norma
- 3.3.8 Se repiten los ítems 3.3.6 y 3.3.7 pero para los modelos MEF
- 3.3.9 Se analizan los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio y los modelos MEF, trazando las curvas de tendencia de corrientes, potenciales, temperaturas y vibraciones correlacionándolos con cada tipo de puesta a tierra.
- 3.3.10 Se propone una metodología con la cual se minimice los efectos térmicos y de vibraciones ante la presencia de cargas desequilibradas y armónicas de corriente.
- 3.3.11 Todo el proceso y los resultados de la investigación serán consignados en un informe escrito que se entrega al finalizar el proyecto.

Durante las pruebas se monitorea: 1) corrientes, tensiones y potencias real, aparente y compleja en los devanados, y a tierra a través de la puesta a tierra del neutro y el eje; 2) incremento de temperatura mediante mediciones en las termocuplas, laser y termografías; y 3) medición de vibraciones axiales, radial- vertical y radial horizontal.

La adecuación y puesta en marcha del laboratorio requirió de 8 meses. La realización de las pruebas fue un total de 6 meses, debido al mal tiempo y fallas inherentes al laboratorio. Cada simulación duró un tiempo de 13 días en una estación de procesador Xeon E3 y 64 Gb de Ram.

3.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Las medidas eléctricas se realizaron con un equipo “Dranetz PowerVisa 440”. Los resultados se muestran en gráficos de barras diferenciando por color las puestas a tierra. El eje “x” muestra: las fases, componentes de secuencia u orden del armónico, y en el eje “y” la magnitud;

Los resultados corresponden con datos tomados en “Sitio” con un desequilibrio de: 1%, 7% y 20%, y simulaciones “MEF” mediante el software “Comsol Multiphysics 5.2” con un desequilibrio de: 0%, 9% y 18% con el generador aislado. Dependiendo del tipo de análisis algunos ítems muestran ambas y en otras solo una, mostrando primero en Sitio.

La carga se desequilibra gradualmente y de forma simétrica. De tal forma que se mantenga invariable la componente de corriente de secuencia positiva.

3.4.1 Corrientes y Tensiones por cada fase, y puesta a tierra en Sitio y MEF.

En las Figuras 1, 2, 3 y 4 se presenta la magnitud de las corrientes y tensiones por las fases y neutro del turbogenerador. De estos resultados se puede observar que:

El desequilibrio de corrientes entre fases es mayor en la puesta a tierra de Baja Resistencia, seguido por baja inductancia y en menor grado la resonante y alta resistencia. El promedio de la corriente por las fases aumenta con respecto a carga equilibrada para todas las puestas a tierra, siendo de mayor incremento baja resistencia y el menor alta resistencia.

A mayor grado de desequilibrio mayor es la componente fundamental de corriente por el neutro del generador, siendo la puesta a tierra de baja resistencia la más permisible.

Figura 1 Corrientes en las fases en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

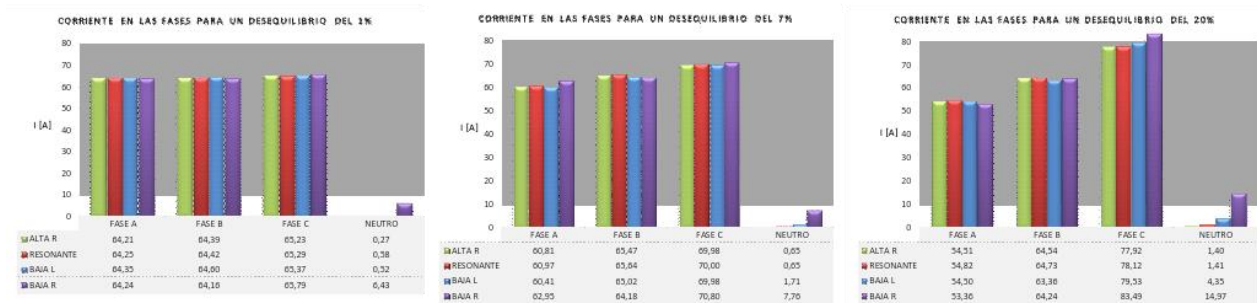


Figura 2 Corrientes en las fases MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



Figura 3 Tensión por fase en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

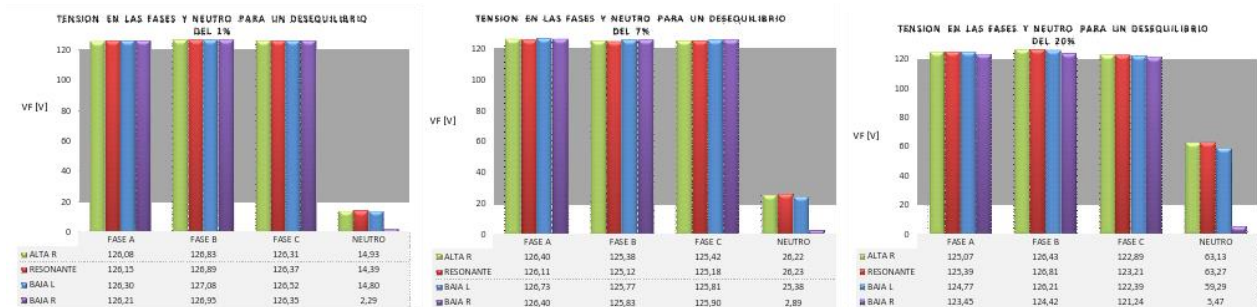
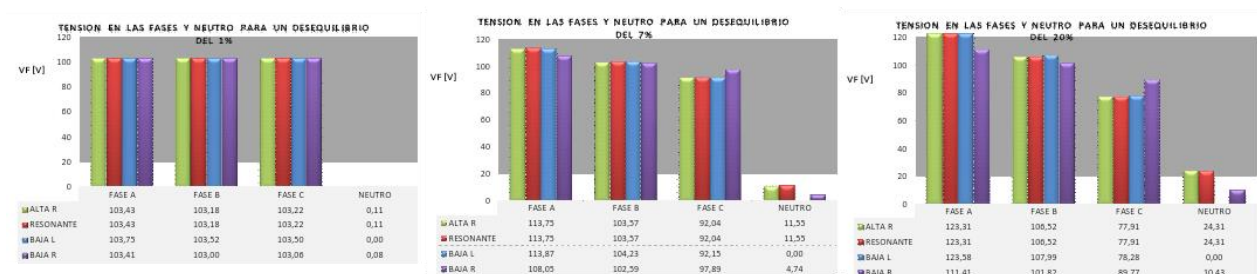


Figura 4 Tensión por fase fases MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



El desequilibrio de tensiones entre fases es menor en la puesta a tierra de baja resistencia y mayor en alta resistencia. A menor desequilibrio menor potencial entre neutro y tierra.

El valor promedio del potencial por fases disminuye con respecto a carga equilibrada para todas las puestas a tierra, siendo menor en el de baja inductancia, seguido por el baja resistencia y mayor grado los de alta resistencia y resonante.

3.4.2 Corrientes y Tensiones de secuencia Sitio y MEF.

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se presentan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero en corriente y tensión para tres desequilibrios de corriente; de las que se resalta lo siguiente:

Las corrientes y tenciones de secuencia positiva se mantienen casi constantes con el desequilibrio, presentando la mayor variación el sistema de puesta a tierra de baja resistencia. Las corrientes de secuencia negativa y cero crecen con el desequilibrio, pero es más notable el crecimiento en el sistema de puesta a tierra de baja resistencia. Mientras que en los sistemas de puesta a tierra de alta resistencia y resonante presentan el menor crecimiento.

Figura 5 Corrientes de secuencia en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

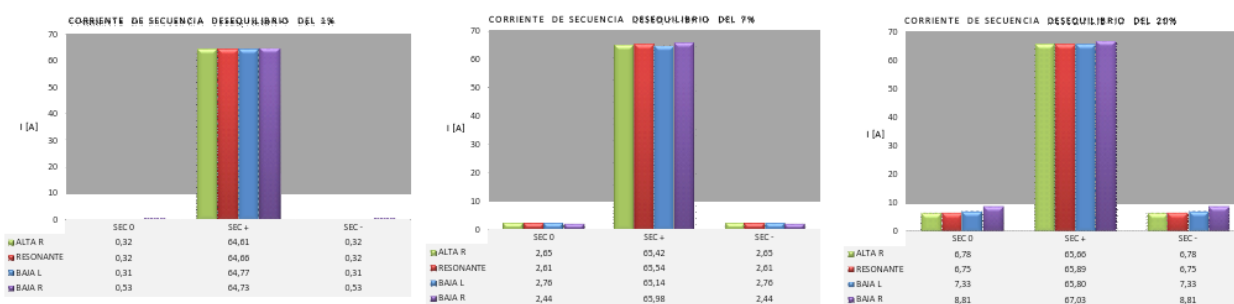
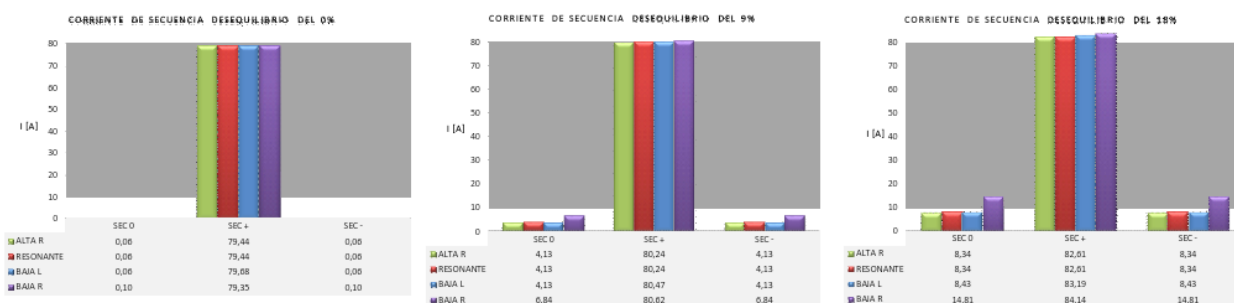


Figura 6 Corrientes de secuencia MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



En general los potenciales de secuencia negativa y cero crecen con el desequilibrio, siendo menor en el sistema de puesta a tierra de baja resistencia.

Figura 7 Tensión de secuencia en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

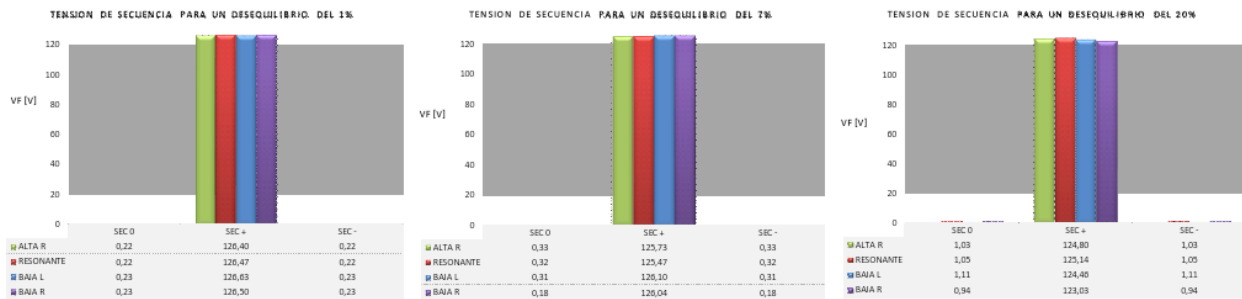
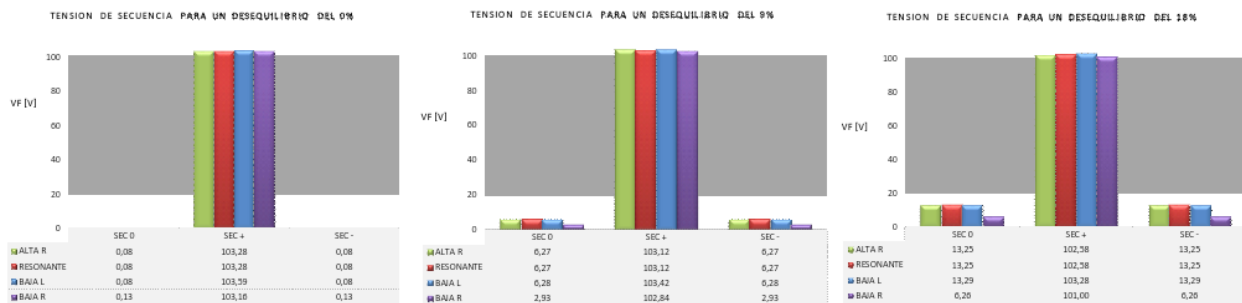


Figura 8 Tensión de secuencia MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



3.4.3 Armónicos de corriente por fase y neutro en Sitio y MEF.

Se halló que la magnitud de cada armónico por fase varía con el desequilibrio, pero esta variación representa menos del 0.2 A, que es poco comparado con la variación del fundamental (más de 12 A). Salvo el 3 armónico de la puesta a tierra con baja resistencia donde se observó en el desequilibrio del 20% una variación de 3,5 A entre fases. Por lo tanto, se presenta la magnitud promedio de cada armónico de corriente por las fases (excluyendo el fundamental). El Valor "Tot" corresponde al valor Rms de todos los armónicos excepto el fundamental.

De las Figuras 9 y 10 se observa que la puesta a tierra de baja resistencia presenta el mayor contenido armónico en las fases, sobresaliendo el 3 armónico, como consecuencia, en iguales condiciones el contenido armónico [1] será mayor para este tipo de puesta a tierra. El contenido de las otras 3 puestas a tierra es menor y similar en magnitud entre ellas. La magnitud y cantidad de armónicos dependen poco del desequilibrio. En el laboratorio la magnitud total de armónicos se redujo con el desequilibrio, mientras en la simulación es casi constante.

Figura 9 Promedio Armónicos de corriente por las fases en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

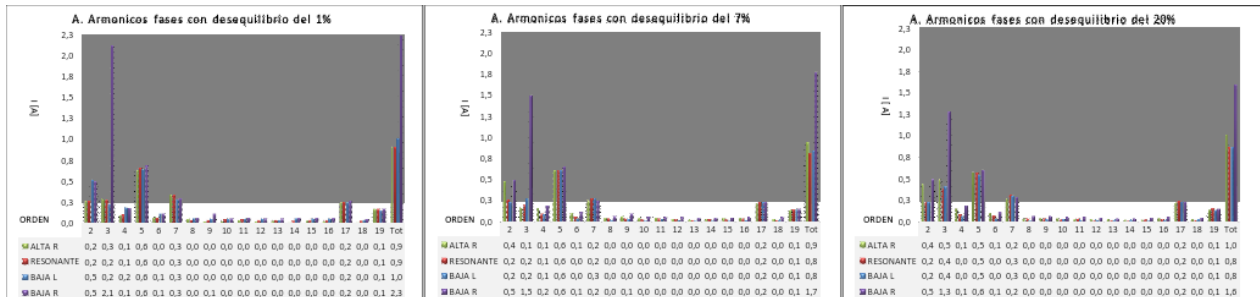


Figura 10 Promedio Armónicos de corriente por las fases MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%

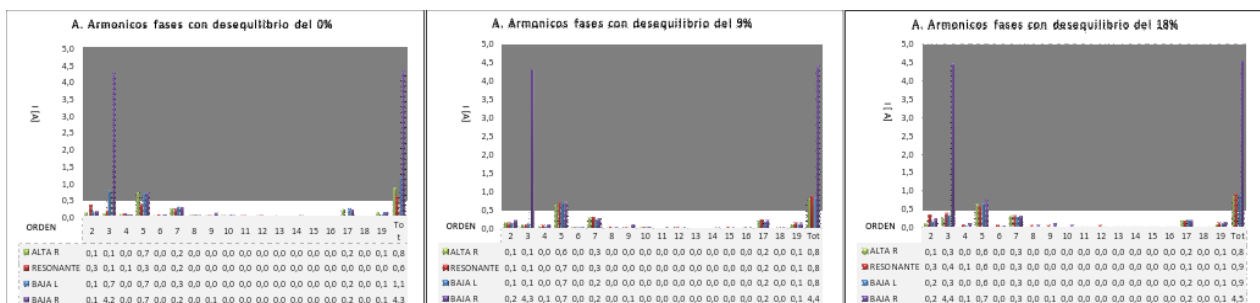


Figura 11 Armónicos de corriente por el neutro en Sitio para un desequilibrio del 1, 7 y 20%

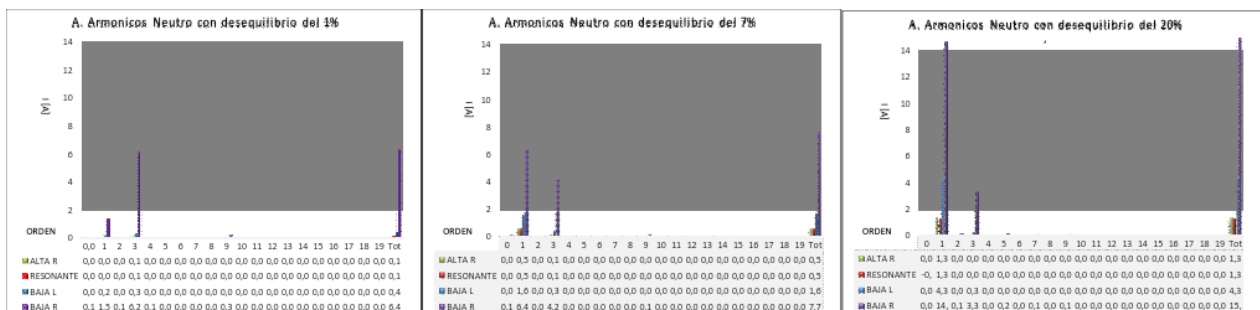
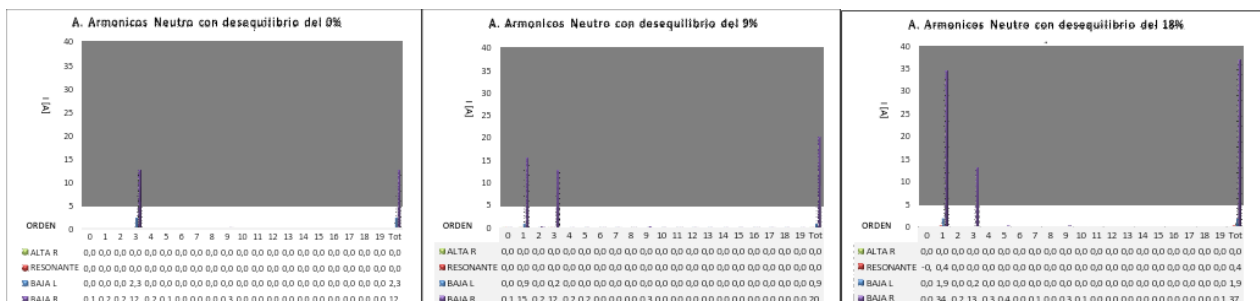


Figura 12 Armónicos de corriente por el neutro MEF para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



Las Figuras 11 y 12 muestran los armónicos de corriente por el neutro, donde la puesta a tierra de baja resistencia presenta mayor contenido armónico, seguido por baja inductancia, en las otras

el contenido armónico es muy bajo. El 1 armónico presenta el mayor incremento con el desequilibrio. Los armónicos 3 y 9, en la puesta a tierra de baja resistencia, disminuyen con el desequilibrio en las pruebas de laboratorio y son casi constantes en las simulaciones.

3.4.4 Armónicos de Fuerza Magneto Motriz (F.m.m)

Como se observó de 3.4.1 y 3.4.3 los armónicos de corriente de orden 1 y 3 presentan la mayor magnitud por fase, siendo el 1 el que más varía con el desequilibrio. Teniendo en cuenta esto, mediante el método algorítmico de diseño y análisis de máquinas de alterna desarrollado por [2] se calcularon los armónicos de F.m.m. creados por el armónico fundamental de corriente. El ejercicio se realizó para el estado equilibrado (color negro) y el mayor desequilibrio obtenido en las simulaciones MEF. En la figura 13 se presentan los resultados de análisis. El eje x corresponde al orden del armónico de F.m.m o número de pares de polos que forma el armónico. El color continuo, representa el valor mínimo del armónico o campo uniforme y giratorio, y la parte con trama representa la variación del armónico o campo pulsante.

En la figura 13 se observa como el desequilibrio reduce la magnitud del armónico fundamental de F.m.m. Además, se crean armónicos pulsantes de F.m.m. (parte con trama), en estos destacan los armónicos pulsantes de F.m.m. que forman 1, 2, 3, 4 y 5 pares de polos. Asimismo, aparecen los armónicos de diente 46 y 50. Siendo la puesta a tierra de baja resistencia la que presenta mayor reducción del campo giratorio y la mayor pulsación de campo en el armónico fundamental.

Figura 13 Armónicos de F.M.M. para un desequilibrio del 0 y 18 %



Para los demás armónicos de corriente solo se tiene en cuenta el armónico fundamental de F.m.m., ya que la magnitud de estos armónicos de F.m.m. es insignificante. Como se mencionó el desequilibrio también desequilibra los armónicos de corriente por fase, por lo tanto, al igual que el fundamental de corriente, crearán un campo pulsante y un campo giratorio, a excepción de los armónicos de orden mk (m : número de fases, k entero) en los cuales el campo se anula.

Dicho lo anterior, cada armónico de corriente creará un campo giratorio de 2 pares de polos y una frecuencia que será de $f_i = i * 60$, donde i es el orden del armónico. La velocidad de este campo será: $n_i = f_i/p$.

3.4.5 Armónicos de fuerza electromotriz (f.e.m.) inducidos y corriente en las barras del rotor MEF.

Una vez identificados los armónicos de corriente que se presentan en el turbogenerador bajo las condiciones de carga equilibrada y desequilibrada, se procedió calcular la frecuencia de la f.e.m. inducida en el rotor por cada armónico de F.m.m. creados por los armónicos de corriente.

La Tabla 1 presenta el cálculo de la frecuencia de f.e.m. inducida en las barras amortiguadoras por el armónico fundamental de F.m.m. creado por los armónicos de corriente del devanado del estator. Los colores representan la magnitud del armónico de corriente o F.m.m., a mayor magnitud del armónico, más oscuro es el color y viceversa. En negrilla se resaltan las frecuencias más significativas. Donde: i : orden armónico de corriente, p : pares polos, f : frecuencia armónico, ne : velocidad campo creado por armónico de corriente visto desde el estator, nr : velocidad del rotor, $nrr +$ y $nrr -$: velocidad campo de secuencia positiva y negativa creado por el armónico de corriente visto desde el rotor, $frr +$ y $frr -$: frecuencia inducida en las barras amortiguadoras.

Tabla 1 Armónico fundamental de F.m.m. creado por armónicos de corriente del devanado estator

i	p	f	ne	nr	$nrr +$	$nrr -$	$frr +$	$frr -$
2	2	120	60	30	30	90	60	180
3	2	180	90	30	60	120	120	240
4	2	240	120	30	90	150	180	300
5	2	300	150	30	120	180	240	360
6	2	360	180	30	150	210	300	420
7	2	420	210	30	180	240	360	480
8	2	480	240	30	210	270	420	540
9	2	540	270	30	240	300	480	600
10	2	600	300	30	270	330	540	660
11	2	660	330	30	300	360	600	720
12	2	720	360	30	330	390	660	780
13	2	780	390	30	360	420	720	840
14	2	840	420	30	390	450	780	900
15	2	900	450	30	420	480	840	960
16	2	960	480	30	450	510	900	1020
17	2	1020	510	30	480	540	960	1080
18	2	1080	540	30	510	570	1020	1140
19	2	1140	570	30	540	600	1080	1200

La Tabla 2 muestra el cálculo de la frecuencia de f.e.m. inducida en las barras amortiguadoras por los armónicos de F.m.m. creados por el armónico fundamental de corriente del devanado del estator.

Tabla 2 Armónico de F.m.m. creado por armónico fundamental de corriente del devanado estator

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

p	f	ne	nrr	nrr+	nrr-	frr+	frr-
1	60	60,0	30,0	-30,0	90,0	-30	90
2	60	30,0	30,0	0,0	60,0	0	120
3	60	20,0	30,0	10,0	50,0	30	150
4	60	15,0	30,0	15,0	45,0	60	180
5	60	12,0	30,0	18,0	42,0	90	210
6	60	10,0	30,0	20,0	40,0	120	240
7	60	8,6	30,0	21,4	38,6	150	270
8	60	7,5	30,0	22,5	37,5	180	300
9	60	6,7	30,0	23,3	36,7	210	330
10	60	6,0	30,0	24,0	36,0	240	360
11	60	5,5	30,0	24,5	35,5	270	390
12	60	5,0	30,0	25,0	35,0	300	420
13	60	4,6	30,0	25,4	34,6	330	450
14	60	4,3	30,0	25,7	34,3	360	480
15	60	4,0	30,0	26,0	34,0	390	510
16	60	3,8	30,0	26,3	33,8	420	540
46	60	1,3	30,0	28,7	31,3	1320	1440
50	60	1,2	30,0	28,8	31,2	1440	1560

Las Figuras 14 y 15 muestran los armónicos de f.e.m. y corriente en las barras amortiguadoras obtenidas mediante MEF.

Figura 14 Armónicos de F.e.m. en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 0, 9 y 18%

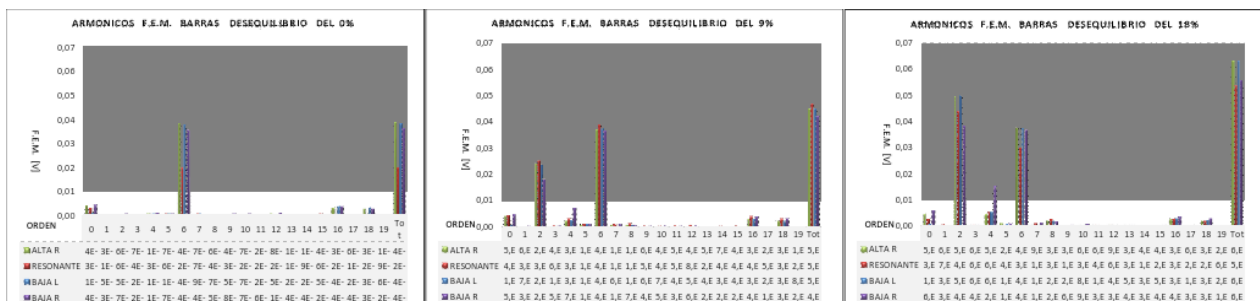
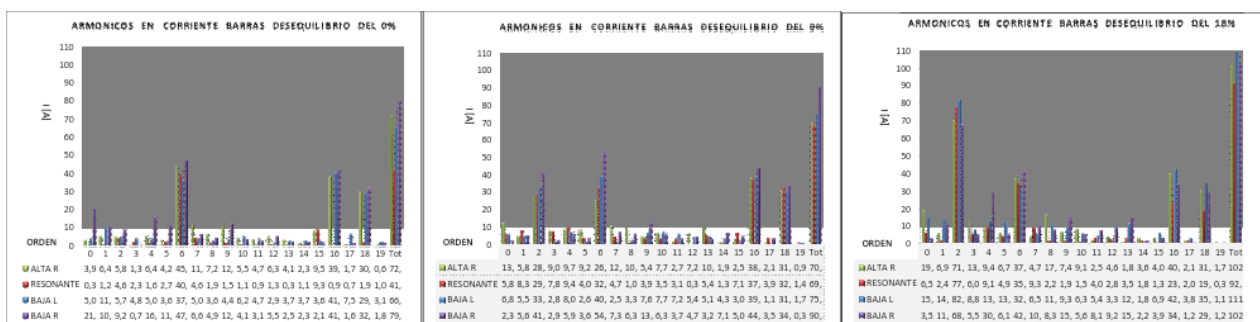


Figura 15 Armónicos de Corriente en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



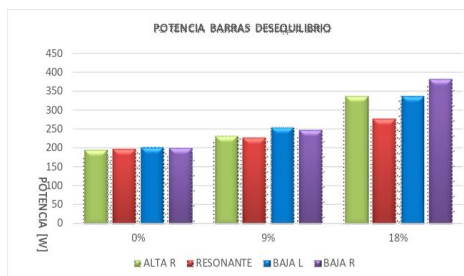
En las Figuras 14 y 15 se observa como el armónico de f.e.m. y corriente que más crece es el de orden 2, el cual es inducido por el armónico fundamental de F.m.m creada por los armónicos de corriente 1 y 3. Los armónicos de f.e.m. y corriente de orden 6 (inducido por el armónico fundamental de F.m.m. de los armónicos de corriente 5, 7), 16 y 18 (inducidos por el armónico fundamental de F.m.m. de los armónicos de corriente 17 y 19) son casi invariables con el

desequilibrio. Esto es debido a que la magnitud de los armónicos de corriente que los crean son casi constantes con el desequilibrio. En general, la puesta a tierra resonante es la que presenta el menor contenido armónico de corriente.

3.4.6 Potencia disipada en las barras amortiguadoras MEF

En la Figura 16 se muestra la potencia total disipada en las barras amortiguadoras. Se observa que la potencia disipada por las barras crece con el desequilibrio y la puesta a tierra que presenta mayor potencia disipada es la de baja resistencia, seguido por la de baja inductancia y alta resistencia, la de menor magnitud es la resonante.

Figura 16 Potencia barras amortiguadoras para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



La potencia disipada en el núcleo del rotor del rotor sigue el mismo comportamiento de la potencia disipada por las barras amortiguadoras, pero representa menos del 0.1% de la potencia de las barras amortiguadoras.

3.4.7 Torque MEF

En las figuras 17, 18, 19 y 20 se presenta el torque obtenido mediante MEF de: 1) barras amortiguadoras, 2) núcleo del rotor, 3) devanado de excitación y 4) fase que llevan la máxima corriente. Estos torques se deben a la interacción del campo creado por una corriente del rotor (o el estator) con la corriente del devanado del estator (o el rotor). Es condición necesaria que el campo y la corriente sean de igual frecuencia y que ambas creen campos que giren en el mismo sentido. Este torque además es del doble de la frecuencia de quien los crea.

Figura 17 Armónicos de Torque en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 0, 9 y 18%

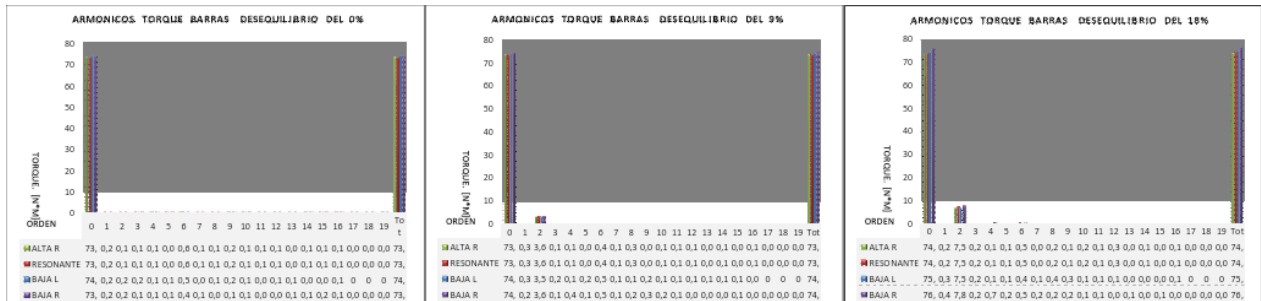


Figura 18 Armónicos de Torque en núcleo del rotor para un desequilibrio del 0, 9 y 18%

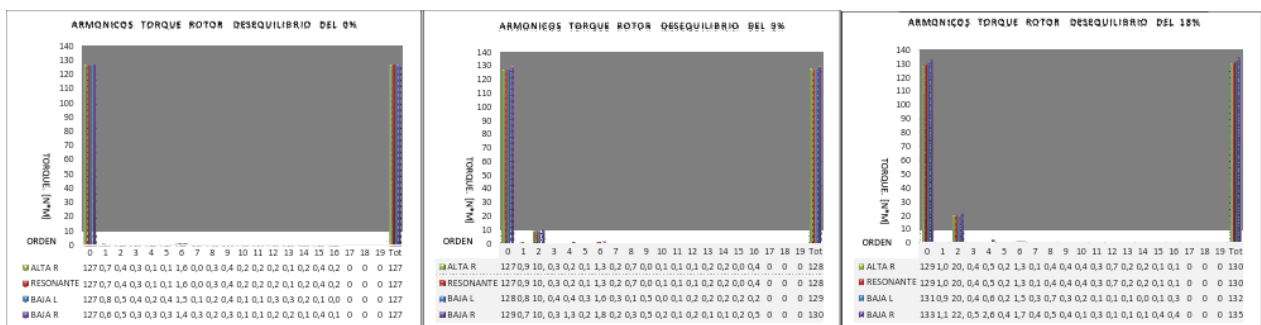


Figura 19 Armónicos de Torque en el devanado de excitación para un desequilibrio del 0, 9 y 18%

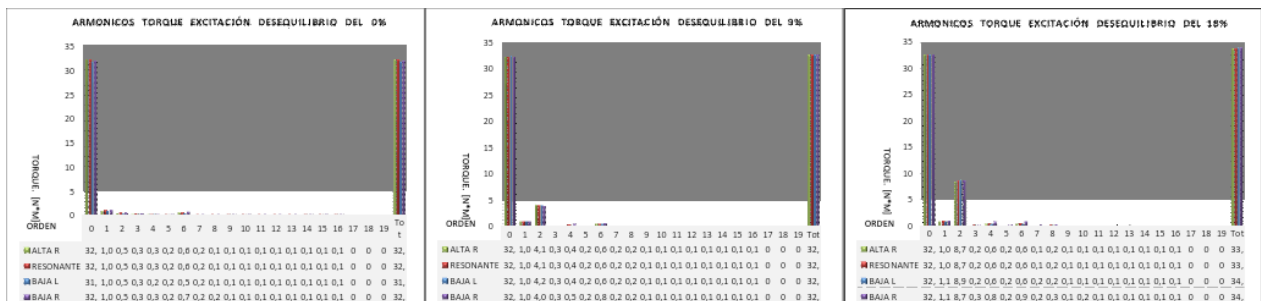
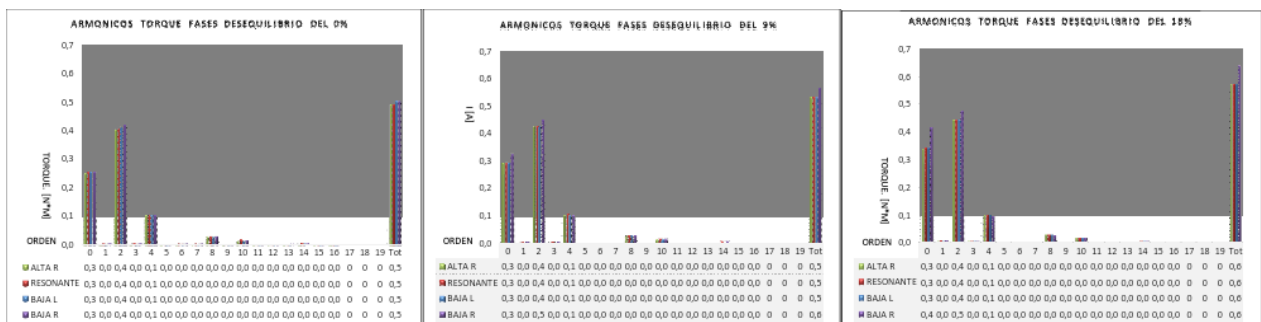


Figura 20 Armónicos de Torque por fases para un desequilibrio del 0, 9 y 18%



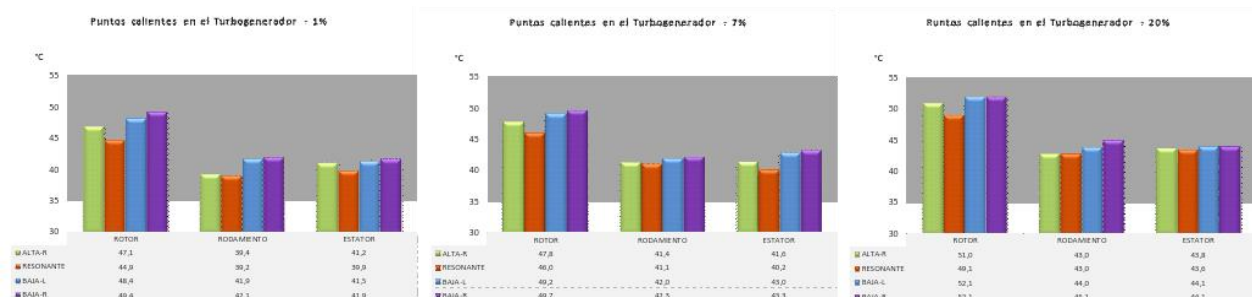
De las gráficas se observa como el torque Dc es prácticamente constante, siendo levemente mayor en la puesta a tierra de baja resistencia. Esto corresponde con la variación de la componente de secuencia positiva, ver ítem 3.4.2. El torque de orden 2 en las barras, el núcleo, la excitación y las fases crece con el desequilibrio y es debido principalmente a la interacción del campo principal con el fundamental de corriente creado por el desequilibrio. Este torque es menor en las fases.

Los armónicos de torque 4, 8 y 10 en las fases y 2, 4 y 6 en la excitación son prácticamente constantes con el desequilibrio, y son creados por armónicos de corrientes de orden 2, 4 y 5 en las fases y 1, 2 y 4 en las barras amortiguadoras, los cuales son prácticamente constantes.

3.4.8 Temperatura sitio

En la Figura 21 se presenta la temperatura medida en la parte lateral del: rotor, rodamientos y estator en las tres condiciones de desequilibrio; estos datos corresponden a las imágenes térmicas capturadas por una cámara “FLIR E60” y confirmado con una pistola infrarroja para la medición de temperatura y 12 sensores “Pt100” (detector de temperatura por resistencia) instaladas en los devanados del estator y las partes laterales del núcleo del estator.

Figura 21 Temperatura promedio en el rotor, rodamientos y núcleo del estator para u desequilibrio del 1, 7 y 20%



De aquí se observa que la temperatura en todos los puntos incrementa con el desequilibrio, y el rotor es la parte con mayor incremento de temperatura. La puesta a tierra de Baja Resistencia y Baja Inductancia presentan mayor incremento de la temperatura, contrario a la puesta Resonante quien presenta los niveles de temperatura más bajos. Esta tendencia está de acuerdo con los cálculos de la potencia disipada en las barras amortiguadoras ver 3.4.6., y contenido armónico visto en el ítem 3.4.5.

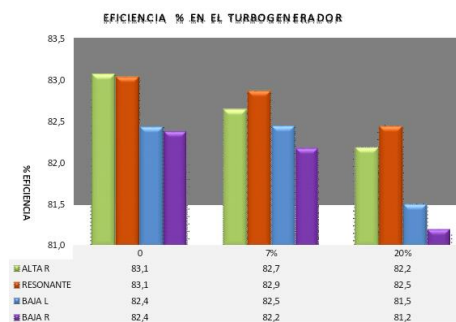
3.4.9 Eficiencia Sitio

En la Figura 22 se muestra la eficiencia para los 3 desequilibrios y las distintas puestas a tierra, calculada como la relación entre la potencia de entrada y la de salida del grupo Motor – Generador según [3].

En la Figura 22 se nota que la eficiencia disminuye con el desequilibrio, indicando un incremento en las pérdidas de la máquina. Para todos los desequilibrios, la eficiencia es menor para el sistema de puesta a tierra de Baja Resistencia y Baja Inductancia. Con la máquina equilibrada la mejor eficiencia reportada es la de alta resistencia, pero con desequilibrio es la puesta a tierra resonante.

El contenido armónico reduce la eficiencia de la máquina así este con carga equilibrada, las más propensas a esto son las puestas a tierra de baja inductancia y resistencia. Datos consecuentes con la temperatura reportada en la Figura 21.

Figura 22 Eficiencia del turbogenerador para un desequilibrio del 1, 7 y 20%



3.4.10 Vibraciones Sitio

De manera adicional se realizó la medición de vibraciones con un equipo “Fluke 810”, las mediciones son tomadas en dirección radial. Los resultados se reportan en las Figuras 23, 24 y 25. En este caso se ve fuertemente expresado el primer armónico de giro que es casi constante con el desequilibrio, esto es debido a un desequilibrio de masas detectado. Además, se ve como el armónico de 120 Hz crece con el desequilibrio, a excepción de la puesta a tierra de baja resistencia, comportamiento que puede ser debido a que el armónico inicial está 180° en desfase con respecto al creado por el desequilibrio. Esto confirma los resultados de las simulaciones del ítem 3.4.7.

Figura 23 Armónicos de Corriente en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 1%

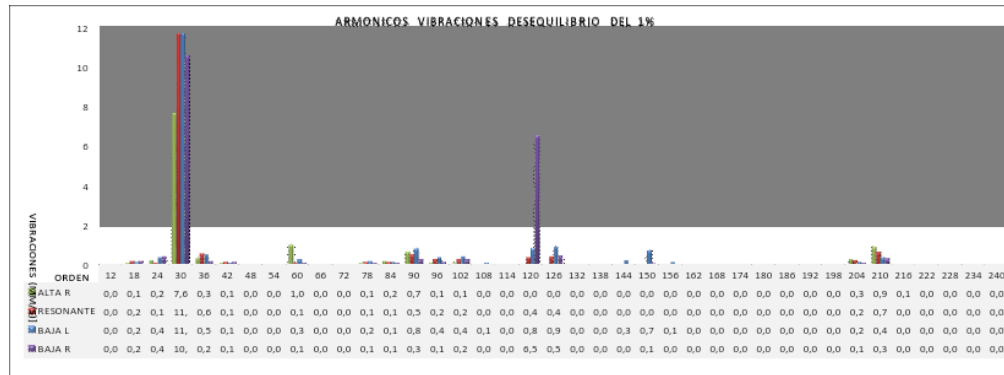


Figura 24 Armónicos de Corriente en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 9%

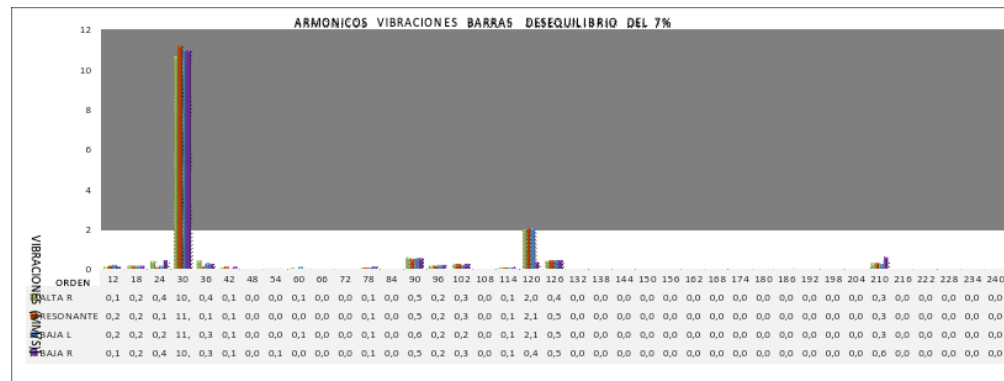
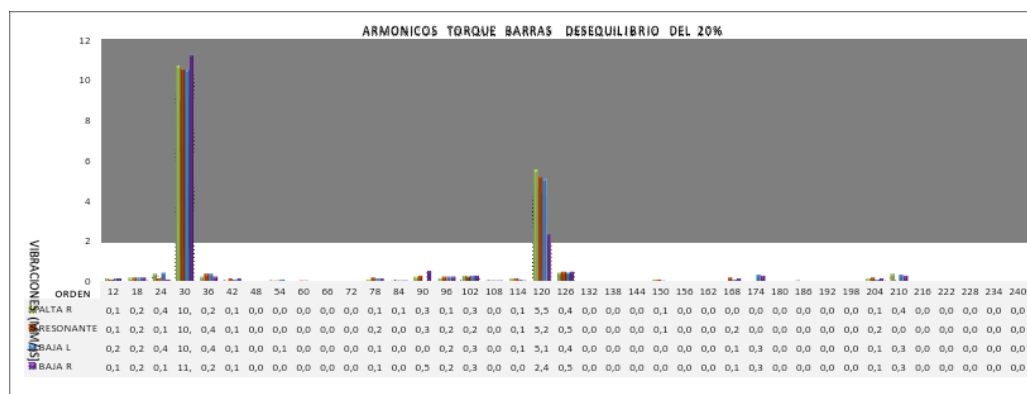


Figura 25 Armónicos de Corriente en barras amortiguadoras para un desequilibrio del 20%



Verificando el crecimiento del contenido de vibraciones con [4] y sin tener en cuenta el aporte creado por el desequilibrio de masas, se puede decir que el equilibrio de carga crea vibraciones

adicionales, que son perjudiciales para la máquina, ya que al 7% de desequilibrio se reportan valores que ya están por arriba de la norma.

3.5 PRINCIPALES CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES

Se estableció que un mayor desequilibrio de corriente entre las fases garantiza el menor desequilibrio en tensión entre fases y un menor potencial a tierra, pero esto ocasiona un potencial promedio entre fases menor y una mayor corriente a tierra.

Se evidenció que la componente de secuencia negativa y cero de tensión y corriente crecen con el desequilibrio, y la puesta a tierra de baja resistencia presenta el mayor incremento en corriente y el menor en tensión.

Se demostró que el desequilibrio de carga incrementa el primer armónico de corriente por el neutro, incrementando las pérdidas en este.

Se evidencio que el desequilibrio de carga crea un campo que pulsa con la frecuencia del primer armónico de corriente, el cual induce una f.e.m. del doble de la frecuencia en las barras amortiguadoras, incrementando la temperatura de la máquina, creando un torque de frenado y reduciendo la eficiencia.

Se determinó que el promedio de los armónicos de corriente en el devanado del estator causa un calentamiento adicional en las barras amortiguadoras, pero prácticamente no se ven influenciadas por el desequilibrio de carga.

Se comprobó mediante pruebas experimentales, que el desequilibrio en magnitud de corriente produce calentamiento adicional en la máquina, disminución de eficiencia y vibraciones adicionales.

Se verificó que el sistema de puesta a tierra de Baja Resistencia presenta el mayor desequilibrio y armónicos de corriente, hecho que se refleja en un mayor incremento de la temperatura. Pero esta puesta a tierra presenta menor: desequilibrio de tensiones por fase, reducción del potencial promedio y diferencia de potencial a tierra. Este comportamiento es similar en menor grado para la puesta a tierra de baja inductancia.

La puesta a tierra Resonante reporta el mejor desempeño al limitar los armónicos de corriente en fases, neutro y barras amortiguadoras, evidenciado en un menor calentamiento. Además, presenta la mejor eficiencia en condiciones equilibradas y desequilibradas. Pero junto a la puesta

a tierra de alta resistencia presentan un potencial promedio por fase menor que las otras puestas a tierra.

Se observó que los resultados de las pruebas en el sistema de puesta a tierra de Alta Resistencia son cercanos a los reportados por la puesta a tierra Resonante, por ende, instalar una puesta a tierra de Alta Resistencia puede brindar beneficios casi similares cuando las condiciones del sistema no permitan la implementación de una puesta a tierra Resonante.

Se identificó el rotor como la parte del turbogenerador que presenta mayor elevación de temperatura, consecuencia de las corrientes parásitas que aparecen como resultado del potencial inducido sobre él, a causa del desequilibrio.

4 IMPACTOS ACTUAL O POTENCIAL:

Con una correcta selección de la puesta a tierra, se mejorará la eficiencia de los turbogeneradores, haciendo que la temperatura global disminuya, aumentando la vida útil y e incrementando las ganancias de la empresa.

Científicamente se avanza en el conocimiento sobre la operación, funcionamiento y diagnóstico de los turbogeneradores, además, de que se crea una nueva metodología para la selección correcta de la puesta a tierra de turbogeneradores, que permitirá al sector energético un mejor planeamiento y utilización del recurso, generando ahorro económico.

Este proyecto además contribuye con una guía técnica que da las herramientas necesarias para seleccionar y calcular la puesta a tierra del neutro del devanado del estator de generadores.

Crear una línea de investigación que permita afrontar nuevos retos en el ámbito de lo turbogeneradores. Consolidar la infraestructura de investigación y desarrollo en el área de máquinas generadoras con el avance en la línea de investigación en el modelamiento de turbogeneradores y la realización de nuevos proyectos en el tema. Con la realización de este proyecto se fortalecerá la capacidad técnica y científica del grupo de investigación Convergió con respecto al modelamiento y simulación de las máquinas sincrónicas.

Los resultados del estudio podrán ser empleados por las empresas generadoras de energía eléctrica mediante turbogeneradores, para determinar qué tipo de puesta a tierra es más conveniente, dependiendo del: tipo de conexión a la red, Conexión del devanado del estator y grado de desequilibrio que deber soportar la máquina. A partir de estos resultados también se

podrá determinar un funcionamiento confiable y seguro, además de disminuir las pérdidas económicas por fallas y procesos de reclamación.

El desarrollo de este proyecto será un valioso aporte a la comunidad científica en este tema, debido a que se determina el efecto del desequilibrio de carga en turbogeneradores. Esto representará un gran avance para las máquinas eléctricas, debido a la enorme complejidad de este fenómeno.

5 PRODUCTOS:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
		1				1		
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
☐ Prototipos y patentes								
☐ Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								

Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de pregrado	1	1	1	1
Semillero de Investigación			1	1
Estudiantes de maestría	1	1	1	1
Estudiantes de doctorado				
Joven investigador				
Productos de divulgación				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1	1	1	1
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.	1		1	1

Tabla No. 2. Detalle de productos

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

Tipo de producto:	Tesis Pregrado
Nombre General:	Evaluación del impacto térmico al utilizar diferentes métodos de puesta a tierra en el neutro del estator de un turbogenerador de 28 kva ante desequilibrio en magnitud de corriente
Nombre Particular:	Tesis de Pregrado: Evaluación del impacto térmico al utilizar diferentes métodos de puesta a tierra en el neutro del estator de un turbogenerador de 28 kva ante desequilibrio en magnitud de corriente
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Universidad del Valle, 7 de agosto de 2017.
Participantes:	Cindy Johana Buitrón M., Harold José Díaz M., Jairo A. Palacios P.
Sitio de información:	Biblioteca Central Universidad del Valle.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía "Convergía".

Tipo de producto:	Tesis Maestría
Nombre General:	Análisis de las vibraciones mecánicas de un turbogenerador producidas por el desequilibrio de corriente i2.
Nombre Particular:	Tesis Maestría: Análisis de las vibraciones mecánicas de un turbogenerador producidas por el desequilibrio de corriente i2.
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Universidad del Valle, 7 de febrero de 2019.
Participantes:	Jenifer Sofia Pejendino. Harold José Díaz M., Jairo A. Palacios P.
Sitio de información:	Biblioteca Central Universidad del Valle.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía "Convergía".

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Minimización de los efectos causados por desequilibrio de carga y armónicos, mediante la variación de la puesta a tierra del neutro. Presentado a la Revista Dyna, En Evaluación.
Nombre Particular:	Artículo Minimización de los efectos causados por desequilibrio de carga y armónicos, mediante la variación de la puesta a tierra del neutro.
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Universidad del Valle, 31 de octubre de 2019.
Participantes:	Harold José Díaz M., Jairo A. Palacios P.
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía "Convergía".

Tipo de producto:	Presentación
Nombre General:	Simposio de investigaciones Universidad del Valle 2018.
Nombre Particular:	Evaluación del impacto térmico al utilizar diferentes métodos de puesta a tierra en el neutro del estator de un turbogenerador de 28 kva ante desequilibrio en magnitud de corriente.
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Universidad del Valle, 2 de Mayo de 2018.
Participantes:	Cindy Johana Buitrón M., Harold José Díaz M.
Sitio de información:	Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía "Convergía".

Tipo de producto:	Presentación de Proyecto
Nombre General:	Evaluación mediante simulación por métodos finitos del impacto térmico y eléctrico al utilizar diferentes métodos de puesta a tierra en un turbogenerador de 28 kVA ante desequilibrio en magnitud de corriente



Nombre Particular:	Presentación de Proyecto: Evaluación mediante simulación por métodos finitos del impacto térmico y eléctrico al utilizar diferentes métodos de puesta a tierra en un turbogenerador de 28 kVA ante desequilibrio en magnitud de corriente
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Universidad del Valle, 2017.
Participantes:	Harold José Díaz M., Jairo A. Palacios P.
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía "Convergía".

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones



Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2