



Departamento de posgrados

Maestría en Gestión de Mantenimiento

“Evaluación de parámetros síntoma en el sistema de escobillas de un generador síncrono”

Tesis previa a la obtención del título de:

Magister en Gestión de Mantenimiento

Autor:

Joffre Alexis Chalco Cando

Director:

Iván Coronel

Cuenca, Ecuador 2015

1. DEDICATORIA

A Jehová por darme la vida e inteligencia para cumplir mis metas propuestas. A mis queridos padres Hernán y María, a mí amada esposa que han estado a mi lado para apoyarme incondicionalmente. A todos ustedes, aquí solo me es posible ofrecer un reconocimiento insuficiente de mi aprecio.

“Pregúntate si lo que estás haciendo hoy, te acerca al lugar en el que quieres estar mañana” Walt Disney

2. AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, de manera especial al Ing. Iván Coronel director de tesis y los ingenieros Gil Alvarez y Eduardo Sempertegui miembros del tribunal y docentes de la Universidad del Azuay por su apoyo.

3. RESUMEN

El trabajo se ha dividido en 4 grupos principales: Materiales y métodos, Resultados, Discusión y conclusión. Dentro de estos 4 grupos principales se adaptó la estructura del mantenimiento basada en la condición OSA CBM, a lo largo del trabajo se siguió este lineamiento. El capítulo 2 describe el funcionamiento del generador y presenta es estudio estadístico de los datos históricos recolectados. El capítulo 3 analiza los resultados del capítulo 2 y propone un método para predecir la tendencia de desgaste y comportamiento del sistema. El capítulo 4 describe las metodologías existentes para la gestión de mantenimiento y adapta los resultados de los capítulos precedentes para proponer un modelo de gestión de mantenimiento con todos los parámetros a monitorear y que permitirán maximizar la disponibilidad de las unidades de generación.

4. PALABRAS CLAVE

Mantenimiento, Gestión, Condición, Generador, Mantenimiento basado en la condición (MBC).

ABSTRACT

The work has been divided into 4 main groups: Materials and Methods, Results, Discussion and Conclusion. Within these 4 main groups, the maintenance structure based on the OSA CBM condition was adapted. This guideline was followed throughout the work. Chapter 2 describes the operation of the generator, and presents the statistical study of collected historical data. Chapter 3 analyzes the results of Chapter 2, and proposes a method for predicting the wear behavior tendency system. Chapter 4 describes the existing methodologies for managing maintenance, and adapts the results of the preceding chapters to propose a maintenance management model with all the parameters that will be monitored; which will allow to maximize the availability of generation units.


UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas


Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
DPTO. IDIOMAS

6. ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	CAPITULO 1: MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
2.1.	Generador Síncrono.....	7
2.2.	Escobillas y anillos colectores.....	8
2.2.1.	Características de las escobillas	9
2.2.2.	Funcionamiento y consideraciones	10
2.3.	Mantenimiento basado en la condición.....	10
2.3.1.	Adquisición de datos	11
2.3.2.	Procesamiento de la señal.....	15
2.3.2.1.	Generador síncrono Alstom 85 MW, turbina Francis, 16 escobillas.....	15
2.3.2.2.	Generador síncrono Siemens 115 MW, turbina Pelton, 56 escobillas.	22
2.3.2.3.	Generador síncrono Alstom 115 MW, turbina Pelton, 32 escobillas	27
2.3.3.	Monitoreo de la condición	30
3.	CAPÍTULO 2: RESULTADOS.....	34
3.1.	Evaluación de la salud	34
3.1.1.	Generador síncrono Alstom 85 MW	34
3.1.2.	Generador síncrono Siemens 115 MW	34
3.1.3.	Generador síncrono Alstom 115 MW	34
3.2.	Predicción.....	35
4.	CAPITULO 3: DISCUSIÓN	42
4.1.	Toma de decisiones	42
4.2.	Gestión del mantenimiento	42
4.2.1.	Mantenimiento preventivo vs. mantenimiento basado en la condición en el sistema de anillos rozantes.	43
4.3.	Presentación	44
4.3.1.	Gestión de mantenimiento en generadores síncronos	45
4.3.2.	Recolección de información	48
5.	CONCLUSIÓN	52
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

7. ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS

Ilustración 1. Subsistemas de un generador síncrono (Fuente propia)	7
Ilustración 2. Anillos colectores y escobillas, generador Siemens 115 MW (Fuente propia) ..	8
Ilustración 3. Sistema de escobillas-anillos generador síncrono ALSTOM (Fuente propia) ...	8
Ilustración 4. Estructura del trabajo (OSA-CBM)	11
Ilustración 5. Dinamómetro (Fuente propia)	12
Ilustración 6. Disposición de escobillas (MERSEN, 2010)	13
Ilustración 7. Disposición de anillos colectores (Siemens 2005)	17
Ilustración 8. Disposición de escobillas en los anillos colectores.	17
Ilustración 9. Longitud de escobillas U01 anillo superior (Fuente propia)	17
Ilustración 10. Longitud de escobillas U01 anillo inferior (Fuente propia)	18
Ilustración 11. Longitud de escobillas U02 anillo superior (Fuente propia)	18
Ilustración 12. Longitud de escobillas U02 anillo inferior (Fuente propia)	18
Ilustración 13. Diagrama de frecuencias relativas del anillo inferior U01 (Fuente propia)	20
Ilustración 14. Diagrama de frecuencias relativas del anillo superior U01 (Fuente propia) ..	21
Ilustración 15. Diagrama de frecuencias relativas del anillo superior U02 (Fuente propia) ..	21
Ilustración 16. Diagrama de frecuencias relativas del anillo inferior U02 (Fuente propia)	22
Ilustración 17. Longitud de escobillas anillo SS U05 año 2012 (Fuente propia)	23
Ilustración 18. Longitud de escobillas anillo SS U05 año 2015 (Fuente propia)	23
Ilustración 19. Diagrama de frecuencias relativas anillo SS (Fuente propia)	25
Ilustración 20. Diagrama de frecuencias relativas anillo SI (Fuente propia)	25
Ilustración 21. Diagrama de frecuencias relativas anillo IS (Fuente propia)	26
Ilustración 22. Diagrama de frecuencias relativas anillo II (Fuente propia)	26
Ilustración 23. Longitud de escobillas anillo S año 2015 (Fuente propia)	27
Ilustración 24. Longitud de escobillas anillo I año 2015 (Fuente propia)	28
Ilustración 25. Diagrama de frecuencias relativas anillo S (Fuente propia)	29
Ilustración 26. Diagrama de frecuencias relativas anillo I (Fuente propia)	30
Ilustración 27. Medición de la longitud de una escobilla. (Fuente propia)	32
Ilustración 28. Medición de la presión del resorte. (Fuente propia)	32
Ilustración 29. Mega óhmetro utilizado para verificar la limpieza y humada. (Fuente propia)	32
Ilustración 30. Medición de la rugosidad. (Fuente propia)	33
Ilustración 31. Comparación de desgastes (Fuente propia)	35
Ilustración 32. Ecuación de la curva de desgaste 2012 (Fuente propia)	35
Ilustración 33. Ecuación de la curva de desgaste 2013 (Fuente propia)	36
Ilustración 34. Ecuación de la curva de desgaste 2014 (Fuente propia)	36
Ilustración 35. Ecuación de la curva de desgaste 2015 (Fuente propia)	36
Ilustración 36. Ecuación de la curva de desgaste del anillo SS. (Fuente propia)	37
Ilustración 37. Ecuación de la curva de desgaste del anillo SI. (Fuente propia)	37
Ilustración 38. Ecuación de la curva de desgaste del anillo IS. (Fuente propia)	38
Ilustración 39. Ecuación de la curva de desgaste del anillo II. (Fuente propia)	38
Ilustración 40. Ecuación de la curva de desgaste del anillo inferior 85 MW. (Fuente propia)	38
Ilustración 41. Ecuación de la curva de desgaste del anillo superior 85 MW. (Fuente propia)	39
Ilustración 42. Tipos de mantenimiento preventivo (Fuente propia)	43
Ilustración 43. Curva de degradación de condición (MBC Ing. Cristian García)	44
Ilustración 48. Medición de rugosidad en los anillos colectores (Ing. Mec. Fabricio Gallardo)	47
Ilustración 49. Mantenimiento basado en la condición aplicado a un generador síncrono	
(Fuente propia)	48

Ilustración 50. Gráficos desde la base de datos histórica del formato de recolección de datos (Fuente propia).....	50
Ilustración 51. Proceso de recolección de datos (Fuente propia).....	51

Tabla 1. Características de las escobillas (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005).....	9
Tabla 2. Características del generador Alstom (Fuente propia)	15
Tabla 3. Análisis de desgaste U01 anillo superior (Fuente propia)	19
Tabla 4. Análisis de desgaste U01 anillo inferior (Fuente propia)	19
Tabla 5. Análisis de desgaste U02 anillo superior (Fuente propia)	19
Tabla 6. Análisis de desgaste U02 anillo inferior (Fuente propia)	20
Tabla 7. Características del generador Siemens (Fuente propia)	22
Tabla 8. Análisis de desgaste anillo SS U05 2012 (Fuente propia)	24
Tabla 9. Análisis de desgaste anillo SS 2015 (Fuente propia)	24
Tabla 10. Características del generador "C" (Fuente propia)	27
Tabla 11. Análisis de desgaste anillo Superior 2015 (Fuente propia)	28
Tabla 12. Análisis de desgaste anillo Inferior 2015 (Fuente propia)	29
Tabla 13. Parámetros para monitoreo	31
Tabla 14. Medida de rugosidad generador Siemens 115 MW	33
Tabla 15. Medida de rugosidad generador Alstom de 115 MW	33
Tabla 16. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo SS. (Fuente propia)	39
Tabla 17. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo SI. (Fuente propia).....	40
Tabla 18. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo IS. (Fuente propia).....	40
Tabla 19. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo II. (Fuente propia)	40
Tabla 20. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo SS. (Fuente propia).....	41
Tabla 21. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo SI. (Fuente propia)	41
Tabla 22. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo IS. (Fuente propia)	41
Tabla 23. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo II. (Fuente propia)	42
Tabla 24. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo SS (Fuente propia).....	45
Tabla 25. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo SI (Fuente propia)	45
Tabla 26. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo IS (Fuente propia)	46
Tabla 27. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo II (Fuente propia)	46
Tabla 28. Formato para la recolección de datos en el mantenimiento (Fuente propia)	49

Joffre Alexis Chalco Cando

Trabajo de graduación

PhD. Iván Rodrigo Coronel

Enero, 2016

“Evaluación de parámetros síntoma en el sistema de escobillas de un generador síncrono”

1. INTRODUCCIÓN

La primera central hidroeléctrica de generadores síncronos en Ecuador ubicada en la provincia del Azuay (Paute-Molino) fue construida entre 1976 y 1983, y se instalaron generadores síncronos, los que utilizan un sistema de corriente continua para crear el campo magnético giratorio, esta corriente es conducida hacia el rotor mediante escobillas de grafito. Las escobillas durante el tiempo de funcionamiento están sometidas a fricción debido a la presión que ejercen los muelles para la transmisión de corriente eléctrica, estos factores sumados al bajo valor de dureza del material de construcción hacen que estos elementos sean los de mayor desgaste en el sistema, y por lo tanto los elementos que mayor atención necesitan. En este contexto surgen las preguntas:

- ¿La metodología actual de mantenimiento maximiza la disponibilidad del sistema (por lo tanto, de la unidad de generación)?
- ¿Cuáles son los parámetros a incluir para un acertado pronóstico de recambio y frecuencia de inspección?

El objetivo de toda gestión de mantenimiento es el reestablecer el estado funcional de un equipo en el menor tiempo posible y con la mayor calidad posible (Mexicana, 2014). Luego de identificar el elemento de mayor criticidad, es necesario analizar las variables que influyen en el desgaste, ya que éstas determinarán los programas de parada de máquina para mantenimiento, de lo anterior se desprende los objetivos de este trabajo:

- Minimizar el número de intervenciones en el sistema de anillos rozantes (maximizar la disponibilidad de la unidad de generación).
- Determinar los parámetros o estados que se debe monitorear para disminuir o mantener un desgaste óptimo de las escobillas.
- Definir un plan de gestión de mantenimiento basado en la condición (MBC) para sistema de anillos rozantes en generadores síncronos.

2. CAPITULO 1: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Generador Síncrono

Un generador síncrono es el encargado de transformar energía mecánica proveniente de la turbina en energía eléctrica para el consumo en los hogares e industria del país. Está formado de varios subsistemas que permiten un funcionamiento acorde a las necesidades de generación, uno de ellos es el de excitación, dentro de este subsistema se encuentran los anillos colectores y escobillas. La Ilustración 1 muestra el diagrama funcional de un generador síncrono.

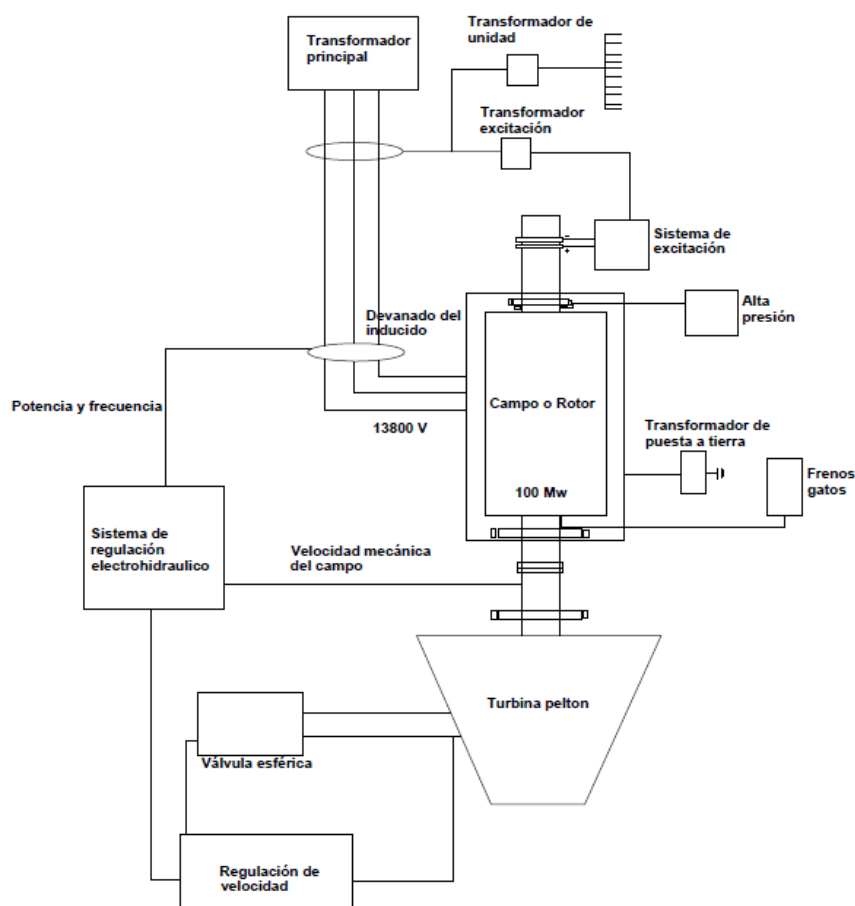


Ilustración 1. Subsistemas de un generador síncrono (Fuente propia)

Los anillos colectores están conectados eléctricamente con los polos del generador, el voltaje de corriente continua llega a ellos mediante las escobillas, este voltaje es necesario para crear el campo magnético giratorio el cual induce una F.E.M. en bornes del generador. En la Ilustración 2 se puede observar los cables que llegan con la alimentación de corriente y las escobillas extraídas del sistema.

El campo deberá recibir una “pre-excitación” para que el generador pueda entregar un voltaje inicial, esto se logra inyectando una corriente continua inicial externa al

generador (baterías o centros de fuerza de corriente continua), una vez alcanzado el nivel necesario se realiza el cambio a la “auto-excitación”.

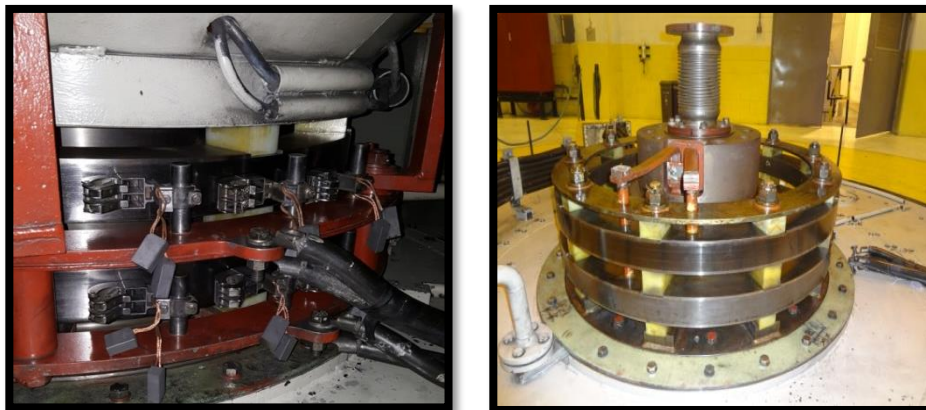


Ilustración 2. Anillos colectores y escobillas, generador Siemens 115 MW (Fuente propia)

2.2. Escobillas y anillos colectores.

La cantidad de escobillas utilizadas, así como el tipo de fabricación y dimensión varían dependiendo de la corriente total que circula por el sistema de excitación. La corriente total deberá ser dividida entre el número de escobillas, sin exceder el límite de la densidad de corriente por escobilla. Así, si una escobilla tipo EG34D soporta 12 A/cm², y la corriente nominal del sistema es de 1100 Amperios ¿Cuántas escobillas necesitamos? Iniciamos suponiendo inicialmente 20 escobillas, 10 por cada anillo, entonces 1100 Amperios dividido para 20 nos da 55 Amperios, obtenemos el área de contacto de la escobilla multiplicando el ancho (l) por la altura (A) que el caso de una escobilla de 3.2 cm por 2.5 cm se obtiene 8 cm², ahora dividimos los 55 amperios para el área de contacto de la escobilla obteniendo 6.87 A/cm² inferior al valor recomendable. Ahora con 10 escobillas obtenemos 13.75 A/cm² superando el límite recomendado por el fabricante. Es importante dejar claro que una densidad baja también es mala para el sistema siendo 5.6 A/cm² el límite inferior. (MERSEN, 2010)



Ilustración 3. Sistema de escobillas-anillos generador síncrono ALSTOM (Fuente propia)

Los anillos colectores por lo general son de acero 30CrMo4 en norma UNI y 4130 en norma ASTM, una aleación de cromo molibdeno ampliamente utilizada como acero para aviones, que combina soldabilidad, facilidad de fabricación y endurecimiento ligero. (ACCURA, 2015)

Se utiliza dos anillos, uno para la polaridad positiva y otro para la polaridad negativa, la cantidad de escobillas debe ser igual en cada anillo. Los anillos pueden ser ranurados para ayudar a la ventilación debiendo tener extremo cuidado con los filos ya que pueden acelerar el desgaste de las escobillas.

2.2.1. Características de las escobillas

Existen 5 grupos principales de escobillas, que corresponden cada uno a un modo de fabricación específico:

Carbográficas (A), Electrográficas (EG), Gráficas blandas (LFC), Metálicas (CG-MC-CA), Resinográficas (BG). Las más utilizadas para generadores síncronos son las Electrográficas (EG), dentro del grupo de electrográficas existen subgrupos basados en la dureza, carga de rotura a la flexión, frotamiento entre otros que se puede observar en la Tabla 1 (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005).

GRUPOS de CALIDADES	CALIDADES	Densidad aparente	Resistencia $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ $\mu\Omega \cdot \text{inch}$	Dureza Shore	Carga de rotura a la flexión MPa PSI	Carga de tensión al cortado ΔU en V	Frotamiento	Carga máxima admisible A/cm^2 A/inch^2	Velocidad máxima $\text{m}/\text{seg.}$ $\text{ft}/\text{seg.}$	Porcentaje de metal %
Carbográficas	A 121	1,75	2 200 (710)	30	25	M	B	12 a 20 (75 a 125)	15 (49)	
	A 122	1,67	45 000 (16 000)	27	20	A	B	10 a 12 (65 a 75)	15 (49)	
	A 176	1,60	52 500 (21 717)	40	20	A	B	8 a 10 (50 a 65)	30 (98)	
	A 210	1,57	25 000 (10 000)	30	16	M	B	8 a 10 (50 a 65)	25 (82)	
	A 252	1,57	45 000 (16 706)	27	16	A	B	10 a 12 (65 a 75)	25 (82)	
Gráficas blandas	LFC 501	1,46	1 900 (835)		8	M	M	6 a 10 (40 a 65)	75 (246)	
	LFC 554	1,26	2 000 (835)		10	M	M	11 a 13 (71 a 84)	90 (295)	
Electrográficas	EG 34D	1,60	1 100 (460)	35	25	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 389P	1,49	1 600 (668)	29	19	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 396	1,52	1 600 (668)	27	19	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 362	1,62	2 500 (1 045)	35	21	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 40P	1,62	3 200 (1 336)	57	27	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 313	1,70	4 700 (1 963)	54	21	M	B	12 (75)	50 (164)	
	EG 367	1,53	4 100 (1 753)	48	21	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 332	1,52	4 200 (2 025)	48	21	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 387	1,63	3 300 (2 000)	60	39	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 300	1,57	4 200 (1 680)	58	24	M	B/M	12 (75)	50 (164)	
	EG 98	1,60	3 400 (1 503)	60	33	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 369	1,57	5 100 (2 030)	55	25	M	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 319P	1,46	7 200 (3 007)	52	26	A	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 321	1,46	6 600 (1 420)	54	26	A	M	12 (75)	50 (164)	
	EG 365	1,62	5 300 (2 840)	48	15	M	M	12 (75)	50 (164)	

Tabla 1. Características de las escobillas (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005)

2.2.2. Funcionamiento y consideraciones

La escobilla es un conductor eléctrico sujeto a fricción. Este tipo de sistema es utilizado para satisfacer el requerimiento de corriente continua en un objeto móvil (rotor), pero tiene la desventaja, por naturaleza del material, de contaminar el recinto de las escobillas con polvo de carbón, este carbón es un buen conductor de electricidad, esto creará caminos para la corriente desde el rotor hacia tierra, condición insatisfactoria para el correcto funcionamiento del generador.

En este contexto, el mantenimiento del sistema de escobillas-anillos colectores estará dirigido a controlar y restaurar las condiciones funcionales, las que se pueden clasificar en tres grupos: Aspectos mecánicos, eléctricos y de ambiente (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005).

- Mecánicos:
Coeficiente de frotamiento, Rugosidad de anillos, Vibraciones, Presión, Guiado, Disposición de las escobillas, Dureza del anillo colector, Dureza del carbón.
- Eléctricos:
Caída de tensión, Conmutación, Distribución de corriente, Densidad de corriente, Resistividad.
- Fisicoquímicos:
Humedad relativa, temperatura, pátina, polvos, vapores, aceites, granulometría.

2.3. Mantenimiento basado en la condición.

El Mantenimiento basado en la Condición (MBC) proviene de un supuesto lógico que la reparación o reemplazo preventivo de los componentes de la maquinaria sería oportuno si se analizarán justo antes que aparezca una falla (Mexicana, 2014). El objetivo del Mantenimiento basado en la Condición (MBC) es obtener la máxima vida útil de cada activo físico antes de ponerlo fuera de servicio. (Mexicana, 2014). La correcta aplicación de esta metodología debe cumplir lineamientos establecidos por normativas internacionales, este trabajo se estructurará de la siguiente forma:

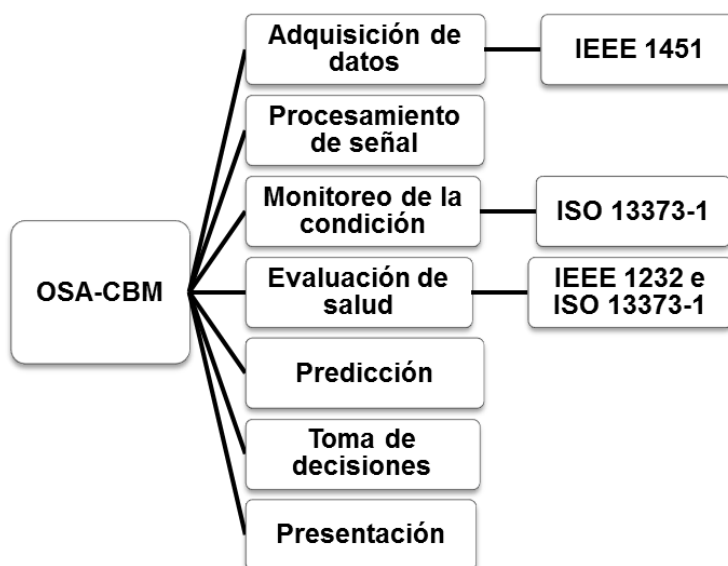


Ilustración 4. Estructura del trabajo (OSA-CBM)

2.3.1. Adquisición de datos

A continuación, se describe las variables de interés para el estudio del sistema de anillos rozantes:

- **Tamaño de las escobillas**

El desgaste de la escobilla es “normal”, debido a la fricción, circulación de corriente, la dureza y composición de la escobilla. Para determinar el tamaño óptimo de la escobilla se debe tomar en cuenta:

La distancia entre el anillo colector y el porta escobilla, medida del porta escobilla, longitud que sobresale del porta escobilla, ubicación del cable de cobre en la escobilla, densidad de corriente.

La recomendación del fabricante es que la escobilla no debe reducir su tamaño más allá del 40% del valor inicial, debido a que la corriente circulará solo por la parte central del cuerpo de la escobilla, dejando el resto casi sin corriente. La recolección de este dato se realiza manualmente con un pie de rey, sin embargo, se podría implementar un sistema de medición en línea utilizando sensores ópticos o de ultrasonido acoplados al resorte del porta escobilla (CVG EDELCA, 2005).

- **Efecto de la presión del resorte (Porta escobilla)**

Si la presión es demasiado baja se producirá un sobrecalentamiento, debido a pérdidas eléctricas por resistencia de contacto y desgaste excesivo por quemadura. Si es demasiado elevado se producirá sobrecalentamiento, debido a pérdidas por fricción y desgaste excesivo por abrasión.

La adquisición de estos datos se realiza con la ayuda de un dinamómetro digital mostrado en la Ilustración 5.



Ilustración 5. Dinamómetro (Fuente propia)

Las pérdidas totales tienen un valor mínimo para una presión de 2 lbs/pulg², y permanecen constantes entre 1,5 y 2,5 lbs/pulg².

- **Densidad de corriente**

Se refiere a la corriente medida en amperios por centímetro cuadrado (A/cm²), que la sección del material de la escobilla puede soportar sin mayor calentamiento, este dato viene dado de fábrica como se puede observar en la Tabla 1.

- **Resistencia de aislamiento**

El desgaste producto de la fricción anillo-escobilla genera partículas de carbón en suspensión, contaminando todas las partes del sistema, incluidas las partes aislantes, este carbón baja la resistencia de aislamiento a tierra provocando la actuación del relé de protección de la unidad de generación. El valor de ajuste del relé es 2500 Ω en el primer paso y 2000 Ω en el segundo, estos valores variarán dependiendo del criterio del operador de casa de máquinas.

- **Disposición de las escobillas**

La disposición de las escobillas en los anillos puede ser de diferentes formas (Ilustración 6). Para generadores síncronos debe ser como se muestra en la Ilustración 6 b. Esto permitirá la distribución de corriente a lo largo del anillo colector.

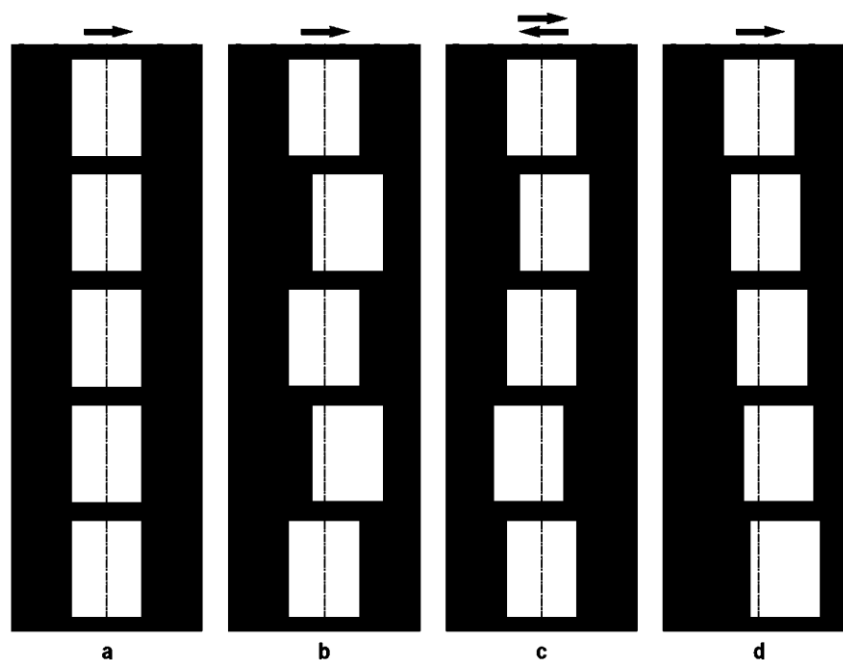


Ilustración 6. Disposición de escobillas (MERSEN, 2010)

- **Humedad relativa**

El agua es el componente principal de la pátina, es proporcionada por el ambiente. En un aire muy seco, los óxidos metálicos predominan en la pátina; esto causa un frotamiento elevado y un desgaste muy rápido de la escobillas. El límite inferior es de 2 g/m³.

- **Temperatura**

Como ya se mencionó anteriormente una pátina de calidad es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema, la pátina depende de la cantidad de humedad que exista en el ambiente, un ambiente seco con altas temperaturas provocará que la pátina este compuesta mayoritariamente de óxidos metálicos provocando un desgaste excesivo.

- **Aceites y polvos**

La contaminación de los colectores, anillos y escobillas por aceites se da por las fugas en los cojinetes, los cuales se condensan por el calor. Estos cuerpos grasos perturban gravemente el correcto funcionamiento de los colectores, la corriente se reparte de manera desigual sobre las escobillas.

La presencia de polvos como silicio, elementos metálicos derivados de las actividades de mantenimiento provocan:

Desgaste y rayado del anillo, rápido desgaste de las escobillas.

- **Pátina**

Se compone de dos elementos básicos: agua y grafito. El origen de dos de ellos es más o menos obvio. La propia escobilla suministra el material para la pátina de grafito y para la de grafito suelto. Las partículas microscópicas provenientes de las escobillas y producidas cuando el colector gira, forman dos capas y algún desplazamiento electrolítico del grafito de las escobillas hacia el colector se agrega a la pátina formada.

La otra capa, la capa del vapor de agua, proviene de la atmósfera circundante y la cantidad presente en cada momento depende de la humedad relativa y de la temperatura. Esta capa de vapor de agua, aunque extremadamente fina es de vital importancia. Funciona como una superficie de deslizamiento muy semejante a la de la fina pátina de agua que se forma bajo el peso de sus patines permitiéndole deslizarse sin esfuerzo a través de la laguna congelada. Si no hay capa de vapor de agua para la lubricación, sus escobillas se desgastarán muy rápidamente. Este caso es particularmente predominante en áreas de gran altitud y baja humedad., en el cual las escobillas deben ser tratadas químicamente para asegurar que depositen sobre el colector una pátina durable en compensación de la deficiente cantidad de vapor de agua y de oxígeno en la atmósfera. ([https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1tina_\(motores\)](https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1tina_(motores)), 2015).

- **Rugosidad de los anillos colectores**

La superficie de los anillos debe ser la óptima, ni muy lisa ni muy rugosa, este estado debe ser monitoreado constantemente y de ser necesario debe ser rectificado el anillo para que esté dentro de los niveles aceptables. Rugosidad inferior o igual a $0,2\ \mu\text{m}$ deben ser evitados. Es necesario quitar el esmalte de las superficies. Rugosidad sobrepasando $2\ \mu\text{m}$, trae consigo un desgaste excesivo de las escobillas. (MERSEN, 2010)

- **Vibraciones** (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005)

Las vibraciones alteran el contacto de la escobilla con el colector, esto puede ser debido a:

- Mala alineación, rodamientos defectuosos.
- Un frotamiento elevado o muy variable, resultado de una escobilla de una calidad inadecuada, de un entorno contaminado, de una pátina defectuosa, de bajas cargas prolongadas.

- **Desplazamientos**

Excentricidad de los anillos colectores con respecto al diámetro referencial de las escobillas.

2.3.2. Procesamiento de la señal

Se aplicó una investigación no experimental, es decir se observó el fenómeno tal como se dan en su contexto natural, para después analizarlo. (Sampieri). Todos los datos a analizar fueron tomados sin alteración de ningún parámetro, esto permitirá determinar la tendencia actual y posteriormente determinar cuáles son las soluciones a los problemas existentes.

La población en nuestro caso serán las centrales de generación que utilizan generadores síncronos, la muestra serán las 2 unidades con generadores Alstom acoplados a una turbina Francis de 85 MW, cinco generadores Siemens acoplados a turbinas Pelton de 115 MW y cinco generadores Alstom acoplados a turbinas Pelton de 115 MW.

La base de datos ha sido alimentada durante varios años en el caso de los generadores Siemens y Ansaldo, mientras que el generador Alstom tiene pocos datos para el análisis, con los datos existentes se va a crear la ecuación de la curva para determinar la tendencia de desgaste, tiempo de vida de la escobilla y generar un plan de mantenimiento basado en la condición. Este análisis se realiza en base a entrevistas al personal de mantenimiento, hojas de vida del fabricante, normas técnicas, hojas de datos del fabricante de escobillas, inspecciones visuales y mediciones tomadas en sitio.

2.3.2.1. Generador síncrono Alstom 85 MW, turbina Francis, 16 escobillas.

Cada generador puede entregar al sistema 85 MW de potencia activa considerando que el nivel de potencia reactiva no debe pasar la determinada por la curva de capacidad del generador. Este generador utiliza una turbina de tipo Francis, y tiene las siguientes características:

Potencia (MW)	Voltaje en el estator (V)	Voltaje en el rotor (V)	Corriente en el estator (A)	Corriente en el rotor (A)	R.P.M.
85	13800	177	3600	625	257,14
No. Anillos	Diámetro de los anillos (mm)	Metal	Ancho del anillo (mm)	Escobillas por anillo	Superficie del anillo
2	1200	Acero	90	8	Ranurada (5)
Alto de la escobilla (mm)	Ancho de la escobilla (mm)	Espesor de la escobilla (mm)	Clase	Tipo de resorte	
50	32	25	EG34D	Lazo	

Tabla 2. Características del generador Alstom (Fuente propia)

La inferencia estadística nos ayudará a tomar decisiones más cercanas a la realidad de nuestro sistema, podremos entender la tendencia central del desgaste y la variabilidad de los datos en los extremos, para esto haremos uso de la Media, Mediana, Moda y Desviación estándar.

Los datos presentados hacen referencia al desgaste en milímetros de las escobillas.

Las interpretaciones de los datos tendrán las siguientes consideraciones:

- Si la diferencia de la media y la mediana es grande indica que los datos presentan valores extremos distantes de la tendencia central, es decir se presenta valor anormal de desgaste.
- Para conocer cuáles son los valores de desgaste más repetitivos se utilizará la moda.
- Al tener un valor grande en la diferencia entre la mediana y la media, haremos uso de la desviación estándar para conocer la variabilidad de los datos y determinar qué escobilla presenta un desgaste anormal y se puedan tomar acciones para el mejoramiento de este comportamiento.

Los datos presentados en la Ilustración 9 confirman una variabilidad de los datos de desgaste de las escobillas 1, 3, 5, en el caso de la escobilla 1 el mínimo es 0,23 mm (Sep.- oct.) y el máximo 1,02 mm (Ag. – Sep.)

La Ilustración 10 presenta los valores de desgaste del anillo inferior en la unidad 1, para las escobillas 5, 6, 7. Los valores de desgaste presentan una variabilidad alta con respecto a las demás escobillas, un mínimo de 0.38 mm y un máximo de 1.4 mm.

La Ilustración 11 e Ilustración 12 presentan los datos de desgaste de la unidad 2, anillo superior e inferior respectivamente.

La Ilustración 7 y la Ilustración 8 muestran como están ubicados los anillos formando dos grupos de escobillas, el primer grupo alimenta el polo positivo y el segundo el polo negativo.

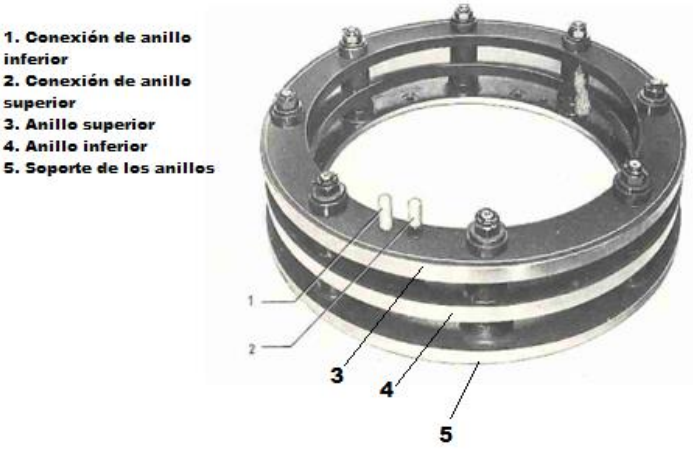


Ilustración 7. Disposición de anillos colectores (Siemens 2005)

1. Escobillas en el anillo superior

2. Escobillas en el anillo inferior
- 



Ilustración 8. Disposición de escobillas en los anillos colectores.

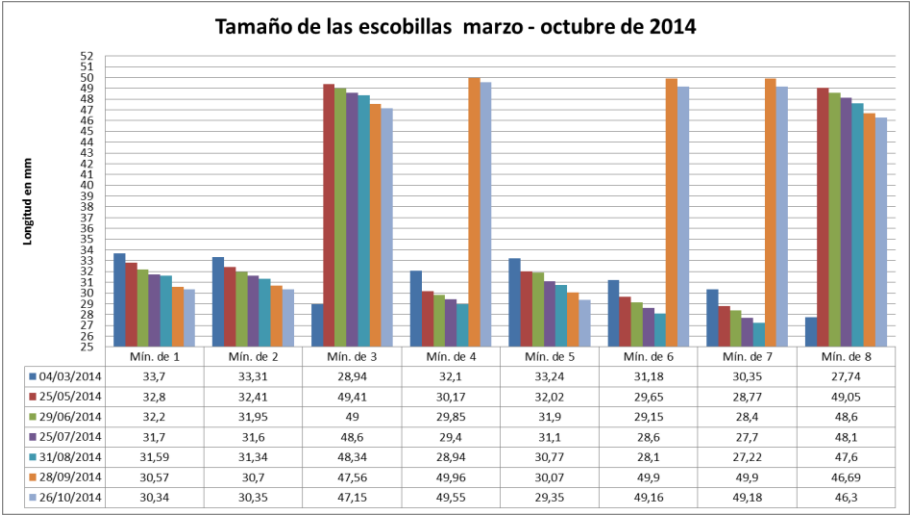


Ilustración 9. Longitud de escobillas U01 anillo superior (Fuente propia)

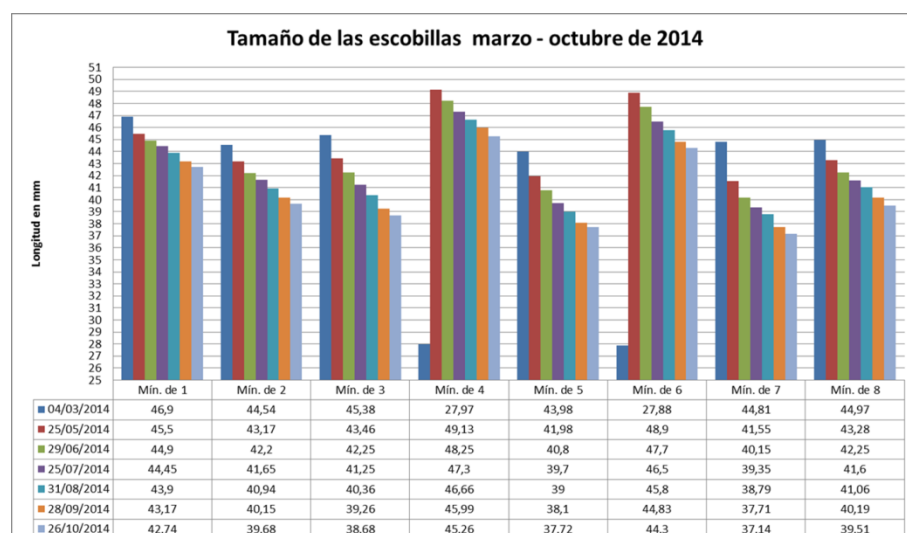


Ilustración 10. Longitud de escobillas U01 anillo inferior (Fuente propia)

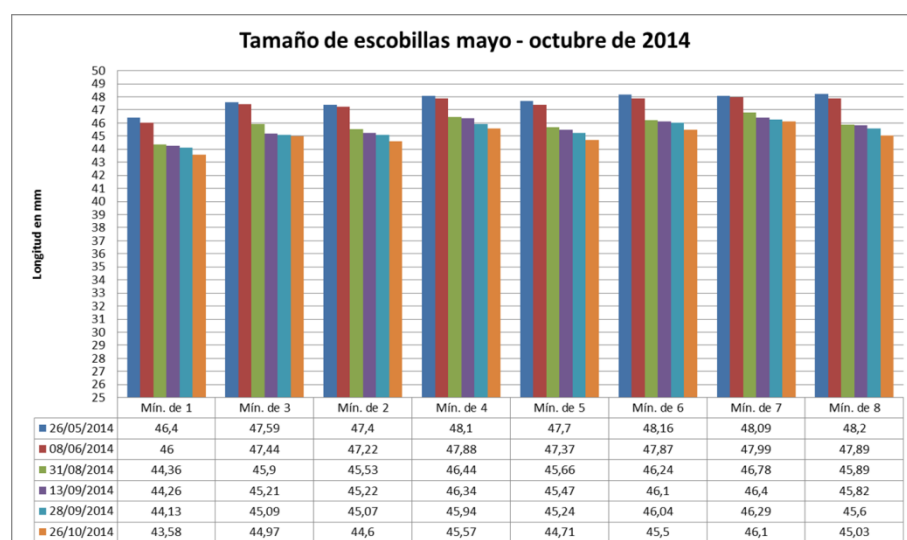


Ilustración 11. Longitud de escobillas U02 anillo superior (Fuente propia)

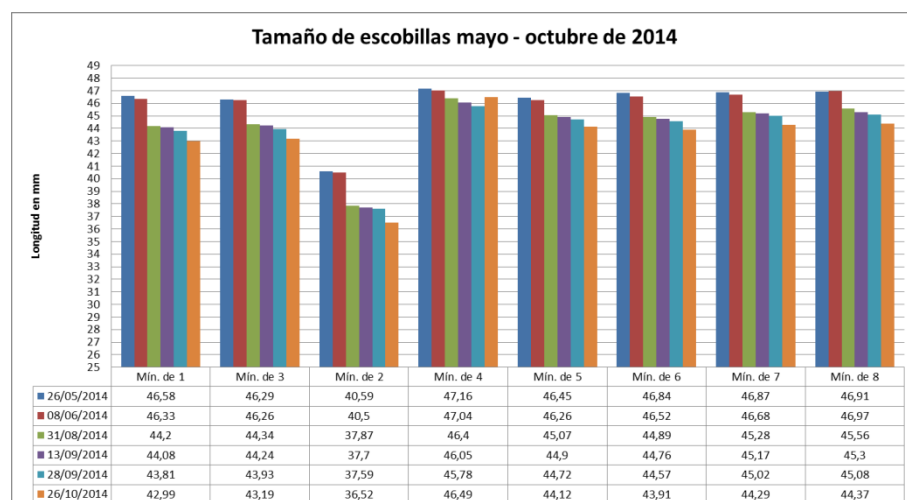


Ilustración 12. Longitud de escobillas U02 anillo inferior (Fuente propia)

Análisis estadístico

Se muestran los datos de desgaste en donde se observa que el anillo superior de la unidad 1 tiene escobillas señaladas con rojo cuya desviación está por encima de lo “normal”, Tabla 3.

El juego de escobillas del anillo superior de la unidad 2 presenta un desgaste anormal en las escobillas 3 y 8, una variabilidad moderada en las escobillas 2 y 6. Estos datos se presentan en la Tabla 5.

Anillo Superior Unidad 1									
	DESGASTE (mm)					Análisis			
	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Agos	Agos - Sep	Sep - Oct	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza
Escobilla 1	0,60	0,50	0,11	1,02	0,23	0,49	0,50	0,36	0,13
Escobilla 2	0,46	0,35	0,26	0,64	0,35	0,41	0,35	0,15	0,02
Escobilla 3	1,00	0,40	0,26	0,78	0,41	0,57	0,41	0,31	0,09
Escobilla 4	0,32	0,45	0,46	0,10	0,35	0,34	0,35	0,15	0,02
Escobilla 5	0,12	0,80	0,33	0,70	0,72	0,53	0,70	0,29	0,09
Escobilla 6	0,50	0,55	0,50	0,10	0,74	0,48	0,50	0,23	0,05
Escobilla 7	0,37	0,70	0,48	0,10	0,72	0,47	0,48	0,26	0,07
Escobilla 8	0,45	0,50	0,50	0,91	0,39	0,55	0,50	0,21	0,04
Promedio	0,48	0,53	0,36	0,54	0,49				
Horas Operación	572	558	463	329	491				

Tabla 3. Análisis de desgaste U01 anillo superior (Fuente propia)

Anillo Inferior Unidad 1									
	DESGASTE (mm)					Análisis			
	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Agos	Agos - Sep	Sep - Oct	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza
Escobilla 1	0,60	0,45	0,55	0,73	0,43	0,55	0,55	0,12	0,01
Escobilla 2	0,97	0,55	0,71	0,79	0,47	0,70	0,71	0,20	0,04
Escobilla 3	1,21	1,00	0,89	1,10	0,58	0,96	1,00	0,24	0,06
Escobilla 4	0,88	0,95	0,64	0,67	0,73	0,77	0,73	0,14	0,02
Escobilla 5	1,18	1,10	0,70	0,90	0,38	0,85	0,90	0,32	0,10
Escobilla 6	1,20	1,20	0,70	0,97	0,53	0,92	0,97	0,30	0,09
Escobilla 7	1,40	0,80	0,56	1,08	0,57	0,88	0,80	0,36	0,13
Escobilla 8	1,03	0,65	0,54	0,87	0,68	0,75	0,68	0,19	0,04
Promedio	1,06	0,84	0,66	0,89	0,55				
Horas Operación	572,00	558,00	463,00	329,00	491,00				

Tabla 4. Análisis de desgaste U01 anillo inferior (Fuente propia)

En el anillo inferior presenta 4 escobillas con una desviación alta, sin embargo, la escobilla 2 tiene un valor de 0.59 de desviación por lo que es urgente un análisis de las posibles causas de este hecho, los datos están en la Tabla 6.

Anillo Superior Unidad 2									
	DESGASTE (mm)					Análisis			
	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Agos	Agos - Sep	Sep - Oct	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza
Escobilla 1	0,35	0,82	0,82	0,23	0,55	0,55	0,55	0,27	0,07
Escobilla 2	0,18	0,84	0,84	0,46	0,47	0,56	0,47	0,29	0,08
Escobilla 3	0,15	0,77	0,77	0,81	0,12	0,52	0,77	0,36	0,13
Escobilla 4	0,26	0,72	0,72	0,50	0,37	0,51	0,50	0,21	0,04
Escobilla 5	0,33	0,85	0,86	0,42	0,53	0,60	0,53	0,25	0,06
Escobilla 6	0,29	0,81	0,81	0,20	0,54	0,53	0,54	0,29	0,08
Escobilla 7	0,10	0,60	0,61	0,49	0,19	0,40	0,49	0,24	0,06
Escobilla 8	0,31	1,00	1,00	0,29	0,57	0,63	0,57	0,35	0,12
Promedio	0,25	0,80	0,80	0,42	0,42				

Tabla 5. Análisis de desgaste U02 anillo superior (Fuente propia)

Anillo Inferior Unidad 2									
	DESGASTE (mm)					Análisis			
	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Agos	Agos - Sep	Sep - Oct	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza
Escobilla 1	0,25	1,07	1,07	0,39	0,82	0,72	0,82	0,38	0,14
Escobilla 2	0,09	1,32	1,32	0,28	1,07	0,81	1,07	0,59	0,34
Escobilla 3	0,24	0,96	0,96	0,41	0,74	0,66	0,74	0,33	0,11
Escobilla 4	0,12	0,82	0,82	0,62	0,29	0,53	0,62	0,32	0,10
Escobilla 5	0,19	0,59	0,59	0,35	0,60	0,47	0,59	0,19	0,04
Escobilla 6	0,32	0,82	0,81	0,32	0,66	0,59	0,66	0,25	0,06
Escobilla 7	0,19	0,70	0,70	0,26	0,73	0,52	0,70	0,27	0,07
Escobilla 8	0,23	0,70	0,70	0,48	0,71	0,57	0,70	0,21	0,04
Promedio	0,20	0,87	0,87	0,39	0,70				
Horas Operación	110	762	743	261	422				

Tabla 6. Análisis de desgaste U02 anillo inferior (Fuente propia)

El histograma o gráfico de frecuencias relativas nos ayudará a tener una visión global del desgaste presentado por unidad de generación, dando las pautas para una adecuada proyección de desgaste en los siguientes meses.

La Ilustración 13 muestra que el 33% de los desgastes esta entre 0.4 mm y 0.6 mm mientras que la Ilustración 14 muestra el diagrama de frecuencias del anillo superior unidad 1, en donde se ve que el 30% de las medidas de desgaste están entre 0.49 mm y 0.69 mm, solo un 3% entre 1.29 mm y 1.49 mm.

La Ilustración 15 e Ilustración 16 presentan el diagrama de frecuencias de la unidad 2 en donde el 28% de los desgastes están entre 0.7 mm y 0.85 mm en el anillo superior. Mientras en el anillo inferior el 25% está entre 0.5 mm y 0.71 mm.

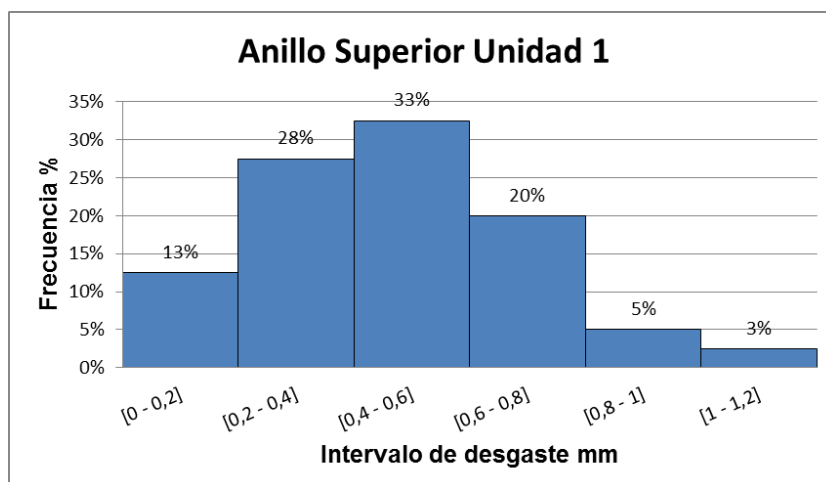


Ilustración 13. Diagrama de frecuencias relativas del anillo inferior U01 (Fuente propia)

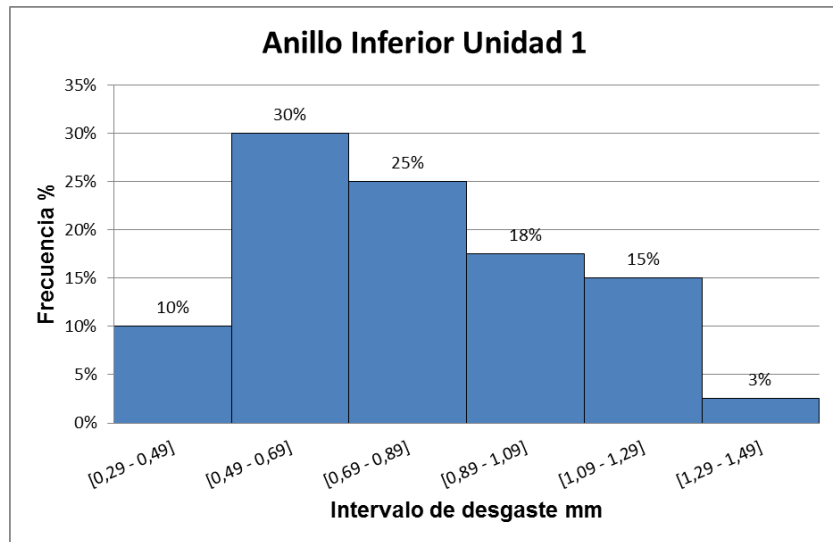


Ilustración 14. Diagrama de frecuencias relativas del anillo superior U01 (Fuente propia)

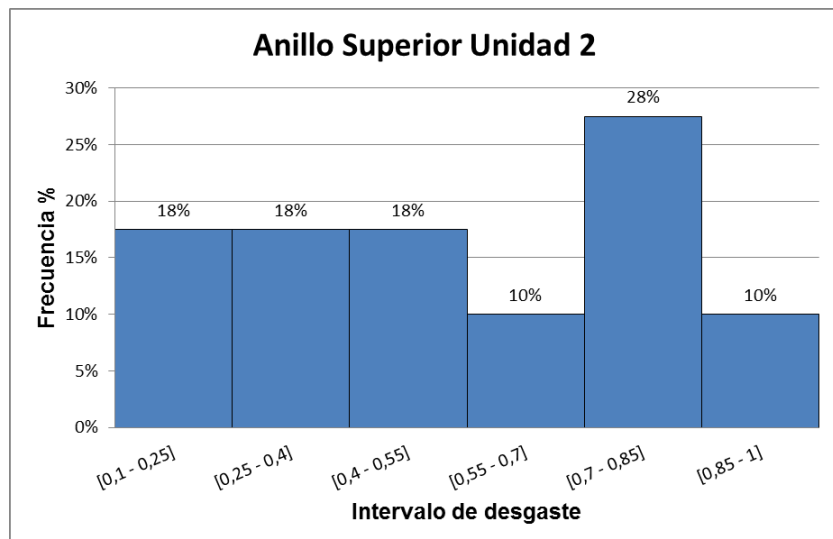


Ilustración 15. Diagrama de frecuencias relativas del anillo superior U02 (Fuente propia)

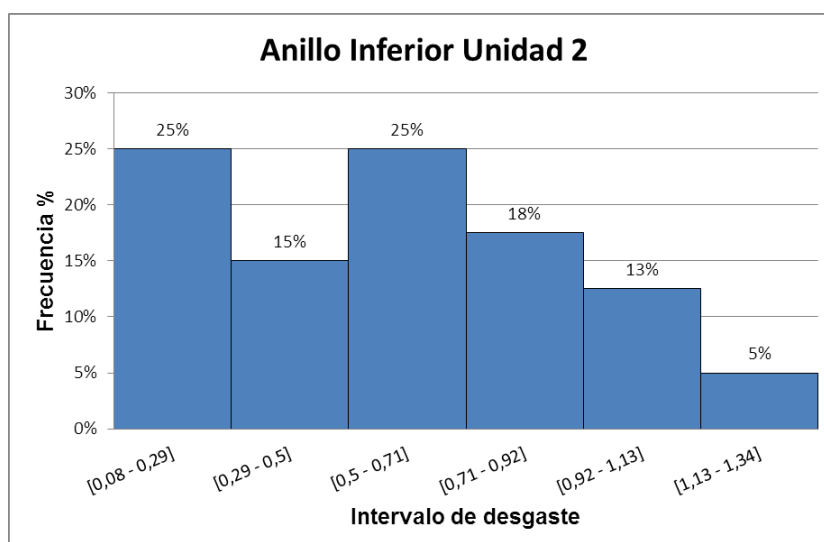


Ilustración 16. Diagrama de frecuencias relativas del anillo inferior U02 (Fuente propia)

2.3.2.2. Generador síncrono Siemens 115 MW, turbina Pelton, 56 escobillas.

El generador en análisis Siemens, tiene las siguientes características:

Potencia (MW)	Voltaje en el estator (V)	Voltaje en el rotor (V)	Corriente en el estator (A)	Corriente en el rotor (A)	R.P.M.
105	13800	220	4700	1100	360
No. Anillos	Diámetro de los anillos (mm)	Metal	Ancho del anillo (mm)	Escobillas por anillo	Superficie del anillo
2	1120	Acero	80	28	Sin ranura
Alto de la escobilla (mm)	Ancho de la escobilla (mm)	Espesor de la escobilla (mm)	Clase	Tipo de resorte	
50	25	15	EG34D	BUNG	

Tabla 7. Características del generador Siemens (Fuente propia)

Se realiza el análisis de los datos recolectados durante 4 años, en la Ilustración 17 e Ilustración 18 se puede observar la tendencia de desgaste en los años 2012 y 2015.

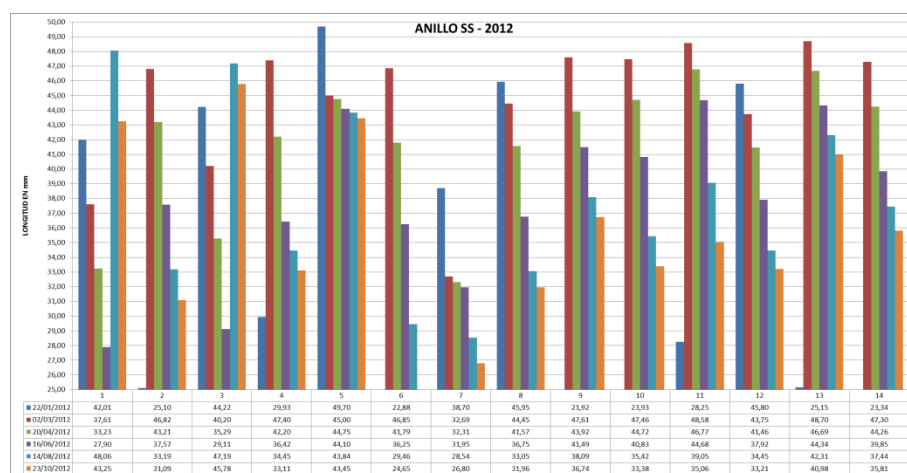


Ilustración 17. Longitud de escobillas anillo SS U05 año 2012 (Fuente propia)

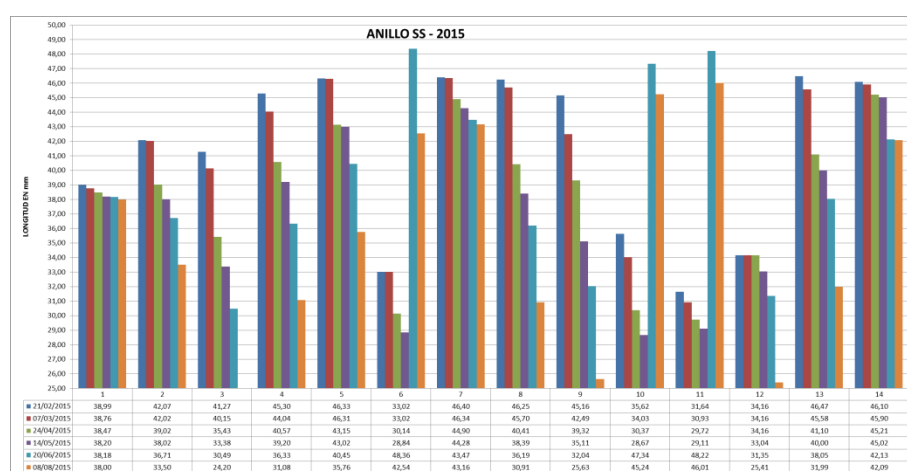


Ilustración 18. Longitud de escobillas anillo SS U05 año 2015 (Fuente propia)

Análisis estadístico

Al igual que el generador anterior se presenta un análisis estadístico de los datos obtenidos con el fin de determinar los máximos y mínimos valores de desgaste, será el punto de partida para la predicción de desgaste realizada en el numeral 3.2.

	2012					
					Desgaste (mm)	
	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza	Max	Min
Escobilla 1	3,65	4,39	1,7290	2,9895	5,33	1,05
Escobilla 2	3,28	3,40	1,7171	2,9485	5,64	0,74
Escobilla 3	3,41	3,42	1,9972	3,9890	6,18	1,11
Escobilla 4	3,39	3,02	1,7795	3,1665	5,78	1,34
Escobilla 5	1,20	0,52	1,7354	3,0114	4,70	0,25
Escobilla 6	5,44	5,18	1,8350	3,3673	8,21	3,15
Escobilla 7	2,33	1,91	2,1358	4,5616	6,01	0,36
Escobilla 8	3,17	3,29	1,6508	2,7251	5,02	1,09
Escobilla 9	3,38	2,92	1,7237	2,9713	6,08	1,35
Escobilla 10	3,90	4,05	1,3849	1,9180	5,41	2,04
Escobilla 11	3,52	3,61	1,5922	2,5352	5,63	1,42
Escobilla 12	3,18	2,88	1,8369	3,3741	6,47	1,24
Escobilla 13	1,98	1,80	0,7696	0,5923	3,31	1,30
Escobilla 14	3,86	3,56	1,9034	3,6229	6,28	1,63

Tabla 8. Análisis de desgaste anillo SS U05 2012 (Fuente propia)

La Tabla 8 permite determinar los valores máximos de desgaste en donde la escobilla 6 presenta un desgaste máximo de 8,21 mm mientras que las escobilla 7 tiene un mínimo de 0,36 mm.

La Tabla 9 presenta los datos del año 2015, la escobilla 9 presenta un máximo desgaste de 6,41 mm.

	2015					
					Desgaste (mm)	
	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza	Max	Min
Escobilla 1	0,20	0,23	0,1080	0,0117	0,29	0,02
Escobilla 2	1,71	1,31	1,3540	1,8334	3,21	0,05
Escobilla 3	3,41	2,89	2,0841	4,3436	6,29	1,12
Escobilla 4	2,84	2,87	1,6480	2,7158	5,25	1,26
Escobilla 5	2,11	2,57	2,0161	4,0647	4,69	0,02
Escobilla 6	2,33	1,64	2,2050	4,8621	5,82	0,00
Escobilla 7	0,65	0,62	0,5278	0,2786	1,44	0,06
Escobilla 8	3,07	2,20	2,1226	4,5056	5,29	0,55
Escobilla 9	3,91	3,17	1,5109	2,2827	6,41	2,67
Escobilla 10	2,34	2,10	0,8477	0,7186	3,66	1,59
Escobilla 11	1,30	1,21	0,6875	0,4727	2,21	0,61
Escobilla 12	1,75	1,12	2,4537	6,0204	5,94	0,00
Escobilla 13	2,90	1,95	2,2729	5,1661	6,06	0,89
Escobilla 14	0,80	0,20	1,1927	1,4225	2,89	0,04

Tabla 9. Análisis de desgaste anillo SS 2015 (Fuente propia)

A continuación, se presenta los gráficos de frecuencias acumuladas de los 4 años en los 4 anillos, cada anillo contiene 14 escobillas.

Es necesario aclarar que se les conoce como anillos o medias lunas las bases donde están los porta escobillas, existen 4: superior-superior (SS), superior-inferior (SI), Inferior-superior (IS), inferior-inferior (II).

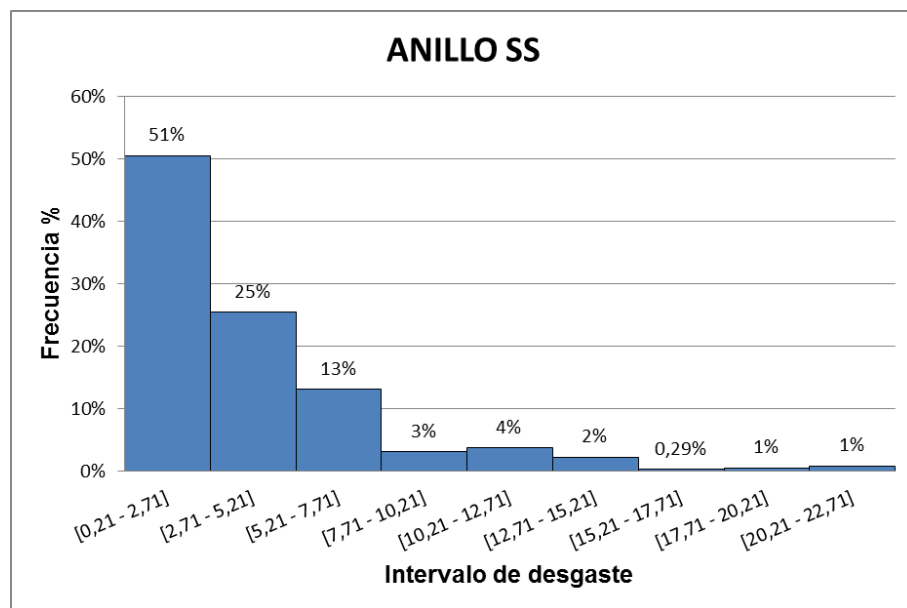


Ilustración 19. Diagrama de frecuencias relativas anillo SS (Fuente propia)

En la Ilustración 19 vemos que más del 50% de los desgastes está dentro del rango 0.21-2,71 mm. Lo que manejaremos como base para nuestra proyección posterior.

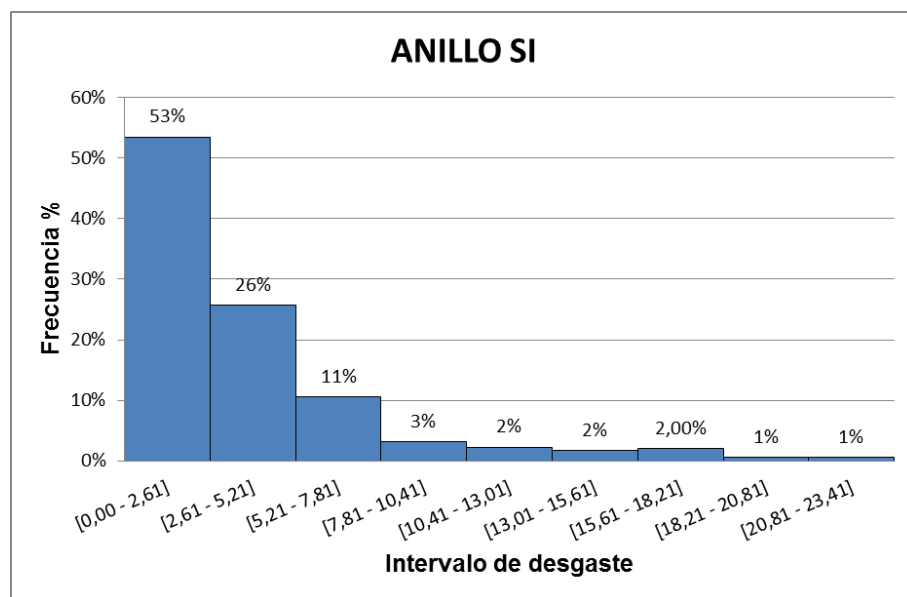


Ilustración 20. Diagrama de frecuencias relativas anillo SI (Fuente propia)

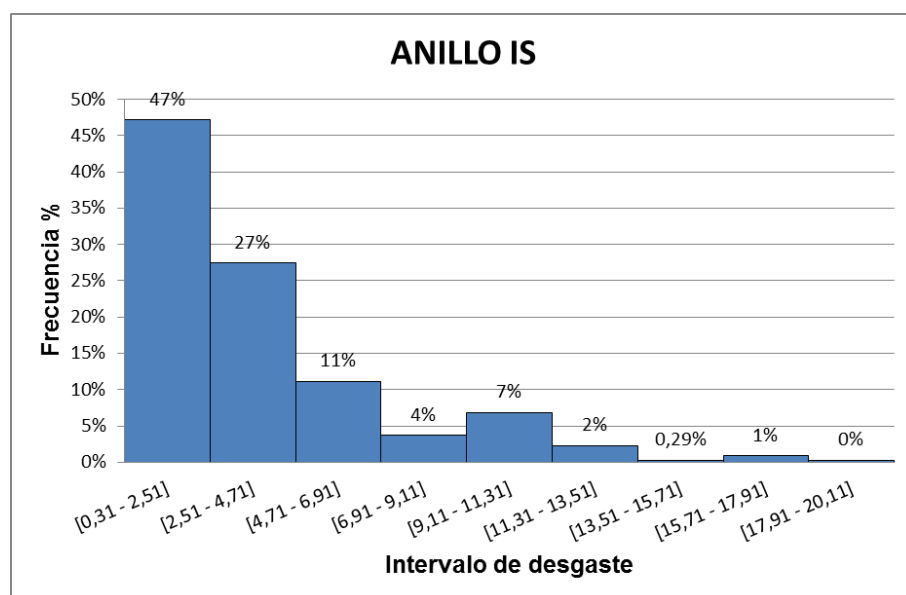


Ilustración 21. Diagrama de frecuencias relativas anillo IS (Fuente propia)

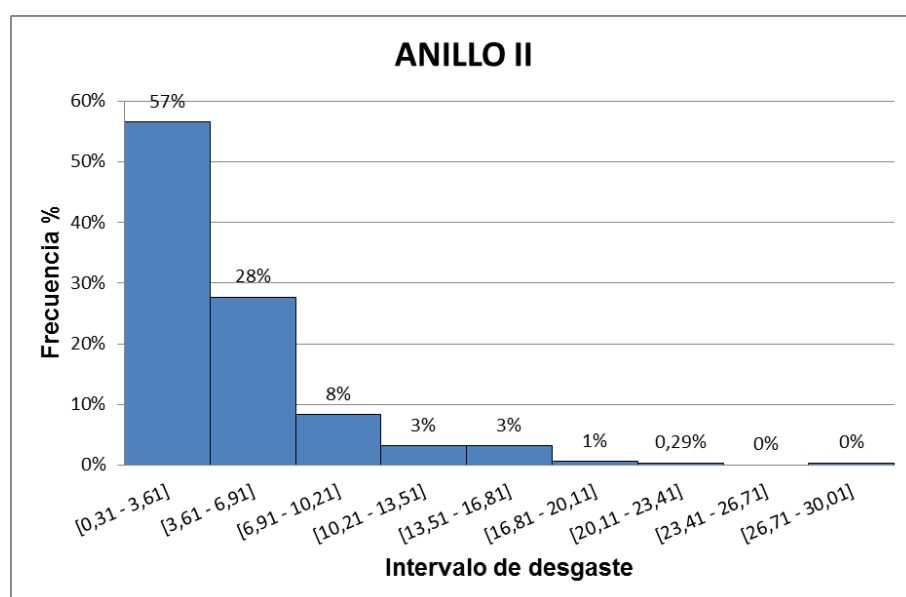


Ilustración 22. Diagrama de frecuencias relativas anillo II (Fuente propia)

El análisis de la Ilustración 20, Ilustración 21 e Ilustración 22 permite diferenciar una mala medición de una buena, o al menos permitirá por el momento plantearse un error en esa escobilla, esto debido a que más del 70% de los desgastes están dentro del rango 0.21 – 5 mm.

2.3.2.3. Generador síncrono Alstom 115 MW, turbina Pelton, 32 escobillas

El fabricante de este generador es Alstom y utiliza 32 escobillas. Las características son las siguientes:

Potencia (MW)	Voltaje en el estator (V)	Voltaje en el rotor (V)	Corriente en el estator (A)	Corriente en el rotor (A)	R.P.M.
115	13800	264	5500	1120	360
No. Anillos	Diámetro de los anillos (mm)	Metal	Ancho del anillo (mm)	Escobillas por anillo	Superficie del anillo
2	900	Acero	50	16	Ranurada
Alto de la escobilla (mm)	Ancho de la escobilla (mm)	Espesor de la escobilla (mm)	Clase	Tipo de resorte	
64	32	25	EG34D	BUNG	

Tabla 10. Características del generador "C" (Fuente propia)

La Ilustración 23 muestra el tamaño de las escobillas durante el año 2015 en el anillo superior y la Ilustración 24 muestra las dimensiones de las escobillas del anillo inferior.

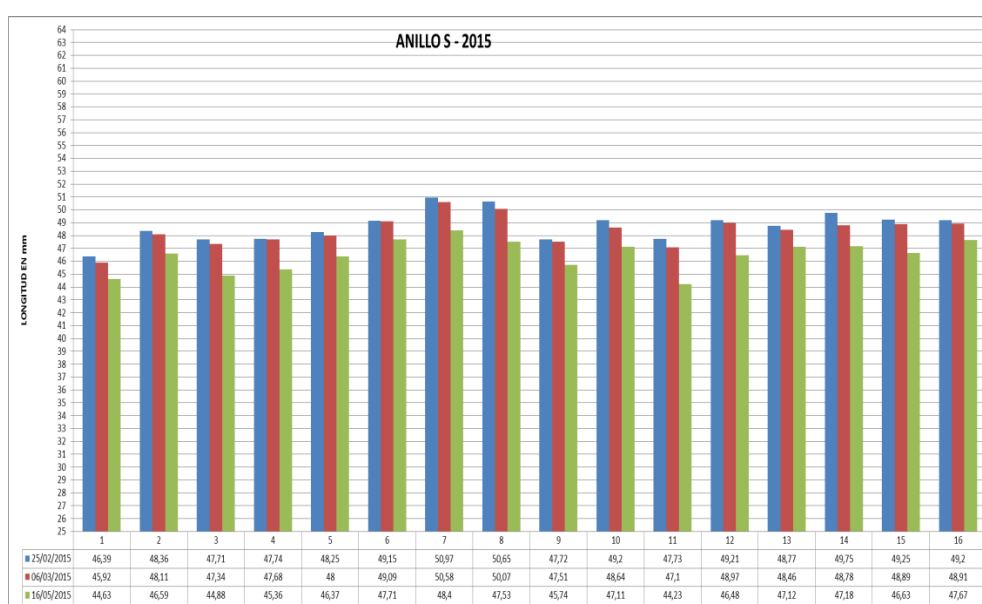


Ilustración 23. Longitud de escobillas anillo S año 2015 (Fuente propia)

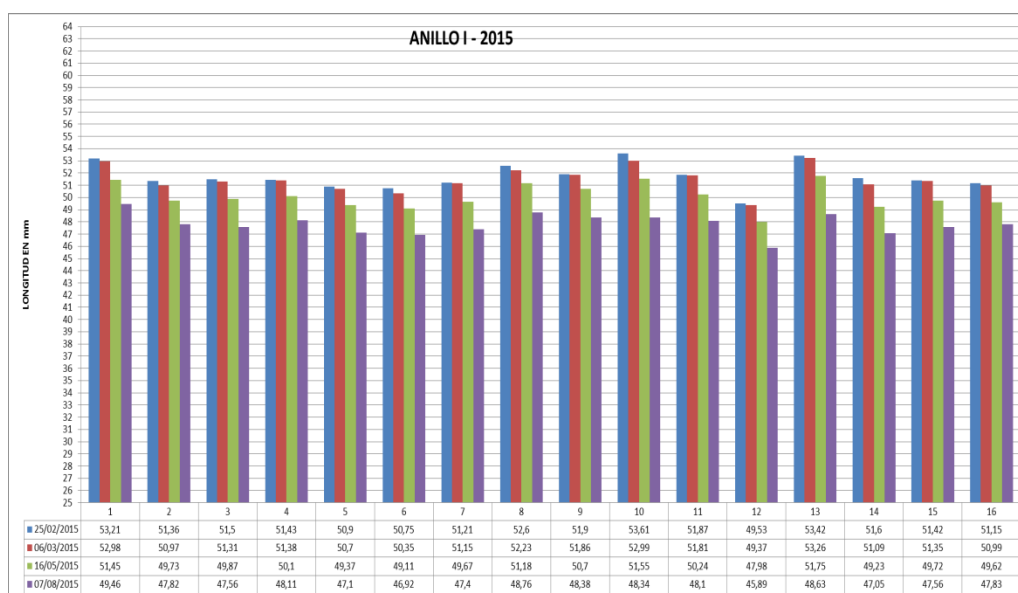


Ilustración 24. Longitud de escobillas anillo I año 2015 (Fuente propia)

Al mirar la Ilustración 24 e Ilustración 25 se nota claramente que el desgaste es uniforme y no existen “picos” de desgaste, esto lo comprobaremos mediante el análisis estadístico.

Análisis estadístico

Una vez más hacemos uso del análisis estadístico para determinar los puntos críticos de desgaste. En el caso del anillo superior en el año 2015 el desgaste máximo es de 2,87 en la escobilla 11 y el mínimo es de 0,06 mm. en las escobillas 4 y 6. Todos los datos podemos verlos en la Tabla 11.

	2015					
					Desgaste (mm)	
	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza	Max	Min
Escobilla 1	1,21	1,29	0,7034	0,4948	1,87	0,47
Escobilla 2	1,10	1,52	0,7361	0,5419	1,53	0,25
Escobilla 3	1,89	2,46	1,3300	1,7689	2,84	0,37
Escobilla 4	1,53	2,21	1,2742	1,6237	2,32	0,06
Escobilla 5	1,15	1,57	0,7800	0,6084	1,63	0,25
Escobilla 6	1,03	1,38	0,8472	0,7177	1,64	0,06
Escobilla 7	1,01	0,46	1,0139	1,0279	2,18	0,39
Escobilla 8	1,92	2,54	1,1616	1,3492	2,64	0,58
Escobilla 9	1,34	1,77	0,9914	0,9829	2,05	0,21
Escobilla 10	1,30	1,53	0,6560	0,4303	1,81	0,56
Escobilla 11	2,12	2,87	1,2933	1,6725	2,87	0,63
Escobilla 12	1,58	2,02	1,1869	1,4086	2,49	0,24
Escobilla 13	1,05	1,34	0,6493	0,4216	1,51	0,31
Escobilla 14	1,50	1,60	0,4922	0,2422	1,94	0,97
Escobilla 15	1,69	2,26	1,1524	1,3281	2,44	0,36
Escobilla 16	1,16	1,24	0,8282	0,6858	1,94	0,29

Tabla 11. Análisis de desgaste anillo Superior 2015 (Fuente propia)

El anillo inferior presenta el máximo desgaste 1.86 mm en la escobilla 14 y el mínimo en la escobilla 9 de 0,04 mm. La Tabla 12 contiene el total de los datos.

	2015					
					Desgaste (mm)	
	Media	Mediana	Des. Estan.	Varianza	Max	Min
Escobilla 1	0,88	0,88	0,9192	0,8450	1,53	0,23
Escobilla 2	0,82	0,82	0,6010	0,3613	1,24	0,39
Escobilla 3	0,82	0,82	0,8839	0,7813	1,44	0,19
Escobilla 4	0,66	0,66	0,8697	0,7565	1,28	0,05
Escobilla 5	0,77	0,77	0,7990	0,6385	1,33	0,20
Escobilla 6	0,82	0,82	0,6940	0,3628	1,24	0,40
Escobilla 7	0,77	0,77	1,0041	1,0082	1,48	0,06
Escobilla 8	0,71	0,71	0,4808	0,2312	1,05	0,37
Escobilla 9	0,60	0,60	0,7920	0,6272	1,16	0,04
Escobilla 10	1,03	1,03	0,5798	0,3362	1,44	0,62
Escobilla 11	0,81	0,81	1,0677	1,1401	1,57	0,06
Escobilla 12	0,78	0,78	0,8697	0,7564	1,39	0,16
Escobilla 13	0,84	0,84	0,9546	0,9112	1,51	0,16
Escobilla 14	1,19	1,19	0,9546	0,9113	1,86	0,51
Escobilla 15	0,85	0,85	1,1031	1,2168	1,63	0,07
Escobilla 16	0,77	0,77	0,8556	0,7321	1,37	0,16

Tabla 12. Análisis de desgaste anillo Inferior 2015 (Fuente propia)

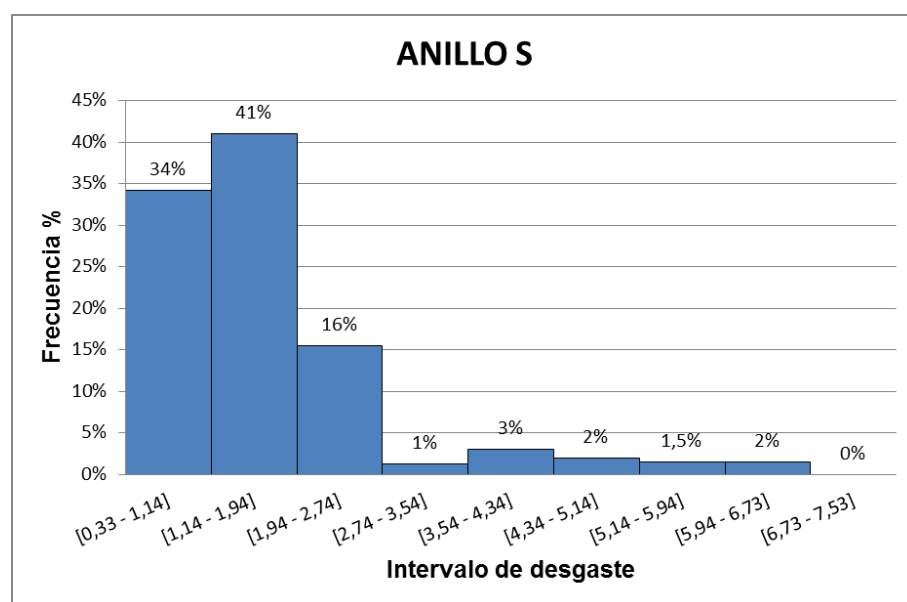


Ilustración 25. Diagrama de frecuencias relativas anillo S (Fuente propia)

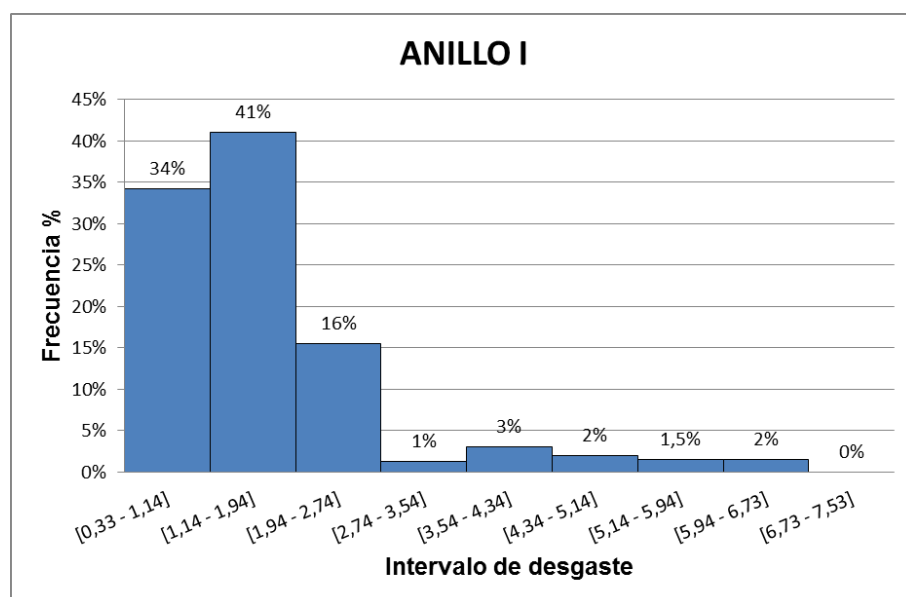


Ilustración 26. Diagrama de frecuencias relativas anillo I (Fuente propia)

La Ilustración 25 e Ilustración 26 muestran claramente que el desgaste en este generador es mínimo comparado con el generador “AB”, más del 70% de los desgastes está dentro del rango 0,33-1,94 mm, esto deja claro que un desgaste fuera de este rango es anormal y será necesario un análisis hasta determinar la causa raíz.

2.3.3. Monitoreo de la condición

La naturaleza del sistema dificulta el monitoreo de todas las condiciones en línea, las escobillas están en continuo desgaste lo que imposibilita colocar sensores de temperatura directamente en la escobilla, tener tres diferentes tipos de porta escobillas hace que la colocación de sistemas de medición en línea este restringida, esta consideración saca una nueva posibilidad de mejora.

Existen parámetros que podrían ser medidos en línea, por lo que es conveniente hacer la clasificación: parámetros medibles en línea y parámetros medibles con máquina parada.

Parámetros medibles	
En línea	Fuera de línea
Densidad de corriente	Tamaño
Humedad ambiental	Presión
Temperatura	Resistencia de aislamiento
Vibraciones	Pátina
Voltaje	Rugosidad
Potencia	
Corriente	

Tabla 13. Parámetros para monitoreo

2.3.3.1. Parámetros medibles en línea

Estas mediciones van a ser tomadas directamente del sistema SCADA (Supervisión, control y adquisición de datos) y serán almacenados un día antes de intervenir en la unidad para un mantenimiento programado.

Densidad de corriente. El dato de la corriente que puede soportar una escobilla viene dado por el fabricante, se debe monitorear que no se exceda este valor. Tomando el valor de corriente que circula por el sistema de excitación dividido entre el número de escobillas obtendremos la densidad de corriente a la que está siendo sometida la escobilla.

Humedad ambiental y temperatura. Como se explicó anteriormente la Patina depende de la cantidad de agua en el ambiente por lo que se debe tener en la empresa un Termo higrómetro para realizar las mediciones.

Vibraciones, Voltaje, Corriente, Potencia. En las centrales hidroeléctricas estos datos son monitoreados en línea por lo que para la implementación de la gestión de mantenimiento se hará uso de estos mismos datos que ya contiene el sistema SCADA.

2.3.3.2. Parámetros medibles fuera de línea

Luego de que la unidad ha sido consignada para mantenimiento y se la hayan colocado las seguridades respectivas, debemos proceder a tomar las mediciones respectivas, utilizando las técnicas descritas en el punto 2.3.1.

Tanto los parámetros medidos en línea cuanto los parámetros medidos fuera de línea están directamente relacionados, y la base de datos debe registrar las fechas exactas de las mediciones.

Tamaño. Se puede obtener la medición con un calibrador milimétrico desde los extremos del carbón como se muestra en la Ilustración 27.



Ilustración 27. Medición de la longitud de una escobilla. (Fuente propia)

Presión. Se utiliza el dinamómetro mostrado en la Ilustración 5 para determinar la presión óptima recomendada por el fabricante. La Ilustración 28 muestra la forma de utilizar el dinamómetro para tomar la medición.



Ilustración 28. Medición de la presión del resorte. (Fuente propia)

Resistencia de aislamiento. Se debe verificar que no exista residuos de carbón que puedan producir un corto circuito, esto se logra con un mega óhmetro el cual verifica los caminos que la corriente puede tomar hacia tierra. La Ilustración 29 muestra una medición realizada en los anillos colectores.



Ilustración 29. Mega óhmetro utilizado para verificar la limpieza y humedad. (Fuente propia)

Rugosidad. Esta medición es muy importante como se ha recalcado a lo largo de este trabajo, si la superficie es demasiado irregular la escobilla se desgastará muy rápidamente y no servirá el análisis estadístico. La Ilustración 30 muestra el momento de la toma de la medición. La Tabla 14 muestra los resultados de las medidas en el generador Siemens de 115MW y la Tabla 15 del generador Alstom de 115 MW.



Ilustración 30. Medición de la rugosidad. (Fuente propia)

ANILLO SUPERIOR (μm)					
MEDICION 0°	MEDICION 90°	MEDICION 180°	MEDICION 360°		
	0,66		0,68	PROMEDIO ANILLO SUPERIOR	0,83
	0,67		1,17	MÁXIMO ANILLO SUPERIOR	1,17
	0,91		0,88	MÍNIMO ANILLO SUPERIOR	0,66
ANILLO INFERIOR (μm)					
MEDICION 0°	MEDICION 90°	MEDICION 180°	MEDICION 360°		
	1,19		0,55	PROMEDIO ANILLO INFERIOR	1,86
	3,98		4,11	MÁXIMO ANILLO INFERIOR	4,11
	0,76		0,58	MÍNIMO ANILLO INFERIOR	0,55

Tabla 14. Medida de rugosidad generador Siemens 115 MW

ANILLO SUPERIOR (μm)					
MEDICION 0°	MEDICION 90°	MEDICION 180°	MEDICION 360°		
			1,91	PROMEDIO ANILLO SUPERIOR	2,19
			2,95	MÁXIMO ANILLO SUPERIOR	2,95
			1,7	MÍNIMO ANILLO SUPERIOR	1,7
ANILLO INFERIOR (μm)					
MEDICION 0°	MEDICION 90°	MEDICION 180°	MEDICION 360°		
			0,94	PROMEDIO ANILLO INFERIOR	1,14
			0,76	MÁXIMO ANILLO INFERIOR	1,71
			1,71	MÍNIMO ANILLO INFERIOR	0,76

Tabla 15. Medida de rugosidad generador Alstom de 115 MW

3. CAPÍTULO 2: RESULTADOS

Esta sección presentará los resultados del análisis de datos, ¿Qué podemos concluir luego del análisis estadístico? ¿Es posible predecir el cambio de las escobillas? ¿Este análisis permite determinar patrones de desgaste anormales? Estas preguntas serán respondidas en esta sección el trabajo.

3.1. Evaluación de la salud

3.1.1. Generador síncrono Alstom 85 MW

El diagrama de frecuencias relativas describe claramente el comportamiento del desgaste. La Ilustración 13 muestra que no existe una tendencia central, más bien todos los desgastes están distribuidos entre 0 y 1,2 mm, en el caso ideal todas las escobillas deberían presentar el mismo desgaste, sin embargo, estamos muy alejados de este tipo de desgaste.

Los cuatro diagramas de frecuencias de las 2 unidades presentan patrones de desgastes sin una tendencia central, por lo que es indispensable hacer un estudio de concentricidad de los anillos colectores, además de implementar un nuevo formato de recolección de datos, que incluya la presión del resorte, temperatura ambiente, humedad, rugosidad, con fin de determinar la causa del desgaste anormal.

3.1.2. Generador síncrono Siemens 115 MW

Esta unidad presenta un desgaste demasiado rápido, más del 50% de los desgastes está dentro del rango 0,21 – 2,71 mm, lo que genera una alarma de desgaste anormal debido a la mala calidad de la escobilla o una alta rugosidad del anillo colector. Se sugiere implementar el formato de recolección de datos del capítulo 4. Es necesario hacer el estudio de la factibilidad de cambiar los anillos colectores por unos ranurados y utilizar los mismos portaescobillas (por lo tanto, escobillas) de los generadores Alstom.

3.1.3. Generador síncrono Alstom 115 MW

Esta unidad presenta un desgaste homogéneo, el 75 % de los desgastes están en el rango de 0,33 – 1,94 mm lo cual es aceptable. Es necesario mejorar en la recolección de datos e implementar mejores técnicas de monitoreo de la condición. También es necesario implementar el nuevo formato.

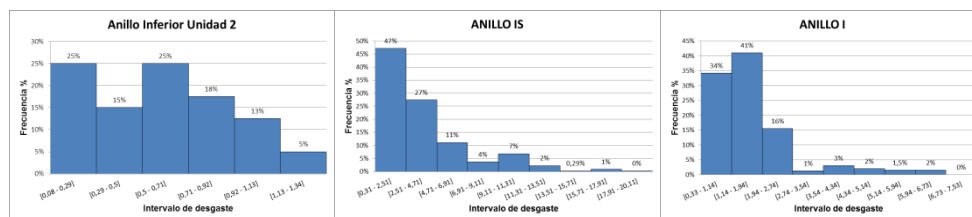


Ilustración 31. Comparación de desgastes (Fuente propia)

La Ilustración 31 muestra los gráficos de frecuencias relativas de tres generadores uno de cada objeto de análisis, es evidente que el grafico de la derecha tiene una tendencia central de desgaste mientras que la primera no presenta un patrón de desgaste lo que deja claro que existe un parámetro que esta fuera de los rangos aceptables y es necesaria una corrección del funcionamiento.

3.2. Predicción

Con base al análisis de datos presentados en los apartados anteriores y con la ayuda del software Microsoft Excel se ha obtenido la ecuación de la curva para cada patrón de desgaste en análisis. Al obtener la ecuación de la curva podremos sustituir las variables y proyectar el desgaste al tiempo que deseemos.

La Ilustración 32 muestra la ecuación de la curva para el desgaste en el año 2012 del generador de 115 MW junto al gráfico de frecuencias acumuladas, las ilustraciones 27 a 30 muestran los gráficos de las curvas de desgaste de los siguientes años.



Ilustración 32. Ecuación de la curva de desgaste 2012 (Fuente propia)

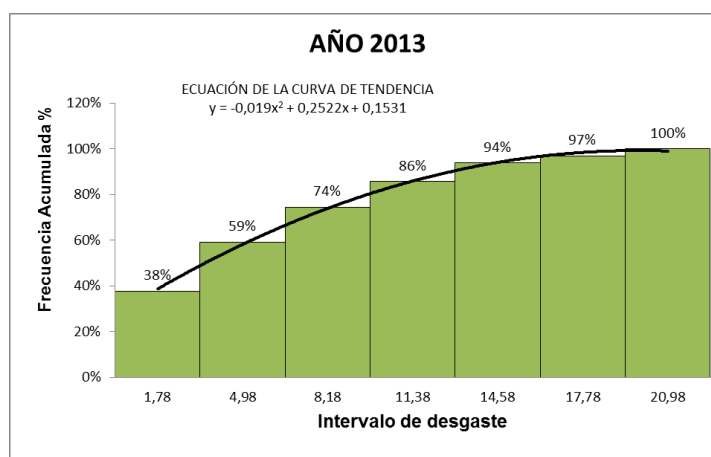


Ilustración 33. Ecuación de la curva de desgaste 2013 (Fuente propia)

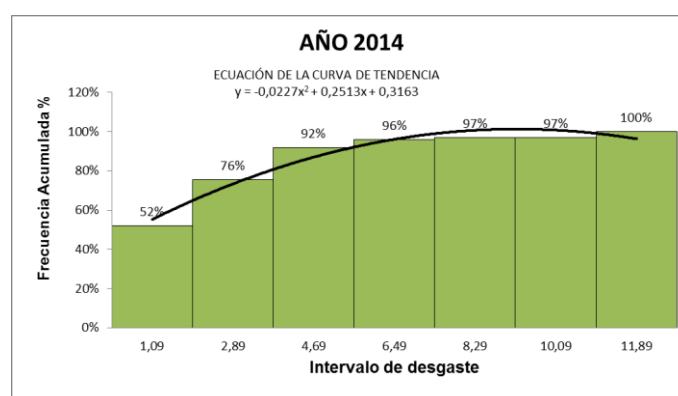


Ilustración 34. Ecuación de la curva de desgaste 2014 (Fuente propia)

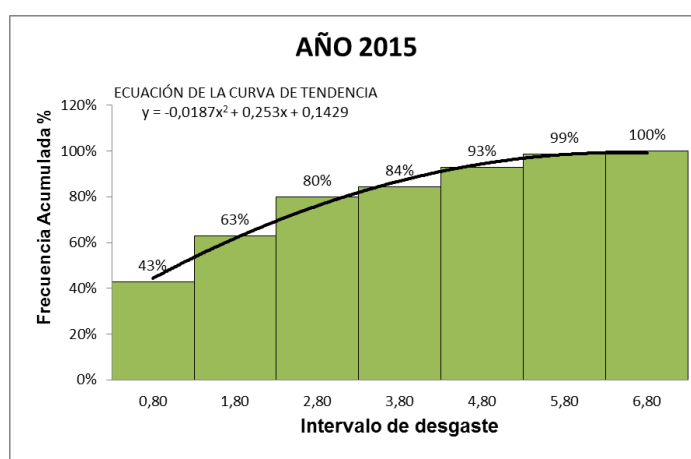


Ilustración 35. Ecuación de la curva de desgaste 2015 (Fuente propia)

A continuación, se obtiene la ecuación de la curva combinando los cuatro años logrando crear una sola curva que describe el desgaste de cada anillo colector. La Ilustración 36 muestra la ecuación de la curva de desgaste del anillo SS.

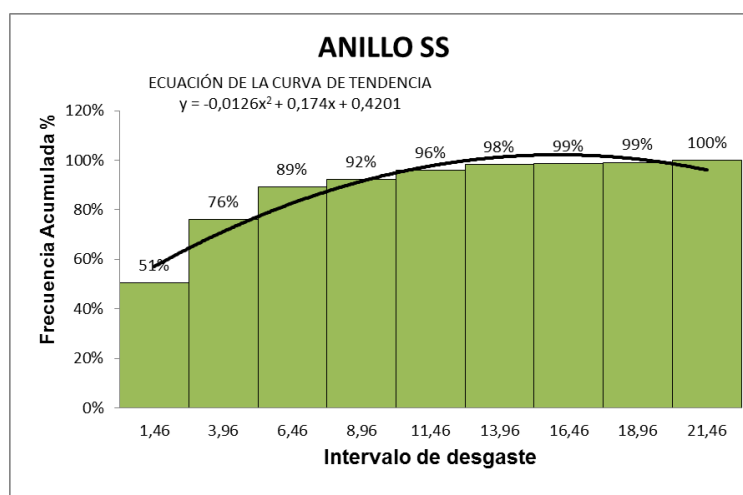


Ilustración 36. Ecuación de la curva de desgaste del anillo SS. (Fuente propia)

En la Ilustración 37 se observa el resultado de combinar las ecuaciones de las curvas de desgaste de los cuatro años anteriores.

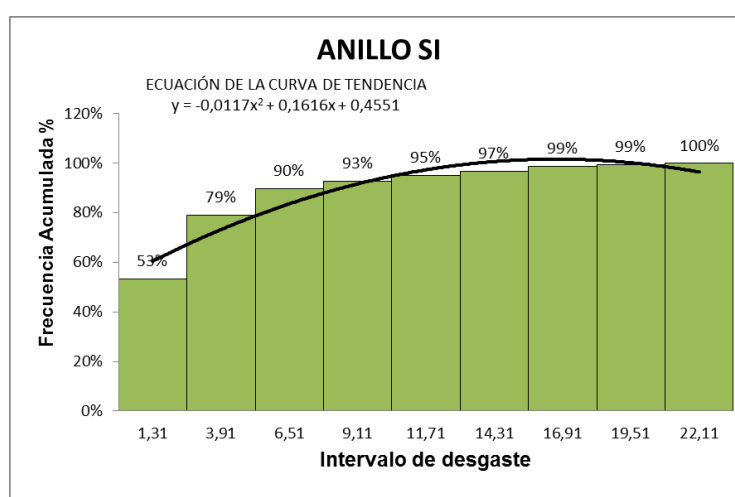


Ilustración 37. Ecuación de la curva de desgaste del anillo SI. (Fuente propia)

La Ilustración 38 e Ilustración 39 muestran la gráfica de las ecuaciones de desgaste del anillo inferior (II, IS).

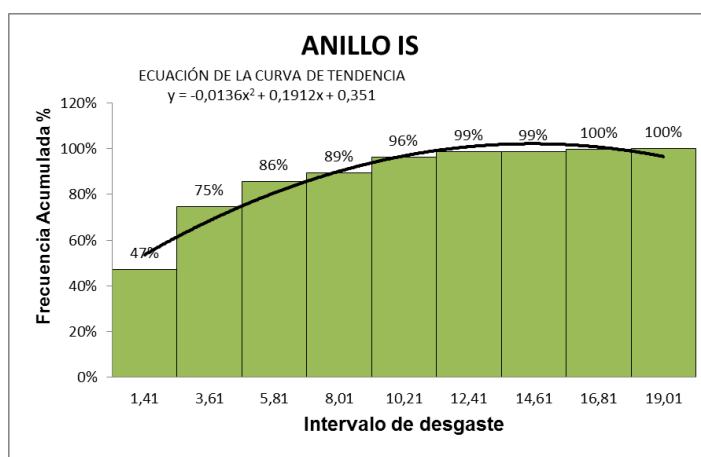


Ilustración 38. Ecuación de la curva de desgaste del anillo IS. (Fuente propia)

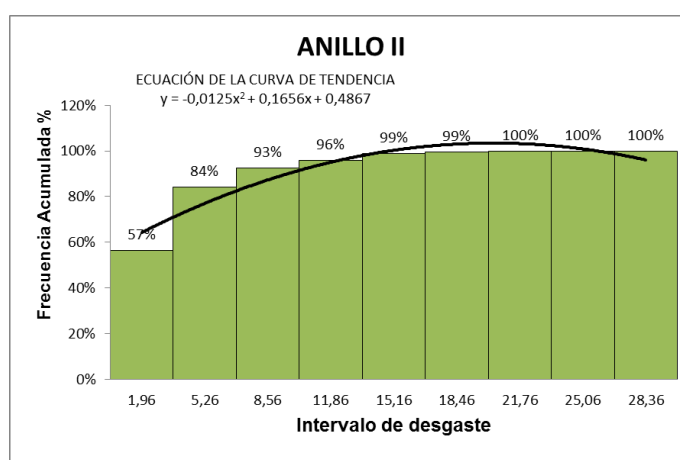


Ilustración 39. Ecuación de la curva de desgaste del anillo II. (Fuente propia)

A continuación, se presentan los datos del generador de 85 MW. En la Ilustración 40 e Ilustración 41 observamos la ecuación de la curva de desgaste del anillo inferior y superior.

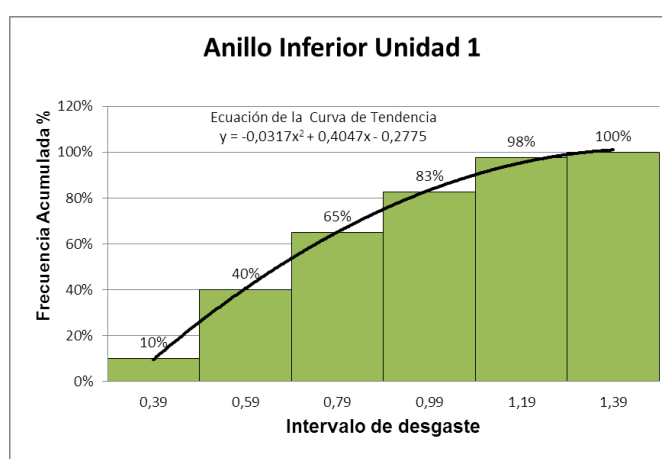


Ilustración 40. Ecuación de la curva de desgaste del anillo inferior 85 MW. (Fuente propia)

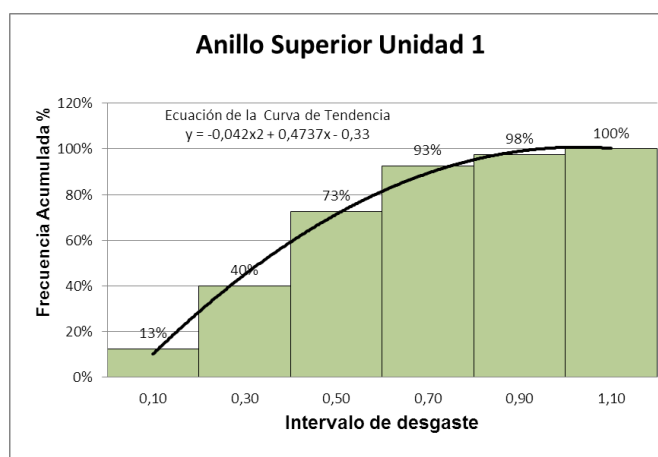


Ilustración 41. Ecuación de la curva de desgaste del anillo superior 85 MW. (Fuente propia)

El siguiente paso es usar estas ecuaciones para la predicción de desgaste en cada generador y cada anillo, esta predicción permitirá saber en qué tiempo debemos cambiar una escobilla y por lo tanto determinará el tiempo de intervención en el sistema (uno de los objetivos de este trabajo). La Tabla 16 presenta los datos de proyección de desgaste para los siguientes meses en el anillo SS del generador de 115 MW.

MEDICIÓN DE ESCOBILLAS (mm)													ERROR (mm)
2015													
21/02/2015	07/03/2015	24/04/2015	14/05/2015	20/06/2015	08/08/2015	08/08/2015	08/09/2015	08/10/2015	08/11/2015	08/12/2015	01/01/2016		
Escobilla N°													
1	38,99	38,76	38,47	38,20	37,18	38,50	34,66	32,14	29,62	27,10	24,59	22,07	3,84
2	42,07	42,02	39,02	38,02	36,71	33,50	34,36	32,01	29,67	27,32	24,97	22,62	0,86
3	41,27	40,15	35,43	33,38	30,49	24,20	26,54	46,05	46,05	42,09	38,14	34,19	2,34
4	45,30	44,04	40,57	39,20	36,33	31,08	30,95	25,57	20,19	14,81	44,62	39,24	0,13
5	46,33	46,31	43,15	43,02	40,45	35,76	39,32	38,19	37,06	35,93	34,80	33,67	3,56
6	33,02	33,02	30,14	28,84	48,36	42,54	42,97	37,59	32,20	26,81	21,43	16,04	0,43
7	46,40	46,34	44,90	44,28	43,47	43,16	42,28	41,10	39,91	38,72	37,54	36,35	0,88
8	46,25	45,70	40,41	38,39	36,19	30,91	32,48	28,77	25,06	21,34	17,63	46,29	1,57
9	45,16	42,49	39,32	35,11	32,04	25,63	27,90	45,86	41,72	37,58	33,44	29,30	2,27
10	35,62	34,03	30,37	28,67	47,34	45,24	41,56	35,78	30,00	24,22	18,44	12,66	3,68
11	31,64	30,93	29,72	29,11	48,22	46,01	43,91	39,59	35,28	30,97	26,65	22,34	2,10
12	34,16	34,16	34,16	33,04	31,35	25,41	26,86	45,51	41,03	36,54	32,06	27,57	1,45
13	46,47	45,58	41,10	40,00	38,05	31,99	34,02	29,99	25,95	45,97	41,94	37,90	2,03
14	46,10	45,90	45,21	45,02	42,13	42,09	38,62	35,11	31,60	28,09	46,49	42,98	3,47
PROMEDIO DE ERROR													2,04

Tabla 16. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo SS. (Fuente propia)

En la Tabla 16 se puede observar con relleno rojo los valores proyectados que determinan un cambio de escobilla porque el desgaste va a superar el límite permitido, tendremos un total de 9 escobillas cambiadas hasta enero de 2016.

La Tabla 17 presenta la proyección de desgaste del anillo SI, observamos que para enero de 2016 se deberá cambiar 9 escobillas.

		MEDICIÓN DE ESCOBILLAS (mm)												ERROR (mm)
		2015												
Escobilla N°		21/02/2015	07/03/2015	24/04/2015	14/05/2015	20/06/2015	08/08/2015	08/08/2015	08/09/2015	08/10/2015	08/11/2015	08/12/2015	01/01/2016	
1		43,12	42,38	41,76	41,76	40,70	40,42	39,12	37,54	35,95	34,37	32,79	31,21	1,30
2		31,44	30,60	28,61	26,75	48,00	41,42	44,15	40,30	36,45	32,60	28,75	24,90	2,73
3		31,56	30,08	27,90	26,34	47,39	41,63	43,23	39,06	34,90	30,73	26,57	45,84	1,60
4		38,86	37,04	33,18	31,09	28,59	24,40	23,62	45,03	40,06	35,09	30,12	25,15	0,78
5		47,61	47,34	43,95	43,69	42,43	42,02	39,81	37,19	34,58	31,96	29,34	26,72	2,21
6		36,84	35,11	32,20	30,27	27,91	27,41	24,81	46,90	43,80	40,70	37,60	34,50	2,60
7		48,50	47,84	45,02	44,03	44,01	43,52	42,04	40,07	38,10	36,13	34,15	32,18	1,48
8		38,86	38,34	34,26	33,38	30,23	23,39	26,48	46,17	46,17	42,33	38,50	34,67	3,01
9		46,56	45,34	43,39	39,93	37,01	30,47	31,64	26,28	20,91	15,55	44,63	39,27	1,17
10		36,04	32,25	28,16	48,53	48,14	44,43	42,81	37,49	32,16	26,84	44,67	39,35	1,62
11		32,88	32,30	30,84	30,76	29,50	28,54	26,18	22,86	19,54	46,68	43,36	40,04	2,36
12		33,67	33,24	31,32	30,65	29,66	27,66	26,66	23,65	20,65	47,00	43,99	40,99	1,00
13		32,13	30,91	26,76	25,43	48,53	47,13	44,95	41,36	37,78	34,20	30,61	27,03	2,18
14		44,90	44,46	43,19	42,63	42,44	41,43	38,30	34,15	30,01	25,87	45,86	41,71	3,13
		PROMEDIO DE ERROR												1,94

Tabla 17. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo SI. (Fuente propia)

		MEDICIÓN DE ESCOBILLAS (mm)												ERROR (mm)
		2015												
		21/02/2015	07/03/2015	24/04/2015	14/05/2015	20/06/2015	08/08/2015	08/08/2015	08/09/2015	08/10/2015	08/11/2015	08/12/2015	01/01/2016	
Escobilla N°														
1		48,40	47,80	47,60	47,20	46,10	45,95	45,67	45,24	44,81	44,38	43,95	43,52	0,28
2		41,99	38,92	35,08	31,94	31,27	30,40	30,11	28,95	27,79	48,84	47,68	46,52	0,29
3		39,76	37,06	26,36	50,15	49,20	45,14	45,14	41,08	37,02	32,96	28,90	24,84	0,00
4		46,34	46,27	45,72	44,80	44,20	44,01	42,21	40,22	38,23	36,24	34,25	32,26	1,80
5		37,71	37,49	33,76	31,22	28,90	26,21	26,40	23,90	47,50	45,00	42,50	40,00	0,19
6		32,16	30,33	25,28	22,78	43,93	43,75	40,29	36,65	33,01	29,37	25,73	46,36	3,46
7		36,32	35,34	34,59	31,92	30,89	30,38	29,24	27,59	25,94	24,29	48,35	46,70	1,14
8		27,66	48,39	45,87	45,32	44,28	41,93	41,76	39,24	36,72	34,20	31,68	29,16	0,17
9		44,39	42,49	36,04	32,80	30,10	27,37	26,91	23,72	46,81	43,62	40,43	37,24	0,46
10		27,44	49,20	48,02	47,53	47,14	45,56	45,32	43,50	41,68	39,86	38,04	36,22	0,24
11		31,20	29,31	21,53	49,56	48,73	45,04	44,43	40,13	35,83	31,53	27,23	45,70	0,61
12		28,30	48,49	44,81	43,19	41,49	37,68	38,50	35,51	32,52	29,53	26,54	23,55	0,82
13		44,18	42,38	34,60	31,61	28,89	25,28	27,32	48,43	46,86	45,29	43,72	42,15	2,04
14		34,74	31,70	24,90	50,92	50,58	48,75	45,99	41,40	36,81	32,22	27,63	45,41	2,76
		PROMEDIO DE ERROR												1,02

Tabla 18. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo IS. (Fuente propia)

		MEDICIÓN DE ESCOBILLAS (mm)												ERROR (mm)		
		2015														
		21/02/2015	07/03/2015	24/04/2015	14/05/2015	20/06/2015	08/08/2015	08/08/2015	08/09/2015	08/10/2015	08/11/2015	08/12/2015	01/01/2016			
Escobilla N°		1	37,84	37,77	37,41	35,29	32,01	27,75	29,73	27,45	25,17	47,72	45,44	43,16	1,98	
		2	43,20	41,54	40,44	35,75	31,48	35,45	28,75	26,01	47,27	44,53	41,80	39,06	6,70	
		3	41,17	35,09	28,57	24,57	47,31	43,72	40,52	33,74	26,95	43,21	36,43	43,21	3,20	
		4	34,66	34,41	33,91	32,80	31,81	28,25	28,18	24,55	46,37	42,74	46,37	42,74	0,07	
		5	29,96	48,51	42,70	40,57	38,59	32,90	33,21	27,83	44,62	39,24	44,62	39,24	0,31	
		6	44,31	43,60	42,51	41,50	41,11	41,78	38,14	35,17	32,20	29,23	26,26	47,03	3,64	
		7	29,04	49,75	43,65	42,06	36,91	32,71	30,89	24,88	43,98	37,97	31,95	25,94	1,82	
		8	34,64	33,87	31,00	29,04	47,75	43,64	43,85	39,95	36,05	32,15	28,25	24,35	0,21	
		9	27,64	48,57	44,69	43,23	41,81	40,66	39,05	36,29	33,54	30,78	28,02	25,26	1,61	
		10	46,42	45,57	41,15	37,58	35,40	30,37	31,08	26,76	45,68	41,36	45,68	41,36	0,71	
		11	29,67	28,65	26,64	25,97	48,23	46,61	45,26	42,30	39,33	36,37	33,40	30,44	1,35	
		12	27,12	48,08	46,53	46,12	45,23	43,93	42,40	39,56	36,73	33,89	31,06	28,23	1,53	
		13	45,27	43,73	39,56	36,69	34,56	30,77	29,83	25,10	45,27	40,54	35,81	31,08	0,94	
		14	21,11	47,78	41,25	38,81	34,72	28,56	28,91	23,09	44,19	38,37	32,56	26,75	0,35	
		PROMEDIO DE ERROR														1,74

Tabla 19. Proyección de desgaste hasta enero de 2016 anillo II. (Fuente propia)

La Tabla 18 y Tabla 19 presentan la proyección de desgaste de los anillos inferiores se observa que el anillo IS necesitará cambiar 9 escobillas mientras que el anillo II se deberá cambiar 13 escobillas.

Con estos valores obtenidos podemos proyectar a 10 años y definir las escobillas necesarias en stock para garantizar el correcto funcionamiento de las unidades. La Tabla 20 presenta en resumen de la proyección del anillo SS.

La Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23 muestran el resumen de proyección de los anillos SI, IS e II.

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	2,52	10	6728	11,8	15
Escobilla 2	2,35	11	8971	12,6	14
Escobilla 3	3,95	6	6728	13,7	23
Escobilla 4	5,38	5	8971	12,4	31
Escobilla 5	1,13	22	13457	12,2	7
Escobilla 6	5,39	5	4486	14,3	31
Escobilla 7	1,19	21	8971	12,2	7
Escobilla 8	3,71	7	6728	13,4	21
Escobilla 9	4,14	6	6728	12,4	24
Escobilla 10	5,78	4	4486	11,2	33
Escobilla 11	4,31	6	5383	12,5	25
Escobilla 12	4,49	6	6728	11,4	26
Escobilla 13	4,03	6	6728	11,8	23
Escobilla 14	3,51	7	6728	13,3	20
PROMEDIO	3,71	8,65	7273	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					299

Tabla 20. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo SS. (Fuente propia)

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	1,58	16	8971	19,5	9
Escobilla 2	3,85	6	6728	14,2	22
Escobilla 3	4,16	6	8971	12,7	24
Escobilla 4	4,97	5	6728	11,5	29
Escobilla 5	2,62	10	8971	11,9	15
Escobilla 6	3,10	8	6728	15,3	18
Escobilla 7	1,97	13	8971	11,5	11
Escobilla 8	3,83	7	8971	10,6	22
Escobilla 9	5,37	5	13457	10,2	31
Escobilla 10	5,33	5	13457	10,8	31
Escobilla 11	3,32	8	5383	11,2	19
Escobilla 12	3,00	8	8971	11,1	17
Escobilla 13	3,58	7	8971	13,2	21
Escobilla 14	4,14	6	5383	11,8	24
PROMEDIO	3,63	7,74	8619	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					293

Tabla 21. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo SI. (Fuente propia)

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	0,43	58	6728	12,4	2
Escobilla 2	1,16	22	8971	12,9	7
Escobilla 3	4,06	6	3364	12,8	23
Escobilla 4	1,99	13	5383	9,1	11
Escobilla 5	2,50	10	5383	14,3	14
Escobilla 6	3,64	7	6728	10,2	21
Escobilla 7	1,65	15	8971	11,3	10
Escobilla 8	2,52	10	8971	13,7	15
Escobilla 9	3,19	8	5383	12,2	18
Escobilla 10	1,82	14	6728	9,2	10
Escobilla 11	4,30	6	4486	13,2	25
Escobilla 12	2,99	8	5383	11,4	17
Escobilla 13	1,57	16	8971	10,2	9
Escobilla 14	4,59	5	4486	10,50	26
PROMEDIO	2,60	14,11	6424	12	
TOTAL DE ESCOBILLAS					210

Tabla 22. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo IS. (Fuente propia)

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	2,28	11	8971	13,2	13
Escobilla 2	2,73	9	6728	12,3	16
Escobilla 3	6,79	4	3845	13,2	39
Escobilla 4	3,63	7	6728	12,6	21
Escobilla 5	5,38	5	4486	13,4	31
Escobilla 6	2,97	8	6728	13,3	17
Escobilla 7	6,02	4	4486	12,4	35
Escobilla 8	3,90	6	4486	14,3	22
Escobilla 9	2,76	9	6728	10,9	16
Escobilla 10	4,32	6	6728	12,6	25
Escobilla 11	2,97	8	5383	12,3	17
Escobilla 12	2,83	9	5383	12,6	16
Escobilla 13	4,73	5	5383	13,2	27
Escobilla 14	5,81	4	4486	12,5	33
PROMEDIO	4,08	6,86	5753	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					329

Tabla 23. Resumen de proyección de desgaste en escobillas a 10 años de anillo II. (Fuente propia)

Los resultados obtenidos son la base del nuevo plan de mantenimiento de cada unidad de generación, tenemos que para 10 años en el anillo SS del generador de 115 MW necesitaremos 299 escobillas para el anillo SI 293 mientras que para los anillos inferiores 210 y 329 respectivamente. Otro dato base que se desprende de este análisis son las horas de operación promedio de intervención en el sistema para el anillo SS son 7273 horas mientras que para el anillo II son 5753 horas de funcionamiento, estos datos de proyección serán usados para definir en este capítulo de este trabajo el nuevo plan de mantenimiento.

4. CAPITULO 3: DISCUSIÓN

4.1. Toma de decisiones

Luego de haber obtenido los resultados del análisis de desgaste de las escobillas es necesario tomar las decisiones respecto al mantenimiento del sistema de escobillas, recalcando que estas decisiones no serán tomadas únicamente con base en el análisis estadístico, si no que el otro pilar será las recomendaciones del fabricante, a saber: rugosidad, temperatura, presión, material de la escobilla, entre otros descritos en el capítulo 2 de este trabajo.

4.2. Gestión del mantenimiento

La propuesta de gestión del mantenimiento para los generadores síncronos tiene por objetivo disminuir al mínimo las intervenciones en los sistemas lo que elevará al máximo la disponibilidad de los sistemas, al monitorear el estado del sistema midiendo los parámetros:

- **Mecánicos:**
Coeficiente de frotamiento, Rugosidad de anillos, Vibraciones, Presión, Guiado, Disposición de las escobillas, Dureza del anillo colector, Dureza del carbón.
- **Eléctricos:**

Caída de tensión, Conmutación, Distribución de corriente, Densidad de corriente, Resistividad.

- Fisicoquímicos:
Humedad relativa, temperatura, pátina, polvos, vapores, aceites, granulometría.

Lograremos incrementar la confiabilidad del sistema de escobillas en los generadores síncronos.

4.2.1. Mantenimiento preventivo vs. mantenimiento basado en la condición en el sistema de anillos rozantes.

Mayoritariamente las empresas generadoras que utilizan generadores síncronos aplican un mantenimiento preventivo basado en el tiempo, este puede ser tiempo calendario o por horas de operación, la Ilustración 42 ilustra los dos métodos mencionados.

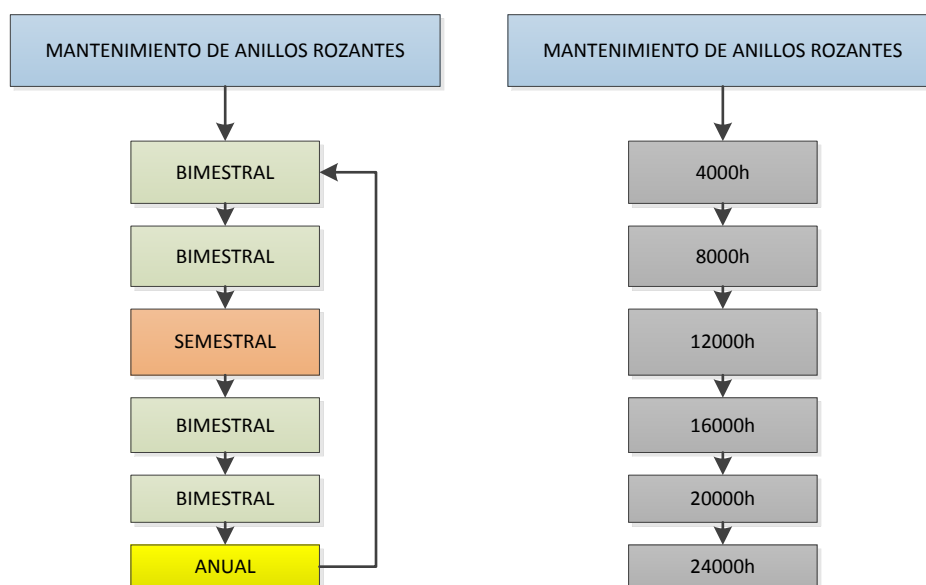


Ilustración 42. Tipos de mantenimiento preventivo (Fuente propia)

El primer método realiza intervenciones basado en tiempo calendario cada intervención bimestral utiliza un máximo de 6 horas, para los mantenimientos semestrales la unidad de generación debe ser consignada por 3 días y las actividades de mantenimiento anual requieren 6 días de trabajos lo que da un total de 4 intervenciones por mantenimiento bimestral y una intervención para mantenimiento semestral y anual respectivamente sumando 240 horas de indisponibilidad por unidad cada año sin tomar en cuenta las paradas forzadas.

El segundo método toma en cuenta las horas de operación de las unidades lo que impide saber una fecha exacta de intervención, las horas de operación estarán ligadas al despacho económico de las unidades de generación que realice el ente regulador, para el caso ecuatoriano es el CENACE. El tiempo medio entre mantenimiento dependerá de la

naturaleza de la central de generación, es decir, si la central es pequeña (menor a 100 MW) el sistema nacional se verá afectado por la ausencia de las unidades de generación, caso contrario si la central es grande (mayor a 750 MW) su salida de la red afectará directamente al sistema nacional interconectado.

Por lo tanto, esta estrategia deja muchas incertidumbres a la hora de planificar un mantenimiento preventivo esto debido a que todos los elementos de las unidades no se desgastan a la misma velocidad.

El mantenimiento basado en la condición utiliza el análisis de las curvas de tendencia, el monitoreo constante y las proyecciones para realizar las actividades de mantenimiento con el fin de alargar al máximo las horas de operación sin poner el riesgo la integridad de los activos. Esto se logra determinando el máximo, mínimo, alarmas y tendencias de los escenarios posibles dentro del sistema.

La Ilustración 43 muestra la curva de degradación, en la base se encuentra la condición normal o inicial a medida que pasa el tiempo la condición varía, es ahí donde se utiliza las alarmas, antes de llegar a la condición de peligro actúa la alarma “protección” que evitará el daño permanente de los equipos. Esta condición logra llegar al límite del tiempo de operación del equipo.

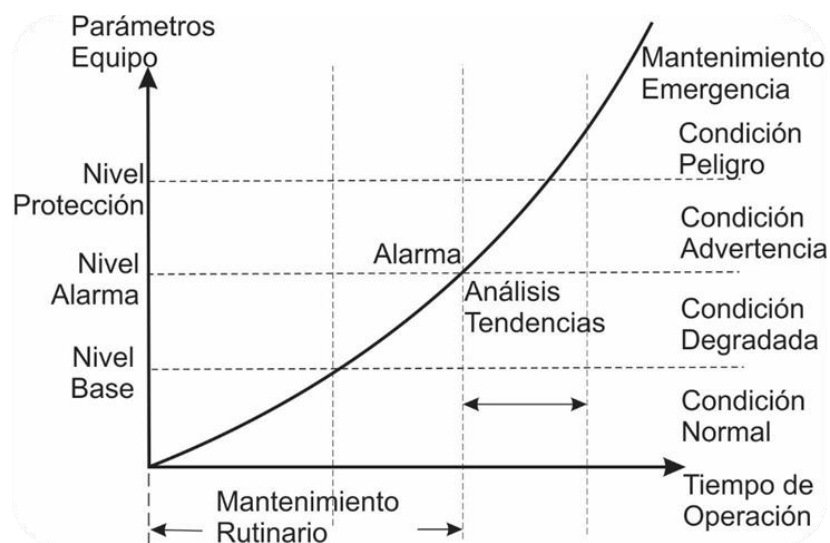


Ilustración 43. Curva de degradación de condición (MBC Ing. Cristian García)

4.3. Presentación

Esta sección final presenta la integración de los resultados obtenidos en los puntos anteriores, recomendaciones del fabricante adaptadas a las situaciones nuestras y las técnicas de mantenimiento basado en condición.

4.3.1. Gestión de mantenimiento en generadores síncronos

A lo largo de este trabajo se ha evidenciado que existen diversos factores que influyen a la hora de definir cuál es el tiempo óptimo de intervención en el sistema de anillos, primero consideremos el patrón de desgaste.

La Tabla 24 muestra el resumen para el generador síncrono de 56 escobillas, el mayor desgaste se da en la escobilla número 10 del anillo superior-superior, la tendencia es de 5,78 mm por mes, considerando el límite de seguridad de desgaste por escobilla nos da un tiempo promedio de vida de 4 meses.

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	2,52	10	6728	11,8	15
Escobilla 2	2,35	11	8971	12,6	14
Escobilla 3	3,95	6	6728	13,7	23
Escobilla 4	5,38	5	8971	12,4	31
Escobilla 5	1,13	22	13457	12,2	7
Escobilla 6	5,39	5	4486	14,3	31
Escobilla 7	1,19	21	8971	12,2	7
Escobilla 8	3,71	7	6728	13,4	21
Escobilla 9	4,14	6	6728	12,4	24
Escobilla 10	5,78	4	4486	11,2	33
Escobilla 11	4,31	6	5383	12,5	25
Escobilla 12	4,49	6	6728	11,4	26
Escobilla 13	4,03	6	6728	11,8	23
Escobilla 14	3,51	7	6728	13,3	20
PROMEDIO	3,71	8,65	7273	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					299

Tabla 24. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo SS (Fuente propia)

La Tabla 25 muestra la tabla resumen del generador síncrono de 56 escobillas, el mayor desgaste se da en la escobilla número 9 del anillo superior-inferior, la tendencia es de 5,37 mm por mes, considerando el límite de seguridad de desgaste por escobilla nos da un tiempo promedio de vida de 5 meses.

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	1,58	16	8971	19,5	9
Escobilla 2	3,85	6	6728	14,2	22
Escobilla 3	4,16	6	8971	12,7	24
Escobilla 4	4,97	5	6728	11,5	29
Escobilla 5	2,62	10	8971	11,9	15
Escobilla 6	3,10	8	6728	15,3	18
Escobilla 7	1,97	13	8971	11,5	11
Escobilla 8	3,83	7	8971	10,6	22
Escobilla 9	5,37	5	13457	10,2	31
Escobilla 10	5,33	5	13457	10,8	31
Escobilla 11	3,32	8	5383	11,2	19
Escobilla 12	3,00	8	8971	11,1	17
Escobilla 13	3,58	7	8971	13,2	21
Escobilla 14	4,14	6	5383	11,8	24
PROMEDIO	3,63	7,74	8619	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					293

Tabla 25. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo SI (Fuente propia)

La Tabla 26 muestra la tabla resumen del generador síncrono de 56 escobillas, el mayor desgaste se da en la escobilla número 14 del anillo inferior-superior, la tendencia es de 4,59

mm por mes, considerando el límite de seguridad de desgaste por escobilla nos da un tiempo promedio de vida de 5 meses.

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	0,43	58	6728	12,4	2
Escobilla 2	1,16	22	8971	12,9	7
Escobilla 3	4,06	6	3364	12,8	23
Escobilla 4	1,99	13	5383	9,1	11
Escobilla 5	2,50	10	5383	14,3	14
Escobilla 6	3,64	7	6728	10,2	21
Escobilla 7	1,65	15	8971	11,3	10
Escobilla 8	2,52	10	8971	13,7	15
Escobilla 9	3,19	8	5383	12,2	18
Escobilla 10	1,82	14	6728	9,2	10
Escobilla 11	4,30	6	4486	13,2	25
Escobilla 12	2,99	8	5383	11,4	17
Escobilla 13	1,57	16	8971	10,2	9
Escobilla 14	4,59	5	4486	10,50	26
PROMEDIO	2,60	14,11	6424	12	
TOTAL DE ESCOBILLAS					210

Tabla 26. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo IS (Fuente propia)

La Tabla 27 muestra la tabla resumen del generador síncrono de 56 escobillas, el mayor desgaste se da en la escobilla número 3 del anillo inferior-inferior, la tendencia es de 6,79 mm por mes, considerando el límite de seguridad de desgaste por escobilla nos da un tiempo promedio de vida de 4 meses.

N°	TENDENCIA DE DESGASTE MENSUAL (mm)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (MESES)	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA ÚTIL (HORAS DE OPERACIÓN)	FUERZA MEDIDA ESCOBILLAS (N)	TOTAL PROYECCIÓN DE ESCOBILLAS (10 AÑOS)
Escobilla 1	2,28	11	8971	13,2	13
Escobilla 2	2,73	9	6728	12,3	16
Escobilla 3	6,79	4	3845	13,2	39
Escobilla 4	3,63	7	6728	12,6	21
Escobilla 5	5,38	5	4486	13,4	31
Escobilla 6	2,97	8	6728	13,3	17
Escobilla 7	6,02	4	4486	12,4	35
Escobilla 8	3,90	6	4486	14,3	22
Escobilla 9	2,76	9	6728	10,9	16
Escobilla 10	4,32	6	6728	12,6	25
Escobilla 11	2,97	8	5383	12,3	17
Escobilla 12	2,83	9	5383	12,6	16
Escobilla 13	4,73	5	5383	13,2	27
Escobilla 14	5,81	4	4486	12,5	33
PROMEDIO	4,08	6,86	5753	13	
TOTAL DE ESCOBILLAS					329

Tabla 27. Resumen de desgaste en las escobillas del anillo II (Fuente propia)

En las condiciones actuales y solamente tomando en cuenta el desgaste de las escobillas será necesaria una intervención cada 4 meses para realizar el cambio y limpieza. ¿Se podría aumentar este tiempo? Por supuesto que sí, este tiempo fue tomado en las condiciones actuales, pero como se explicó en los capítulos iniciales existen parámetros indispensables que deben ser monitoreados y corregidos. Para obtener el mínimo desgaste de las escobillas y por lo tanto el mayor tiempo de operación entre desgastes debemos tomar en cuenta:

La pátina es considerada la epidermis de los anillos por lo tanto siempre debe existir y debe ser monitoreada esto permitirá una fricción moderada, y baja temperatura en el anillo. (MERSEN, 2010)

La rugosidad la superficie del anillo no debe estar ni muy lisa tampoco presentar demasiadas irregularidades para anillos de acero debe estar entre 0.75 to 1.25 μm . (Groupe CARBONE LORRAINE, 2005) De las mediciones realizadas en el mismo generador síncrono se obtuvo que el anillo inferior presente medidas de 4,11 μm , lo que corresponde al desgaste excesivo presentado en la escobilla 3 del anillo inferior-inferior. La Ilustración 44 muestra el equipo con el que se midió la rugosidad.



Ilustración 44. Medición de rugosidad en los anillos colectores (Ing. Mec. Fabricio Gallardo)

Presión del resorte La presión debe ser suficiente para asegurar un contacto bueno y continuo de la escobilla con el anillo. Las pérdidas mecánicas, temperatura y desgaste incrementan con la presión.

De hecho, toda ruptura del contacto de la escobilla con el anillo es la causa de chispas bajo la escobilla. Estas chispas causan daños al anillo y un desgaste rápido de la escobilla. (MERSEN, 2010)

La presión máxima dependerá del material de la escobilla para el caso de los generadores síncronos los rangos recomendados son 17.5-20 kPa.

Temperatura una temperatura elevada provocará un ambiente seco perjudicando a la Pátina, un ambiente húmedo provocará que la pátina sea demasiada espesa por lo que se debe respetar las recomendaciones del fabricante, entre 45 y 70 °C.

La Ilustración 45 muestra el diagrama de flujo de la gestión del mantenimiento basado en MBC en el sistema de anillos rozantes de un generador síncrono.

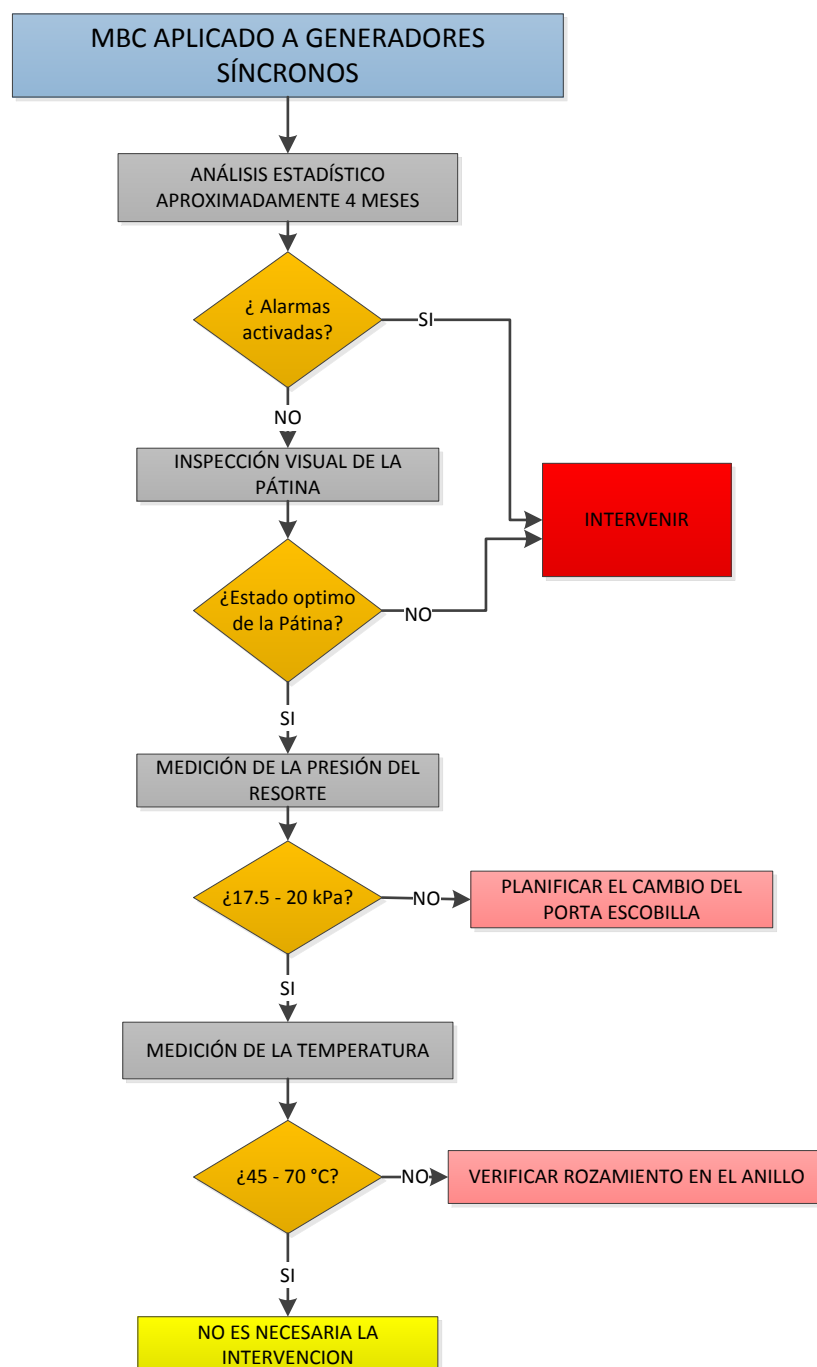


Ilustración 45. Mantenimiento basado en la condición aplicado a un generador síncrono (Fuente propia)

4.3.2. Recolección de información

Con base al punto anterior es necesario establecer un formato de recolección de datos que sea utilizado en cada mantenimiento. La Tabla 28 muestra el formato propuesto, se incluye las variables más importantes a ser medidas anualmente.

Area
Pág. 1 de 1

NOMBRE DEL FORMATO N° E001

Identificación: Numeración | Almacenamiento: Impreso | Archivo activo: 2 años | Retención: Area | Vigencia: Fecha | Versión: 02

N°	ANILLO SUPERIOR (-)						ANILLO INFERIOR (+)									
	SS	Δ	MIN	MAX	SI	Δ	MIN	MAX	IS	Δ	MIN	MAX	II	Δ	MIN	MAX
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																

RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO DEL ROTOR (MΩ)	
ANTES DE LA LIMPIEZA	DESPUES DE LA LIMPIEZA
ROTOR	

Horas acumuladas de Operación:

Horas de operación desde último mantenimiento:

Presion (kPa):

Temperatura °C:

Causa de la intervención:

Escobillas cambiadas:

Rugosidad de anillos μm :

MAX:

SUP:

MIN:

INF:

OT:

Realizado por: Fecha:

Tabla 28. Formato para la recolección de datos en el mantenimiento (Fuente propia)

Este formato debe ser almacenado digitalmente, se ha aplicado formato condicional a las celdas donde se almacena las mediciones, al estar a 10 mm del límite inferior se presentará la primera alarma al estar a 6 mm del límite inferior se presentará la alarma naranja y al estar a 4 mm del límite inferior se presentará la alarma roja.

Paralelamente se estará alimentando la base de datos de desgaste en la segunda hoja del libro de Excel como se muestra en la Ilustración 46.

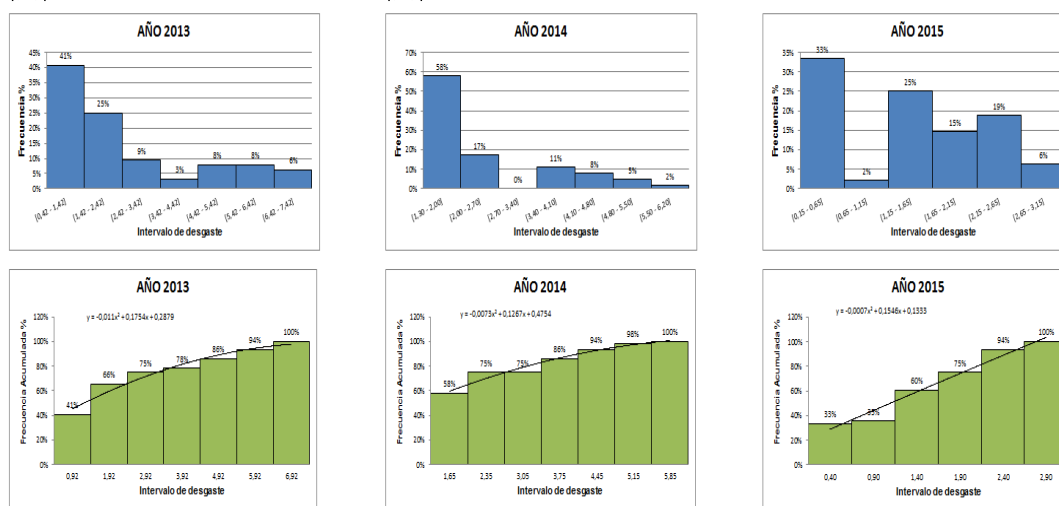


Ilustración 46. Gráficos desde la base de datos histórica del formato de recolección de datos (Fuente propia)

La Ilustración 47 muestra proceso para la recolección de datos, al momento de la recolección se debe tomar decisiones por lo que los datos deben ser precisos.

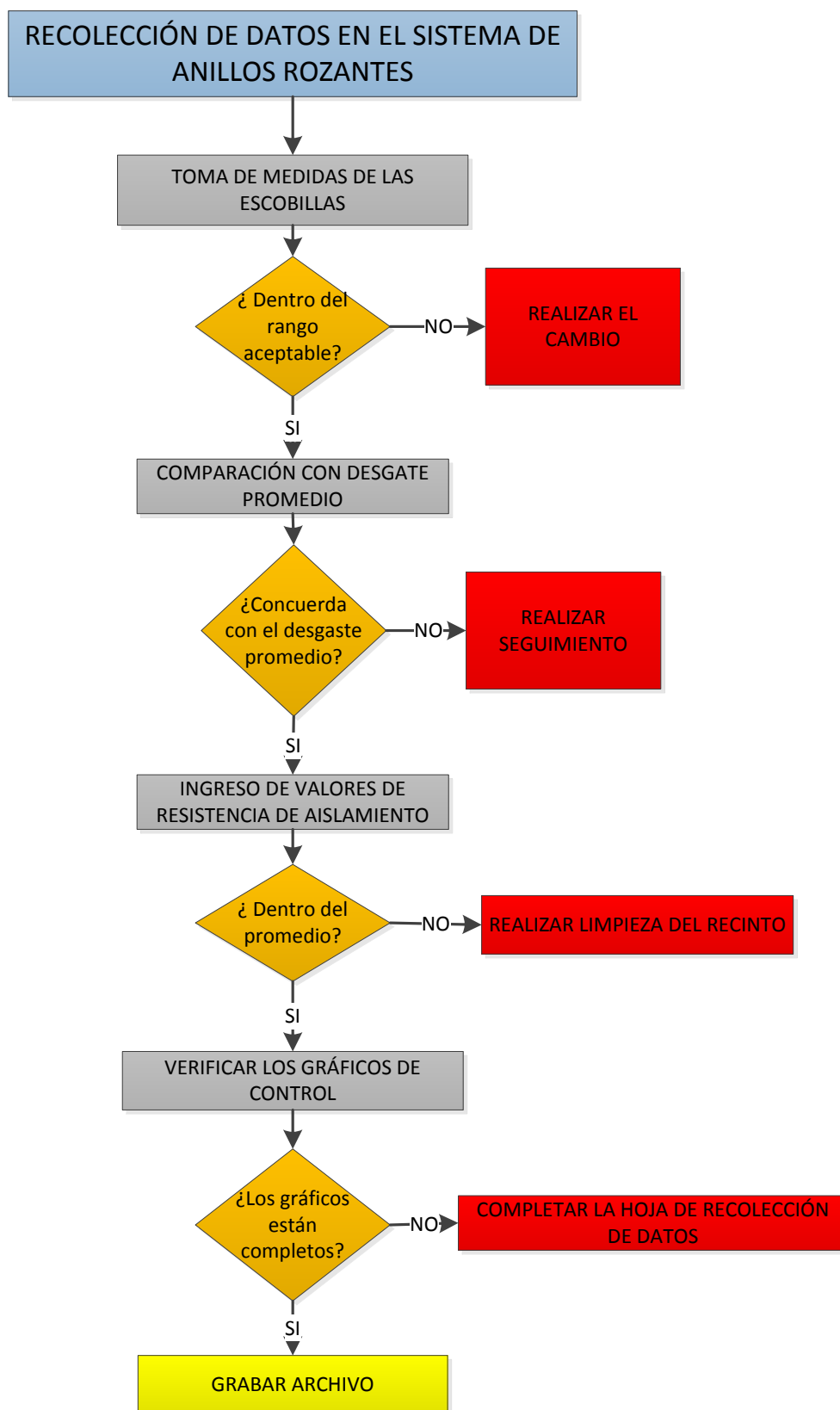


Ilustración 47. Proceso de recolección de datos (Fuente propia)

5. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo se ha demostrado que a pesar de que un equipo esté funcionando varios años generando ganancias, se puede realizar un incremento en la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

La estadística ha sido el punto de arranque para el análisis, que depende de los años que se haya alimentado la población de mediciones tomadas, en el caso de una máquina nueva se puede usar datos de equipos con características similares y las recomendaciones de los fabricantes.

Habrán casos especiales que la estadística falle, debido a que las condiciones de trabajo son variables (temperatura, humedad, presión etc.) Adicional el funcionamiento de las unidades depende de los organismos reguladores, por lo que no puede estar una unidad parada todo un mes (prácticamente imposible, salvo que este con una falla permanente) entonces se refuerza el estudio estadístico con el monitoreo constante de las variables vitales.

Ahora analicemos las interrogantes y objetivos planteados al inicio de este trabajo:

¿La metodología actual de mantenimiento maximiza la disponibilidad del sistema (por lo tanto, de la unidad de generación)? No. La metodología actual presenta un grave problema, no toma en cuenta ningún parámetro síntoma, por lo tanto, sin importar el comportamiento del sistema se interviene y se detiene la unidad.

¿Cuáles son los parámetros a incluir para un acertado pronóstico de recambio y frecuencia de inspección? En este trabajo se definió en la Tabla 13. Parámetros para monitoreo los parámetros medibles de importancia en la gestión de mantenimiento del sistema de escobillas.

Parámetros medibles	
En línea	Fuera de línea
Densidad de corriente	Tamaño
Humedad ambiental	Presión
Temperatura	Resistencia de aislamiento
Vibraciones	Pátina
Voltaje	Rugosidad
Potencia	
Corriente	

Tabla 13. Parámetros para monitoreo

Además, se debe considerar que el anillo colector puede ser rectificado para alcanzar la rugosidad deseada, por lo tanto, dependiendo de las unidades de generación que disponga la planta sería conveniente tener un anillo rectificado listo para ser usado.

¿Qué podemos lograr luego de implantar este trabajo? Incrementar la disponibilidad de las unidades de generación (cada día de generación es equivalente a 500 mil de dólares) con la metodología actual las unidades deben ser detenidas cada 2 meses para labores de mantenimiento, ahora se propone (con bases sólidas) que se intervenga cada 4 meses reduciendo a la mitad el número de intervenciones en el sistema, esto genera dólares, millones de dólares (lo más apetecido por los ejecutivos). La implementación de este trabajo no solo busca dólares (aunque todo puede ser traducido a dólares). Trasladándonos al territorio de gestión de mantenimiento este trabajo permite que el equipo entregue sus horas de trabajo máximo, con la eficiencia óptima y lo más importante sin reducir el tiempo de vida de los componentes, se recalca esto, debido a que algunas ocasiones se piensa que llevar la máquina al máximo de sus horas de trabajo provoca un efecto dañino.

Cada máquina deberá ser tratada de una forma diferente, al igual que un médico no prescribe la misma medicina a una mujer embarazada que una señora que no lo está, los trabajos deberán ser realizados de acuerdo a cada circunstancia particular de las unidades (tendencia de desgaste, rugosidad, densidad de corriente etc.) al decir en el párrafo anterior que se va a intervenir cada 4 meses no es una ley, de hecho se pudo observar que el límite superior es 6 meses. Si un mantenimiento se lo realizó en 4 meses se debe evitar descuidar el seguimiento y caer en un plan basado en tiempo de 4 meses, ¡imposible! es un mantenimiento basado en la condición (MBC) variable durante todo el tiempo, podrá ser incluso 2 meses (estado actual) pero no constante. Con este fin se presenta un diagrama de flujo para la gestión basada en la condición aplicada a este sistema que permite tomar la decisión correcta de cuando intervenir.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCURA. (2015). *AISI 8630, AISI 4340, AISI 4130, AISI 6150*. West Midlands.
- CVG EDELCA. (2005). *Diseño de un sistema automatizado de gestion de mantenimiento para anillos rozantes*. Caracas.
- García, O. (2014). Confiabilidad humana. *Gestión de activos*, (págs. 5-9). Colombia.
- Groupe CARBONE LORRAINE. (2005). *Guía técnica, escobillas para máquinas eléctricas*. FRANCE: CHATEAUNEUF sur LOIRE.
- [https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1tina_\(motores\)](https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1tina_(motores)). (2015). *Pátina (Motores)*. Wikipedia .
- MERSEN. (2010). *CONDITION OF THE SURFACE OF COMMUTATORS AND RINGS-ROUGHNESS*. France: MERSEN France Amiens.

Mexicana, S. B. (2014). MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN. *Bureau Veritas*, 1.

Sampieri, R. H. (s.f.). Metodología de la investigación .