



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Diagnóstico de averías asociadas a la detección de chispas  
en máquinas rotativas de corriente continua mediante el  
análisis avanzado de corrientes.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento

AUTOR/A: Salas Robles, Jorge Enrique

Tutor/a: Antonino Daviu, José Alfonso

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**

**Diagnóstico De Averías Asociadas A La Detección De Chispas  
En Máquinas Rotativas De Corriente Continua Mediante El  
Análisis Avanzado De Corrientes**

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

**Titulación:** Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento

**Presentada por:** M. Jorge Enrique Salas Robles

**Director:** Dr. D. José Alfonso Antonino Daviu.

- Valencia, mayo de 2024 -

## **Agradecimientos:**

En primer lugar, ¡toda gloria a mi Padre Celestial, quien me guía a donde vaya y en quien pongo mis planes! *Jeremías 29:11*.

En segundo lugar, agradecer al Dr. José Alfonso Antonino Daviu por la oportunidad que me ha brindado para realizar el actual aporte a la ciencia; agradecerle su valioso tiempo e interés a la asesoría y orientación de la presente tesis.

A mis padres, Yolanda Inés y José, y hermanos Juanito, Ari y Cris; No menos importante a Alejita, Lulú y Prince que siempre me han apoyado a lo largo de todos estos años; su Fe y consejos me han ayudado para ser cada día una mejor persona. Y por su puesto al resto de mi familia (en especial a Tania y Luis F) y a todos mis amigos, *Oscar “Chatiko”, Miguel Molina, Jorge Corona, Ricaurter “El Flaco”, Jhoncito, Dieguito “Don D”, Ernie, Carlos “El nene”* y demás; que siempre han estado ahí, gracias por su incondicional apoyo y por vuestra confianza en mí.

A todos los Profesores, Tutores e Instructores de quienes he recibido uno de los tesoros más valiosos: el conocimiento, un agradecimiento sincero por su ardua y bella labor de formar personas y profesionales. A *Julio César Rincón* por haber despertado en mí la investigación, a *Héctor Iván* por el amor a la Física y en memoria *Álvaro Sandoval* por su formación a la vida.

¡Así como mi agradecimiento a mis Aulas Mater!

### **Loa a ti Claustros Ilustres**

Compañero estudiante a la meta  
tú y yo somos también San Simón;  
que, si un día la vida nos vence,  
al Colegio le hicimos traición.



Agradezco a la UPV y a la escuela Técnica de Ingeniera del Diseño por aceptarme y permitirme estudiar el Máster de Ingeniería del Mantenimiento, así como la disposición de las excelentes instalaciones del campus.

*Solo me resta compartir algunas frases que dan gran significado a experiencias vividas a lo largo de mi vida:*

*“La vida es como montar en bicicleta, para mantener el equilibrio hay que seguir pedaleando”* **Albert Einstein**

*“Como no estas experimentado en las cosas del mundo, todas las cosas que tienen algo de dificultad te parecen imposibles. Confía en el tiempo que suele dar dulces salidas a muchas amargas dificultades”* **Miguel de Cervantes Saavedra**

## Resumen:

Se estima que en la actualidad existen un poco más de 300 millones de motores eléctricos a nivel mundial, los cuales consumen entre el 40 al 50% de la energía generada en el planeta. Los motores eléctricos son empleados en una gran variedad de procesos industriales de diversa naturaleza y están presente en sectores críticos como centrales de generación, hospitales, aeronáutica y robótica. [Corral 2018], [Morena 2012]

El uso de motores de **Corriente Directa (DC)** o Motores de Corriente Continua, en el ámbito industrial, disminuyó progresivamente en las últimas décadas en comparación con el de las máquinas de **Corriente Alterna (AC)**. Las principales razones obedecen a que los métodos de conmutación mecánica suelen ocasionar pérdidas y requieren mantenimiento a lo largo de toda su vida; lo que se traduce en mayor costo de operación [Velasco 2022]. Debido a las características constructivas de los Motores/Generadores DC, a su estructura de desgaste en puntos sensibles y ambientes de trabajo severos (presencia de humedad y exposición a material particulado), han conducido a que las técnicas aplicadas de mantenimiento sean en general tipo preventivo y correctivo. Sin embargo, gran número de empresas industriales que aún tiene en sus procesos equipos DC requieren mejores técnicas de diagnóstico que mejoren la fiabilidad de los procesos y disponibilidad de los activos.

Luego, motores de gran potencia (del orden de MW) que trabajan en régimen continuo, con valores cercanos a 1 millón de euros, son considerados como críticos y por tanto, requieren la implementación de técnicas avanzadas de diagnóstico, no intrusivas, que permitan monitorizar de forma continua o intermitente el estado de los componentes de forma fiable [Corral 2018]. La ocurrencia de averías de forma repentina conlleva consecuencias negativas, en lo económico como son elevados costes de reparación, costes de paradas no planificadas, tiempo de espera de recambios, así como el incremento de la inseguridad de los procesos productivos.

Una de las fallas más comunes en máquinas DC, es el fenómeno de las chispas en sistemas Conmutador/escobillas, que obedecen a síntomas de una incorrecta operación de funcionamiento relacionada a diferentes causas de tipo mecánico, eléctrico y condiciones ambientales [ABB 2002] [Mersen 1 2017].

Por tanto, la detección de las chispas en su fase incipiente y la evaluación de su grado de severidad, nos permiten diagnosticar fallos asociados y tomar acciones óptimas de mantenimiento mientras se monitorea la evolución de la falla.

El presente trabajo, propone una técnica de detección, evaluación de las chispas, basado en el monitoreo remoto y análisis de señales de la corriente de armadura en estado transitorio mediante (**Advanced Transient Current Signature Analysis, ATCSA**) la representación de tiempo-frecuencia usando la Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT), Los resultados experimentales confirman que un incremento de la actividad de chispas genera una gran cantidad de armónicos de baja frecuencia; hecho



que permite introducir KPIs de severidad de fallo (Intensidad de la chispa: computación de la *energía*, valores de *RMS y/o Media* de una señal concreta) de la actividad de chispa que relaciona el estado actual de la calidad de la conmutación respecto a una línea base establecida (patrones de comparación) cuando el motor está en funcionamiento óptimo.

Adicionalmente, la presente tesis se centra en revisión bibliográfica en los últimos 100 años y en la validación de técnicas predictivas de estudios realizados por otros científicos en los últimos 50 años y que han seguido de cerca el estudio de este fenómeno; intentado predecir y cuantificar el fallo asociado a chispas en procesos de conmutación.

En forma concreta se han obtenido más de 600 señales (con frecuencias de muestreo  $f_s = 10kHz$  de laboratorio de *corriente de Armadura, flujo magnético y corrientes de excitación en escobillas* en un montaje de un motor DC trabajando como generador eléctrico a un 50% de su capacidad y como equipo primario un motor de inducción trabajando al 50%, 75% y 100% respectivamente de niveles de carga de su capacidad; simulando diferentes estados de desgaste de escobillas y/o pérdidas de tensión de los resortes de las escobillas para obtener como efecto la aparición de chispas entre el contacto escobilla-colector. Se registraron 7 niveles de inspección de evolución del fallo desde su estado saludable, pasando por un estado de detección de fase incipiente o temprana hasta alcanzar un nivel de fallo severo. Para cada nivel de estado, se han obtenido un número de señales con el fin de mantener la repetibilidad (respecto al dispositivo de medición) y la reproducibilidad (del montaje).

Dado el gran éxito de los resultados obtenidos se han producido tres Artículos científicos como fruto del TFM, que han sido enviados a congresos para su debida aprobación.

Por último, debido a los resultados, se analiza también, la viabilidad económica de su implementación, estandarización y adaptación de la técnica en el campo industrial.

## **Summary:**

It is estimated that there are currently more than 300 million electric motors worldwide, which consume between 40 to 50% of the energy generated on the planet. Electric motors are used in a wide variety of industrial processes and are present in critical sectors such as power generation plants, hospitals, aeronautics and robotics [Corral 2018], [Morena 2012].

The use of Direct Current (DC) motors industrial applications has gradually decreased in the last decades compared to Alternating Current (AC) machines. The main reasons are due to the fact that mechanical commutation methods tend to cause losses and require maintenance throughout their life, resulting in higher operating costs [Velasco 2022]. Due to the design characteristics of DC motors/generators, their wear structure at sensitive points and adverse working environments such as the presence of humidity and exposure to particulate pollution, the maintenance techniques applied have generally been preventive and corrective generally. However, a large number of industrial companies that still using DC equipment in their processes require better diagnostic techniques to improve process reliability and equipment availability.

Then, high power engines, of the order of MW, operating in continuous mode, with values close to 1 million euros, are considered critical and therefore require the implementation of advanced non-intrusive diagnostic techniques that allow continuous or intermittent monitoring of the state of the components in a reliable way [Corral 2018]. The occurrence of sudden failures leads to negative economic consequences, such as high repair costs, unplanned downtime costs, waiting time to acquire spare parts, as well as increased insecurity of production processes.

One of the most common failures in DC machines is the phenomenon of sparking in switch/brush systems, which is due to symptoms of incorrect operation related to various mechanical, electrical and environmental conditions [ABB 2002] [Mersen 1 2017].

Therefore, detecting sparks in their early stages and measuring their severity allows us to diagnose the associated faults and take the most appropriate maintenance action, while monitoring the evolution of the fault.

The present work, proposes a technique of detection, evaluation of sparks, based on remote monitoring and analysis of armature current signals in transient state by means of (Advanced Transient Current Signature Analysis, ATCSA) time-frequency representation using Short Time Fourier Transform (STFT), experimental results confirm that an increase in spark activity generates a large amount of low-frequency harmonics; fact that allows the establishment of KPIs of fault severity (Spark Intensity: Energy Calculation, RMS and/or Mean values of a given signal) of spark activity that

relate the current state of commutation quality with respect to an established baseline (reference pattern) when the motor is operating optimally.

Additionally, this thesis focuses on literature review in the last 100 years and on the validation of predictive techniques of studies performed by other scientists in the last 50 years who have closely followed the study of this phenomenon; trying to predict and quantify the failure associated with sparks in switching processes.

More than 600 signals have been obtained with sampling frequencies  $f_s=10\text{kHz}$  of armature current, magnetic flux and brush excitation currents in the laboratory. The assembly consist of a DC motor operating as an electric generator at 50% of its capacity with an induction motor operating at 50%, 75% and 100% load levels of its capacity; simulation of different states of brush wear and brush spring tension loss to obtain as an effect the appearance of sparks between the brush-collector contact. Seven inspection levels of fault evolution were recorded, starting from a healthy state, through an incipient or early detection state, to a severe fault level. For each state level, a number of signals were obtained in order to maintain repeatability (of the gauge) and reproducibility (of the assembly).

Due to the great success of the results obtained, three scientific articles have been produced as a result of the TFM and have been submitted to congresses for approval.

Finally, due to the results, the economic viability of its implementation and the standardization and adaptation of the technique in the industrial field are also analyzed.

## TABLA DE CONTENIDO GENERAL

# MEMORIA

<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>18</b>
1.1. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	18
1.2. ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TESIS .....	19
<b>CAPITULO 2: MÁQUINAS ELÉCTRICAS .....</b>	<b>20</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A MÁQUINAS ELÉCTRICAS: ASPECTOS HISTÓRICOS ...	20
2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS .....	22
2.3. FENÓMENO DE LA CONMUTACIÓN.....	26
2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA .....	28
2.5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE MAQUINAS DC.....	29
<b>CAPITULO 3: GRUPOS DE CALIDAD DE ESCOBILLAS.....</b>	<b>39</b>
3.1. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LAS ESCOBILLAS EN MOTORES/GENERADORES DC.....	41
3.1.1. PARÁMETROS MECÁNICOS.....	43
3.1.2. PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	52
3.1.3. PARAMETROS DEL ENTORNO .....	57
<b>CAPITULO 4: ESTADO DEL ARTE DEL MANTENIMIENTO DE MAQUINAS DC .....</b>	<b>60</b>
4.1. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVAS EMPLEADAS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. ....	60
4.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE MANTENIMIENTO EN MOTORES DC.   62	
4.3. ASPECTO DE LAS PÁTINAS .....	64
4.3.1. P-PÁTINAS .....	64
4.3.2. B-QUEMADURAS.....	67
4.3.3. L-DEFECTOS de las DELGAS del CONMUTADOR.....	68
4.3.4. T-MANCHAS .....	68
4.3.5. R-DESGASTE de los CONMUTADORES.....	69
4.4. ASPECTO CARA DESLIZANTE ESCOBILLAS.....	70
4.5. ASPECTOS ASOCIADOS A LA FORMACIÓN DE CHISPAS EN ESCOBILLAS. 73	
4.6. CLASIFICACIÓN DE CHISPAS .....	74

4.7.	EQUIPOS DESARROLLADOS PARA EL DIAGNOSTICO DE MOTORES DC.	77
<b>CAPITULO 5: METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE FALLOS Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE MOTORES DC ASOCIADOS A CHISPAS EN EL CONMUTADOR.</b> .....		
		81
5.1.	ANTECEDENTES .....	81
5.2.	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO: TÉCNICA DE ANÁLISIS DE CORRIENTE EN ESTADO TRANSITORIO.....	85
5.2.1.	FUNDAMENTOS Y VENTAJAS DE LA TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO .....	87
5.2.2.	GESTANDAR GENERAL DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA ATCSA.....	89
<b>CAPITULO 6: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b> .....		
		91
6.1.	EQUIPOS DE MEDIDAS EMPLEADOS .....	91
6.2.	ANALISIS DE LABORATORIO: DETECCIÓN DE CHISPAS DE MOTOR/GENERADOR DC DEBIDO A LA PÉRDIDA DE PRESIÓN DEL RESORTE DEL PORTAESCOBILLA.....	93
6.3.	ANÁLISIS EN ESTADO ESTACIONARIO.....	100
6.4.	ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO.....	102
CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS Y TRABAJOS FUTUROS .....		108
BIBLIOGRAFÍA.....		112

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de conversión de energía, según el funcionamiento como motor o generador, y leyes fundamentales [Gómez 2020].....	22
<b>Figura 2.</b> Científicos que hicieron aportes sobre las leyes de funcionamiento del motor eléctrico [Gómez 2020].....	22
<b>Figura 3.</b> (Izquierda) Sentido de giro de Campo magnético, producido por la circulación de una corriente en una barra central, (derecha) Líneas de campo magnético generadas en una espira por el paso de corriente [Gómez 2020]. .....	24
<b>Figura 4.</b> Esquema de movimiento lineal de un imán (campo magnético variable) produce una lectura en el galvanómetro positiva o negativa según su sentido de recorrido en la bobina. Lo que refleja una corriente eléctrica circundante [Gómez 2020]. .....	25
<b>Figura 5.</b> (Izquierda) Regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza $F$ ; (derecha), expresión gráfica de las leyes de Faraday y de Lenz. [Gómez 2020]. .....	26
<b>Figura 6.</b> Giro de una espira en un generador, de izquierda a derecha: 1° posición a 0°, 2° posición a 90° f.e.m inducida máxima, 3° posición 180° f.e.m=0 y 4° rotor a 270° y nuevamente f.e.m es máxima. [Fraile 2003]. .....	27
<b>Figura 7.</b> Graficas de la f.e.m. inducida rectificadas por la conmutación. a) una espira. b) tres espiras [Fraile 2003]. .....	27
<b>Figura 8.</b> Tensión de la salida D.C de una máquina con un conmutador y escobillas. a) vista en perspectiva; b) voltaje de salida resultante entre escobillas [Chapman 2012]. .....	27
<b>Figura 9.</b> Clasificación generadores DC. Todas las conexiones corresponden a la máquina girando en sentido horario. Para giro antihorario se invierten las conexiones a los bornes <b>A1y A2</b> [Pozueta 2010]. .....	28
<b>Figura 10.</b> Inducido más bobinas auxiliares conectadas en serie [Pozueta 2010]. .....	29
<b>Figura 11.</b> Clasificación de máquinas eléctricas rotativas más habituales [Gómez 2020].....	29
<b>Figura 12.</b> Constitución de una Máquina DC, con inductor y polos salientes. [Domínguez 2008]. .....	30
<b>Figura 13.</b> Esquema del estator y del rotor con respecto a la configuración, Motor/Generador [Gómez 2020]. .....	30
<b>Figura 14.</b> (a): Conexión de los devanados de los motores y generadores DC (ejemplo de máquina conectada en paralelo). [Domínguez 2008], (b) localización en identificación de componentes [Pozueta 2010]. .....	31
<b>Figura 15.</b> (a): Partes constitutivas de las máquinas eléctricas rotativas, (b): detalle de una zapata polar donde se aloja el bobinado de excitación o campo y en las ranuras superiores el devanado de compensación (izq.), devanados auxiliares (der.) (c): Detalle de carcasa y sus devanados (izq.), detalle de núcleos polares que van atornillados a la carcasa (der.).....	32
<b>Figura 16.</b> Devanados imbricado y ondulado. [Domínguez 2008]. .....	33
<b>Figura 17.</b> Inducido. (a) [Guerrero 2003], (b) [Martín 2012] .....	34
<b>Figura 18.a)</b> (izq.), Sección de un conmutador de delgas [Domínguez 2008], (b) (der.) Partes de una delga [Pozueta 2010], (c) Colector [Martín 2012]. .....	34
<b>Figura 19.</b> Ejemplos de escobillas y sus partes [Helwing 1 2020]. .....	35
<b>Figura 20.</b> Escobillas 1. Solid Brushes, 2a, 2b. Split Brushes, 3. Spread Brushes, 4. Tandem Brushes, 5. Sandwich Brushes y 6. Carbon brushes with wear sensor [Helwing 2 2013]. .....	36
<b>Figura 21.(a)</b> Formas y Dimensiones de escobillas según aplicación (según la IEC 60276 y IEC 60136), $t \times a \times r$ en cm. [Helwing 1 2020] [Helwing 2 2013] (b) [Carbone Lorraine 2017]. .....	37
<b>Figura 22.</b> Colector, Escobillas y sus partes. (a)[Guerrero 2003], (b)Resorte Helicoidal [Helwing 2 2013], Tipo resorte (c) Tipo muelle espiral [Fraile 2003]. .....	38
<b>Figura 23.</b> Principales parámetros y características del fenómeno a través de la superficie contacto entre la escobilla y el conmutador de un motor DC [Shin, WG 2010]. .....	42
<b>Figura 24.</b> Parámetros fundamentales escobillas: Mecánicos, Eléctricos y Físico Químicos (Entorno)..	43

<b>Figura 25.</b> Rangos de Rugosidad en función del coeficiente de fricción de la superficie del colector. [Mersen 5 2017].	44
<b>Figura 26.</b> Coeficiente de fricción entre escobillas y conmutador [Mersen 1 2017].	45
<b>Figura 27.</b> (a), (b) y (c) Evolución del consumo de corriente en las escobillas respecto a la velocidad de la locomotora (48.4, 50 y 53,4 km/h respectivamente) a full carga. (d) Representa la corriente circulante (r.m.s) generada por la vibración en un rango de velocidad más amplio y es causada por la resonancia mecánica del motor [Flinders 1999].	46
<b>Figura 28.</b> Comportamiento de desgaste de las escobillas por pérdida de la presión de la escobilla. [Shunk GB4].	47
<b>Figura 29.</b> Desempeño de las escobillas, por la combinación de desgaste mecánico (resultado de la fricción) y desgaste eléctrico (resultado de resistencia excesiva en la superficie de contacto). (a) [Mersen 3 2017], (b) Rango Ideal de desgaste X-Y. [Helwing 1 2020].	47
<b>Figura 30.</b> Parámetros <b>k</b> y <b>b</b> de la ecuación (13), para la determinación de la presión [Mersen 6 2017], [Helwing 2 2013].	50
<b>Figura 31.</b> Esquema bisel de una escobilla [Mersen 7 2017].	50
<b>Figura 32.</b> (Izq) Escobilla con bisel no revestida, valores recomendados para $\alpha$ . No se aconseja usar escobillas donde $t=a$ debido a la orientación del grano [Mersen 7 2017], (der) $\alpha$ también se aplica cuando se quiere reducir las vibraciones del montaje. [Helwing 2 2013].	51
<b>Figura 33.</b> Resultado de Prueba a diferentes niveles de presión del resorte de escobillas NCC634, con evidencia de nivel de chispas a 40 m/s de velocidad lineal periférica, menor presión más elevado el nivel de severidad de las chispas [Morita 2007].	51
<b>Figura 34.</b> Factores que influyen en la Caída de tensión y afectan a la conmutación y distribución de la corriente durante el contacto deslizante entre las escobillas y el conmutador [Mersen 1 2017].	52
<b>Figura 35.</b> Elementos que componen la pátina. [vdocuments.net 2015, Schunk].	53
<b>Figura 36.</b> La caída de tensión entre escobillas de polaridad positiva y negativa en ensayos de laboratorio son una función de la densidad de corriente [Skjølberg 2009].	53
<b>Figura 37.</b> La caída de tensión (Modo Motor) entre escobillas de polaridad positiva y negativa en ensayos de laboratorio son una función de la densidad de corriente [Sawa, K. 1 2013].	54
<b>Figura 38.</b> (a) Diagrama esquemático de puntos de contacto y flujo de corriente en un contacto eléctrico. [Timsit, R.S. 2013]. (b) Esquema ilustrativo de un contacto eléctrico y el patrón de flujo de corriente restringido a través del punto de contacto (Cortesía de Eaton Corporation) [Zhou, X. 2013].	55
<b>Figura 39.</b> Tasas de desgaste (Modo Generador) en nanómetros por kilómetro de escobillas en el laboratorio como una función de la densidad de corriente JB [Skjølberg 2009].	57
<b>Figura 40.</b> Humedad y Vida de la escobilla: la línea curva representa (2 granos de agua por pie cúbico de aire seco o 4,6 gramos por metro cúbico) [Lozowski 2001].	58
<b>Figura 41.</b> Tendencia reciente en monitoreo de condición de motores eléctricos, basado en la integración de la monitorización de diferentes cantidades de motores para el desarrollo de sistemas de diagnóstico inteligentes [Antonino 3 2020].	62
<b>Figura 42.</b> Pátinas Normales, coloración uniforme: marrón claro(P2), u oscuro(P6) [Mersen 5 2017].	65
<b>Figura 43.</b> Pátina rayada (P12), Pátina decapada (P14), Pátina Manchadas (P16) [Mersen 5 2017].	66
<b>Figura 44.</b> Manchas aisladas o repartidas uniformemente (P22), Manchas oscuras de contorno bien definido, seguidas o no de manchas más claras de contorno más irregular (P24), Delgas manchadas en sus centros o en sus bordes (P26-P28) [Mersen 5 2017].	66
<b>Figura 45.</b> Delgas alternativamente claras y oscuras (P42), fuertes Marcas de chispas(P44), Manchas iguales al doble de paso Polar(P46) [Mersen 5 2017].	67
<b>Figura 46.</b> Quemaduras por chispas en el borde de las delgas (B2-B6); Quemaduras en el centro de las delgas (B8); Pátina agujereada: pequeñas manchas claras, repartidas sobre la pista de las delgas (B10) [Mersen 5 2017].	68
<b>Figura 47.</b> Delga Salida (L2); delga hundida (L4); Micas sobresalientes (L6); rebabas en aristas (L8); Cobre arrastrado (L10) [Mersen 5 2017], [Helwing 2 2013].	68

<b>Figura 48.</b> Imagen de la escobilla ( <b>T10</b> ); Franja oscura debida a una delga que sobresale ( <b>T12, L2</b> ), franja oscura debida a una delga hundida o baja ( <b>T14, L4</b> ); franjas oscuras debidas a micras que sobresalen ( <b>T16, L6</b> ); Manchas oscuras y localizadas debidas a rebabas ( <b>T18, L8</b> ) [Mersen 5 2017]....	68
<b>Figura 49.</b> Desgaste normal del metal, tras un largo periodo de funcionamiento ( <b>R2</b> ); Desgaste anormal por ajuste incorrecto de las escobillas, calidad inapropiada, poluciones ambientales diversas ( <b>R4</b> ) [Mersen 5 2017]. Conmutador Rayado ( <b>R6</b> ), Conmutador Hilachudo ( <b>R8</b> ) [Helwing 2 2013].	69
<b>Figura 50.</b> Superficie anillo Colector tomada a x75: (a) Aparecieron algunas huellas desgastadas, (b) El color de la superficie (Pátina) cambia parcialmente a marrón, que parece como una mezcla de lubricante y partículas de desgaste. (c)–(d) El desgaste progresó lentamente con el tiempo y las huellas se volvieron claras. (e) Las partes marrones desaparecieron gradualmente y la capa de revestimiento de Ni o el metal base (pistas blancas en la imagen) pueden quedar expuestos. (f) Casi todas las zonas de metal base se oxidaron (es el final de su vida útil) [Sawa, K. 2 2013].	70
<b>Figura 51.</b> Distribución de elementos del anillo al final de su vida útil, usando un equipo de Micro analizador de sonda de electrones (EPMA) [Sawa, K. 2 2013].	70
<b>Figura 52.</b> Desgaste normal, <b>S1</b> (apariencia fina densa), <b>S3</b> (apariencia porosa) y <b>S5</b> (presencia de polvo circundante en la atmosfera de operación) [Helwing 2 2013].	70
<b>Figura 53.</b> <b>S7</b> (Superficie rayada), <b>S9</b> (Superficie rayada y surcos) y <b>S5</b> (presencia de polvo circundante en la atmosfera de operación) [Helwing 2 2013].	71
<b>Figura 54.</b> <b>S13</b> (quemadura de Borde), <b>S15</b> (superficie erosionada) y <b>S17</b> (segmentos quemados en cara deslizante) [Helwing 2 2013].	71
<b>Figura 55.</b> <b>S19</b> (doble cara de deslizamiento, escobilla Twin), <b>S21</b> (Segregaciones de cobre) y <b>S23</b> (Bordes quebrados) [Helwing 2 2013].	71
<b>Figura 56.</b> Análisis muestra la superficie del conmutador y la superficie de las escobillas en etanol (a-d) y gasolina (e-g) después de la prueba de 50 horas, $6 \times 10^6$ rotaciones y diferentes niveles de corriente [A], [H. Tanaka 2010].	72
<b>Figura 57.</b> Análisis con microscopio láser del segmento del conmutador, etanol a 9[A], [H. Tanaka 2010].	72
<b>Figura 58.</b> Clasificación de Chispa en concordancia con la clasificación Westinghouse [Mersen 1 2017].	75
<b>Figura 59.</b> Clasificación de Chispa en concordancia con la clasificación JEC-2120 [Morita 2007].	76
<b>Figura 60. b.</b> Comportamiento de Desgaste de una escobilla bajo la presencia de un arco fuerte. c y d un arco leve [Sawa, K. 2 2013].	76
<b>Figura 61.</b> Dinamómetro para medir tensión de los resortes de las escobillas [Mersen 1 2017].	77
<b>Figura 62.</b> Verificador de Rugosidad [Mersen 4 2017].	78
<b>Figura 63.</b> Estroboscopia para detectar la pérdida de la redondez del conmutador cuando los niveles de vibración sean altas [Mersen 4 2017].	78
<b>Figura 64.</b> Alarma verificadora de Desgaste [Mersen 4 2017].	78
<b>Figura 65.</b> Monitor de Escobilla [Sawada 1972].	79
<b>Figura 66.</b> Vista general de equipo de monitoreo continuo de chispa usando señales emitidas de radiofrecuencia. Cuenta con unidad de procesamiento de señal (25x26x35 cm, 10 kg) y unidad de grabación (20x26x30 cm, 5kg) [Michiguchi 1983].	79
<b>Figura 67.</b> Esquema de dispositivo óptico de monitoreo de chispas [Barwany 1991].	80
<b>Figura 68.</b> Indicador de Conmutación, Sensor UV que detecta baja emisión de intensidad ultravioleta de la intensidad de chispa [Mersen 4 2017].	80
<b>Figura 69.</b> Gráfico E vs JB para 4 tipos de escobillas (a) Expresión Matemática de Bailey and Cheghorne, (b) Valores de e K1, K2 Padmanabhan 1965].	82
<b>Figura 70.</b> Formas de Onda de las señales detectadas, métodos tradicionales vs radio frecuencia como el más sensible y no intrusivo hasta 1983 [Michiguchi 1983].	84
<b>Figura 71.</b> Típica onda de señal de Chispas en la Amplitud Vs tiempo. Parámetros H(altura), W(ancho) y Área (H x W es el más sensible) por encima del nivel de umbral [Michiguchi 1983].	84
<b>Figura 72.</b> Comparación ilustrativa entre la técnica Clásica MCSA (Estado Estacionario) y Avanzada ATCSA (Estado Transitorio) analizando un motor con 2 barras rotas en el devanado de inducción. Tomado de la página 49, [Corral 2018].	87



<b>Figura 73.</b> Esquema Tomado y ajustado con los pasos para la aplicación de la metodología [Corral, 2018].	89
<b>Figura 74.</b> Equipo de medida para la adquisición de Señales [Velasco 2022].	93
<b>Figura 75.</b> Motor SIEMENS (Primario), Generador BKB Electric Motors LTD (Secundario).	93
<b>Figura 76.</b> Generador BKB Electric Motors LTD (Secundario): Características y Plaqueta de identificación.	94
<b>Figura 77.</b> Motor SIEMENS (Primario): Características y Plaqueta de identificación. Tomado de: <a href="https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ES/Catalog/Product/?mlfb=1LE1003-0EB02-2AA4&amp;SlepCountryCode=ES">https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ES/Catalog/Product/?mlfb=1LE1003-0EB02-2AA4&amp;SlepCountryCode=ES</a> .	94
<b>Figura 78.</b> Principales características y circuito de potencia del arrancador Schneider [SCHNEIDER 2013].	95
<b>Figura 79.</b> Comprobación de la medida RMS de Corriente de Armadura y de Excitación para cada Prueba usando polímetros comerciales.	95
<b>Figura 80.</b> Escobillas tipo rectangular de ubicación radial: posición vista frontal en dirección <b>a</b> (0°), <b>b</b> (90°), <b>c</b> (180°), <b>d</b> (270°). La denotación CH1.1, CH1.2, CH2.1 y CH2.2 hace referencia al canal del osciloscopio que captura la señal con pinzas amperimétricas.	96
<b>Figura 81.</b> Configuración Típica Resorte Tipo muelle espiral, retomando la figura 22 [Fraile 2003].	97
<b>Figura 82.</b> Presión resortes Helicoides <b>P0</b> (Gap entre Escobilla-conmutador), <b>P1</b> (Menor Tensión), <b>P2</b> , <b>P3</b> (Tensión intermedia), <b>P4</b> (Máxima Tensión).	97
<b>Figura 83.</b> <b>a)</b> Motor Sano <b>b)</b> Nivel Chispa dentro del umbral de Alerta, <b>c), d) y e)</b> Altos niveles de Chispa dentro del umbral de riesgo de daño.	99
<b>Figura 84.</b> <b>a)</b> Motor Sano, <b>b)</b> Nivel Moderado de Chispas, <b>c), d) y e)</b> Altos niveles de Chispa y desgaste de Pátina, Conmutador y Escobillas.	99
<b>Figura 85.</b> Identificación de armónicos fundamentales de la señal de Línea Base y que son múltiplos de la frecuencia de red y múltiplos de la velocidad de rotación.	100
<b>Figura 86.</b> FFT espectro de corriente de Armadura en estado estacionario para <b>a), b) y c)</b> Generador Saludable y evolución incipiente de fallo <b>d), e) y f)</b> Generador en estados de fallo leve a crítico.	101
<b>Figura 87.</b> Análisis 2D STFT de la Línea Base [0-5 s] tiempo de arranque., [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de bajas frecuencias.	102
<b>Figura 88.</b> Análisis 2D STFT del estado de menor tensión de Resortes ( <b>P1</b> ). [0-5 s] tiempo de arranque., [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo $\Delta\text{sparking} = 4,08\%$ .	103
<b>Figura 89.</b> Análisis 3D STFT Línea Base vs Estado de Menor tensión de Resortes, de la Zona o Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla $\Delta\text{sparking} = 4,08\%$ .	103
<b>Figura 90.</b> Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes ( <b>P0</b> ). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo $\Delta\text{sparking} = 15,31\%$ .	104
<b>Figura 91.</b> Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla $\Delta\text{sparking} = 15,31\%$ .	104
<b>Figura 92.</b> Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes ( <b>P-1</b> ). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo $\Delta\text{sparking} = 29,42\%$ .	105
<b>Figura 93.</b> Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla $\Delta\text{sparking} = 29,42\%$ .	105
<b>Figura 94.</b> Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes ( <b>P-1</b> ). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo $\Delta\text{sparking} = 33,36\%$ .	106

<b>Figura 95.</b> <i>Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla.</i>	
$\Delta\text{sparking} = 33,36\%$ .....	106
<b>Figura 96.</b> <i>ICEM 2024, Internatinal Conference on ELectrical Machices Congress.....</i>	110
<b>Figura 97.</b> <i>IEEE-ECCE2024, Energy Conversion Congress &amp; Expo. ....</i>	111
<b>Figura 98.</b> <i>MDPI, Journal Entropy .....</i>	111

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas DC [Manzano 2002].	28
<b>Tabla 2.</b> Capacidad y Dimensiones de cables flexibles en escobillas del fabricante Carbone Lorraine [Carbone Lorraine 2013].	37
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Aplicaciones y Propiedades [Carbone Lorraine 2017].	39
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Límites de Uso [Carbone Lorraine 2017].	40
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Clasificación Caídas de tensión al contacto y frotamiento en escalas. <b>(a).</b> [Carbone Lorraine 2017], <b>(b).</b> [Helwing 2 2013].	40
<b>Tabla 6.</b> Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Condiciones de Laboratorio para medir la caída de tensión al contacto y el frotamiento [Carbone Lorraine 2013].	41
<b>Tabla 7.</b> Rango de presión recomendada para las familias de calidad de escobillas del fabricante MERSEN bajo condiciones de operación normal en <b>kPa</b> . * consultar con el fabricante, ** para motores de montacargas [Mersen 3 2017].	48
<b>Tabla 8.</b> Valores del coeficiente <b>kp</b> según la presión de las escobillas para un grado EG estándar a 10 A/cm <sup>2</sup> [Mersen 3 2017].	49
<b>Tabla 9.</b> Parámetros característicos del mantenimiento de las máquinas eléctricas rotativas [Cabañas 1998].	61
<b>Tabla 10.</b> Parámetros característicos del mantenimiento de las máquinas eléctricas rotativas [Cabañas 1998].	61
<b>Tabla 11.</b> Problemas específicos de mantenimiento de motores DC [Cabañas 1998], [ABB 2002].	64
<b>Tabla 12.</b> Tipo de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].	73
<b>Tabla 13.</b> Posibles Causas y soluciones (medidas correctivas) de tipos de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].	73
<b>Tabla 14.</b> Posibles Causas y soluciones (medidas correctivas) de tipos de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].	74
<b>Tabla 15.</b> Indicador de severidad de chispas ( <b>Δsparking</b> ) propuesto para 8 estados, de los cuales con su ventana de inspección.	107

## LISTADO DE SÍMBOLOS

*DC: Corriente Directa*

*AC: Corriente Alterna*

*SFTF: Short Time Fourier Transform*

*FFT: Fast Fourier Transform del Espectro de corriente de Armadura*

*ATCSA: Advanced Transient Current Signature Analysis*

*PDI: Controlador Proporcional, Diferencial e Integral de un proceso o equipo.*

*KPI: Key Performance Indicator*

*B: Campo Magnético en Teslas [T]*

$\mu_0$ : *Permeabilidad magnética del vacío*

*I: Corriente eléctrica [A]*

*N: Número de espiras de una bobina*

*L: Longitud de la bobina*

*R: radio de la espira, en metros [m]*

$\Phi$ : *Flujo Magnético [Wb]*

*E: Fuerza Electromotriz f.e.m.*

$\frac{d\theta}{dt}$ : *Variación del flujo magnético en el tiempo.*

$E_{ind}$ : *Campo Eléctrico inducido.*

$I_{ind}$ : *Corriente inducida*

$B_{ind}$ : *Campo magnético inducido.*

$\vec{F}$ : *La fuerza que experimenta un conductor de longitud L por el circula una corriente eléctrica I.*

*t: Dimensión **tangencial** /espesor en[cm] de una escobilla de acuerdo DIN IEC 60136-3*

*a: Dimensión **axial**/ancho en[cm] de una escobilla de acuerdo DIN IEC 60136-3*

*r: Dimensión **radial**/largo en[cm] de una escobilla de acuerdo DIN IEC 60136-3*

*b: Dimensión **ancho de ranura** en[cm], en el conmutador o colector*

$k$ : Número de ranuras en el conmutador o colector

$\alpha$ : ángulo de bisel de contacto de escobilla en el conmutador [°]

$J_B$ : densidad de corriente  $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$

$S$ : área transversal de la escobilla en  $[cm^2 \text{ o } in^2]$

$N_p$  = número de escobillas Motor/Generador DC

$v$ : velocidad periférica admisible del conmutador o colector  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$P$ : presión específica de resorte de escobilla dada en  $[kPa]$ ,  $\left[\frac{cN}{cm^2}\right]$ ,  $\left[\frac{gf}{cm^2}\right]$ ,  $\left[\frac{oz}{in^2}\right]$  según el caso

$\rho$ : resistividad eléctrica de la escobilla en dirección radial  $[\mu\Omega\text{-}m]$

$R_a$ : Rugosidad de superficie  $[\mu m]$

$\mu$ : Coeficiente de Fricción  $[-]$

$R_s$ : Rugosidad r.m.s de una superficie  $[\mu m]$

$T$ : La fuerza tangencial debida a la fricción

$N_F$ : Fuerza Normal

$\Delta U_p$ : la caída de tensión o voltaje de contacto para una escobilla en  $[mV]$

$\Delta U_{P_{ref}}$ : la caída de tensión o voltaje de contacto para una escobilla a una presión de referencia  $P_{ref}$ , en  $[mV]$ .

$k_p$ : Coeficiente de Presión de una escobilla

$F_r$ : Fuerza ejercida de una escobilla sobre el conmutador/colector en  $[cN]$

Humedad Relativa:  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Vibraciones r.m.s admisibles:  $\left[\frac{mm}{s}\right]$

GAP: Espacio de no contacto entre escobillas/conmutador

$K_1, K_2$  : Constantes, solo caso de la figura 69.

$H$ : altura de amplitud de una señal, solo para el caso, figura 71.

$W$ : ancho de una señal, solo para el caso, figura 71.

$P_n$ : Potencia Nominal  $[kW]$

$U_n$ : Voltaje Nominal [V]

$n_n$ : Velocidad Nominal [rpm]

$\cos \Phi$ : Factor de Potencia eléctrico de un motor

$\frac{\Delta}{Y}$ : Conexión Estrella-Triángulo de arranque de un motor

CH1.1, CH1.2, CH2.1 y CH2.2: Canales de osciloscopio

P1, P2, P3, P4: Estados de presión del resorte sobre las escobillas definido arbitrariamente por la configuración del generador eléctrico [-].

P0, P-1: Estados sin presión o con GAP de las escobillas/conmutador definido arbitrariamente para simular estados de fallo [-].

s: deslizamiento de un motor asíncrono [-]

$n_s$ : Velocidad sincronismo [rpm]

$n_{np}$ : Velocidad nominal motor primario [rpm]

$f_r$ : frecuencia fundamental de rotación del motor/generador DC, en [Hz]

$f_{pb}$ : Frecuencia de barra de paso de conmutación, en [Hz]

$f_p$ : Frecuencia fundamental, en [Hz]

$k_1 @ k_{m\acute{a}x}$ : constantes de múltiplos de armónicos fundamentales de rotación o de red.

$N_d$ : Número de Delgas del Conmutador, Colector

Peak-Peak: Valores Pico a Pico de una señal

$\gamma_{\text{sparking}} \text{ Base}$ : Indicador de Chispa Línea Base, en [r.m.s], resultado de la SFTF

$\gamma_{\text{sparking}} \text{ Actual}$ : Indicador de Chispa de estado actual de inspección, en [r.m.s], resultado de la SFTF

$\Delta_{\text{sparking}}$ : Indicador de falla comparativo entre Línea Base y Estado Actual de inspección [%]

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. OBJETIVOS DE LA TESIS

EL principal objetivo de la presente tesis es aplicar una tecnología de diagnóstico avanzada de corrientes a problemas asociados con la conmutación en motores DC, concretamente para la detección de chispas, procesando el análisis de señales de corriente de armadura en estado transitorias (generadas durante el proceso de arranque), usando técnicas de transformadas tiempo-frecuencia (Short Time Fourier Transform, STFT). Posteriormente, identificar armónicos fundamentales, definir indicadores de severidad de Fallo y umbrales de control para el mantenimiento.

El objetivo principal se desglosa en una serie de objetivos específicos, los cuales se van desarrollando en capítulos posteriores. Estos objetivos se describen a continuación:

- 1.1.1. *Revisar el estado del arte en materia de diagnóstico de la condición de motores DC.* Revisión bibliográfica que ha abordado el tema que se investiga con relación a la generación de chispas en la conmutación. Causas, efectos y su detección.
- 1.1.2. *Caracterizar los armónicos presentes en el espectro Fourier de la corriente de armadura de un motor/generador DC.* Se pretende identificar armónicos del motor en estado sano o línea base. Por tanto, se podrán identificar tanto los armónicos introducidos por la tensión de alimentación y de rotación (armónico fundamental, armónicos secundarios) como también armónicos debidos a características constructivas.
- 1.1.3. *Explicar el proceso de aplicación de la metodología propuesta al caso de motores DC actuando como generador eléctrico.* Es un protocolo de inspección donde se describe la secuencia de pasos necesarios para aplicar de forma integral la técnica propuesta, basada en el análisis STFT de la corriente de armadura durante el arranque.
- 1.1.4. *Obtener múltiples datos experimentales con un montaje de laboratorio compuesto por un motor DC como generador (equipo Secundario) y un motor de inducción y/o jaula de ardilla como equipo primario.* La generalidad de la metodología propuesta resulta posible con un montaje de laboratorio que nos ha permitido la captura de señales (trabajando a varios regímenes de operación), de corriente de arranque y que suman un poco más de 600 señales.
- 1.1.5. *Aplicar procesamiento computacional a señales de laboratorio.* Realizar el análisis computacional de las señales medidas, aplicando los criterios y técnicas necesarias, de forma tal que nos permita cuantificar el estado de la salud del

activo (Motor/Generador DC) respecto al parámetro monitorizado. No obstante, la técnica podrá ser capaz de identificar otros modos de fallo que no están al alcance del presente trabajo.

1.1.6. *Interpretar los resultados y obtener conclusiones.* Comprobación de la técnica de diagnóstico para las condiciones parametrizadas en el montaje de laboratorio. Adicionalmente, se podrá evaluar la incidencia de factores, sobre los resultados obtenidos con relación a condiciones operativas (nivel de carga de trabajo), condiciones constructivas del motor (número de escobillas, tipo de escobillas, número de delgas del conmutador), tipología del arrancador (opcional), variable monitorizada (corriente de armadura). Se podrán obtener recomendaciones desde el punto de vista práctico.

1.1.7. *Estandarizar de forma Industrial la metodología de diagnóstico.* Gracias a la tecnología se puede tener una posible incorporación de la técnica de diagnóstico en dispositivos portátiles para el monitoreo por condición.

1.1.8. *Publicar los resultados de la investigación realizada.* Tener la oportunidad de difundir la investigación en escenarios académicos, congresos industriales y poder tener puntos de vista de expertos en el diagnóstico de fallos en motores DC.

## 1.2. ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TESIS

El contenido de la tesis se ha estructurado en una serie de capítulos que se describen a continuación:

- En el capítulo 1 se enumeran y describen los objetivos perseguidos en la presente tesis, adicionalmente, se establece su estructura y desarrollo.
- En el capítulo 2 se dedica a la introducción de la Máquinas Eléctricas, sus aspectos históricos, principio de funcionamiento, las características constructivas de las máquinas eléctricas rotativas.
- El Capítulo 3 se comentan, Clasificación de Escobillas y Parámetros fundamentales de las escobillas.
- El capítulo 4 se comenta el estado del arte de las técnicas de mantenimiento en Maquinas Rotativas, en Motores/Generadores DC y equipos empleados para el Mantenimiento. Aspectos relacionados con el aspecto de Pátinas con explicación de casos concretos.
- El capítulo 5, se describe el método de diagnóstico propuesto, se describen los antecedentes históricos,
- El capítulo 6, Procedimiento y Análisis Experimental
- Finalmente, se exponen las conclusiones globales de la presente tesis, aportes principales y se deja la línea base de trabajo para trabajos futuros sobre el mismo tema.
- El Anexo I, Memoria Económica de la implementación de la Técnica.



## CAPITULO 2: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

### 2.1. INTRODUCCIÓN A MÁQUINAS ELÉCTRICAS: ASPECTOS HISTÓRICOS

Las máquinas eléctricas se denominaron por primera vez con el nombre de “*máquinas dinamoeléctricas*”, este término se debe a **Charles Brooke**; que lo incluyó en el “Proceedings de la Royal Society” de 1867, en un artículo sobre conversión de energía. La expresión anterior, en su sentido general, incluye todos los tipos de *máquinas eléctricas* que funcionan bajo el principio de inducción de **Faraday (1791-1867)** descubierto en 1831. Las máquinas se definían como convertidores de energía mecánica en energía eléctrica (**generadores o dinamos**); o a la inversa, como convertidores de energía eléctrica a mecánica (**motores**), dado el principio de reciprocidad de la máquina eléctrica formulado por **Lenz (1804-1865)** en 1838 [Fraile 2003].

En 1832 **Polyte Pixii**, de Parí construyó la 1ra máquina magnetoeléctrica que producía una corriente alterna y que mejoró más tarde asesorado por **Ampère (1775-1836)** e ideó un conmutador primitivo para rectificar la onda resultante y convertirla en una onda unidireccional; ya en 1862, **Holmes** construyó una máquina perfeccionada de corriente continúa gran conmutador de 160 bobinas y 60 imanes.

En 1867 **Werner Von Siemens** presentó a la Academia de Ciencias de Berlín una máquina auto excitada a la que dio el nombre de “*dynamo-electric Machine*” y el mismo día **Wheatstone** presentaba en la Royal Society una idea análoga. Por su parte Siemens proponía un esquema con bobinas de excitación en **serie** con el inducido, mientras Wheatstone era partidario de una conexión en paralelo (**Shunt**). En 1881 **Deprez** (Francia) y **J.Perry** (Inglaterra) sugirieron la excitación compuesta (**Compound**) para obtener una autorregulación del dinamo [Fraile 2003].

La teoría del motor DC se desarrolló simultáneamente con la teoría del dinamo. Por destacar los estudios de H.Ward-Leonard, en 1896 y sus procedimientos de regulación de velocidad de forma precisa.

Las aplicaciones de los motores eléctricos han sido de vital importancia para el desarrollo y crecimiento de los países, particular los desarrollados. Se estima que existen más de 300 millones de motores eléctricos a nivel mundial, los cuales al 2012, consumían unos 7400 TWh por año, lo que representan aproximadamente el 40% de la demanda mundial de energía [Morena, 2012] y se estima un crecimiento de un 7% para el 2025; teniendo como factores principales las preocupaciones sobre el impacto ambiental de la generación de energía a partir de fuentes convencionales como el carbón y el gas natural; así como la creciente demanda de energía eléctrica con el aumento en ventas de vehículos eléctricos.

Dentro de los motores de uso industrial, se consideran los motores DC, Síncronos y asíncronos o de inducción; siendo éstos últimos los más empleados dada su simplicidad, economía y robustez.

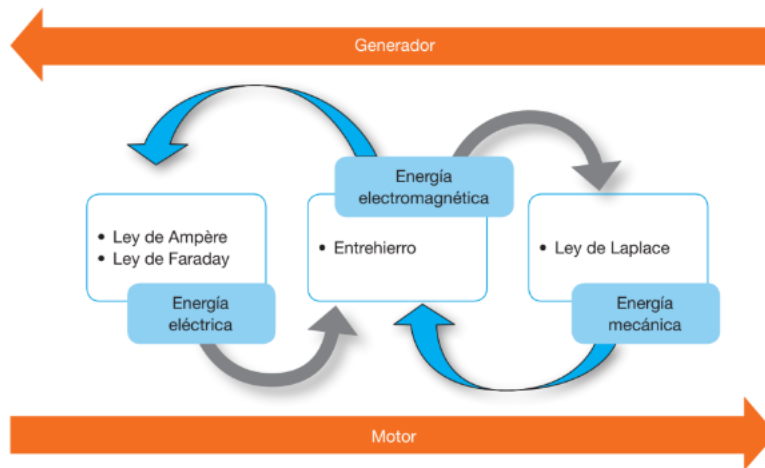
En un principio, los procesos de producción, transmisión y aplicación de energía eléctrica se basaban en voltajes y corrientes continuas. Todas las tareas de conversión electromecánica empleaban máquinas de corriente continua únicamente siendo efectivo en cortas distancias debido a sus grandes pérdidas durante la transmisión de potencia [Vukosavic, 2013]. Por otra parte, se demostró que son más eficientes en redes de transporte (1954) a largas distancias (por lo general superiores a 1000km) y en líneas submarinas de cualquier longitud [Fraile 2003].

En la actualidad, la generación, la transmisión, distribución y consumo de energía eléctrica se basan en tensiones y corrientes alternas, debido a la sencillez y economía que supone el uso de *transformadores* para convertir tensiones de un valor a otro. La utilización de motores de corriente continua en la industria ha ido disminuyendo progresivamente en las últimas décadas y siendo reemplazadas por máquinas de corriente alterna gracias a los avances de la electrónica de potencia. Las principales razones radican en su mayor costo, mayor complejidad constructiva y mantenimiento más delicado [Velasco, 2022]. Sin embargo, la ventaja fundamental de los motores DC frente a los motores AC ha sido su grado de flexibilidad para el control de la velocidad y el par, lo cual ha hecho muy interesante su aplicación en diversos accionamientos industriales y procesos electroquímicos: electrólisis, galvanoplastia, trenes de laminación, telares, etc., y también se emplea en tracción eléctrica por la mayor facilidad de regulación de la velocidad (en España la tracción eléctrica se realiza en DC a 3000V, los trenes metropolitanos funcionan con 600 V a DC y el tren de alta velocidad AVE trabaja con AC monofásica a 25.000V) [Fraile 2003].

Los motores/generadores DC tienen como ventajas principales, el poder regular continuamente la velocidad y par de arranque variando la tensión de entrada o el flujo de corriente, gracias al desarrollo de convertidores electrónicos de potencia. Sin embargo, su uso ha ido decreciendo en las últimas décadas en comparación con los motores AC. Las principales razones obedecen a sus elevados costos de mantenimiento, su complejidad constructiva y mayor fragilidad; siendo al sistema conmutador - escobillas el que mayor sufre desgaste, lo cual se traduce en problemas más frecuentes de mantenimiento. Aunque la tendencia es el uso de motores *Brushless* [Noguera 2020].

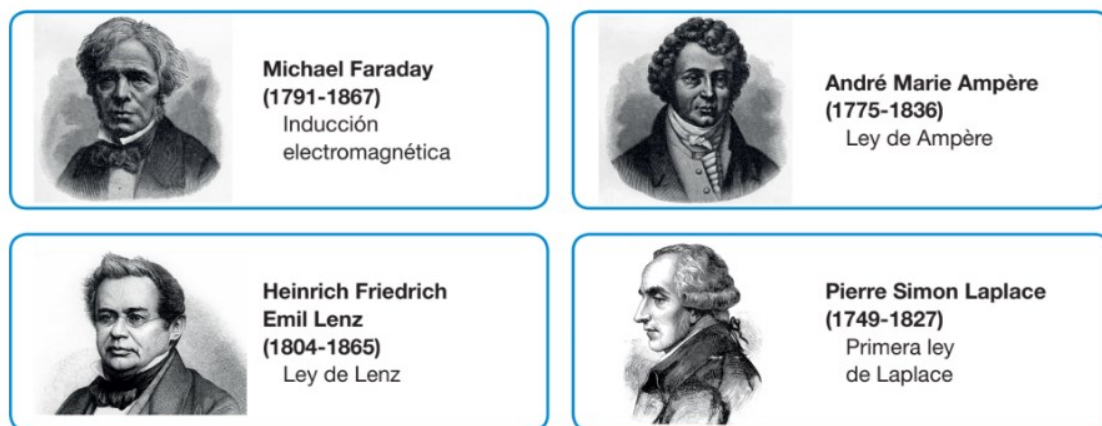
## 2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Todas las máquinas eléctricas rotativas cumplen el principio de reversibilidad y pueden funcionar como motor o generador, es decir, realizan conversión de energía mecánica o viceversa, en las *figuras 1 y 2* se enseñan los modos de funcionamiento de un motor DC; junto a sus leyes de funcionamiento.



*Figura 1. Esquema de conversión de energía, según el funcionamiento como motor o generador, y leyes fundamentales [Gómez 2020].*

Cuatro leyes fundamentales y un teorema son suficientes para definir el funcionamiento de cualquier máquina rotativa, y nos ayudan a comprender su comportamiento.



*Figura 2. Científicos que hicieron aportes sobre las leyes de funcionamiento del motor eléctrico [Gómez 2020].*

### 2.2.1. Leyes Fundamentales

#### Campo Magnético

Los fenómenos electromagnéticos como son: el *campo* y el *flujo magnético* son parte esencial en el funcionamiento de cualquier máquina eléctrica. Un campo magnético suele ser generado por la circulación de corriente Eléctrica y/o por imanes permanentes.

EL motivo o causa fundamental de la conversión de corriente AC a DC o viceversa, en motores, generadores y transformadores eléctricos es la presencia de un campo magnético. Por tanto, como lo menciona el autor [Gómez 2020]:

- EL paso de una corriente eléctrica por un conductor genera un campo magnético a su alrededor.
- Un conductor por el cual circula corriente y está inmerso en un campo magnético sufre una fuerza sobre él mismo (ley de la mano derecha).
- Un campo magnético variable en el tiempo induce una diferencia de potencial en los extremos de la bobina por la que atraviesa.

En el caso de los motores eléctricos, la magnitud del campo magnético en una espira por la cual circula una corriente vendrá expresada por la *ley de Biot-Savart (1)* y la *ley de Ampère (2)* para una solenoide o bobina:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R} \text{ (espira)} \quad (1)$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L} \text{ (bobina)} \quad (2)$$

Donde:

$\mu_0 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} N}{A^2}$ : permeabilidad magnética del vacío.

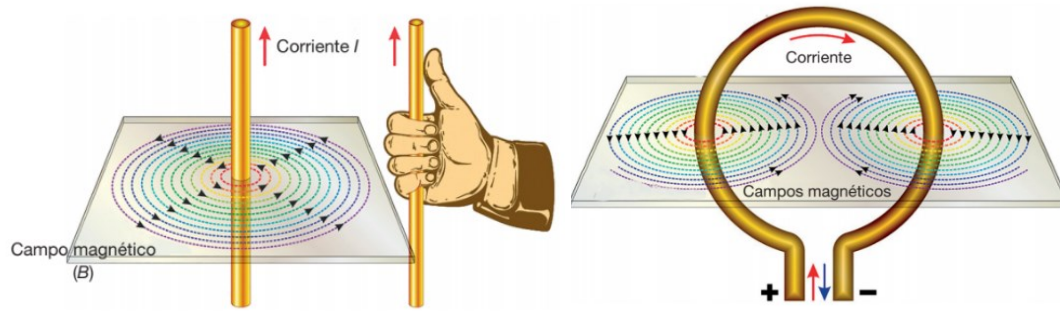
$I$ : Corriente que circula en la espira /bobina, en amperios [A]

$N$ : número de espiras de la bobina

$L$ : Longitud de la bobina

$B$ : Campo magnético, en Teslas [T]. La dirección del campo es vectorial y su dirección la define la regla de la mano derecha.

$R$ : radio de la espira, en metros [m]



**Figura 3.** (Izquierda) Sentido de giro de Campo magnético, producido por la circulación de una corriente en una barra central, (derecha) Líneas de campo magnético generadas en una espira por el paso de corriente [Gómez 2020].

### Flujo Magnético

El flujo magnético es el producto escalar del vector campo magnético y el vector infinitesimal de superficie perpendicular a la superficie que representa. Ambos vectores pueden formar un ángulo de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Está dado por la expresión (3).

$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Dado que la inducción magnética suele ser constante en la sección transversal de las chapas magnéticas, la expresión (3) se reduce a (4) en weber

$$\Phi = B \cdot A \quad [\text{Wb}] \quad (4)$$

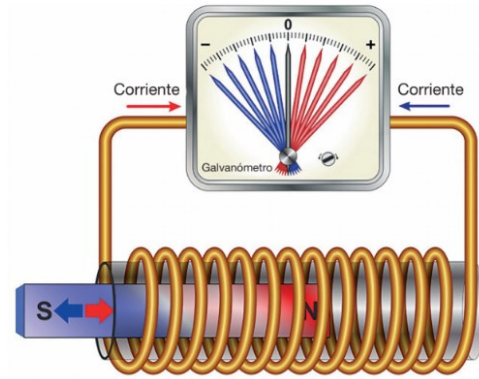
Siendo A el área.

### Ley de Faraday o de inducción electromagnética

Enuncia el comportamiento de una bobina que se somete a un campo magnético variable, produciendo una fuerza electromotriz sobre el conductor proporcional a la variabilidad de dicho campo.

$$E = -\frac{d\theta}{dt} \text{ (una Espira); } E = -N\frac{d\theta}{dt} \text{ (N espiras)} \quad (5)$$

Siendo:  $\frac{d\theta}{dt}$  la variación del flujo magnético en el tiempo.



**Figura 4.** Esquema de movimiento lineal de un imán (campo magnético variable) produce una lectura en el galvanómetro positiva o negativa según su sentido de recorrido en la bobina. Lo que refleja una corriente eléctrica circundante [Gómez 2020].

Fruto de la circulación de una corriente, *figura 3*, se inducirá un campo magnético en las espiras de la bobina, cuya dirección, dada por la regla de la mano derecha, se opondrá a la causa que los genera, como se ilustra en la *figura 4*.

#### Ley de Lenz

Según la ley de Faraday, Ecuación (3), implica que en una espira de contorno cerrado se inducirá una fuerza electromotriz *f.e.m.*, lo cual implica la existencia de un *campo eléctrico inducido*  $E_{ind}$ , cuya expresión está dada por (6).

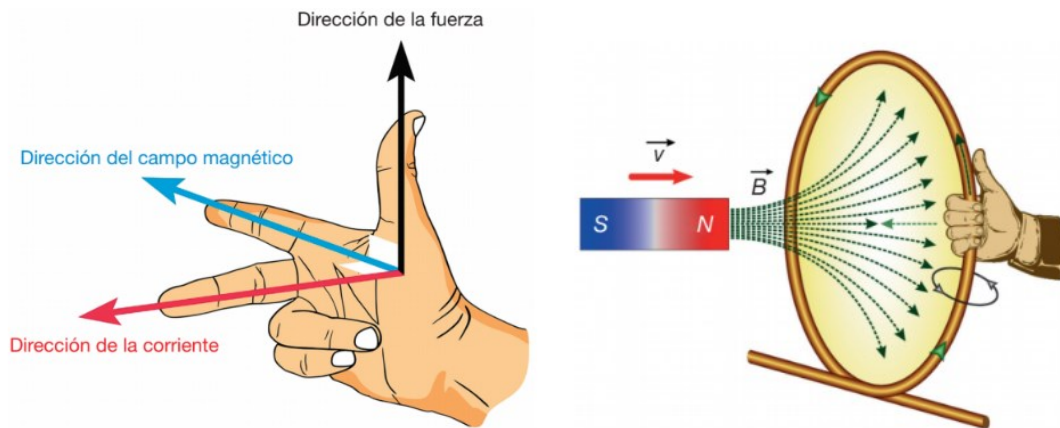
$$\Phi = \oint_c E_{ind} \cdot dl \quad (6)$$

En función de la resistencia del conductor, luego de (6), se deduce (7)

$$E_{ind} = R \cdot I_{ind} \quad (7)$$

Por lo que es evidente que si existe una *corriente inducida*  $I_{ind}$ , existe también un *campo magnético inducido*  $B_{ind}$ , que será el campo magnético variable que genera la corriente inducida que pasa por el conductor, en sentido contrario al campo magnético que lo origina; así como la *ley de Lenz* lo enuncia.

$$\oint B_{ind} \cdot dl = \mu_0 \cdot I_{ind} \quad (8)$$



**Figura 5.** (Izquierda) Regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza  $\vec{F}$ ; (derecha), expresión gráfica de las leyes de Faraday y de Lenz. [Gómez 2020].

### Ley de Ampère

La intensidad de circulación de un campo magnético en un circuito cerrado es proporcional a la corriente que recorre por ese contorno cerrado, ver (9).

$$NI = \oint H \cdot dl \quad (9)$$

### Ley de la Laplace

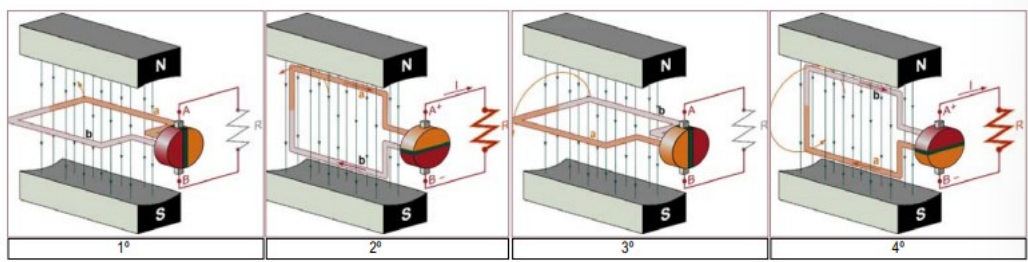
La fuerza que experimenta un conductor de longitud  $L$  por el que circula una corriente eléctrica  $I$ , que a su vez está inmerso en un campo magnético  $B$ , se expresa de la forma, ver (10):

$$\vec{F} = L \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) = L \cdot I \cdot B \cdot \sin\alpha \quad (10)$$

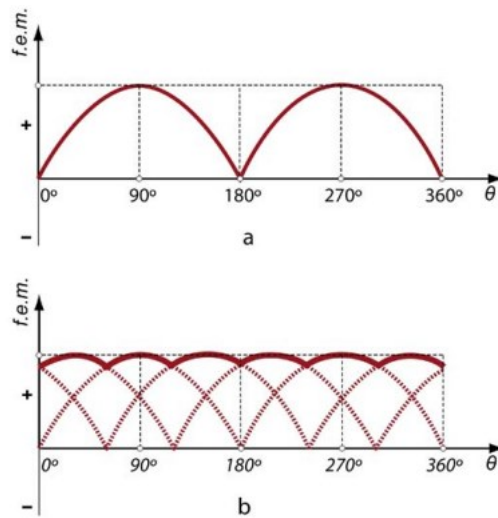
Donde  $\vec{F}$  se define por la regla de la mano derecha.

## 2.3. FENÓMENO DE LA CONMUTACIÓN

La conmutación se realiza en Generadores DC para mantener siempre el mismo sentido de la corriente en el circuito exterior, obteniendo así una corriente directa, y en los Motores DC, para invertir, a medida que giran, el sentido de la corriente en las bobinas rotóricas. De esta manera se mantienen las fuerzas que provocan el par de giro siempre en el mismo sentido. Dicho de forma simple, la conmutación es la conversión mecánica de AC a DC en las escobillas de una máquina DC. A continuación, en la *figura 6* se describe la evolución de la *fuerza electromotriz f.e.m* inducida en un generador DC en función de los ángulos de sus bobinas. La forma de onda de la *f.e.m* es una onda rectificadora y la *f.e.m resultante*, es la suma de los valores instantáneos de las *f.e.m.s.* asociadas a cada espira de todos los conductores puestos en serie.

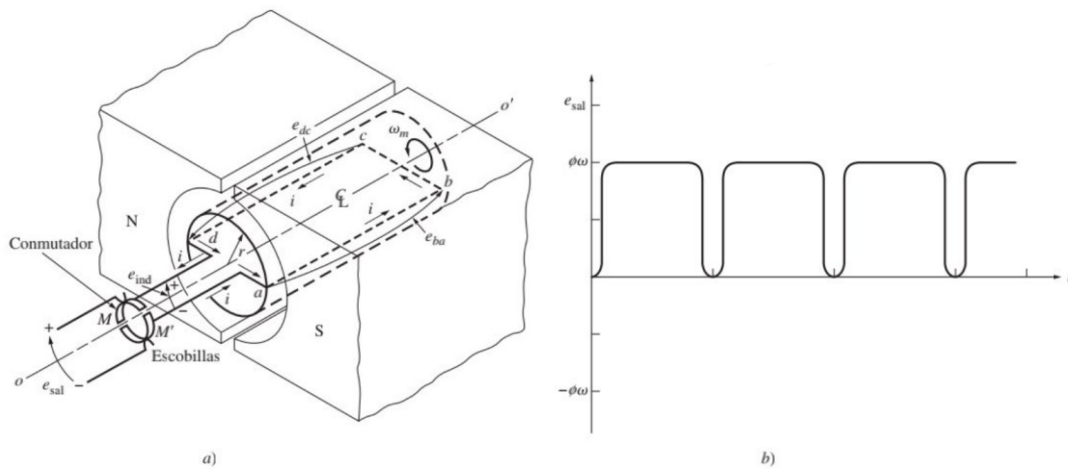


**Figura 6.** Giro de una espira en un generador, de izquierda a derecha: 1° posición a 0°, 2° posición a 90° f.e.m inducida máxima, 3° posición 180° f.e.m=0 y 4° rotor a 270° y nuevamente f.e.m es máxima. [Fraile 2003].



**Figura 7.** Graficas de la f.e.m. inducida rectificada por la conmutación. a) una espira. b) tres espiras [Fraile 2003].

El voltaje generado en cualquier motor real depende de tres factores: el flujo magnético, la velocidad de rotación y la constante que representa la construcción de la máquina.



**Figura 8.** Tensión de la salida D.C de una máquina con un conmutador y escobillas. a) vista en perspectiva; b) voltaje de salida resultante entre escobillas [Chapman 2012].

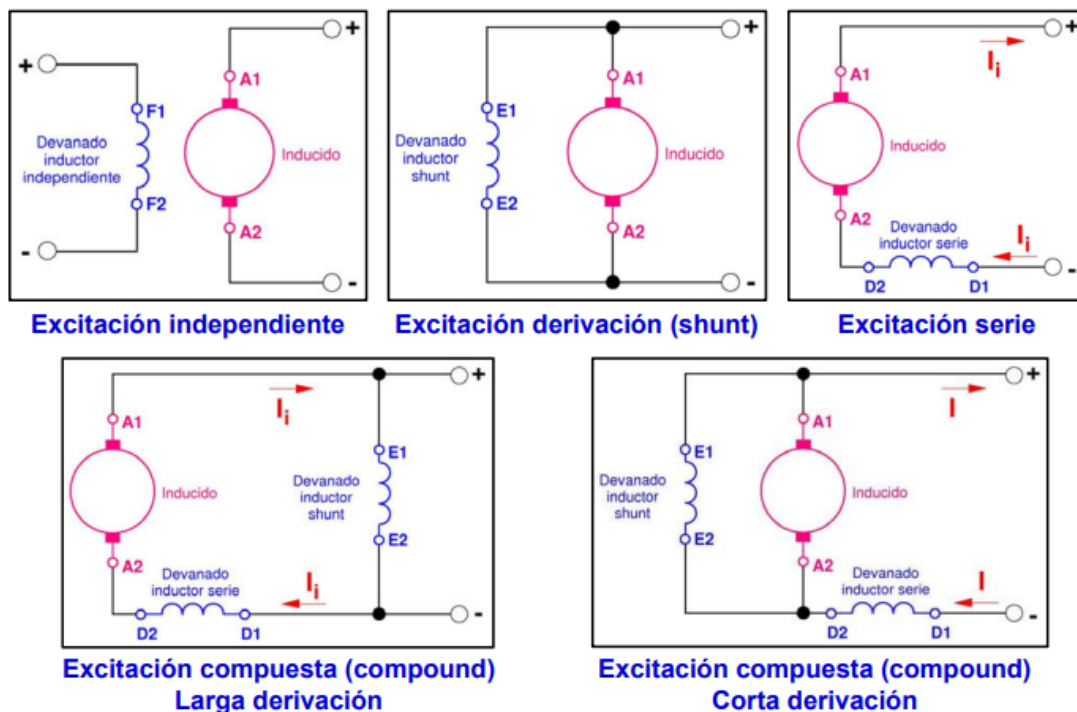


## 2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Los motores DC se caracterizan por su versatilidad. Por medio de varias combinaciones de devanados (*en derivación o en paralelo, en serie y de excitación separada*) son diseñados para mostrar una amplia variedad de características tanto para funcionamiento dinámico como para funcionamiento en régimen permanente. Por la facilidad con que son controlados, los motores DC se utilizan con frecuencia en aplicaciones que requieren una gran gama de velocidades de motor o el control preciso del rendimiento del motor [Fitzgerald, 1984].

Máquina eléctrica \ Tipo de corriente	Corriente continua
Generadores	Dinamo (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> <li>Independiente</li> <li>Serie</li> <li>Shunt o derivación</li> <li>Compound</li> </ul>
Motores	Motor (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> <li>Independiente</li> <li>Serie</li> <li>Shunt o derivación</li> <li>Compound</li> </ul>

**Tabla 1.** Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas DC [Manzano 2002].



**Figura 9.** Clasificación generadores DC. Todas las conexiones corresponden a la máquina girando en sentido horario. Para giro antihorario se invierten las conexiones a los bornes  $A_1$  y  $A_2$  [Pozueta 2010].

Tener en cuenta que, los circuitos auxiliares (de compensación y de conmutación) se conectan en serie con el inducido de forma permanente, por tanto, forman parte del inducido a pesar de estar situados en el estator.

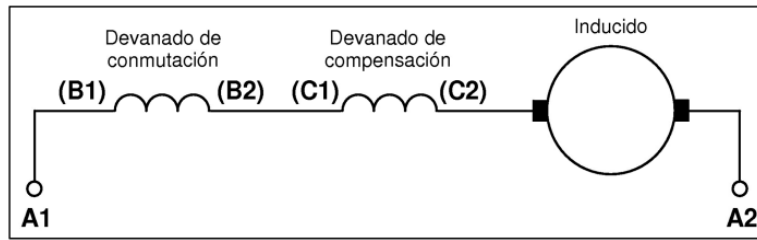


Figura 10. Inducido más bobinas auxiliares conectadas en serie [Pozueta 2010].

## 2.5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE MAQUINAS DC

Esta sección pretende hacer una buena introducción a los motores/generadores DC, haciendo énfasis sus componentes y su función principal; de forma paralela se ilustrarán ejemplos. Para empezar, en la figura 11, se ilustra un resumen de los tipos de máquinas eléctricas y se *denotan* las de objeto de estudio en el presente trabajo.

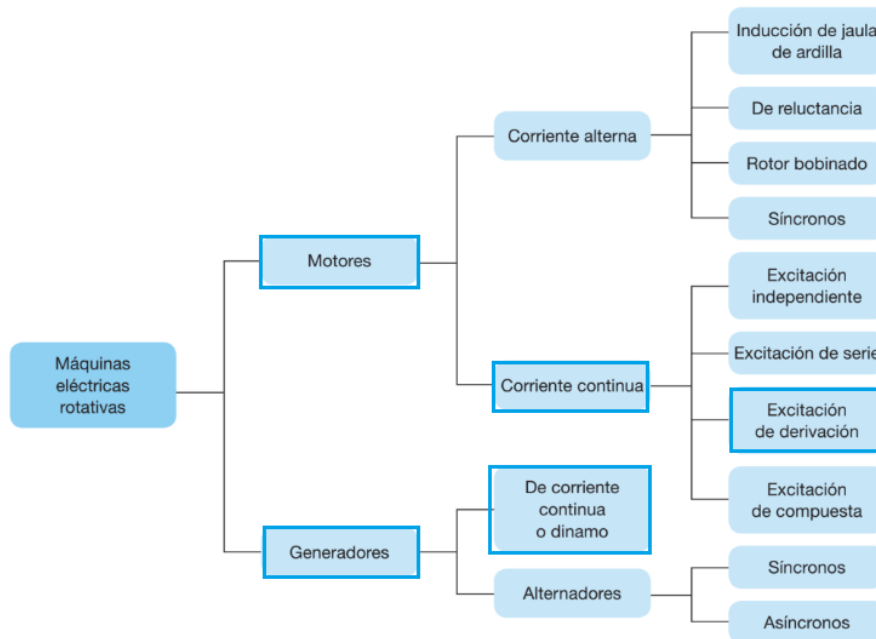


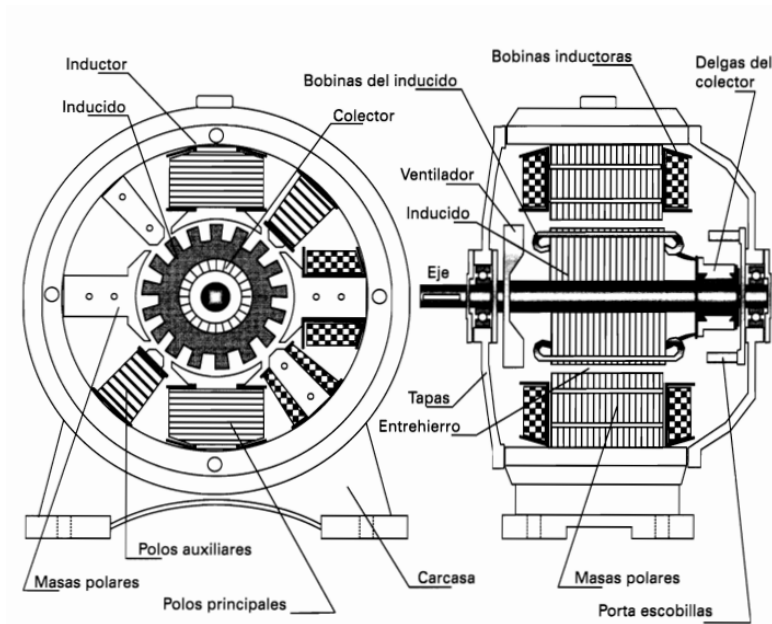
Figura 11. Clasificación de máquinas eléctricas rotativas más habituales [Gómez 2020].

Como se mencionó en la sección anterior, todas las máquinas eléctricas DC son reversibles y pueden funcionar como motor o generador. A continuación, se describen las partes más relevantes de una máquina DC sin diferenciar si es generador o motor. Desde el punto de vista constructivo, una máquina de corriente continua está constituida

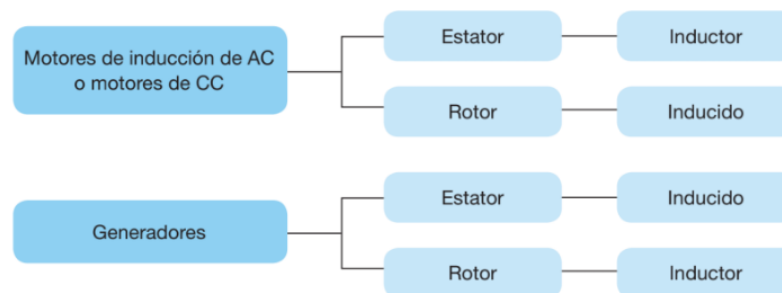
esencialmente por dos partes principales, como son: La parte mecánica y la parte electromagnética.

**La parte mecánica**, quien da uniformidad y funcionalidad tiene una parte estática, compuesta por la carcasa, las tapas laterales y los apoyos o fijaciones de la máquina. Y por una parte móvil, denominada inducido, que gira apoyada sobre cojinetes [Domínguez 2008].

**La parte electromagnética**, formada por un circuito magnético y dos circuitos eléctricos. El circuito magnético constituido por empilados de chapa magnética, que forman las masas polares del *inductor* y del *inducido*. Al contrario, la parte eléctrica está formada por dos devanados perfectamente diferenciados y con funciones completamente distintas: El devanado inductor y el devanado inducido, que está colocado sobre las ranuras de parte que gira [Domínguez 2008].



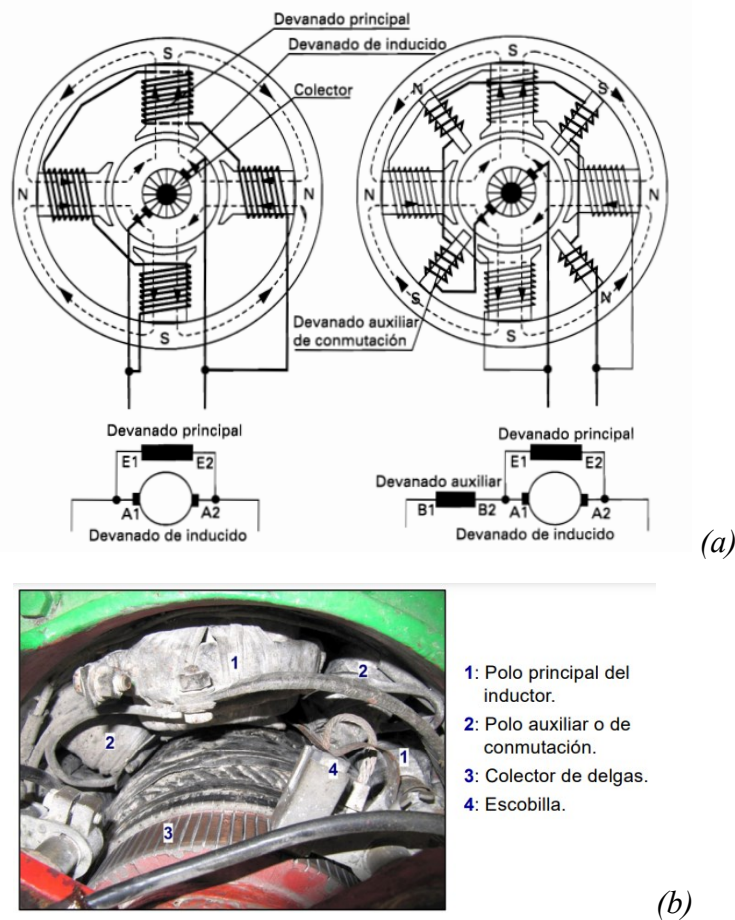
**Figura 12.**Constitución de una Máquina DC, con inductor y polos salientes. [Domínguez 2008].



**Figura 13.**Esquema del estator y del rotor con respecto a la configuración, Motor/Generador [Gómez 2020].

**Inductor o estator:** Es la parte estacionaria o fija de la máquina. Es el conjunto de elementos encargados de producir y conducir el flujo magnético ( $\Phi$ ), encargado de inducir las corrientes eléctricas en el inducido. El inductor a su vez está formado por: el circuito magnético, con sus bobinas principales y auxiliares, la *pieza polar*, el *núcleo*, el *devanado/Bobina* o excitación y las masas o de expansión polar. La misión de las bobinas auxiliares es lograr una buena conmutación, evitando que se produzcan chispas la interfaz *escobillas-conmutador*.

El devanado inductor se excita con corriente directa, y su efecto en el devanado de excitación de una máquina DC es crear una distribución de flujo magnético que sea estacionario con respecto al estator.



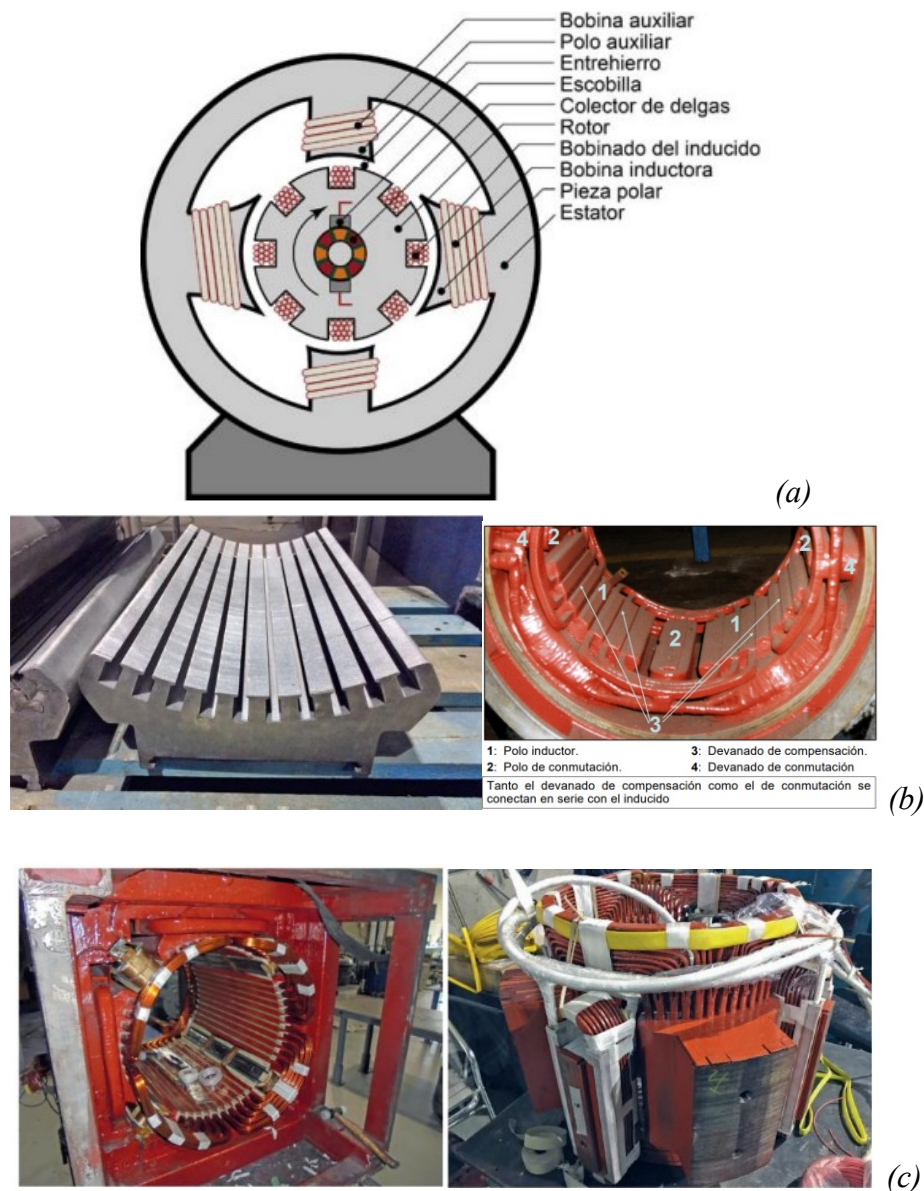
**Figura 14.** (a): Conexión de los devanados de los motores y generadores DC (ejemplo de máquina conectada en paralelo). [Domínguez 2008], (b) localización en identificación de componentes [Pozueta 2010].

**Inducido o Armadura:** Se denomina también rotor por ser la parte giratoria. Es un conjunto de espiras móviles que inducen un flujo de voltaje y corriente en la armadura. En modo motor, la corriente eléctrica se aplica al colector, por medio de las escobillas, mientras en modo generador, la armadura convierte la energía mecánica en energía eléctrica y es recogida en conmutador, también por medio de las escobillas.

**Culata:** es la envoltura de la máquina eléctrica y está hecha de material ferromagnético. Su función es conducir el flujo creado por el devanado inductor. También se unen a ella los polos de la máquina.

**Entrehierro:** se denomina entrehierro al espacio existente entre la parte fija y la parte móvil de la máquina, es decir, entre el rotor y las expansiones polares, evitándose de esta manera el rozamiento entre ambos.

**Cojinetes:** Sirven de apoyo al eje del rotor de la máquina.



**Figura 15.** (a): Partes constitutivas de las máquinas eléctricas rotativas, (b): detalle de una zapata polar donde se aloja el bobinado de excitación o campo y en las ranuras superiores el devanado de compensación (izq.), devanados auxiliares (der.) (c): Detalle de carcasa y sus devanados (izq.), detalle de núcleos polares que van atornillados a la carcasa (der.)



(a) [Fraile 2003], (b) (izq.) [Gómez 2020], (b) (der.) [Pozueta 2010], (c) [Gómez 2020]

Cabe aclarar que si no hay devanado de compensación los *polos auxiliares* tienen la doble misión de reducir la reacción de inducido y de mejora la conmutación.

Los devanados de las máquinas DC son cerrados, sin principio ni fin. Los devanados pueden ser *imbricados y ondulados*, dependiendo de si se cruza o no las partes de la bobina (figura 16), formando bobinas que constan de dos lados activos que se sitúan debajo de polos de diferente nombre con el objeto de obtener la mayor *f.e.m.* posible.

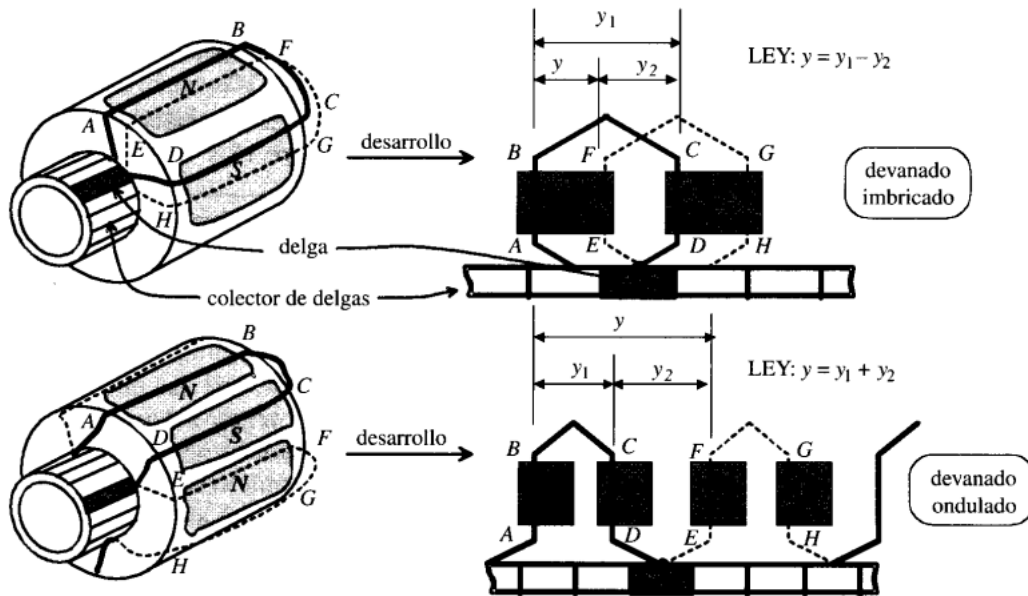
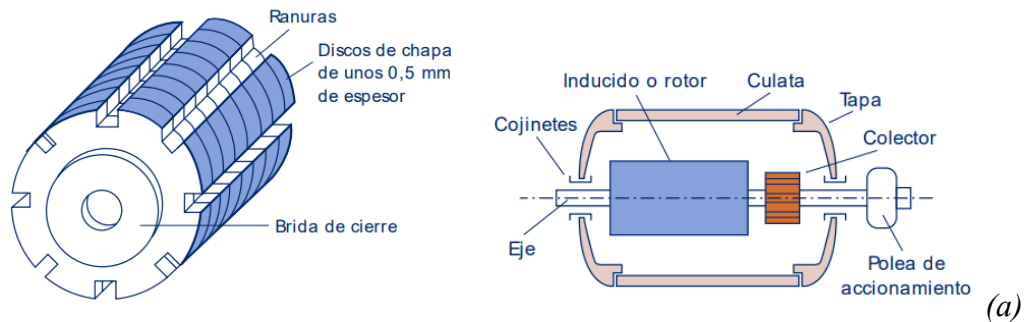


Figura 16. Devanados imbricados y ondulados. [Dominguez 2008].

El **núcleo del inducido** está formado por un cilindro de chapas magnéticas troqueladas (figura 17) que están construidas, generalmente, de acero laminado con un 2% de silicio para mejorar las pérdidas en el circuito magnético. Las chapas que forman el inducido disponen de *muecas o ranuras* en las que se alojan los hilos de cobre del devanado inducido; que a su vez se encuentra conectado al circuito exterior de la máquina a través del colector, y es en él donde se produce la conversión de energía.



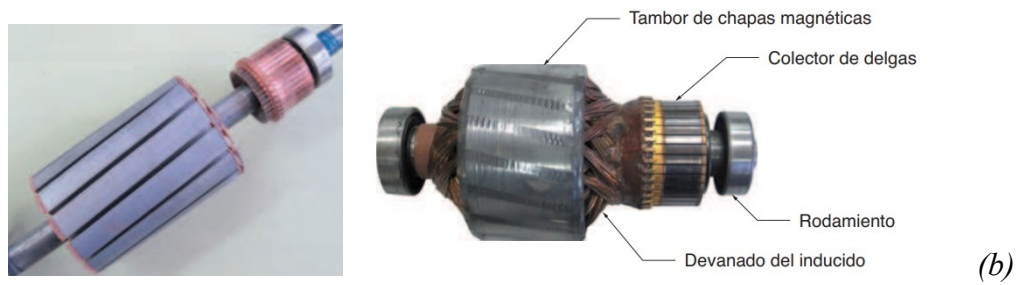


Figura 17. Inducido. (a) [Guerrero 2003], (b) [Martín 2012]

### Conmutador de Delgas

Constituido por láminas de cobre denominadas **delgas**. Un Motor/Generador estará constituido de tantas delgas como bobinas simples presenta el devanado [Cherta 1974], cuya sección transversal tiene la forma de cola de milano, aisladas entre si mediante materiales aislantes (dieléctrico: como la mica) y conectadas a las secciones del devanado del inducido. Forma parte del rotor y gira solidario al devanado del inducido. Tiene la misión de rectificar la tensión generada en el inducido o invertir la tensión de alimentación externa, según se trate de un generador o un motor.

Las delgas presentan en su extremo un *talón* con unas hendiduras donde se alojan los conductores terminales y se sueldan a ellas las conexiones de las bobinas. No menos importante, sobre el conmutador se deslizan las *escobillas*, ver figura 18.

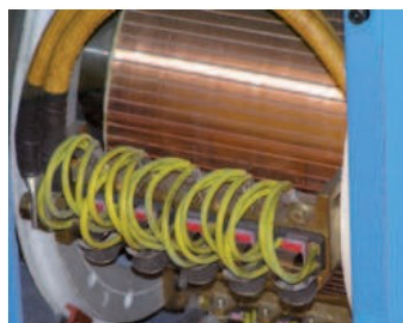
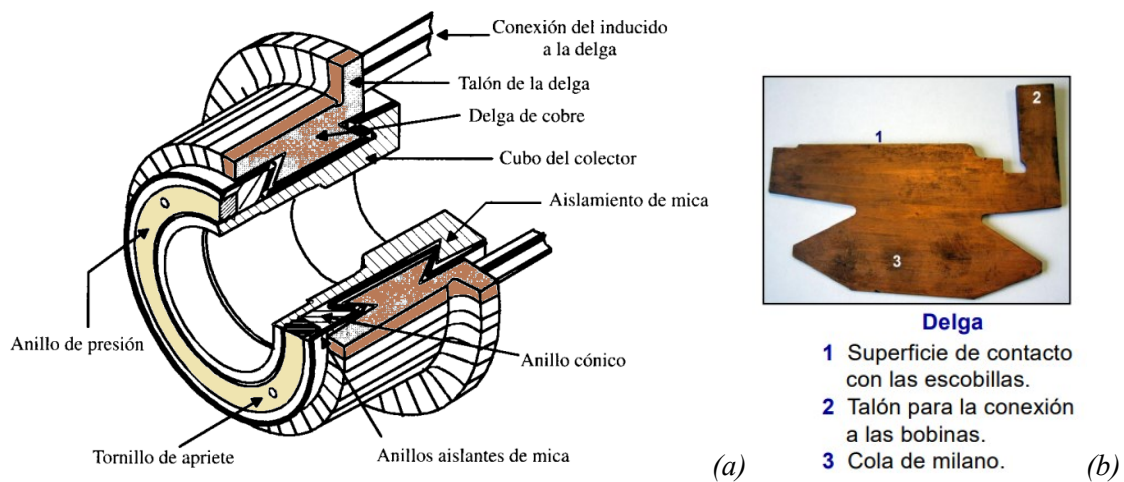


Figura 18.a) (izq.), Sección de un conmutador de delgas [Dominguez 2008], (b) (der.) Partes de una delga [Pozueta 2010], (c) Colector [Martín 2012].

## Escobillas

Una *escobilla* de carbón actúa en contacto deslizante para transmitir corriente eléctrica desde una parte estática (estator), a una giratoria (rotor) en un motor o generador, como es caso de las máquinas de DC, garantizando una conmutación sin chispas [Chapman 2012]. Es decir, son las encargadas de establecer la conexión eléctrica con el inducido a través de las delgas. *Ver figura 19* un ejemplo y sus partes.

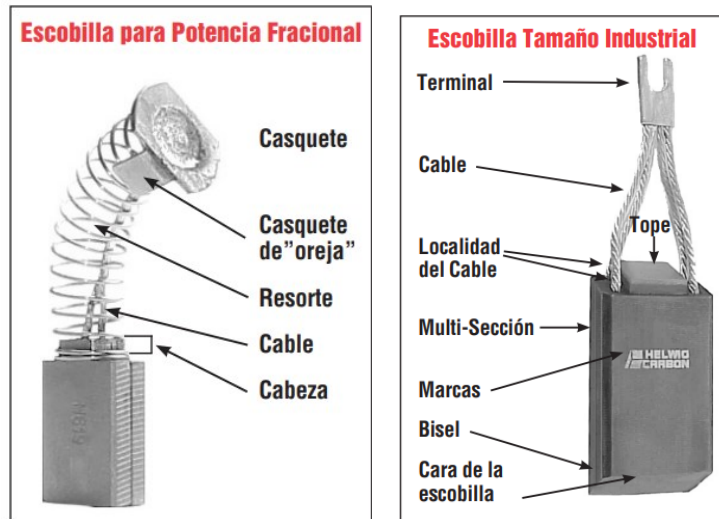


Figura 19. Ejemplos de escobillas y sus partes [Helwing 1 2020].

Una escobilla puede estar compuesta de uno o más bloques de carbono y equipadas con una o más derivaciones y/o terminales. A su vez puede realizar la conmutación con una o varias delgas al mismo tiempo. *Ver figura 20.*



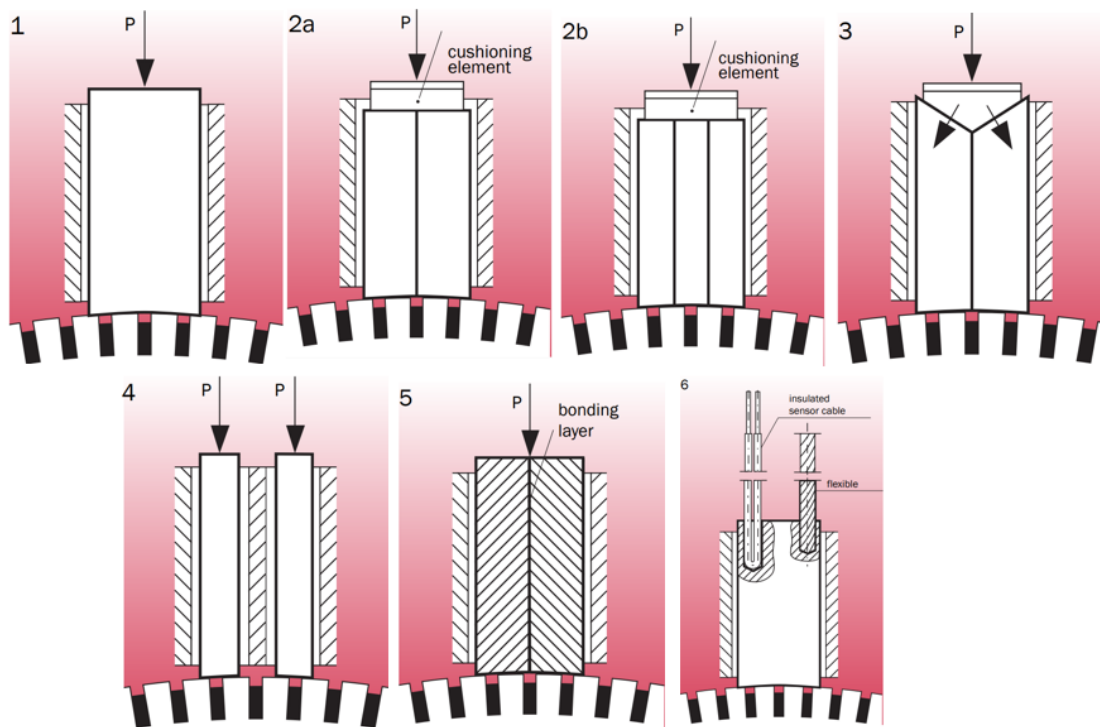
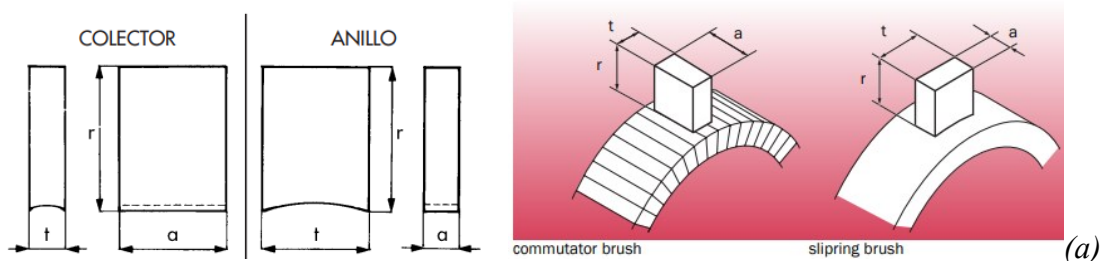


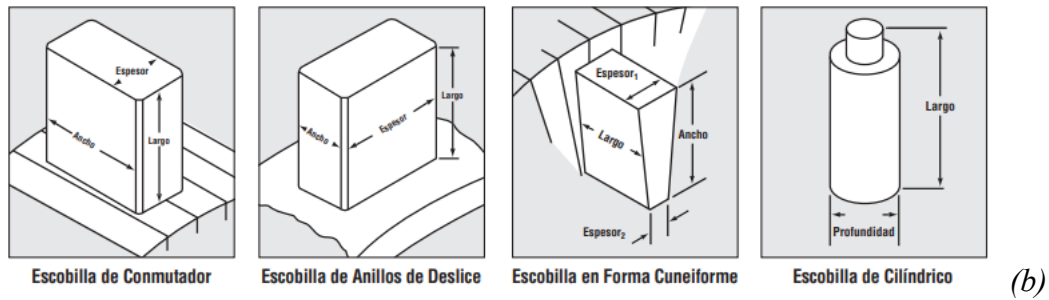
Figura 20. Escobillas 1. Solid Brushes, 2a, 2b. Split Brushes, 3. Spread Brushes, 4. Tandem Brushes, 5. Sandwich Brushes y 6. Carbon brushes with wear sensor [Helwing 2 2013].

El material de las escobillas puede ser de tres tipos: grafito, electro-grafíticos y metal-grafíticos. Son de un material mucho más blando que el de los segmentos del conmutador actuando como elemento fusible. Todo desgaste en la superficie del conmutador es el resultado directo de su rozamiento con las escobillas, para convertir el voltaje AC de los conductores del rotor en voltaje DC en los terminales de la máquina. [Chapman 2012].

Las formas y dimensiones principales de las escobillas se indican con su valor nominal y son especificadas de acuerdo con la norma **DIN IEC 60136-3** y el orden “**t: tangencial /espesor**”, “**a: axial/ancho**”, “**r: radial/largo**” tal y como se ilustra a continuación:

DIMENSIONES t, a, r





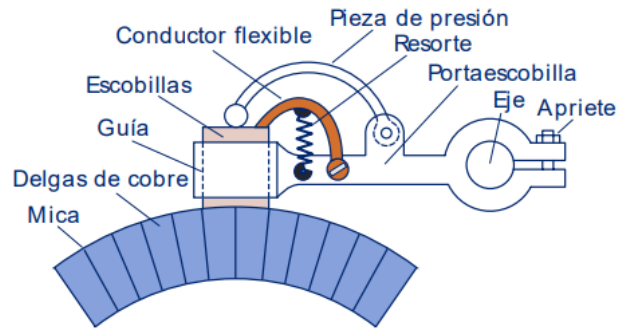
**Figura 21.(a)** Formas y Dimensiones de escobillas según aplicación (según la IEC 60276 y IEC 60136), *t x a x r* en cm. [Helwing 1 2020] [Helwing 2 2013] **(b)** [Carbone Lorraine 2017].

Las escobillas permanecen inmóviles en el espacio, alojadas en la porta escobillas desde donde se deslizan sobre las delgas del colector/conmutador y mediante un flexible, se unen a los bornes del inducido. Los cables flexibles pueden ser de diferentes dimensiones y calibres de capacidad nominal de corriente [A] con hilos estañados que evitan los problemas de contaminación. La sección transversal es determinada respecto a las normas **DIN 46438, DIN 46224**; a continuación, se ilustra la *tabla 2* como ejemplo de un fabricante [Carbone Lorraine 2013].

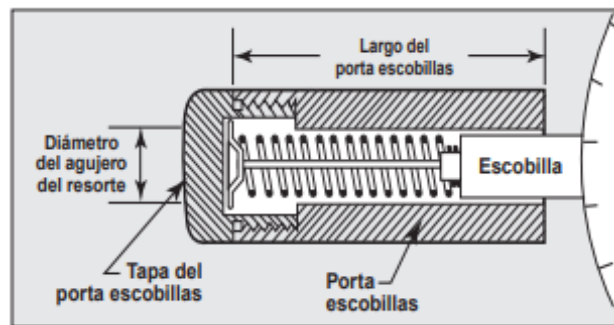
Diámetro (mm)	1,6	1,8	2	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6	4	4,5	5	5,6	6,3
Capacidad nominal (A)	15	17	20	24	28	32	38	44	50	60	75	85	100

**Tabla 2.** Capacidad y Dimensiones de cables flexibles en escobillas del fabricante Carbone Lorraine [Carbone Lorraine 2013].

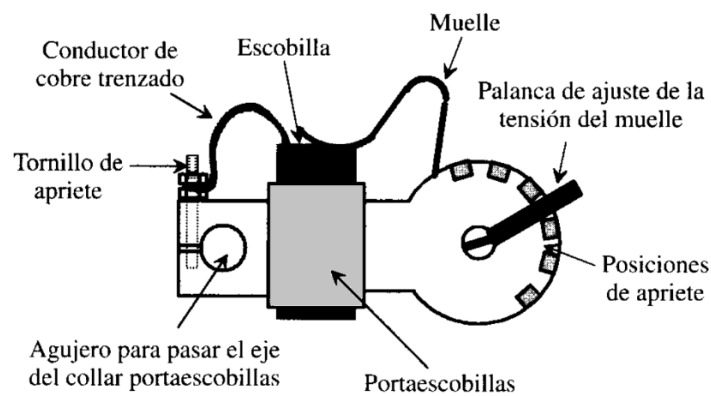
Por otra parte, la presión de la escobilla sobre el conmutador/colector debe ser la apropiada para lograr un máximo de vida útil. Por lo general, se consigue por la acción de un muelle/ resorte en espiral cuya presión se ajusta por medio de una palanca/tornillo. Las escobillas de la misma polaridad van juntas en paralelo al mismo terminal de salida por su conexión al exterior. *Ver figura 22* algunas tipologías existentes.



(a)



(b)



(c)

**Figura 22.** Colector, Escobillas y sus partes. (a)[Guerrero 2003], (b)Resorte Helicoidal [Helwing 2 2013], Tipo resorte (c) Tipo muelle espiral [Fraile 2003].

En las secciones siguientes se ampliará aún más el conocimiento de las escobillas.

### CAPITULO 3: GRUPOS DE CALIDAD DE ESCOBILLAS

Las escobillas, por naturaleza constructiva, tienen *alta conductividad* para reducir las pérdidas eléctricas y *bajo coeficiente de rozamiento*, por sus características lubricantes, para reducir el desgaste excesivo. En la actualidad, algunos fabricantes (Carbone Lorraine, Shunk, Mersen, Helwig) han presentado cinco grupos principales de escobillas según la norma **DIN EN60276** (Ver tablas 3,4, 5 y 6) que se clasifican por su modo de fabricación específico y que definen sus *propiedades principales, aplicaciones y límites de uso* (densidad de corriente  $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$ , velocidad periférica admisible  $\left[\frac{m}{s}\right]$  y presión [kPa] ). Algunos fabricantes suelen incluir factores de uso como son *la resistividad  $[\mu\Omega\cdot m]$ , dureza shore, y Número de película*. A continuación, se presenta un cuadro resumen de uno de los fabricantes:

Categoría	Aplicaciones	Propiedades
<b>Carbográficas</b>	- Maquinas antiguas lentas, con o sin polos Auxiliares. - Máquinas con imanes permanentes. - Servomotores	- Buen poder de conmutación. - Caída media de Tensión al Contacto - Buena Resistencia a altas $\overset{\circ}{T}$ - Soporta cargas variables
<b>Electro gráficas</b>	- Todo tipo de aplicaciones: estacionaria o de tracción, rápidas. - Tensiones bajas, medias o altas constante o variable.	- Caída media de Tensión al Contacto y frotamiento bajo o medio - Pérdidas reducidas
<b>Gráficas Blandas</b>	- Anillos de acero de máquinas asíncronas o síncronas rápidas.	- Amortiguan de manera eficaz los choques y vibraciones mecánicas.
<b>Escobillas Metálicas</b>	- Máquinas CC lentas, con baja o muy baja tensión. - Anillos Motores asíncronos lentos pero cargados, con o sin elevación de escobillas. - Anillos de Motores Síncronos con velocidades lentas o medias.	- Escobillas pesadas o muy pesadas, con frotamiento bajo. - muy baja caída de tensión al contacto, con pérdidas reducidas.
<b>Resino gráficas</b>	- Máquinas CA con colector tipo Schorch. - Ciertas Máquinas CC destinadas a tracción estacionaria, con velocidades medias y cargas moderadas.	- Escobillas con elevada resistencia mecánica y eléctrica. - Gran poder de conmutación, - Alta Caída de tensión al contacto, - Pérdidas elevadas. - Pueden funcionar con muy baja densidad de corriente.

**Tabla 3.** Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Aplicaciones y Propiedades [Carbone Lorraine 2017].

Límites de Uso			
	Densidad de Corriente [A/cm <sup>2</sup> ]	Velocidad [m/s]	Presión [kPa]
<b>Carbografíticas:</b> Aglomerado de Polvo de carbono, grafito natural y grafito artificial	8 a 12	hasta 25	13 a 18
<b>Electro grafíticas:</b> Polvo de carbono y coque sometidos a tratamiento superior a 2500 °C.	8 a 12 (Régimen Estable) 20 a 25 (Régimen Transitorio)	Hasta 50	13 a 40
<b>Grafíticas Blandas:</b> Grafito natural o artificial, triturado, aglomerado y cocido.	10 a 13	70 a 90	13 a 18
<b>Escobillas Metálicas:</b> Mezcla de polvo de grafito natural purificado y cobre o bronce, prensado y cocido.	12 a 30 (Régimen Estable) 100 (Régimen Transitorio)	hasta 35	13 a 40
<b>Resino grafíticas:</b> Grafito natural o artificial con o sin carga triturado y aglomerado, presando y polimerizado con resina termo endurecible (fenólica)	Variables Según las Clases	hasta 40	18

**Tabla 4.** Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Límites de Uso [Carbone Lorraine 2017].

Cabe resaltar que cada fabricante define su propia nomenclatura de calidad de escobilla, define sus parámetros de laboratorio para generar los rangos de los parámetros de uso en sus tablas informativas y mencionan que, en cualquier aplicación, los valores pueden cambiar dada la cantidad de variaciones de las condiciones operacionales [Helwing 2020].

#### CAÍDA de TENSIÓN al

La caída al contacto y el frotamiento

se evalúan con los siguientes símbolos:

Símbolo	Significado	Caída al contacto en voltios Suma de las 2 polaridades	Frotamiento
A	alta	$A > 3$	$E > 0,20$
M	media	$2,3 < M < 3$	$0,12 < M < 0,20$
B	baja	$1,4 < B < 2,3$	$B < 0,12$
MB	muy baja	$0,5 < MB < 1,4$	
MMB	muy muy baja	$MMB < 0,5$	

(a)

Caída de Contacto	Fricción de Coeficiente	Código de Película
<b>MA</b> 2.5V y Más Alto	<b>A</b> 0.3 y Más Alto	<b>1</b> Abrasivo Moderado = Película ligera
<b>A</b> 1.9V á <2.5V	<b>M</b> 0.2 á < 0.3	<b>2</b> Sin Limpiar = Película
<b>M</b> 1.3V á <1.9V	<b>B</b> 0.1 á < 0.2	<b>3</b> Propiedades de Formación de Película = Película Mediana – Película Oscura
<b>B</b> 0.7V á <1.3V	<b>MB</b> < 0.1	
<b>MB</b> Menos de 0.7V		

(b)

**Tabla 5.** Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Clasificación Caídas de tensión al contacto y frotamiento en escalas. (a). [Carbone Lorraine 2017], (b). [Helwing 2 2013].

## CONTACTO y FROTAMIENTO

la caída de tensión al contacto y el frotamiento han sido medidos en laboratorio sobre un anillo ranurado de cobre, en las condiciones siguientes:

Elementos	Caída al contacto	Frotamiento
Corriente	10 A/cm <sup>2</sup>	continua
Carga	12,5 m/seg.	10 A/cm <sup>2</sup>
Velocidad		25 m/seg.
Presión		18 kPa
Temperatura anillos		65-70 °C
Escobillas		tipo radial

Los límites de uso en densidad de corriente y velocidad periférica resultan de las observaciones hechas sobre máquinas reales en buen estado y funcionando en condiciones normales de operación.

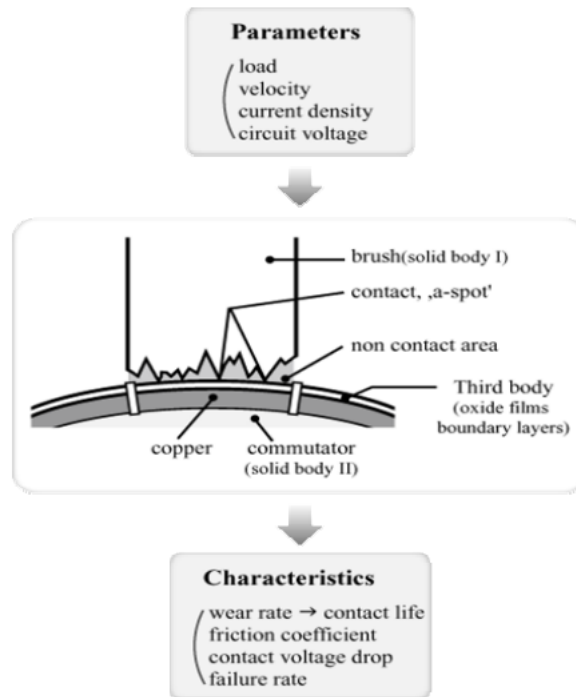
**Tabla 6.** Clasificación de Grupos de Calidades de Escobillas: Condiciones de Laboratorio para medir la caída de tensión al contacto y el frotamiento [Carbone Lorraine 2013].

### 3.1. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LAS ESCOBILLAS EN MOTORES/GENERADORES DC.

Como se mencionó en apartados anteriores, las *escobillas* establecen la conexión física entre las partes rotativas y las fijas, al estar en permanente contacto con el conmutador [Cabañas 1998]. Por otra parte, las escobillas son consideradas como un *conductor eléctrico sujeto a fricción*: Por tanto, *es un dispositivo mecánico y eléctrico a la vez, que tiene la función de transferir una corriente, que puede ser muy variable*, entre la parte giratoria de una máquina (conmutador/colector) y su fuente de alimentación externa fija o circuito de carga [Mersen 1 2017].

Es por ello, que las *escobillas* juegan un papel importante en el funcionamiento de las máquinas eléctricas; y, por tanto, se deben considerar tres factores fundamentales de tipo: *Mecánico, eléctrico y fisicoquímico (Medio ambiental)*; dependiendo de ellos, un fabricante es capaz de realizar la correcta selección del grado (calidad, composición) de la escobilla y así mejorar las condiciones de mantenimiento y alargar la vida útil del activo.

En términos generales una buena *escobilla o cepillo*, es la que mejor se adapta a la máquina. Dado que se trata de una pieza sujeta a *desgaste*, y *dentro del desempeño que se busca es que sea moderado*. A lo largo de 100 años, investigaciones se han realizado para identificar los efectos de la caída de potencial de contacto, temperatura en la superficie de las escobillas, análisis de coeficientes de fricción, cargas normales, velocidad de deslizamiento, densidad de corriente, entre otros factores que serán comentados grosso modo en los siguientes apartados.

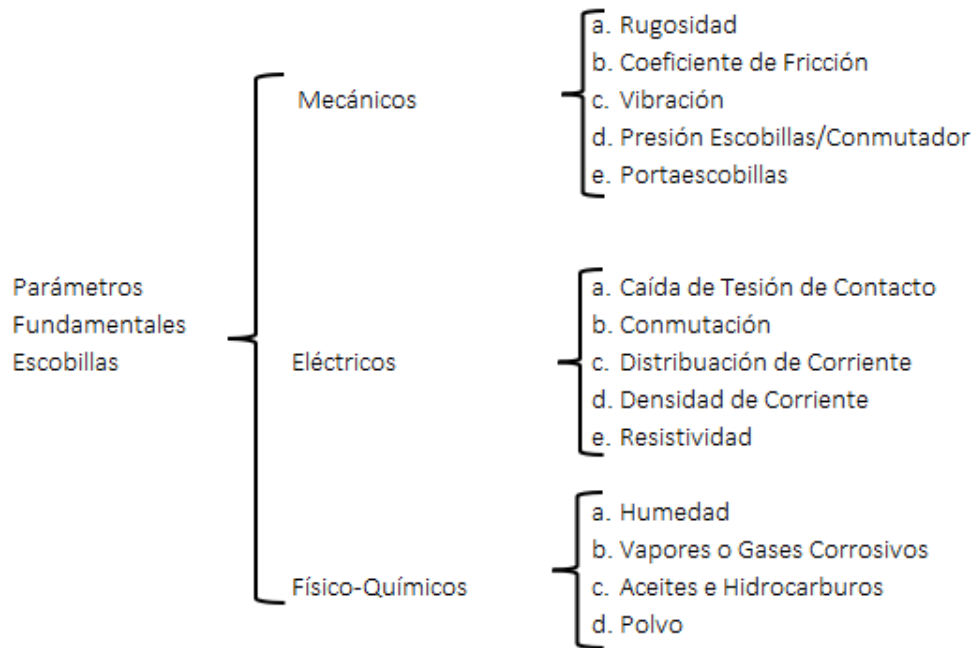


**Figura 23.** Principales parámetros y características del fenómeno a través de la superficie contacto entre la escobilla y el conmutador de un motor DC [Shin, WG 2010].

Un desgaste excesivo exigiría un mayor control del motor, en particular por el riesgo de la reducción de la resistencia interna del aislamiento, elevados costes de mantenimiento y riesgo de mal funcionamiento por una disminución del espesor de película de la Patina sobre el conmutador / anillo colector. Hay que tener en cuenta que los costes de reparación de un conmutador son muy elevados, seguido de paradas inesperadas del equipo.

La escobilla funciona correctamente dentro de un rango bastante estrecho de velocidades y cargas eléctricas, cuyos límites depende de *material constructivo* y *del correcto montaje*. Una buena práctica a la hora de elegir una escobilla para una aplicación en particular consiste en adaptar mejor sus *propiedades mecánicas y eléctricas* a las condiciones del equipo y por su parte las superficies del conmutador deben cumplir con propiedades de fricción adecuadas [Mersen 1 2017].

A continuación, en la figura 24, se definen a modo resumen los parámetros fundamentales que se deben tener en cuenta para entender el funcionamiento de las escobillas. Seguidamente serán desarrollados como parte del marco teórico técnico.



**Figura 24.** Parámetros fundamentales escobillas: Mecánicos, Eléctricos y Físico Químicos (Entorno).

### 3.1.1. PARÁMETROS MECÁNICOS

A continuación, una mirada a las condiciones superficiales del colector/conmutador

#### a). RUGOSIDAD: Estado superficial de los anillos/colectores

los valores de rugosidad del colector y/o /anillo deslizante deben ser los adecuados, lo cual dará, un buen asentamiento de la escobilla y garantizará una buena transmisión de corriente; y, por tanto, un rendimiento óptimo de las escobillas. La superficie no debe ser ni muy lisa, ni muy rugosa. Fabricantes han demostrado en ensayos de laboratorio que superficies con acabado espejo producen aumento de temperatura. Tomar como referencia los estándares **DIN 4762**, **DIN 4768** y **DIN IEC 773** para determinar  $R_a$  y no confundir con el valor *r.m.s* de la rugosidad de la superficie que se designa como  $R_s$ .

Valores de Rugosidad por debajo de **0.2 $\mu$ m** deben evitarse. Cuando el contacto de las superficies de fricción es de acabado espejo, las fuerzas de fricción se elevan y producen vibraciones seguido de un aumento de temperatura considerable. Por otra parte, el grafito no se adhiere fácilmente a la superficie, dificultando la generación de *patina* (película protectora). En estos casos, es necesario remover la superficie pulida del colector. [Mersen 5 2017].

Por otra parte, rugosidades mayores a **2 $\mu$ m**, tendrá como efecto un desgaste excesivo de las escobillas por el comportamiento del conmutador como muela abrasiva [Mersen 5 2017]. En la *figura 25* se ilustra lo comentado.



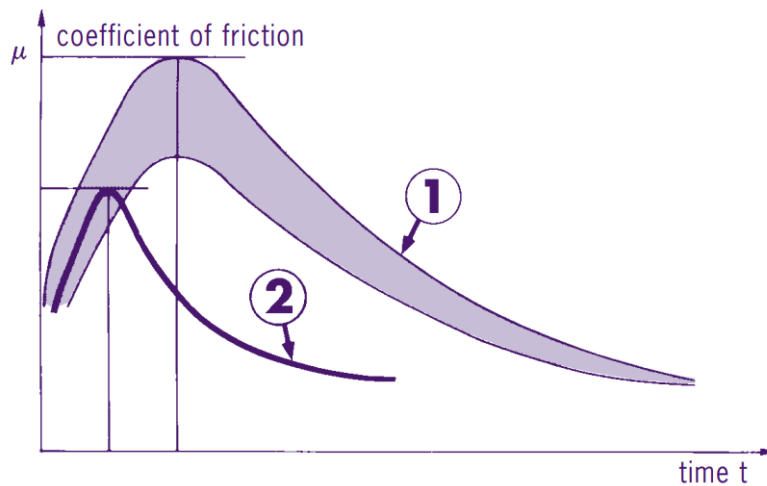


Diagram 1

1 - Commutator polished and bright  $R_a: 0.2 \mu$

2 - Commutator unpolished  $R_a: 1.5 \mu$

**Figura 25.** Rangos de Rugosidad en función del coeficiente de fricción de la superficie del colector. [Mersen 5 2017].

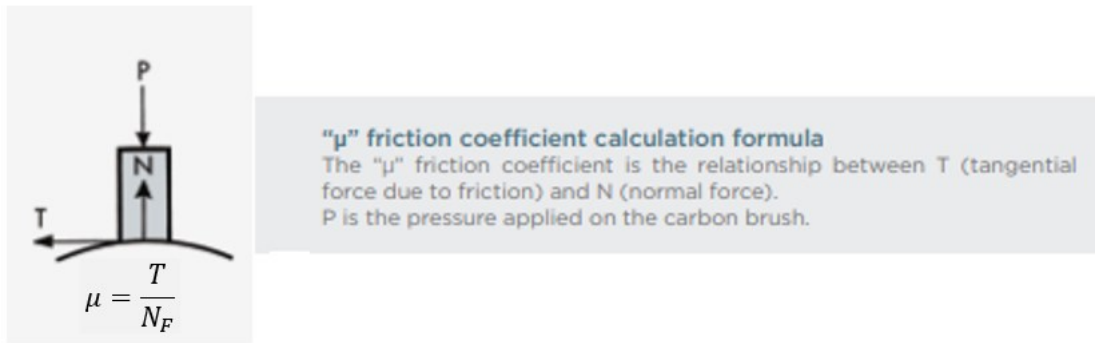
De acuerdo con la experiencia de uno de los fabricantes, los valores de rugosidad recomendados según el tipo de motor son los siguientes [Mersen 5 2017]:

- 0.9 a 1.8  $\mu m$  para conmutadores de máquinas industriales.
- 0.5 a 1  $\mu m$  para pequeños conmutadores de máquinas con una capacidad inferior a 1KW
- 0.75 a 1.25  $\mu m$  para anillos de metal o bronce.

Otro factor para considerar es el material dieléctrico (mica) sobrante, que a menudo crea serios problemas y, por tanto, los conmutadores deben ser revisados cuidadosamente (socavado correcto de la mica, ausencia de rebabas en los bornes de las barras).

## b). COEFICIENTE DE FRICCIÓN

EL coeficiente  $\mu$  debe ser bajo y estable en el tiempo para permitir que la escobilla trabaje sin sobrecalentarse.  $\mu$  no tiene valor fijo y depende del grado de la escobilla de carbón, de la velocidad de giro, de la carga, de la condición del conmutador (o anillo deslizante) y por su puesto del entorno ambiental de trabajo.



**Figura 26.** Coeficiente de fricción entre escobillas y conmutador [Mersen 1 2017].

$\mu$ : es el coeficiente de fricción

$T$ : La fuerza tangencial debida a la fricción

$N_F$ : Fuerza Normal, es equivalente a la fuerza  $P$  ejercida por el resorte para el caso de las escobillas en posición radial; y será inferior cuando las escobillas tengan un grado de inclinación.

### c). VIBRACIÓN

La vibración excesiva reduce la calidad del contacto entre la escobilla /conmutador y reduce la vida de las componentes. por tanto, el rendimiento general del equipo. Entre las principales causas de vibraciones están:

- Equipo desbalanceado, desalineado o rodamientos defectuosos
- conmutador deformado,
- por componentes externos del motor mismo (engranajes, acoplamiento, equipo de accionamiento, cargas).
- Fricción elevada y/o fluctuante, resultado de una escobilla inadecuada, entorno contaminado, pátina defectuosa, periodos prolongados bajo carga o rugosidad insuficiente (superficie quebradiza).
- Sistema escobilla, resorte y porta escobilla.
- Trabajar a la frecuencia de resonancia de motores a tracción.

Vibraciones muy altas pueden provocar daños importantes en las escobillas, así como la destrucción de la porta escobillas y deterioro del conmutador y/o anillo deslizante.

Algunas acciones para mitigar los efectos podrían ser: una elección correcta de la calidad de la escobilla, optar por un arreglo de escobilla múltiple, dividida o sándwich, entre otros. Se deben corregir también las condiciones de montaje, alineación y balanceo del motor tienen gran influencia en la amplitud de las vibraciones.

Investigaciones acerca de la relación entre las corrientes armónicas y vibraciones mecánicas en motores de tracción DC, fueron desarrolladas [Flinders 1999]. Y se encontró para un caso concreto que la Resonancia mecánica de un motor (325 Hz) a una determinada velocidad (52 km/h) de una locomotora fue una de las principales causas

del desgaste excesivo de las escobillas y el conmutador; evidenciando una actividad de chispas mayor a lo habitual en dicho régimen de operación.

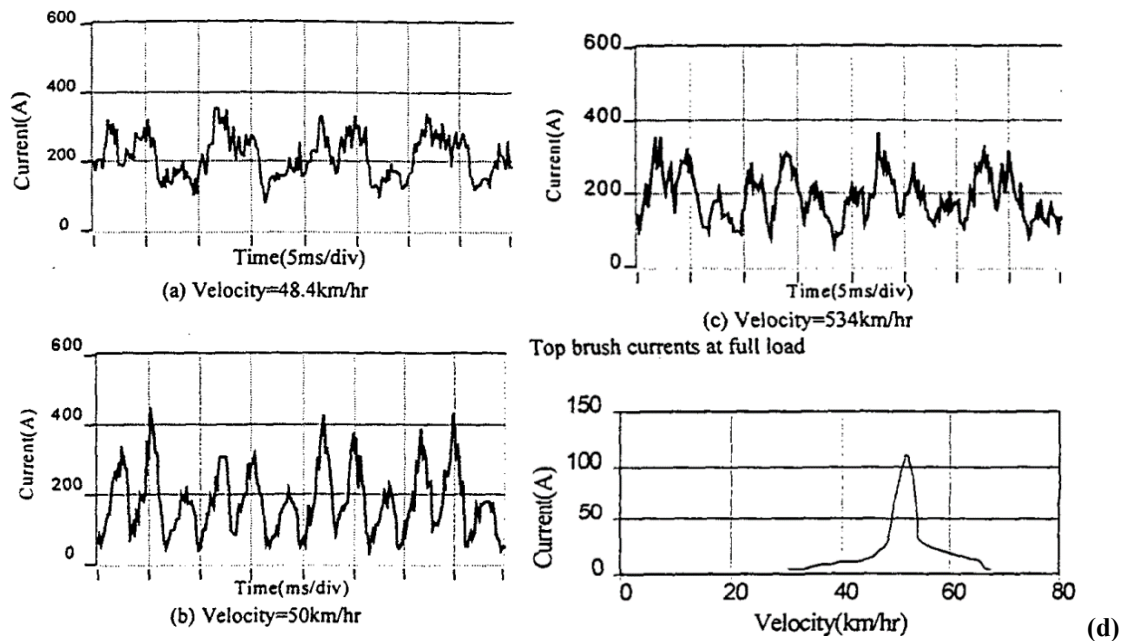
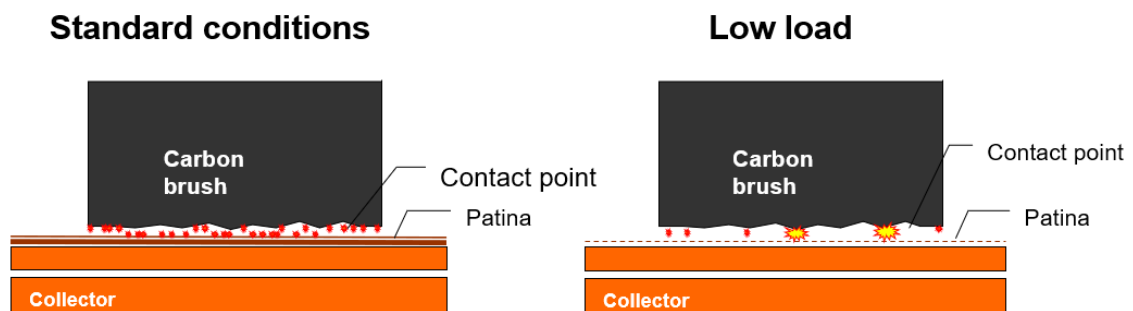
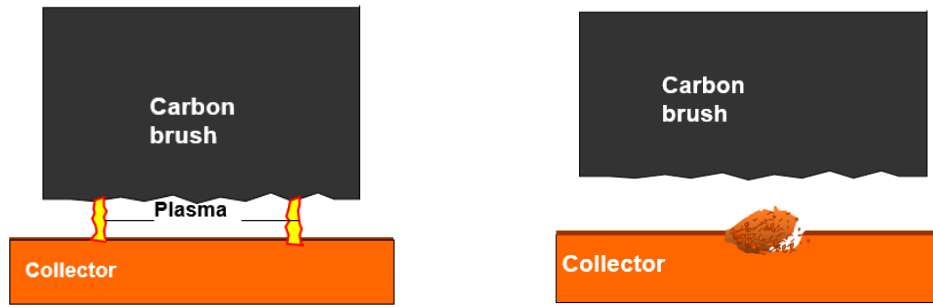


Figura 27.(a), (b) y (c) Evolución del consumo de corriente en las escobillas respecto a la velocidad de la locomotora (48.4, 50 y 53,4 km/h respectivamente) a full carga. (d) Representa la corriente circulante (r.m.s) generada por la vibración en un rango de velocidad más amplio y es causada por la resonancia mecánica del motor [Flinders 1999].

#### d). PRESIÓN DE LAS ESCOBILLAS/CONMUTADOR:

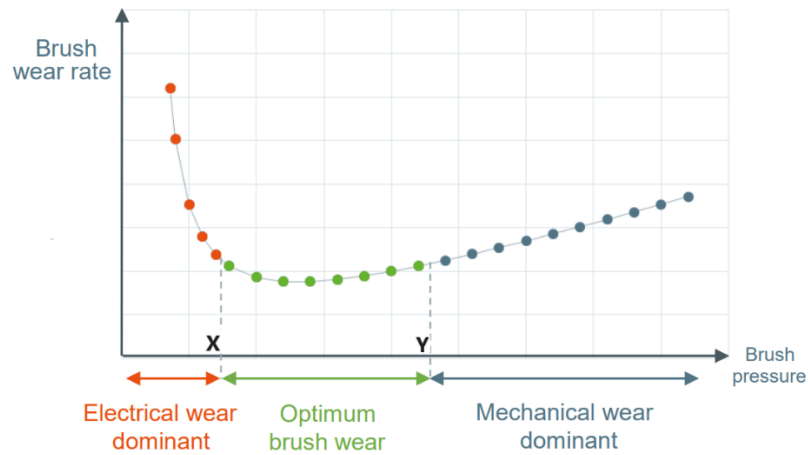
A cualquier velocidad y/o cualquier condición de trabajo del motor, la presión del resorte  $P$  deber ser suficiente para mantener el contacto escobilla/conmutador. Lo ideal es mantener la misma presión de resorte para todas las escobillas y así asegurar la misma distribución de corriente. La pérdida de contacto entre las partes mencionadas es la causa principal de la *generación* de *chispas* debajo de la escobilla, debido a una conmutación incompleta. A su vez, la presencia de las chispas provoca daños en el conmutador o anillo deslizante, seguido de un desgaste acelerado de las escobillas [Mersen 3 2017]. La presente Tesis está enfocada en el estudio y detección de forma incipiente de este fenómeno que como se verá más adelante aparece como síntoma a una gran cantidad de modos de fallos. Entender su aparición y evolución será primordial para poder concluir eficientemente nuestros resultados de laboratorio.



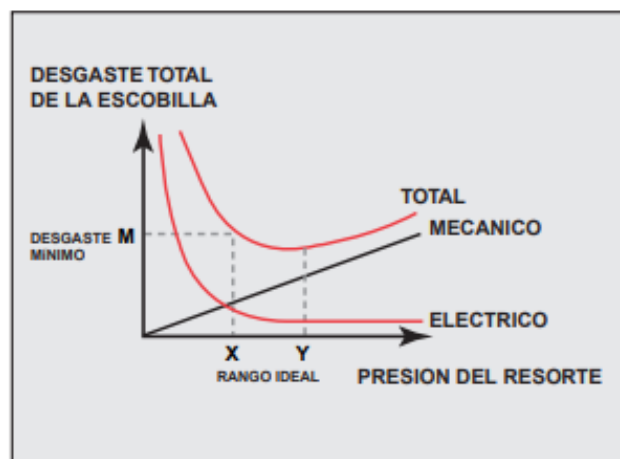


**Figura 28.** Comportamiento de desgaste de las escobillas por pérdida de la presión de la escobilla. [Shunk GB4].

Por otra parte, si la presión de las escobillas es muy alta, tanto las escobillas como las barras del conmutador se desgastarán demasiado por erosión mecánica. Bajo estos principios mencionados, la presión óptima de la escobilla y su desgaste está relacionada con una combinación de los factores *eléctricos y mecánicos*. Tal y como se ilustra en la figura 29 (a) y (b).



(a)



(b)

**Figura 29.** Desempeño de las escobillas, por la combinación de desgaste mecánico (resultado de la fricción) y desgaste eléctrico (resultado de resistencia excesiva en la superficie de contacto). (a) [Mersen 3 2017], (b) Rango Ideal de desgaste X-Y. [Helwing 1 2020].

Existe un desgaste mínimo cuando la presión del resorte se encuentra en el rango  $X a Y$  (zona verde), tal y se ilustra la zona de mejor desempeño de presión de la escobilla. [Mersen 3 2017]

Sin embargo, para máquinas sometidas a golpes o vibraciones (Motores de tracción, motores para hélices) o máquinas con poca estabilidad (desbalanceado o desalineada) la presión del resorte de la escobilla debe incrementarse.

Recommended spring pressure P for each grade family		Slip ring	Commutator	
			Stationary machines	Traction machines
Carbographitic (amorphous or hard)			18 – 20	
Electrographitic		18 – 20	18 – 20	36 - 45
Resin impregnated electrographitic		*	18 – 20	36 - 55
Soft graphitic		11 – 20*	13 – 18	
Metal-graphite	rated speed	18 – 20	*	15 – 17.5**
	speed < 1m/s	25 – 27		

**Tabla 7.** Rango de presión recomendada para las familias de calidad de escobillas del fabricante MERSEN bajo condiciones de operación normal en **kPa**. \* consultar con el fabricante, \*\* para motores de montacargas [Mersen 3 2017].

A mayor presión, mayor incremento de la temperatura y se incrementa el desgaste. La presión máxima tolerable para una escobilla dependerá de la dureza del material. Cualquier escobilla blanda o frágil no deberá ser usada en aplicaciones donde se requiera alta presión (es decir, superior a 225 kPa). Las consideraciones anteriores demuestran la ventaja de los *porta-escobillas con presión estable*, que garantizan poca variación de presión durante el ciclo de vida de la escobilla [Mersen 3 2017].

La caída de voltaje de contacto de la escobilla/conmutador disminuye cuando aumenta la presión, en consecuencia, también disminuyen las propiedades de conmutación. Este aspecto no debe tomarse como insignificante.

A modo de ejemplo para el fabricante MERSEN: La caída de voltaje de contacto para una escobilla electro gráfico (a 10 A/cm<sup>2</sup> y 30 m/s) puede caer hasta en 30% cuando la presión pasa de 15 a 55 kPa. [Mersen 3 2017]

En base a esto, se tiene el coeficiente  $k_p$  permite calcular, la caída de tensión  $\Delta U_p$  (en mV) para una presión de referencia  $P_{ref}$  (por ejemplo, 15 kPa), mediante la expresión (11):

$$\Delta U_p = k_p * \Delta U_{P_{ref}} \quad (11)$$

Donde  $\Delta U_{P_{ref}}$  es la caída de contacto de tensión a la presión de referencia  $P_{ref}$  in mV.

P (kPa)	15	25	35	45	55	65	75
$k_p$	1	0.90	0.82	0.76	0.71	0.67	0.64

**Tabla 8.** Valores del coeficiente  $k_p$  según la presión de las escobillas para un grado EG estándar a 10 A/cm<sup>2</sup> [Mersen 3 2017].

Para ejemplo anterior  $k_p$  pasa de un valor 1 a 0.71, cuando la presión sobre el resorte cambia de 15 a 55 kPa. Y ello, genera una reducción del 30% en la caída de tensión.

### Presión Específica del Resorte

La presión específica  $P$  es la fuerza aplicada sobre la escobilla por área. Se puede calcular fácilmente a partir de la fuerza y la sección de la escobilla mediante la fórmula (12):

$$P = \frac{F_r}{t \times a} \quad (12)$$

Donde:

$F_r$  es la fuerza medida, en gramos (respectivamente  $cN$ ),  $t$  y  $a$  son las dimensiones tangencial y axial de la escobilla, en cm. La Presión específica de la escobilla se da en g/cm<sup>3</sup> (respectivamente  $cN/cm^2$ ).

*Note about units: 1 kPa = 10 cN/cm<sup>2</sup>, which is approximately 10 g/cm<sup>2</sup> (1kgF=9.81N), 1.500 PSI*

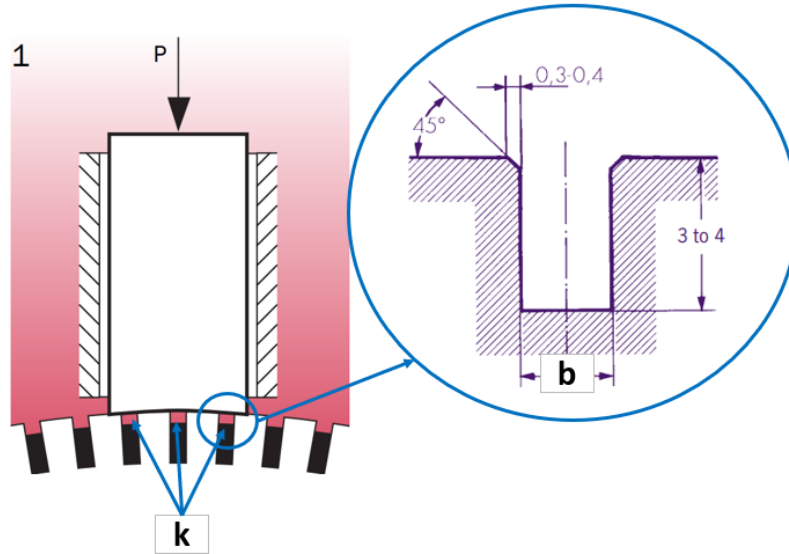
Otras cuestiones u observaciones:

La superficie considerada como base de cálculo de la presión indicada en (12) anteriormente no tiene en cuenta el espacio vacío de la escobilla; (es decir, es espacio entre las barras del conmutador, ranuras helicoidales de los anillos colectores, cortes de sierra oblicuos en la cara de contacto de las escobillas para anillos sin ranura) sino solo la sección transversal de la escobilla.

Debe tenerse en cuenta que, en el caso de anillos colectores ranurados, la superficie de contacto debe reducirse por el ancho de la ranura debajo de la escobilla. La fórmula de la presión específica de la escobilla  $P$  se convierte en la ecuación (13):

$$P = \frac{F_r}{t \times (a - k \times b)} \quad (13)$$

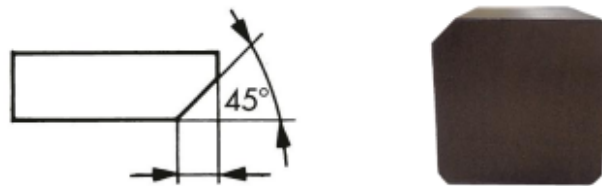
Donde  $b$  es el ancho de la ranura y  $k$  es el número de ranuras debajo de la escobilla [Mersen 6 2017].



**Figura 30.** *Parámetros  $k$  y  $b$  de la ecuación (13), para la determinación de la presión [Mersen 6 2017], [Helwing 2 2013].*

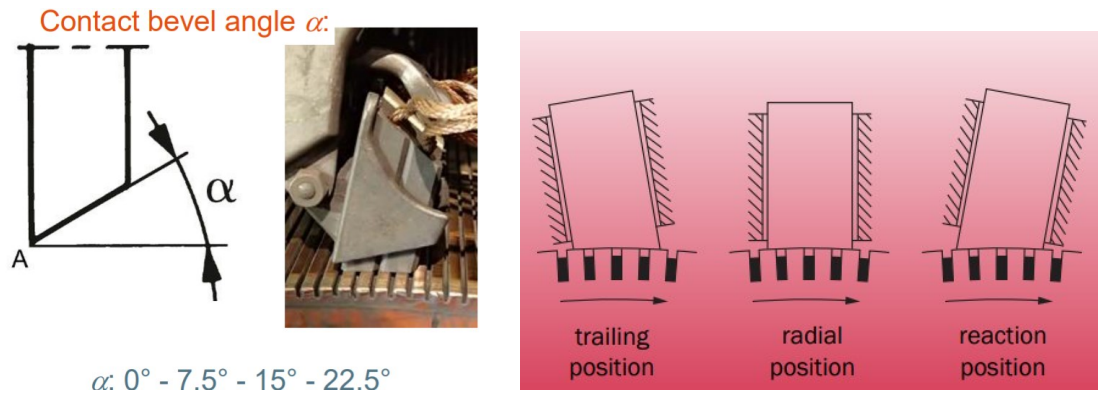
Para escobillas biseladas las presiones se calculan a partir de la sección transversal y la superficie real de la cara de contacto [Mersen 8 2017]. para una escobilla con un ángulo de bisel de contacto [Mersen 7 2017]  $P$  viene dado por la ecuación (14):

$$P = \frac{F_r}{t \times (a \times \cos \alpha)} \quad (14)$$



**Figura 31.** *Esquema bisel de una escobilla [Mersen 7 2017].*

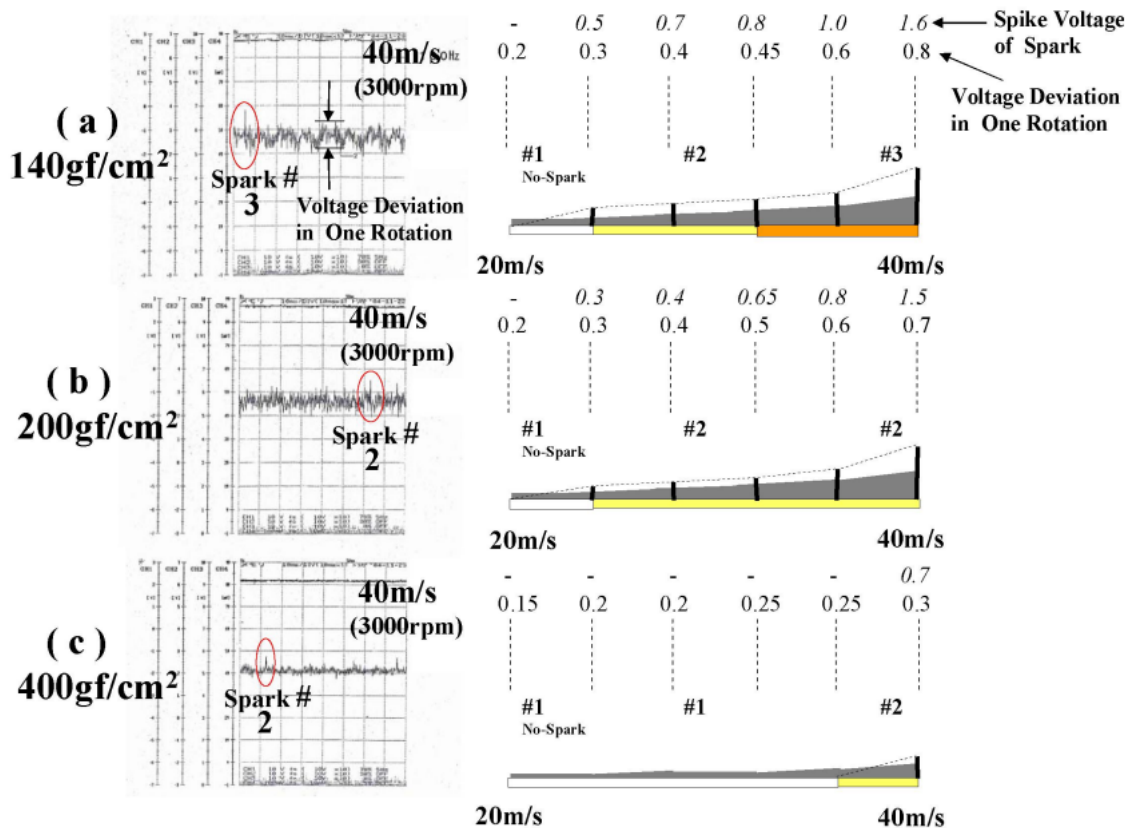
Por razones de estabilidad, de conmutación y de resistencia al desgaste, es importante que las escobillas fabricadas con materiales blandos sean orientadas adecuadamente con respecto al sentido de rotación de la máquina [Carbone Lorraine 2013].



**Figura 32.** (Izq) Escobilla con bisel no revestida, valores recomendados para  $\alpha$ . No se aconseja usar escobillas donde  $t=a$  debido a la orientación del grano [Mersen 7 2017], (der)  $\alpha$  también se aplica cuando se quiere reducir las vibraciones del montaje. [Helwing 2 2013]

Para poner en contexto lo mencionado del parámetro Presión de contacto y su relación con la generación de chispas, se describe a continuación un caso concreto:

Ensayos sobre equipos de anillos deslizantes de Acero, en sistemas de generación térmica, en escobillas de grado NCC634, para la alta velocidad, con ensayos de velocidad periférica entre 20 - 40 m/s, aplicando para todos los casos una presión sobre la escobilla de 140 g/cm<sup>2</sup>, 200g/cm<sup>2</sup> y 400 g/cm<sup>2</sup> son comparados [Morita 2007].



**Figura 33.** Resultado de Prueba a diferentes niveles de presión del resorte de escobillas NCC634, con evidencia de nivel de chispas a 40 m/s de velocidad lineal periférica, menor presión más elevado el nivel de severidad de las chispas [Morita 2007].



## Medición de la Presión de la Escobilla

En ocasiones, desde el punto de vista del *mantenimiento preventivo*, se recomienda realizar la *medición periódica de la presión de la escobilla mediante una balanza de resorte o mediante una célula de carga (dinamómetro)*, ello permitirá identificar desgastes desiguales de los componentes mecánicos.

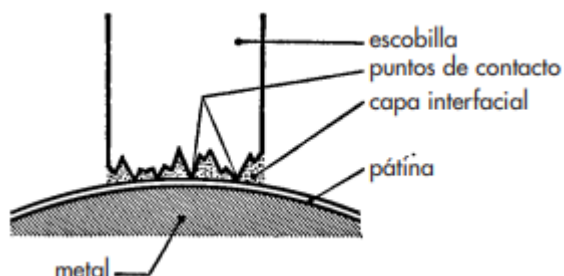
### e). PORTA ESCOBILLAS

La escobilla de carbón debe ser guiada por una porta escobillas de suficiente altura y con un juego adecuado para evitar que la escobilla se atasque o se golpee. Las tolerancias y las holguras las establece la *Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)* [Mersen 7 2017].

### 3.1.2. PARÁMETROS ELÉCTRICOS

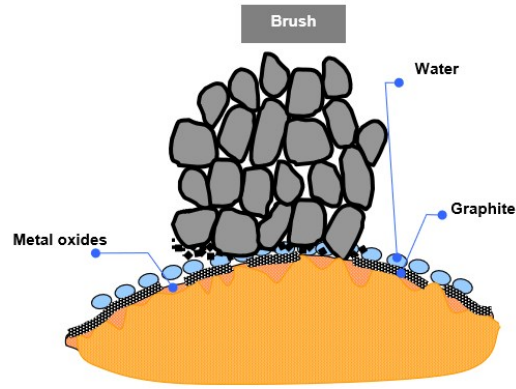
#### a). CAÍDA DE TENSIÓN (DE CONTACTO)

Característica importante en contactos deslizantes; La *caída de tensión* debe ser moderada para evitar sobrecalentamientos y pérdidas eléctricas anormales que no permiten el contacto deslizante, influyendo en la *conmutación* y *distribución de corriente* entre las escobillas de carbón. Ello depende del grado de calidad de la escobilla, del contacto eléctrico, de la película (pátina) y de la capa interfacial.



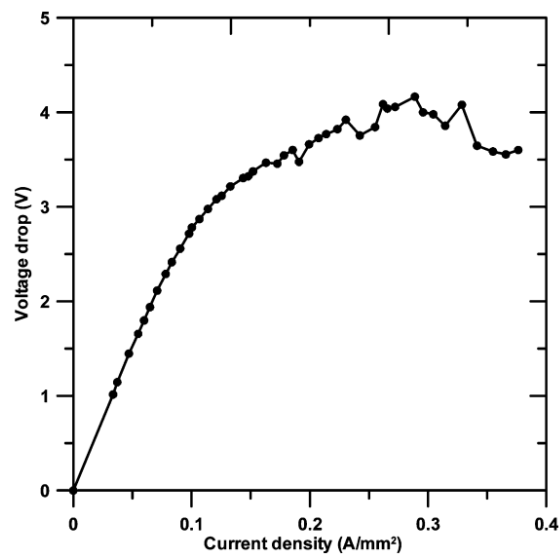
**Figura 34.** Factores que influyen en la Caída de tensión y afectan a la conmutación y distribución de la corriente durante el contacto deslizante entre las escobillas y el conmutador [Mersen 1 2017].

La Pátina es una mezcla de óxidos metálicos, carbón y agua, depositada en el anillo colector o conmutador. La capa interfacial se compone de una película gaseosa, ionizada, con partículas de carbono en suspensión, y a veces, polvos finos, ver figura 35, [Carbone Lorraine 2013].

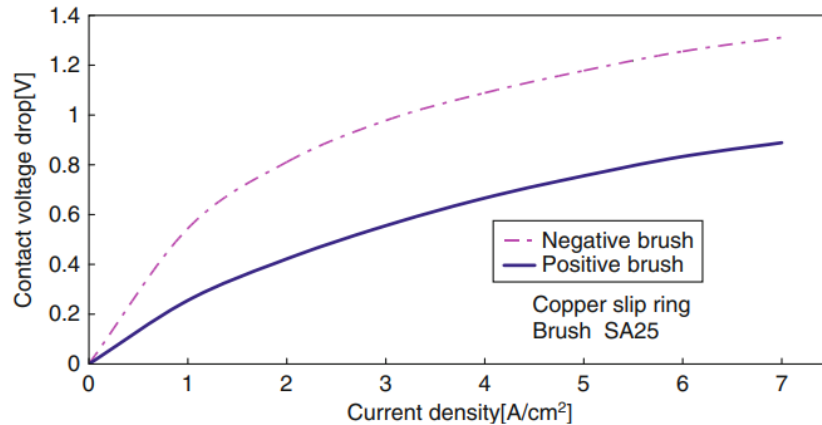


**Figura 35.** Elementos que componen la pátina. [vdocuments.net 2015, Schunk].

Por lo tanto, es normal que la caída de tensión esté influenciada por todos los factores susceptibles de modificar la pátina o la capa interfacial; por ejemplo: Densidad de corriente, Temperatura, Presión aplicada, humedad del ambiente, Impurezas atmosféricas, velocidad de rotación del conmutador/anillo colector, la condición de las superficies en contacto y naturaleza misma de la escobilla [Mersen 1 2017].



**Figura 36.** La caída de tensión entre escobillas de polaridad positiva y negativa en ensayos de laboratorio son una función de la densidad de corriente [Skjøtberg 2009].



**Figura 37.** La caída de tensión (Modo Motor) entre escobillas de polaridad positiva y negativa en ensayos de laboratorio son una función de la densidad de corriente [Sawa, K. 1 2013].

En la figura 37 La polaridad de la escobilla es definida de la siguiente manera: La escobilla es denominada *positiva o anódica*, donde el flujo de corriente va desde la escobilla al conmutador y *negativa o catódica*, cuando la corriente va del conmutador a la escobilla [Sawa, K. 1 2013].

## b). CONMUTACIÓN

Uno de los factores más importantes del funcionamiento satisfactorio de una máquina DC es la capacidad de transferir la corriente de inducido necesaria a través de la escobilla en contacto con el conmutador sin producción de chispas, sin pérdidas locales y sin calentamiento excesivo de las partes.

Una buena conmutación depende de factores comunes como la humedad de aire, el contenido de gas o aceite en el aire o las partículas de polvo. Otros factores son: la temperatura muy baja del aire de refrigeración, las cargas bajas durante un largo periodo de tiempo o las vibraciones. Un factor decisivo para lograr una buena conmutación es la selección correcta de la calidad de las escobillas y es aconsejable hacer una revisión de su estado de desgaste cada 1000 horas de funcionamiento. Sin embargo, ello implica parar la máquina [ABB 2002].

Los fenómenos de conmutación que a menudo producen chispas en la escobilla son consecuencia de la inversión de la corriente en las secciones del inducido puestas en cortocircuito por las escobillas. Por tanto, pueden producirse chispas de conmutación como las producidas por causas mecánicas (vibraciones), por sujeción incorrecta en una línea neutra, por no respetar la equidistancia entre líneas de escobillas, por defectos de aislamiento en los bobinados, por defectos de contacto con el colector, etc. [Mersen 1 2017]

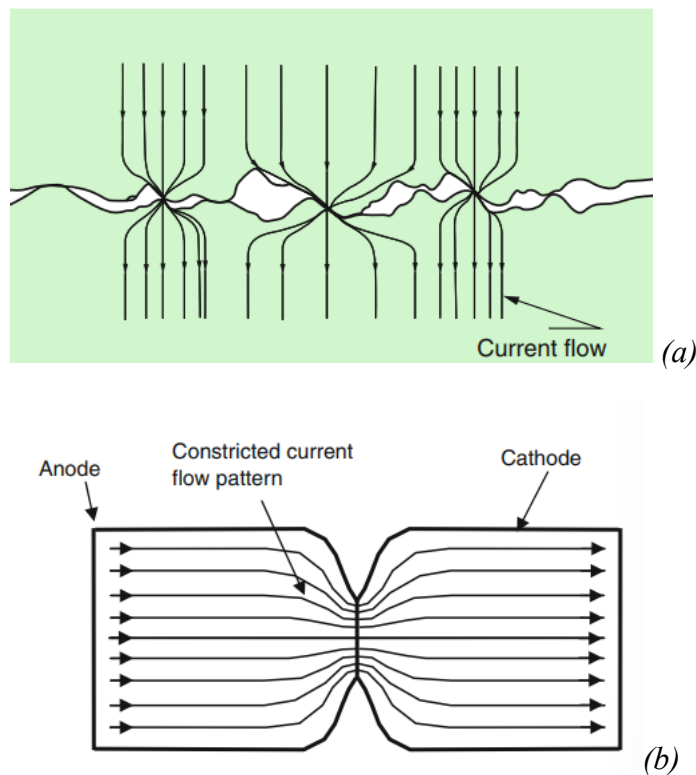
Algunas soluciones que pueden ayudar a mejorar la conmutación [Mersen 1 2017]:

- Usar escobillas modo sándwich (Dos capas de un mismo grado), que ayudan a limitar las corrientes de circulación y controlan la calidad de la pátina.

- Escobillas compuestas de doble grado
- Escobillas de carbón escalonadas.

### c). DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE EN LA SUPERFICIE DE CONTACTO DE LA ESCOBILLA

La corriente no se reparte de manera uniforme en toda la cara de frotamiento de la escobilla. Se parte de zonas de superficie reducida, denominados puntos de contacto, que cambian sus propiedades en el tiempo y que afectan las caras de frotamiento. Cuando el equilibrio se rompe, los puntos de paso de la corriente se reagrupan y su número disminuye. Lo anterior, trae consigo la aparición de estrías, ranuras o rayas y erosión eléctrica en la pátina.



**Figura 38.** (a) Diagrama esquemático de puntos de contacto y flujo de corriente en un contacto eléctrico. [Timsit, R.S. 2013]. (b) Esquema ilustrativo de un contacto eléctrico y el patrón de flujo de corriente restringido a través del punto de contacto (Cortesía de Eaton Corporation) [Zhou, X. 2013].

Los factores que pueden causar este desequilibrio:

- Agentes exteriores (Material particulado, gases, exceso de humedad, temperatura).
- Calidad de escobilla inadecuada a las condiciones de funcionamiento del equipo (pátina demasiado gruesa, densidad de corriente muy alta o muy baja, ventilación deficiente, etc.)

- Corriente que se reparte de forma desigual entre las escobillas de una misma línea en un colector o de una misma hilera en un anillo. Este fallo es originado por diferencias de presión entre una escobilla y otra.

#### d). DENSIDAD DE CORRIENTE

Se llama densidad de corriente ( $J_B$ ) a la corriente relativa a la unidad de superficie de contacto entre las escobillas y el conmutador/colector. Se denota como el cociente de la corriente transportada por la escobilla a través de su sección transversal. Ver Ecuación (15) [Mersen 1 2017]

$$J_B = \frac{I}{S \times N_p} \quad (15)$$

Donde:

$I$  = La corriente de armadura o rotor que fluye a través del motor.

$S$  = área transversal de la escobilla en ( $cm^2$  o  $in^2$ )

$N_p$  = número de escobillas (mitad del número para Motor DC) o número de escobillas por Anillo colector para motores síncronos.

La densidad de corriente  $J_B$  tiene una gran influencia en el desempeño de la escobilla en cuanto a: desgaste, fricción y temperatura. Las densidades de corriente máximas para cada grado de calidad de escobilla, dada por los fabricantes, son las que puede soportar en régimen permanente; sin embargo, varía según las características del motor/generador y el tipo de ventilación.

Una densidad de corriente baja es más perjudicial para el motor que una densidad excesiva. Por consiguiente, a menudo es más conveniente reducir el número de escobillas en las líneas de una máquina para aumentar la densidad de corriente durante el funcionamiento con carga reducida de larga duración [Mersen 7 2017].

Lo anterior obedece a que la fricción y el calor resultante son directamente proporcionales al número de escobillas sobre el conmutador, mientras el calor eléctrico desarrollado en la superficie de contacto de la escobilla no incrementa en proporción directa a la densidad de corriente; esto indica que el calor generado total tiende a disminuir, mientras más escobillas son inhabilitadas y la densidad de corriente se incrementa en las escobillas restantes. Hay evidencias que Máquinas Eléctricas a las que se les ha removido un número de escobillas, para aumentar la densidad de corriente, sin que se tengan efectos en su vida útil [M. S. May 1962].

Evidencias de diferentes ensayos de laboratorio, a siete diferentes hidro generadores, han demostrado que las tasas de desgaste de las escobillas aumentan con el aumento de la densidad de la corriente  $J_B$  que pasa a través de ellas. Siendo escobillas las escobillas de polaridad positiva las que presentaron mayor tasa de desgaste [Skjølberg 2009].

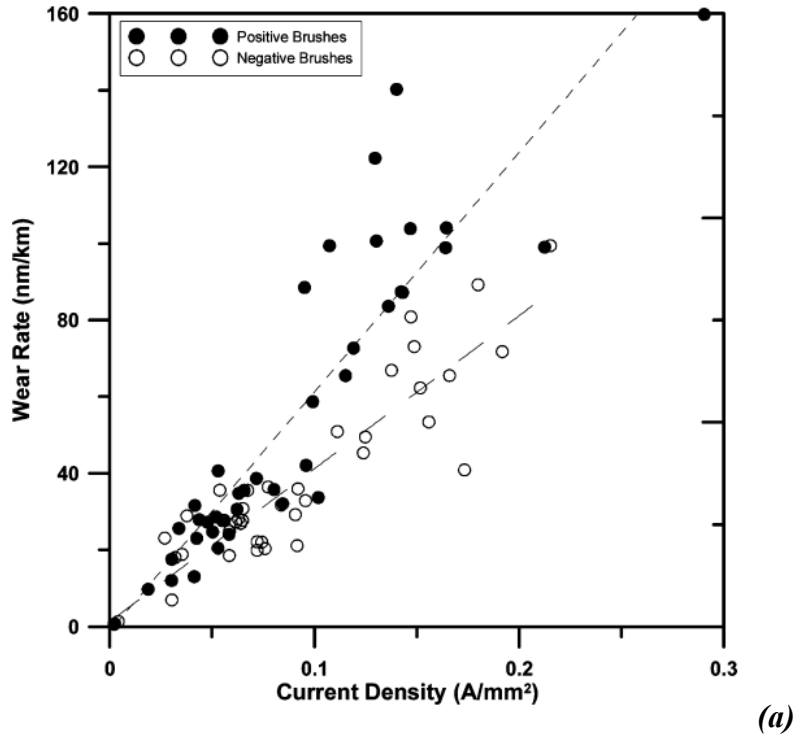


Figura 39. Tasas de desgaste (Modo Generador) en nanómetros por kilómetro de escobillas en el laboratorio como una función de la densidad de corriente  $J_B$  [Skjølberg 2009].

#### e). RESISTIVIDAD

No existe una relación estrecha entre la resistividad eléctrica de una escobilla y su caída de tensión de contacto. La resistividad del material se define como la resistencia al flujo de corriente y se representa como  $\rho$  y sus unidades son  $[\mu\Omega\cdot m]$ . Los valores de Resistividad dados en los catálogos, para cada calidad, son las resistividades longitudinales en la dirección  $r =$  radial. Desde el aspecto operacional, la resistividad influye poco sobre las pérdidas eléctricas en las escobillas [Carbone Lorraine 2013].

Materiales con mayor resistividad aumentan la resistencia general en el circuito de conmutación, mejorando así la conmutación. El grado de calidad de la escobilla y configuración permite en algunos casos modificar esta propiedad de forma artificial y puede mejorar la conmutación [Mersen 1 2017] [Helwing 2020].

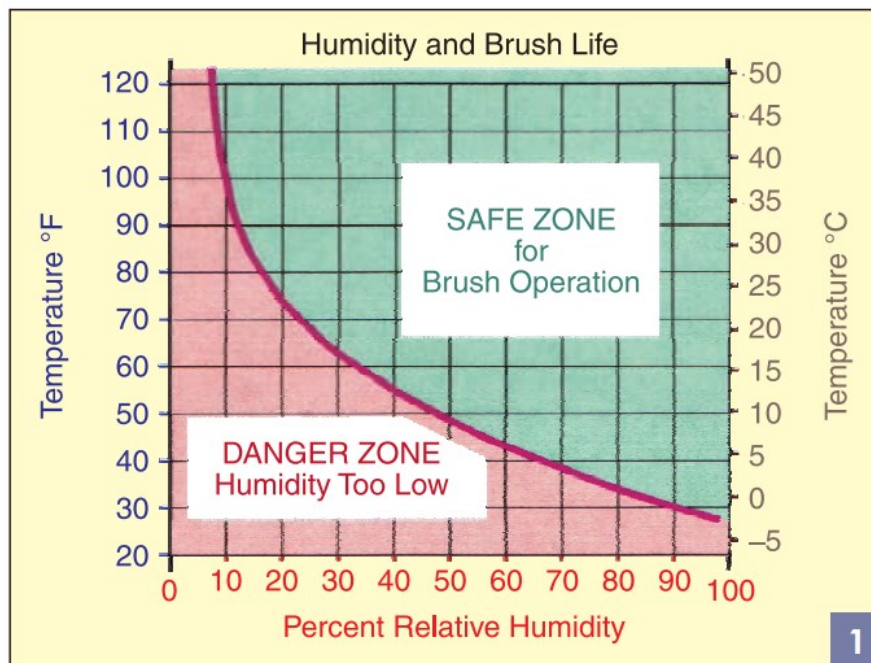
#### 3.1.3. PARAMETROS DEL ENTORNO

##### a). HUMEDAD

El agua está presente en el aire del medio ambiente y es componente esencial de la pátina. Un rango óptimo de humedad está entre  $8$  y  $15 \text{ g/m}^3$  de aire para la formación de pátina. Las condiciones se vuelven críticas cuando el índice de humedad absoluta desciende por debajo de un umbral en  $2 \text{ g/m}^3$  de aire. En aire muy seco, Los

óxidos metálicos predominan en la pátina; aumentando la fricción y acelerando el desgaste de las escobillas [Carbone Lorraine 2013].

Casos de muy corta vida de escobillas, se demostró durante la segunda guerra mundial, cuando los aviones bombarderos se elevaban a altitudes sobre los 20.000 pies, las condiciones atmosféricas de muy baja humedad (valor crítico 2 gr/ft<sup>3</sup>) fue la causa de desgaste extremo y prematuro (“Dusting”) de las escobillas de Motores DC. La duración era tan corta, prácticamente 1 hora, debido a la incapacidad de poder mantener la pátina los conmutadores [Moberly & Johnson 1959]. Por ello, fue necesario el desarrollo de “altitude-Brushes” o tipo Metálico. Lo anterior demostró, que la tasa de desgaste de una escobilla es función de la humedad absoluta del aire a gran altitud.



**Figura 40.** *Humedad y Vida de la escobilla:* la línea curva representa (2 granos de agua por pie cúbico de aire seco o 4,6 gramos por metro cúbico) [Lozowski 2001].

#### **b). VAPORES O GASES CORROSIVOS**

Los vapores o gases corrosivos (Solventes de Clorato, amoníaco, sulfuro de hidrogeno, dióxido de azufre) en condiciones de humedad destruyen la película de contacto, deterioran el conmutador y por ende las escobillas [Mersen 1 2017].

#### **c). ACEITES E HIDROCARBUROS**

La contaminación del conmutador, anillos deslizantes y escobillas con aceites y grasas de diferente origen, afectan el funcionamiento de las escobillas lo que conduce a su inmovilización en los soportes por la mezcla pegajosa de aceite y polvillo de carbón. El deterioro del conmutador, anillos deslizantes y desempeño de las escobillas son el resultado de películas aislante gruesas en la superficie de contacto [Mersen 1 2017].

#### **d). POLVO**

Cuando más abrasivo es el polvo, más dañino es. Dentro de sus causas están:

- Presencia en ranuras en los conmutadores y anillos rozantes
- Alto desgaste de escobillas
- Contaminación de máquinas.

El mejor remedio es la prevención, proporcionando aire limpio filtrado a los equipos.



## CAPITULO 4: ESTADO DEL ARTE DEL MANTENIMIENTO DE MAQUINAS DC

En las siguientes secciones se comentarán los métodos y técnicas de diagnóstico en máquinas rotativas, en motores eléctricos y sobre todo nos enfocaremos en aspectos relacionados con el defecto del fenómeno de las chispas y su efecto en la calidad de la conmutación.

En algunas ocasiones se comentarán modos de fallos, casos de ingeniería forense, pruebas de laboratorio, equipos usados para cualificar y/o cuantificar la severidad de fallo y por su puesto la evolución en la línea del tiempo de las investigaciones asociadas al objeto de estudio.

### 4.1. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVAS EMPLEADAS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.

A continuación, se hará una breve introducción sobre mantenimiento predictivo, se indicarán los parámetros, indicadores de monitoreo y técnicas empleadas en términos generales para máquinas eléctricas; posteriormente se desarrollará la anomalía objeto de estudio.

**Mantenimiento Predictivo:** Se puede definir como el seguimiento organizado con medición periódica o continua de variables del estado del sistema y su comparación con unos patrones preestablecidos (línea Base), para la determinación del instante en que se debe producir la intervención de mantenimiento (umbrales de control). Por tanto, consiste en subsanar el fallo aún se encuentra en estado incipiente o en su fase temprana [Cabañas 1998].

Inconvenientes	Ventajas
Limitaciones a la hora de elegir la instrumentación de medida y diagnóstico, derivadas de la necesidad de no apartar a la máquina de su funcionamiento normal. <i>Técnicas de invasivas y/o intrusivas.</i>	Determinación óptima del momento de intervención del mantenimiento preventivo, se aprovecha la reserva de uso de piezas y equipos y mejor gestión de Stock de repuestos. Se minimizan atenciones correctivas.
<i>Mayores inversiones iniciales</i> , por la incorporación de equipos de medida y recolección de datos.	Ejecución sin interrumpir ni alterar el normal funcionamiento de instalaciones y equipos.
Nivel de formación muy elevado para los técnicos de Mantenimiento. Conocimiento Tecnológico de los equipos y temas relacionados con la disciplina.	Mejora en las condiciones de higiene y seguridad en la planta. (Control del ruido, vibraciones, emisiones tóxicas, etc.)

No se aplica a sistemas en donde apliquen Reglamentos asociados al número de horas máximo de funcionamiento de los equipos y tampoco donde la detección de averías es costosa y/o poco fiable o donde la reposición es a bajo coste y de forma casi inmediata.	Mejora del control de fiabilidad de los elementos y consecución de información suplementaria para los fabricantes.
--	--

**Tabla 9.** *Parámetros característicos del mantenimiento de las máquinas eléctricas rotativas [Cabañas 1998].*

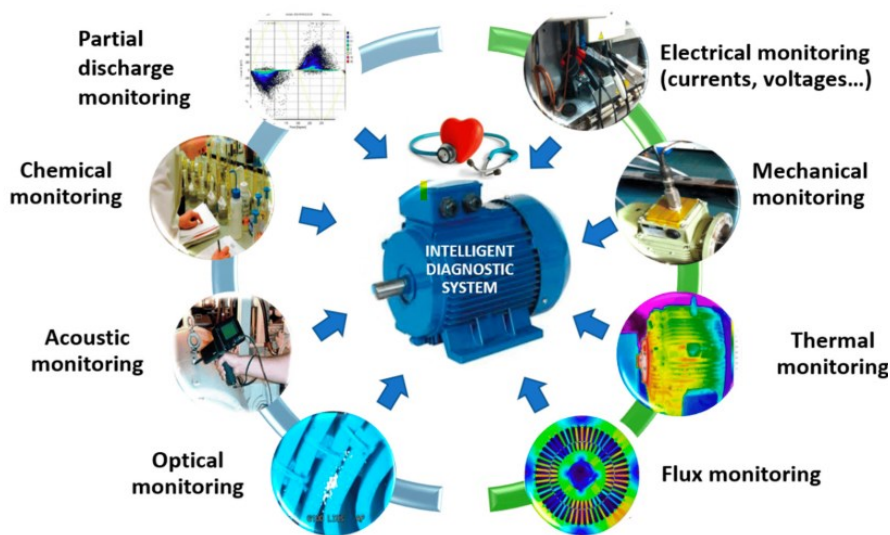
Se conoce que los parámetros a controlar, el tipo de técnica y los métodos empleados para el seguimiento y la correcta evaluación del estado de una máquina rotativa son muy amplio y requieren protocolos de mantenimiento predictivo. En la actualidad existen una serie de técnicas de análisis de aplicación específica para la detección de fallos en sus elementos más característicos asociados con parámetros tales como: la temperatura, desalineación, ruido, vibraciones, estado de cojinetes y estado de rodamientos, etc. Según [Cabañas 1998], en la *tabla 10*, se presenta un pequeño resumen, donde se indica de forma abreviada los parámetros que se pueden utilizar para la “monitorización” de máquinas eléctricas rotativas y los instrumentos o técnicas a emplear en cada caso.

Parámetro Indicador	Técnicas de Aplicación
De vibraciones	Análisis espectral, velocidad de vibración, desplazamiento.
Del estado de Rodamientos	Medida de impulsos de choque, vibraciones de alta frecuencia.
Del estado de alineamiento	Sistema láser de monitorización
Ruido	Análisis del espectro: identificación de componentes.
De equilibrado de Fases	Medidas de <b><i>tensión e Intensidad</i></b>
De consumos anómalos	Medidas de <b><i>intensidad, potencia</i></b>
De anomalías en la corriente de alimentación, de estado de los devanados del rotor y estator, excentricidad, desequilibrio, estado mecánico.	Técnicas de medida y análisis de componentes de frecuencia, en los <b><i>espectros de corrientes y vibración</i></b> .
De severidad en el servicio	Recuento de arranques y maniobras
De temperatura en los devanados (Cabezas de Bobinas, ranuras)	Seguimiento de la temperatura, <b><i>termografía</i></b>
De resistencia eléctrica del aislamiento	<b><i>Medidas de Resistencia, índice de Polarización</i></b>
De presencia de fallos en aislamiento	Medida de factor de pérdidas dieléctricas, <b><i>análisis de descargas parciales</i></b> .
De contaminación de los devanados	Corrientes de absorción y fuga
Del estado de las escobillas	<b><i>Termografía</i></b> , análisis estroboscópico.

**Tabla 10.** *Parámetros característicos del mantenimiento de las máquinas eléctricas rotativas [Cabañas 1998].*

Sin embargo, en años recientes se han venido adaptando metodologías de monitoreo más avanzadas (*Análisis de Corriente, Flujo Magnético, incluso Vibraciones*) a cualquier régimen de operación de las máquinas, incluyendo estados de análisis transitorios de señales obtenidos en operaciones de arranque o cambios de velocidad. Ello a su vez implica el uso de herramientas avanzadas de procesamiento de señales, siendo mucho más confiables los resultados obtenidos, respecto a las técnicas clásicas.

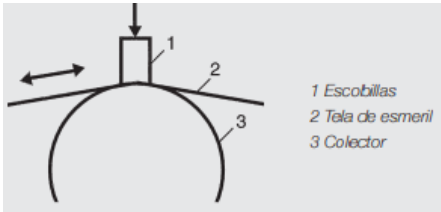
Después de décadas de investigación en esta área, una de las más importantes conclusiones, es que no existe una única técnica capaz de determinar la condición integral de todo un motor, con lo cual unas técnicas son más sensibles a respecto a otras para determinados fallos; siendo las vibraciones la técnica universalmente aceptada para analizar fallos mecánicos. La tendencia es desarrollar sistemas inteligentes capaces de combinar la información de diferentes técnicas aplicadas y así poder determinar el estado de salud integral de una máquina de forma más robusta [Antonino 3 2020].



**Figura 41.** Tendencia reciente en monitoreo de condición de motores eléctricos, basado en la integración de la monitorización de diferentes cantidades de motores para el desarrollo de sistemas de diagnóstico inteligentes [Antonino 3 2020].

#### 4.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE MANTENIMIENTO EN MOTORES DC.

En la sección anterior, se listó en la *tabla 10*, las técnicas más empleadas para el monitoreo de máquinas eléctricas son el análisis de vibraciones, el análisis del estado de aislamiento y la termografía. Sin embargo, existen algunos problemas específicos que afectan los Motores DC y que serán descritos a continuación junto a las técnicas asociadas a cada tipo de problema. *Ver tabla 11* [Cabañas 1998], [ABB 2002].

Problema	Técnicas de Aplicación								
<p><b>Sobrepelliculado:</b> Consiste en la pérdida de la conductividad de la pátina. Su causa obedece al ataque de la pátina por parte de contaminantes atmosféricos.</p>	<p><u>Medición periódica de la resistencia de la superficial del conmutador.</u> En Condiciones normales de funcionamiento la resistencia se encuentra en 0- 500 ohmios. La aparición del defecto puede ocasionar resistencias superficiales hasta de 10.000 ohmios, siendo especialmente notable el fenómeno de quemado en la parte trasera de las barras del colector.</p>								
<p><b>Ruptura de Pátina:</b> Es la ruptura de película superficial del colector, causada por cambios de humedad, asociadas a variaciones bruscas de la temperatura.</p>	<p><u>Limpieza con producto abrasivo</u> el propio colector y de paso permite eliminar el cobre depositado en las escobillas.</p>								
<p><b>Deformación del Colector:</b> son muchos los factores que pueden conducir a un deterioro de las condiciones mecánicas de esta parte.</p>	<p><u>Mantenimiento:</u> procesos de lijado, esmerilado manual, rectificando, torneado.</p>								
<p><b>Desgaste de escobillas:</b> Una conmutación adecuada implica una cierta presión de las escobillas en el colector. Una duración corta es síntoma de defectos en la conmutación cuyas causas obedecen a factores mecánicos y eléctricos, pero varía según la calidad de la escobilla. A continuación, un rango de referencia de desgaste según horas de trabajo y velocidad [ABB 2002].</p> <table border="1" data-bbox="215 1205 785 1352"> <thead> <tr> <th>Velocidad periférica del colector</th> <th>Desgaste de las escobillas aprox.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>por debajo de 20 m/s</td> <td>3 mm/1000 h</td> </tr> <tr> <td>20 – 30 m/s</td> <td>5 mm/1000 h</td> </tr> <tr> <td>30 – 40 m/s</td> <td>7 mm/1000 h</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Escobillas desgastadas</u> (si no se cambian a tiempo, habrá un daño de la superficie de contacto entre el conmutador-escobillas</p>	Velocidad periférica del colector	Desgaste de las escobillas aprox.	por debajo de 20 m/s	3 mm/1000 h	20 – 30 m/s	5 mm/1000 h	30 – 40 m/s	7 mm/1000 h	<p><u>Mantenimiento correctivo:</u> Sustitución de escobillas. <b>No se ha desarrollado todavía un método completamente eficaz que sea capaz de predecir el tiempo de vida esperado de las escobillas para una máquina de un determinado ambiente.</b> Las escobillas de carbón se sustituyen en juegos completos de la misma calidad y su periodicidad se realiza según el límite de desgaste [ABB 2002]. realizando el correcto en rodaje de caras.</p>  <p>1 Escobillas 2 Tela de esmeril 3 Colector</p>
Velocidad periférica del colector	Desgaste de las escobillas aprox.								
por debajo de 20 m/s	3 mm/1000 h								
20 – 30 m/s	5 mm/1000 h								
30 – 40 m/s	7 mm/1000 h								
<p><b>Mal Contacto Escobillas:</b> Puede producir quemaduras en la superficie de contacto del colector. Las causas más probables son:  <u>Vibraciones</u> &gt; 4,5 mm/s (asociadas a la desalineación, genera desgaste lateral o agarrotamiento de la escobilla),  <u>Carga Baja</u> (Reducir el # de escobillas según su calidad), <u>humedad</u> (idóneo aire con humedad entre 3 -15 g/m<sup>3</sup>),  <u>Entorno gases corrosivos</u>, (generará: formación de chispas, alto desgaste de escobillas o colector rayado),  <u>Escobillas o muelles de presión</u> (si una de ellas se mueve con dificultad o está atascada sobrecargara</p>	<p>Inspección Visual Periódica de la superficie de la Escobilla. Requiere Máquina Parada.</p>								

Problema	Técnicas de Aplicación
<p>las restantes y la formación de chispas puede ser peligrosa).</p> <p><u>Escobillas desgastadas, superficies contaminadas con aceite, superficies de contacto rayada</u></p>	
<p><b>Formación de Chispas:</b> Un desgaste selectivo de alguna de las escobillas o la aparición de un <u>arco eléctrico</u> especialmente visible, puede ser síntomas de una <u>presión No uniforme o defectuosa</u>. La formación de chispas puede ser progresiva, sobre todo si se ha generado una ruptura de pátina.</p>	<p>Inspección periódica de la superficie de la pátina, de la superficie de la escobilla y tomar de forma visual el nivel de chispas en el extremo de las escobillas. Requiere la maquina off-line.</p>

**Tabla 11.** Problemas específicos de mantenimiento de motores DC [Cabañas 1998], [ABB 2002].

En lo que refiere a las técnicas actuales preventivas e inspección visual una buena guía dada por los fabricantes de escobillas, es poder identificar el estado de la pátina, superficie de desgaste del conmutador, así como la superficie de desgaste de las escobillas que en gran medida nos informa cuáles son sus causas. A continuación, se ilustran los casos más representativos y de mayor frecuencia para los aspectos mencionados.

### 4.3. ASPECTO DE LAS PÁTINAS

Un conmutador/colector nuevo tiene una superficie de cobre limpia. Luego de un tiempo de funcionamiento se forma la pátina, compuesta de óxido de cobre mezclados con partículas de las escobillas que, combinados, producen una capa resistente que protege la superficie del conmutador. Una pátina homogénea, genera condiciones de funcionamiento idóneas y un desgaste mínimo. Es importante que la temperatura de la superficie sea lo suficientemente alta para activar el proceso químico de formación de pátina. La temperatura depende principalmente de la densidad de corriente en la escobilla, las pérdidas de fricción y la temperatura del aire de ventilación. Otro factor importante es humedad del aire (valor favorable  $10 \text{ g/m}^3$ ) según [ABB 2002] (valor favorable  $8-15 \text{ g/m}^3$ ) según [Carbone Lorraine 2013].

A continuación, se exponen aspectos típicos de pátinas y defectos asociados de dos fabricantes [Mersen 1 2017] [Helwing 2020].

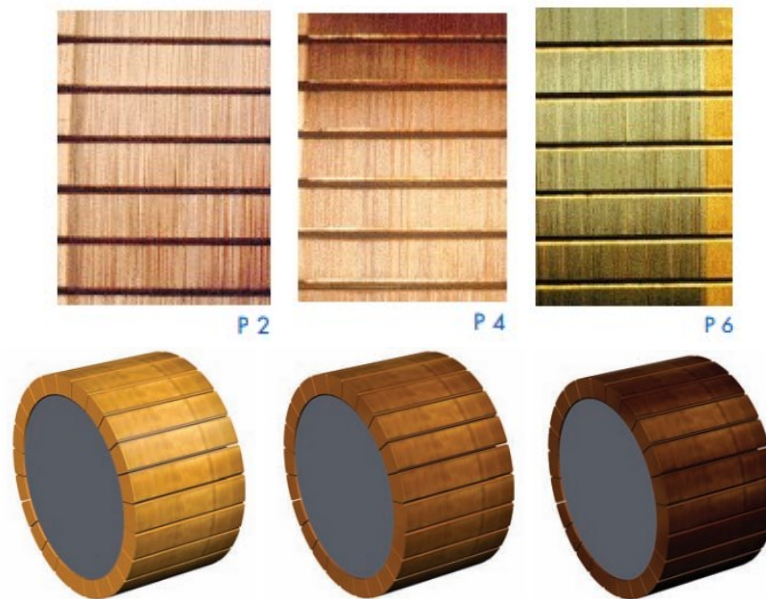
#### 4.3.1. P-PÁTINAS

- a. Intensidad de la coloración: Pátinas normales. Funcionamiento satisfactorio del motor y de las escobillas.
  - *Pátina ligera:* indica buen funcionamiento de las escobillas. El color es claro y resultado de cargas livianas, condiciones de humedad bajas, reducción de

película por contaminación o escobillas con grados de bajo rango de formación de Pátina.

- *Pátina mediana*: es la condición ideal del conmutador para la máxima vida de la escobilla y el conmutador. La pátina se mostrará constante y de color cobre, marrón a marrón oscuro.
- *Pátina Gruesa*: Se manifiesta por cargas altas, alta humedad, alta temperatura o grados de altos rangos de formación de pátina.

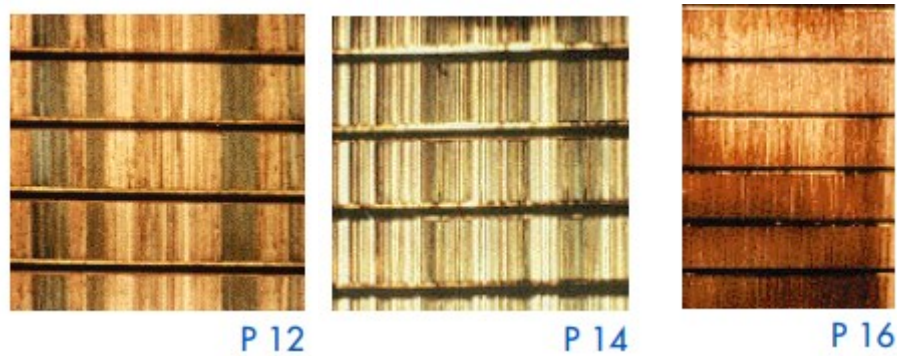
**Nota:** colores que no se encuentren en las tonalidades de los marrones indican contaminación, la cual resulta en alta fricción.



**Figura 42.** Pátinas Normales, coloración uniforme: marrón claro(P2), u oscuro(P6) [Mersen 5 2017].

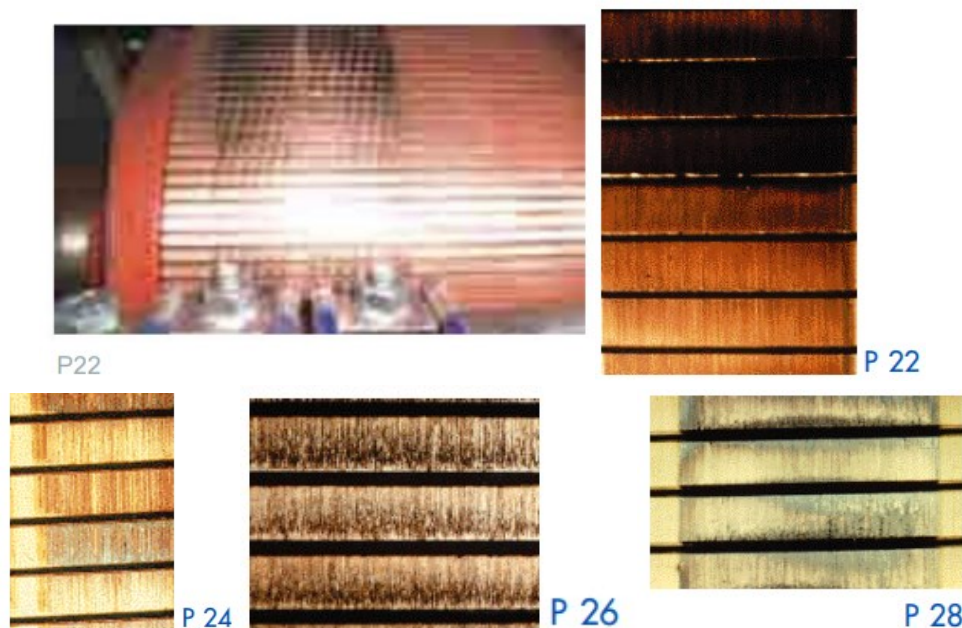
- Aspectos del depósito: Las causas más frecuentes son la humedad excesiva, vapores de aceite o gas agresivo en el ambiente, escobillas en baja carga (P12) o abrasivas (Metal atacado) por una calidad inadecuada de la escobilla (P14). También existe el caso de colector/conmutador deformado o sucio acentuado con manchas de muy diversas formas (P16) debido a una deformación del conmutador o anillo rozante descentrado.





**Figura 43.** *Pátina rayada (P12), Pátina decapada (P14), Pátina Manchadas (P16) [Mersen 5 2017].*

- c. Manchas de origen mecánico: Las causas más frecuentes son la falta de redondez del conmutador (mancha aislada) o vibraciones causadas por un desbalanceo, cojinetes defectuosos, mal alineación del eje, etc.(P22); defecto de una delga o grupo de delgas (signos de deformación del conmutador) que hacen que la escobilla salte al pasar sobre dicho defecto (P24); rectificado de colector defectuoso o mantenimiento deficiente del conmutador (P26-P28).



**Figura 44.** *Manchas aisladas o repartidas uniformemente (P22), Manchas oscuras de contorno bien definido, seguidas o no de manchas más claras de contorno más irregular (P24), Delgas manchadas en sus centros o en sus bordes (P26-P28) [Mersen 5 2017].*

- d. Manchas de origen eléctrico: Las causas frecuentes obedecen a defectos de origen eléctrico, función del tipo de bobinado del inducido, con degradación de la conmutación (P42); fuertes marcas de chispas (P44); defectos en las conexiones equipotenciales, radiales o en las cabezas de las bobinas (P46)

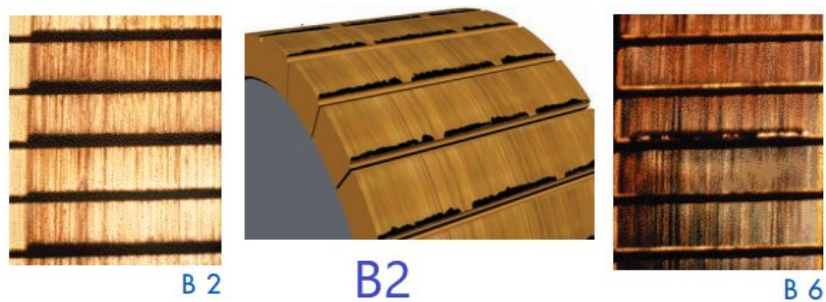


**Figura 45.** Delgas alternativamente claras y oscuras (P42), fuertes Marcas de chispas(P44), Manchas iguales al doble de paso Polar(P46) [Mersen 5 2017].

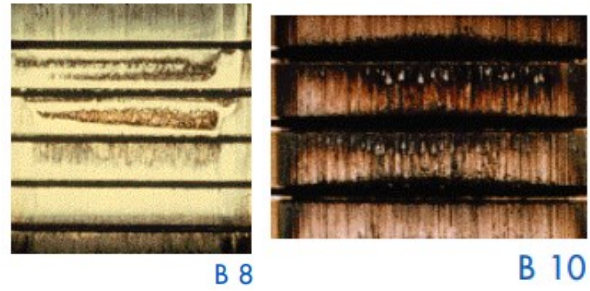
#### 4.3.2. B-QUEMADURAS

Las causas más frecuentes obedecen a chispas bajo las escobillas en motores de dos sentidos de marcha, causados por problemas de conmutación, grado de escobilla inapropiado, presión del resorte baja y/o alineación de la escobilla incorrecta.

La formación intensa de chispas provoca ennegrecimiento, picaduras y desgaste destructivos tanto del conmutador como de las escobillas; tales condiciones empeoran con rapidez y además consumen el cobre y aceleran el desgaste de la escobilla.

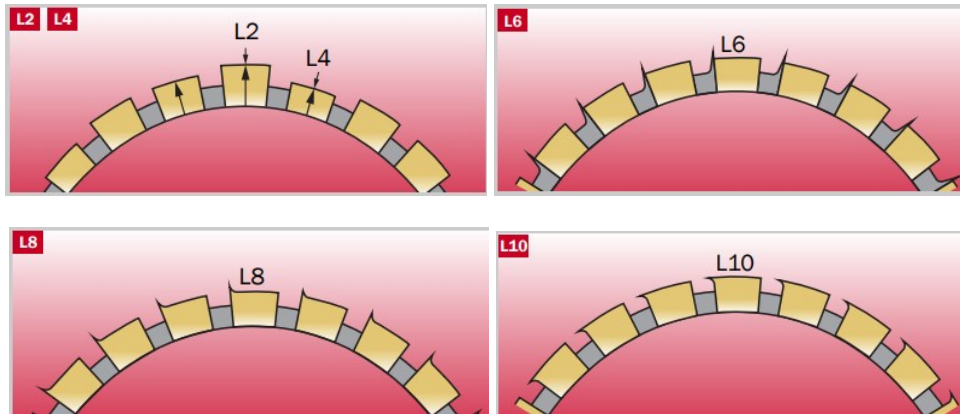






**Figura 46.** Quemaduras por chispas en el borde de las delgas (B2-B6); Quemaduras en el centro de las delgas (B8); Pátina agujereada: pequeñas manchas claras, repartidas sobre la pista de las delgas (B10) [Mersen 5 2017].

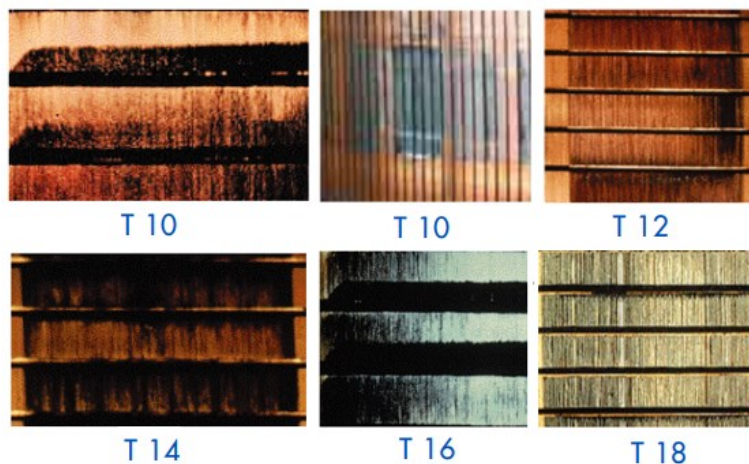
#### 4.3.3. L-DEFECTOS de las DELGAS del CONMUTADOR



**Figura 47.** Delga Salida (L2); delga hundida (L4); Micas sobresalientes (L6); rebabas en aristas (L8); Cobre arrastrado (L10) [Mersen 5 2017], [Helwing 2 2013].

#### 4.3.4. T-MANCHAS

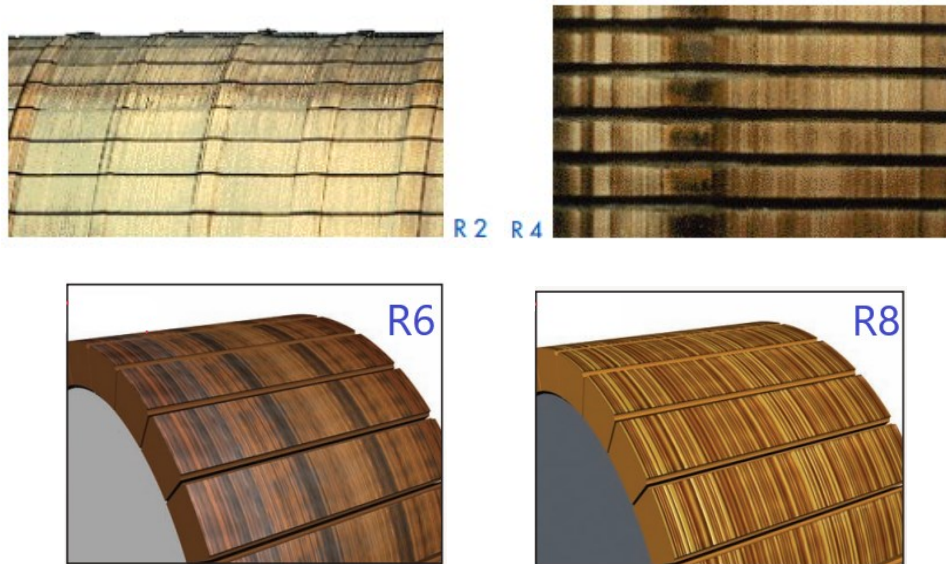
Las causas más frecuentes obedecen a paro prolongado del motor sin corriente o paro momentáneo en carga.



**Figura 48.** Imagen de la escobilla (T10); Franja oscura debida a una delga que sobresale (T12, L2), franja oscura debida a una delga hundida o baja (T14, L4); franjas oscuras debidas a micas que sobresalen (T16, L6); Manchas oscuras y localizadas debidas a rebabas (T18, L8) [Mersen 5 2017].

#### 4.3.5. R-DESGASTE de los CONMUTADORES.

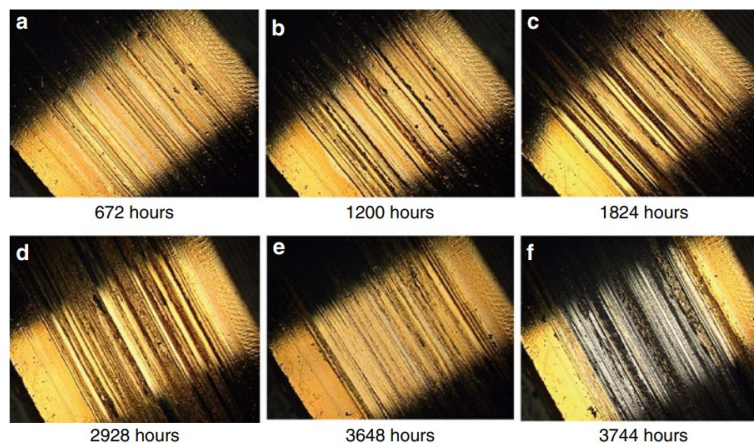
La condición de la película del conmutador es la primera indicación del funcionamiento de cualquier motor o generador. Un color ligero bronceado a marrones oscuros indica una condición de película satisfactoria, de baja fricción y que permite el paso de corriente apropiada. Deformación en la superficie del conmutador es señal de condiciones de desgaste excesivo de las escobillas y del conmutador.



**Figura 49.** *Desgaste normal del metal, tras un largo periodo de funcionamiento (R2); Desgaste anormal por ajuste incorrecto de las escobillas, calidad inapropiada, poluciones ambientales diversas (R4) [Mersen 5 2017]. Conmutador Rayado (R6), Conmutador Hilachudo (R8) [Helwing 2 2013].*

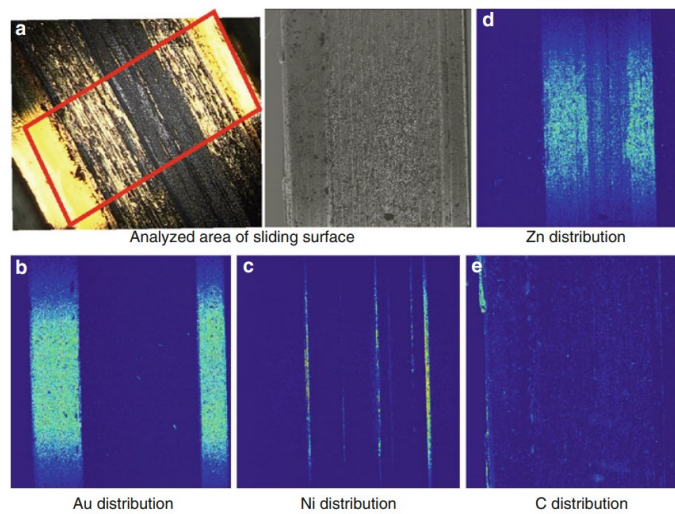
Causas como: presión de resorte baja y partículas de cobre en el conmutador (R6), rayaduras de largo plazo (R8); lo anterior, acompañado de cargas de corrientes bajas, contaminación del medio ambiente, humedad alta.

La figura 50 muestra imágenes de la superficie del anillo colector tomadas con un microscopio óptico (x75) en varios momentos de operación. Presenta un proceso de deterioro típico de la siguiente manera:



**Figura 50.** Superficie anillo Colector tomada a  $\times 75$ : (a) Aparecieron algunas huellas desgastadas, (b) El color de la superficie (Pátina) cambia parcialmente a marrón, que parece como una mezcla de lubricante y partículas de desgaste. (c)–(d) El desgaste progresó lentamente con el tiempo y las huellas se volvieron claras. (e) Las partes marrones desaparecieron gradualmente y la capa de revestimiento de Ni o el metal base (pistas blancas en la imagen) pueden quedar expuestos. (f) Casi todas las zonas de metal base se oxidaron (es el final de su vida útil) [Sawa, K. 2 2013].

En la figura 51, muestra un ejemplo de análisis de elementos de superficie en el anillo que alcanza su vida útil. Las capas de revestimiento de Au y Ni se han desgastado por completo y el metal subyacente (latón incluido Zn) está expuesto. Además, no se detecta ningún elemento de carbono C, lo que significa que casi todo el lubricante desaparece. La superficie del anillo colector estaba completamente oxidada [Sawa, K. 2 2013].



**Figura 51.** Distribución de elementos del anillo al final de su vida útil, usando un equipo de Micro analizador de sonda de electrones (EPMA) [Sawa, K. 2 2013].

#### 4.4. ASPECTO CARA DESLIZANTE ESCOBILLAS.

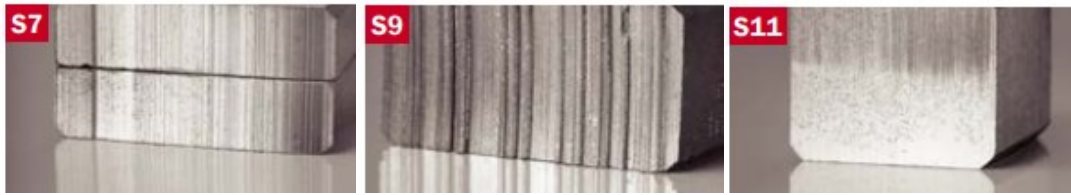
La tasa de desgaste de las escobillas se puede estimar con la inspección visual del estado de la superficie deslizante; sus causas son variables. A continuación, en la figura 52, se dan ejemplos de algunos casos evaluados por el fabricante Helwig.



**Figura 52.** *Desgaste normal*, S1 (aparición fina densa), S3 (aparición porosa) y S5 (presencia de polvo circundante en la atmósfera de operación) [Helwig 2 2013].



Según la *figura 52*; *S1*, *S2* y *S5* son superficies óptimas que no indican problemas de índole mecánico, ni eléctrico.



**Figura 53.** *S7* (Superficie rayada), *S9* (Superficie rayada y surcos) y *S5* (presencia de polvo circundante en la atmosfera de operación) [Helwing 2 2013].

Según la *figura 53*, *S7*, denota causas de diferente índole asociados a: sobrecarga, influencia de contaminación por polvo abrasivo, aceite o grasa y presión débil del resorte de la escobilla; *S9*, causas como *S7*, pero con efectos más severos y *S11* problemas de conmutación como puede ser una incorrecta posición de la zona neutral de las escobillas.



**Figura 54.** *S13* (quemadura de Borde), *S15* (superficie erosionada) y *S17* (segmentos quemados en cara deslizante) [Helwing 2 2013].

Según la *figura 54*, *S13* hace referencia a dificultad de conmutación, débil o insuficiente presión de contacto de la escobilla y chispeo severo, y presión débil del resorte de la escobilla. *S15*, sobre carga eléctrica o mal contacto de escobillas/conmutador y *S17*, falla del devanado, que genera un aumento del voltaje en la conmutación.

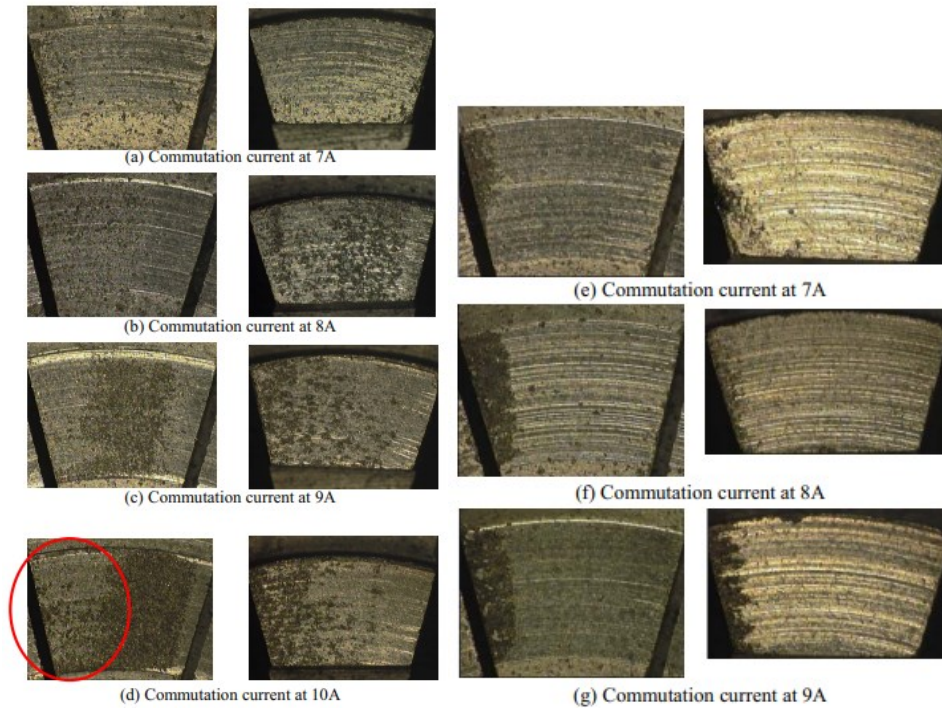


**Figura 55.** *S19* (doble cara de deslizamiento, escobilla Twin), *S21* (Segregaciones de cobre) y *S23* (Bordes quebrados) [Helwing 2 2013].

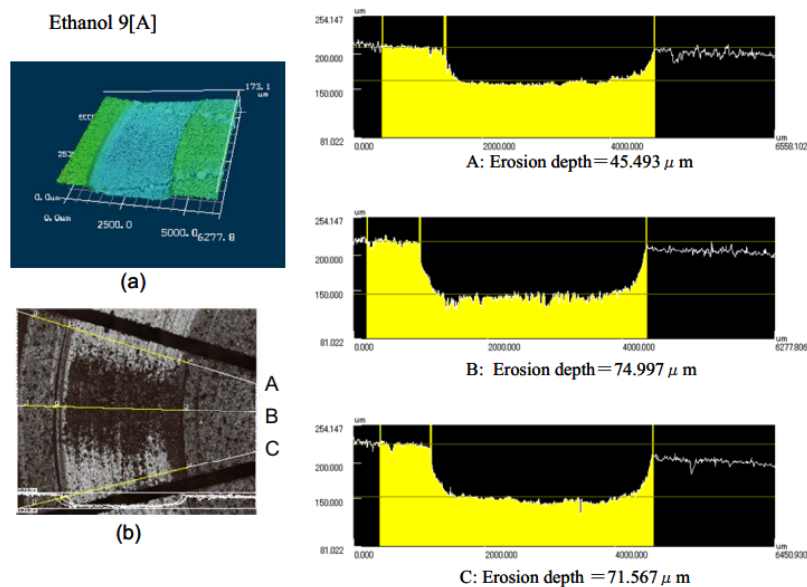
Según la *figura 55*, *S19* hace referencia a inclinación de la escobilla en motor de doble dirección de trabajo. *S21*, acumulación y arrastre de partículas de cobre. *S23*, alta delaminación, conmutador deformado y vibración de escobillas por baja carga o funcionamiento en vacío.

Investigaciones sobre desgaste en superficies escobillas/conmutador en motores DC sometidas a contaminación por hidrocarburos en aplicaciones automotrices dan fe de aumento de la severidad del desgaste [H. Tanaka 2010]. La *figura 56* y *57* ilustran un

caso práctico de desgaste abrasivo combinado con erosión de la superficie de la escobilla debido a contaminación con hidrocarburos para varios estados de carga de un motor, demostrando y cuantificando lo mencionado en [Helwing 2 2013].



**Figura 56.** Análisis muestra la superficie del conmutador y la superficie de las escobillas en etanol **a)-d)** y gasolina **e)-g)** después de la prueba de 50 horas,  $6 \times 10^6$  rotaciones y diferentes niveles de corriente [A], [H. Tanaka 2010].



**Figura 57.** Análisis con microscopio láser del segmento del conmutador, etanol a 9[A], [H. Tanaka 2010].

#### 4.5. ASPECTOS ASOCIADOS A LA FORMACIÓN DE CHISPAS EN ESCOBILLAS.

Algunos fabricantes, como es el caso de ABB, han realizado estudios de los diferentes factores que influyen en el buen funcionamiento de los motores DC. En las *tablas 12 y 13*, a modo general se listan los tipos de fallo más representativos, sus posibles causas y medidas correctivas, que nos sirven como guía y herramienta para el mantenimiento preventivo y correctivo de motores/generadores.

Tipo de Fallo	Causas y medidas correctivas
Formación de <i>chispas</i> en el extremo de entrada	1 4 8 9 10 38 39
Formación de <i>chispas</i> en el extremo de salida	1 3 22 24 37 38 39
Ligera formación de <i>chispas</i>	1 3 4 6 8 9 14 19 22 24 28 29 33 39
Intensa formación de <i>chispas</i>	6 8 9 10 13 31 32 34 35 36 37 38
Formación de <i>chispas</i> en alguna escobilla o en juegos de escobillas	2 6 7 9 14 19 20 24 25 27 28 29 31 32 33 36 37
Arco o destello	1 10 22 26 35
Quemado en la esquina posterior de escobillas	1 4 8 14 19 27 29 30 32 35 37
Vibración y rotura de los extremos de las escobillas	5 12 14 23 24 25 30 32 33 36 37
Las escobillas se desgastan con demasiada rapidez	6 7 8 9 12 15 16 22 23 27 30 31 32 33 37 38 39
Desgaste desigual de las escobillas	2 6 7 12 16 20 24 27 29 30 31 32 34 37
interrupciones y quemado por pliegues	2 6 8 10 11 16 17 18 20 23 31 35
Surcos en los laterales de las escobillas	16 25
Surcos en las superficies de contacto	6 8 17
Partículas de metal en las superficies de contacto	14 17 20 21
Desgaste desigual del colector	6 11 12 15 17 18 20 23 38 39
Surcos en la superficie del colector	6 12 14 15 16 17 18 20 24 27 30 33
Manchas Simétricas en el colector	1 10 13 21 28 35
Manchas asimétricas en el colector	20 34 36 37
Superficie del colector Marcada	6 7 12 14 17 19 24 27 30 38 39

**Tabla 12.** Tipo de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].

Posible causa	Solución
1) Las escobillas están fuera de la zona neutral	Recuperar la posición neutral
2) Asimetría entre los tornillos del soporte de las escobillas	Corrija la distancia entre los tornillos
3) Flujo de polos de conmutación muy alto	Aumente el espacio de aire del polo de conmutación
4) Flujo de polos de conmutación muy bajo	Disminuya el espacio de aire del polo de conmutación
5) Funcionamiento excesivo sin carga	Utilice escobillas adecuadas, reduzca el número de escobillas
6) Suciedad y grasa en el colector	Limpie el colector e identifique la causa
7) Polvo abrasivo en la superficie de las escobillas	Retire las escobillas y límpielas
8) Sobrecarga	Disminuya la carga
9) Vibraciones	Compruebe la alineación, vuelva a equilibrar si es necesario
10) El bobinado del inducido está dañado	Repárelo y rebobine si es necesario
11) Ventilación inadecuada	Determine las causas, y a continuación consulte a ABB si es necesario
12) La densidad de corriente en las escobillas es muy baja	Disminuir el número de escobillas
13) Picos de intensidad	Seleccione los tipos de escobillas adecuados
14) El aire es demasiado húmedo	Permita la entrada de aire fresco, seleccione escobillas adecuadas
15) El aire es demasiado seco	Permita la entrada de aire fresco, seleccione escobillas adecuadas
16) Polvo o arena en suspensión en el aire	Coloque los filtros y elimine las causas
17) Gases o ácidos en el aire (*)	Permita la entrada de aire fresco, seleccione escobillas adecuadas
18) Rozamiento excesivo de las escobillas	Disminuya la presión de las escobillas, utilice escobillas no abrasivas
19) Las escobillas no están adaptadas al colector	Adapte las escobillas perfectamente, tal y como se ha mostrado
20) Diferentes tipos de escobillas	Utilice escobillas del mismo tipo

**Tabla 13.** Posibles Causas y soluciones (medidas correctivas) de tipos de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].

21) El colector se mancha cuando la máquina no está en funcionamiento	Levante las escobillas
22) La presión de las escobillas es demasiado débil	Sustituya el muelle y la almohadilla de la escobilla
23) Presión excesiva en las escobillas	Sustituya el muelle y la almohadilla de la escobilla
24) Escobillas con diferente presión	Ajuste la presión, sustituya el muelle de escobilla defectuoso si fuera necesario
25) Los soportes de las escobillas no son perpendiculares	Restaure la distancia correcta entre los soportes de escobillas y el colector ( $2 \pm 2.5$ mm)
26) Las escobillas están atascadas en los soportes de escobillas	Limpie los soportes de las escobillas
27) Demasiada holgura en los soportes de escobillas	Cambie el soporte de escobilla
28) Vibraciones en los tornillos del soporte de las escobillas	Refuerce los tornillos con anillos de aislamiento
29) Los soportes de escobillas no están en paralelo	Ajuste los soportes de las escobillas
30) El soporte de escobillas está muy lejos del colector	Ajuste la distancia a unos $2 \pm 2.5$ mm
31) Distribución de corriente desigual en las escobillas	Aumente la densidad de corriente de las escobillas, ajuste la presión, utilice escobillas más abrasivas
32) El aislante de mica sobresale del colector	Alise el aislante de mica y los bordes de los segmentos
33) Zumbido en los segmentos del colector	Elimine el zumbido, alise los bordes, sustituya las escobillas por unas de calidad más adecuada
34) Colector ovalado	Tornee el colector
35) Soldadura rota	Suelde los terminales del colector
36) Colector marcado	Tornee el colector
37) Segmentos del colector sobresalientes	Pula el colector con una piedra pómez, torne el colector si fuera necesario
38) No hay bobina de inductancia donde es necesario	Conecte la bobina de inductancia
39) Reactancia de la bobina de inducción diferente de la especificada	Sustituya la bobina de inducción

(\*) Gases dañinos que pueden estar presentes en el aire: sulfatos, siliconas, cloro, amoníaco. Consulte a ABB en estos casos

**Tabla 14.** Posibles Causas y soluciones (medidas correctivas) de tipos de fallo específicos en motores DC [ABB 2002].

Según la tabla 12, cabe notar que los fallos asociados a chispas obedecen al 72% de las causas (**resaltado en color azul**), es por ello la importancia de estudio. Las causas **22, 23, 24, 26 y 31** tienen relación con la presión y el GAP existente entre una escobilla con la superficie deslizante. Lo anterior nos da muestra que la detección de las chispas en fase temprana nos permite dar aviso oportuno de alguna de las 28 causas asociadas a su presencia. Ahora bien, desde el punto de vista del mantenimiento, también nos permite determinar periodos de mantenimiento preventivos con relación a limpieza, ajuste de presión de resortes de escobillas, cambio de escobillas, entre otras.

#### 4.6. CLASIFICACIÓN DE CHISPAS

Como se ha mencionado en secciones anteriores, las causas más frecuentes de la formación de chispas son de carácter *eléctrico* (conmutación defectuosa, sobrecarga, densidad de corriente excesiva, escobillas inadecuadas) y *mecánicas* (golpes y vibraciones, fricción excesiva, conmutador deformado, desequilibrado y presión de resorte insuficiente en los cepillos). Ahora bien, sin importar la razón, las *chispas* son nocivas para la escobilla (debido a que su índice de desgaste aumenta) y para el conmutador (aumenta su deterioro por la quema del metal).

Su grado de agresividad depende de varios factores que serán detallados a continuación:

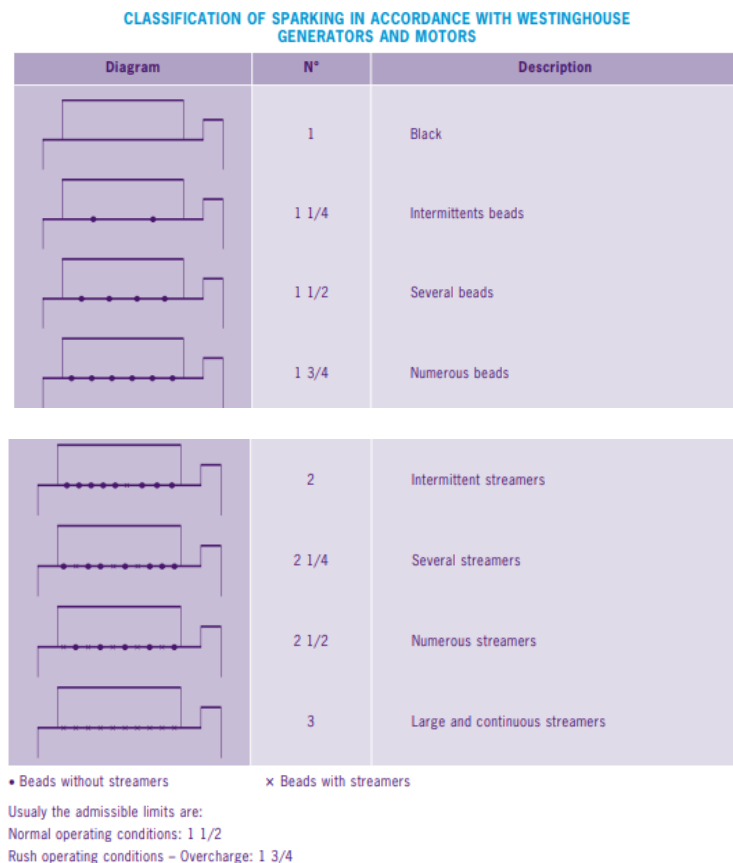
Su volumen: que puede pasar apenas perceptible en el borde, intermitente o continuo, a un arco sostenido, estático o móvil, con o sin expulsión de partículas incandescentes (serpentinatas).



Su color: Dependiendo de su naturaleza, pueden tomar las siguientes clases de color:

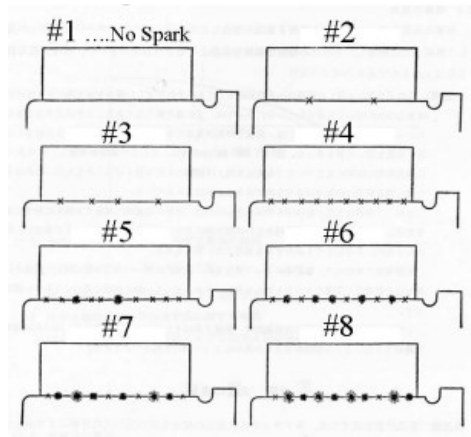
- **Violetas** (son inofensivas, sólo afectan a la escobilla),
- **Rojas** (con o sin expulsión de carbón incandescente que aparecen durante las sobrecargas; estas causan una mayor tasa de desgaste de la escobilla).
- **Azules brillantes y ruidosas, con ardor** (indican falla grave de conmutación, acelera la velocidad de desgaste y daños en el conmutador),
- **Verdes voluminosos siempre ardiendo** (indican una falla grave en el funcionamiento de la máquina. Provoca daños rápidos y profundos en el conmutador y en las escobillas).

A menudo es útil poder definir de manera concisa y precisa los grados de chispas de las escobillas, una técnica preventiva de por *Inspección Visual*, permite clasificar el grado de actividad de las chispas de un motor para un determinado régimen de servicio. El sistema de clasificación de *Westinghouse*, es uno de los más utilizados y aceptable en la mayoría de los casos, que ha demostrado ser satisfactorio [Mersen 1 2017]; Adicionalmente se tiene el sistema Japonés especificado en el *Estándar JEC-2120*. Ver figuras 58 y 59.



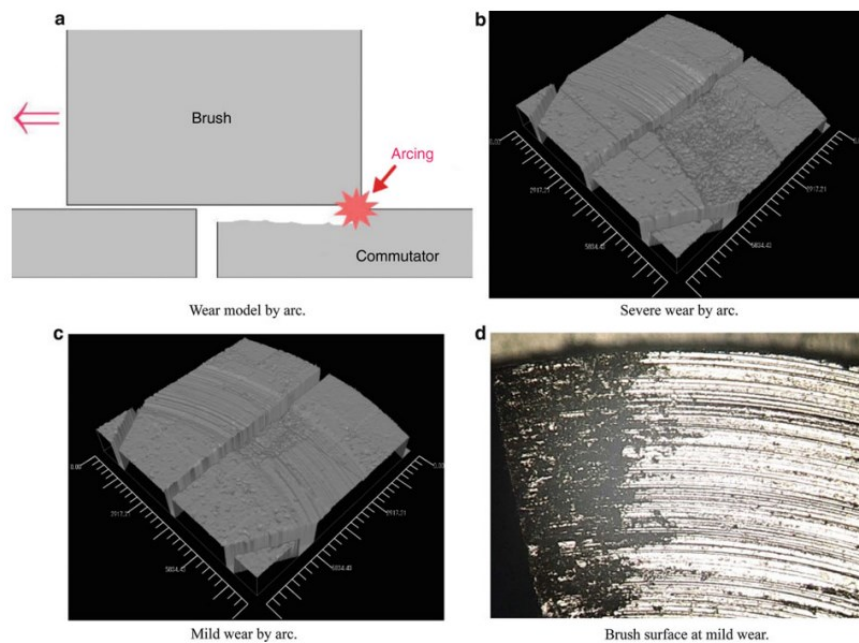
**Figura 58.** Clasificación de Chispa en concordancia con la clasificación Westinghouse [Mersen 1 2017].





**Figura 59.** Clasificación de Chispa en concordancia con la clasificación JEC-2120 [Morita 2007].

El conmutador y la escobilla se desgastan de forma excesiva debido al arco generado en el borde posterior de la escobilla; ambos componentes del sistema se desgastan mecánicamente. Cuando el arco es *severo*, la parte erosionada por arco se extiende y evoluciona gradualmente. Finalmente, la parte de superficie se erosiona y alcanza el ancho de la escobilla, como se muestra en la *Figura 60b* de una figura microscópica láser, y la condición de superficie de deslizamiento se deteriora de forma extrema. Esto puede conducir en pocas horas de funcionamiento al final de la vida útil de la pieza [Sawa, K. 2 2013]. En estos casos, es preferible parar la máquina y hacer los correctivos necesarios.



**Figura 60.** *b.* Comportamiento de Desgaste de una escobilla bajo la presencia de un arco fuerte. *c y d* un arco leve [Sawa, K. 2 2013].

Por otro lado, cuando la energía del arco es menor, el desgaste por arco es *leve*. El desgaste por arco sobre la superficie deslizante es equilibrado y la parte erosionada por

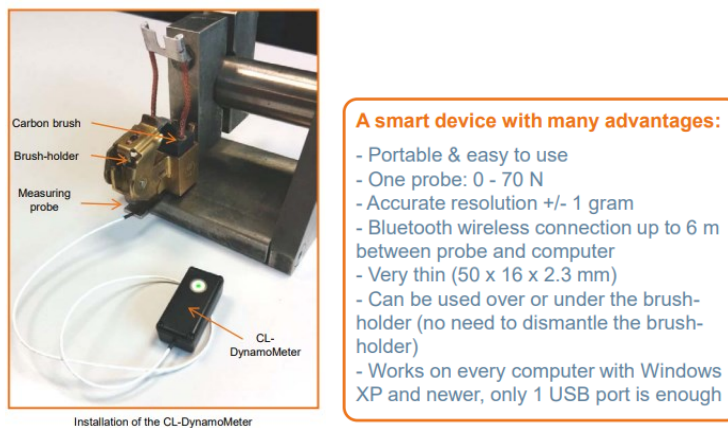
el arco no se extiende más allá de una cierta cantidad, como se muestra en la *figura. 60c* y la *figura 60d* muestra la superficie del cepillo en este caso [Sawa, K. 2 2013].

#### 4.7. EQUIPOS DESARROLLADOS PARA EL DIAGNOSTICO DE MOTORES DC

A continuación, se listan una serie de equipos sugeridos por uno de los fabricantes de escobillas y otros equipos que han sido mencionados en la literatura bibliográfica de estudio del análisis de las chispa y mantenimiento del sistema conmutador/escobillas a lo largo de los años.

##### Equipos para Mantenimiento Preventivo de Motores DC.

Los parámetros que se controlan e inspeccionan son la tensión del resorte de las escobillas (con dinamómetro, ver *figura 61*); el estado de calidad de la superficie de conmutación deslizante, midiendo el valor de rugosidad (Rugosímetro, ver *figura 62*) e inspección visual del estado de la Pátina (Estroboscopio, ver *figura 63*); También se incluyen sistemas de alarma de verificación de desgaste de la escobilla con un circuito de electrónica de potencia que tiene una terminal en cada escobilla, ver *figura 64*.



**Figura 61.** Dinamómetro para medir tensión de los resortes de las escobillas [Mersen 1 2017].

<b>Modelo</b>	<b>SJ-210</b>
<b>D9 9703</b>	
Rango de medición	17,5 mm
Longitud cutoff (λ,c) / Longitud de muestreo	0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm
Fuerza medición / Aguja palpadora (ref. 178-296)	0.75 mN 2 μm, R 60°
Filtros digitales	Gausiano, 2CR75, PC75
Dimensiones unidad visualización	52,1x65,8x160 mm
Ref Mitutoyo	178-560-11D
Peso	500 g (Pantalla + Unidad de avance)

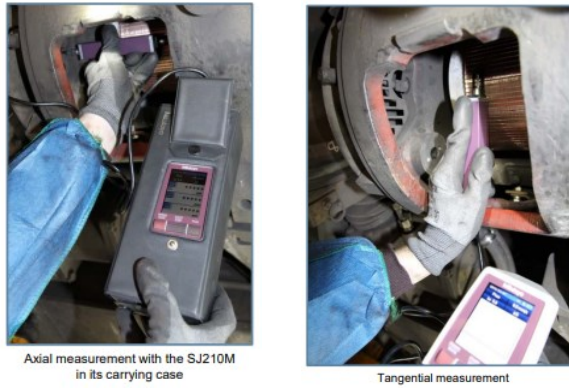



Figura 62. Verificador de Rugosidad [Mersen 4 2017].

**STROBOSCOPE**  
 On badly deformed slip rings or commutators causing important brush vibrations, out roundness can be easily located and identified with our stroboscope.




Stroboscope

Reference	Description
90313N	Digital stroboscope
90315N	Spare lamp

MERSEN SERVICES

Figura 63. Estroboscopia para detectar la pérdida de la redondez del conmutador cuando los niveles de vibración sean altas [Mersen 4 2017].

**ALARM BOX**  
 Commutators and slip rings are likely to get damaged by worn out carbon brushes. The alarm carbon brush includes, in addition to its shunt, a thin copper braid, entirely protected by an insulated sleeve; it is located deeper than the carbon brush tamping. When the carbon brush is worn, the alarm shunt comes into contact with the commutator / slip ring (without causing any damage to the sliding surface), the short-circuit triggers the warning light.



Alarm box

Reference	Description
90702N	Brush wear detection alarm box

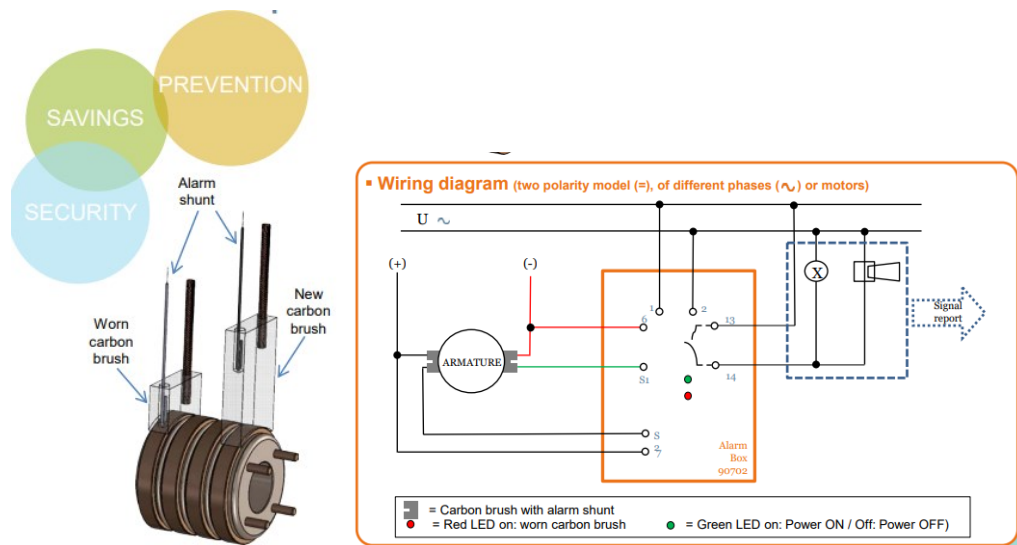


Figura 64. Alarma verificadora de Desgaste [Mersen 4 2017].

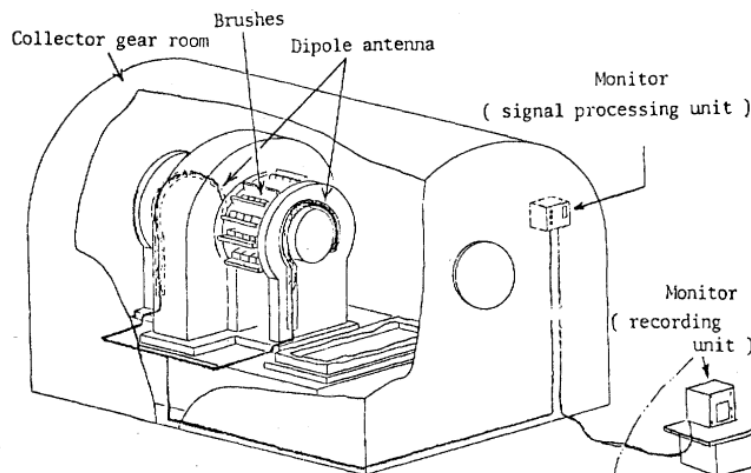
## Equipos para Mantenimiento Predictivo de Motores DC.

El “Brush Monitor” (Monitor de escobillas) fue un equipo portátil alimentado a 115V, 60 Hz; capaz de medir el potencial de chispas promedio de las escobillas de carbón de un anillo a otro, también fue empleado para monitorear señales de voltaje de escobillas individuales o un conjunto de ellas. Su uso se amplía, al ser capaz de extraer cualquier pulso de ruido de una onda compuesta donde exista recurrentes picos de energía. Los datos de salida del equipo pueden ser tratados a una computadora.



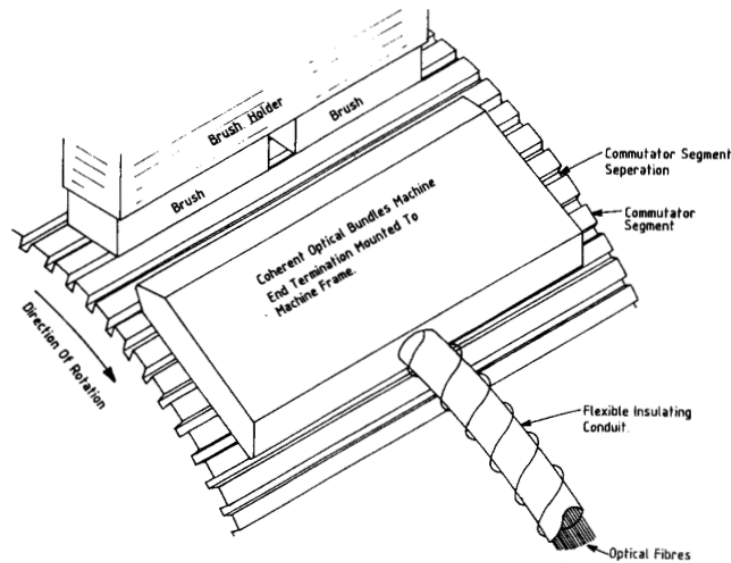
**Figura 65.** Monitor de Escobilla [Sawada 1972].

Por la década del 80, otro equipo de Monitoreo continuo de chispas, se caracterizó por tener una antena dipolar como detector, capaz de capturar las ondas de radio emitidas por las chispas, siendo el parámetro más sensible en la monitorización de señales, ver *figura 66* [Michiguchi 1983].



**Figura 66.** Vista general de equipo de monitoreo continuo de chispa usando señales emitidas de radiofrecuencia. Cuenta con unidad de procesamiento de señal (25x26x35 cm, 10 kg) y unidad de grabación (20x26x30 cm, 5kg) [Michiguchi 1983].

En los 90, se empleó un dispositivo óptico de inspección considerado para la época como no intrusivo; capaz de monitorizar chispas a lo largo de la interface escobilla/commutador en motores DC. Ver *figura 67*.



**Figura 67.** Esquema de dispositivo óptico de monitoreo de chispas [Barwany 1991].

Por último, en la última década, se han implementado en la industria, sensores UV, capaces de medir la intensidad ultravioleta de la chispa, así mismo de define el grado de criticidad, usando sensores ópticos instalados en proyección a la instalación de las escobillas. tiene como limitante que los efectos de suciedad en atmósferas contaminadas pueden afectar las mediciones. Ver *figura 68*.

## Commutation Indicator

An objective measurement replacing visual observation

Objective measurement

Predictive maintenance

Reduced maintenance & downtime

▪ Reliable results

- Contact-free solution
- UV sensor detecting low intensity ultraviolet emission
- Commutation value display in a 1 to 8 range, with 0.1 precision when connected to a computer
- Angular sensitivity +/- 45°

No more difficulty of access.

The sensor can be installed from 100 to 800 mm (4"-32") away from the carbon brush.

Axial view

Tangential view

Sensor set up example with a 200 mm monitoring distance

**Figura 68.** Indicador de Conmutación, Sensor UV que detecta baja emisión de intensidad ultravioleta de la intensidad de chispa [Mersen 4 2017].

## CAPITULO 5: METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE FALLOS Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE MOTORES DC ASOCIADOS A CHISPAS EN EL CONMUTADOR.

### 5.1. ANTECEDENTES

Es sistema conmutador/escobillas son fuente frecuente de problemas asociados a problemas listados en las *tablas 12 y 13* del capítulo 3; por nombrar algunos de ellos podemos tener contactos defectuosos entre el conmutador y escobillas, desgaste excesivo o desigual de las escobillas, deformación del conmutador, contaminación y suciedad. Uno de los efectos negativos de la mayoría de estos fallos se manifiesta con la aparición de chispas (en diferentes niveles e intensidades, siendo peor el arco el estado más crítico) en la región de contacto (debajo o borde) entre las escobillas-conmutador, tal y como se ilustró en la *figura 28*. A continuación se hará un breve resumen del análisis de este fenómeno en la línea del tiempo y que hizo parte de la evolución del motor/generador DC.

Entre los años 1890 y 1900 se escribieron muchos textos sobre máquinas eléctricas en los que se explicaban la teoría, el diseño y construcción de éstas. J.Fischer- Hinnen, 1890, publicó trabajos en la revista alemana E.T.Z en los que analiza el *fenómeno de la conmutación y chispeo en el colector* (1893, 1898) y escribió varios trabajos sobre tipos de inducido.

1891, Arnold desarrolló el devanado serie-paralelo e investigó los *problemas de conmutación y el comportamiento del contacto delga-escobilla*.

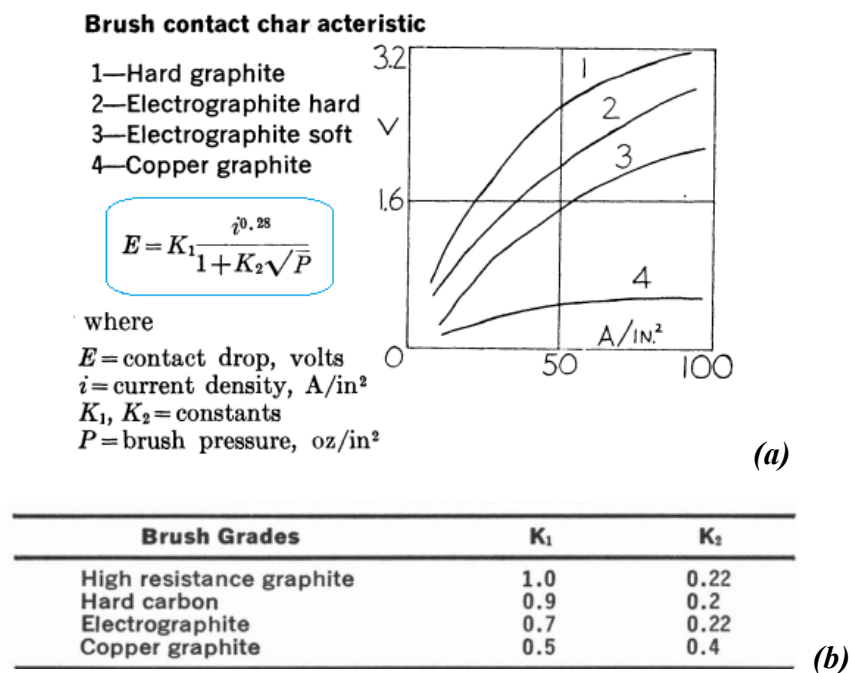
En 1905, aunque se aceptaba la presencia de las chispas, ya se tenían discusiones acerca de los límites permisibles de la intensidad de chispas en generadores DC. Se encontró que la presencia de chispas incrementaba la temperatura del conmutador, energía es mucho mayor comparada con las fuerzas de fricción y resistencia eléctrica capaz de volatilizar cantidades de cobre del conmutador. Al mismo tiempo se consideraba que la *actividad de las chispas* se debía a presencia de campos magnéticos: uno externo (contraelectromotriz) y otro debido a la armadura [G. S. Dunn 1905].

Ya a mediados de la década de los 50, Un tipo de dispositivo que había sido desarrollado para medir la actividad de chispas encontradas en Máquinas DC. había sido descrito por Romanis, “El *proceso de conmutación, hace que la máquina DC sea una constante fuente de oscilaciones eléctricas de radiofrecuencia; los voltajes del arco se concentran en frecuencias que van desde los 14 kciclos hasta el megaciclo*” fue lo manifestado en [S. J. Roumanis 1956].



En la década de los 60, las chispas en forma de arcos, que se forman cuando el contacto escobilla-conmutador es interrumpido, conmutación incompleta; se intentaron cuantificar en forma de energía disipada en el arco y proporcional a la corriente. En otras palabras, “la cantidad de material evaporado de un arco electrodo es proporcional a los coulombs conducidos por el arco” [R. Holm 1962].

Otro hito sobre la misma década fue la definición de expresiones matemáticas, de gran aproximación, obtenidas de ensayos experimentales, donde se relacionan la caída de tensión de contacto  $E$  y la densidad de corriente  $J_B$  para diferentes calidades de escobillas, que funcionaban muy bien para rangos, entre los  $J_B = 10 - 80 \text{ A/in}^2$  en sistemas conmutador/escobillas [Padmanabhan 1965]. A continuación, un fragmento del documento con la notación original a sus variables, ver figura 69:



**Figura 69.** Gráfico  $E$  vs  $J_B$  para 4 tipos de escobillas (a) Expresión Matemática de Bailey and Cheghorne, (b) Valores de  $K_1, K_2$  Padmanabhan 1965].

En la Década de los 70 se plantean técnicas de procesamiento de señales para monitorear el ruido de radiofrecuencia generado por las chispas de las escobillas de carbón en anillos colectores. De este modo, poder realizar una detección temprana y dar aviso de riesgo excesivo de presencia chispas. Ello fue un gran avance y hasta ese momento, sería la tercera Técnica de monitoreo de generadores eléctricos junto a las técnicas de detección de corto circuito entre las espiras de devanados del rotor y la Cámara de ion capaz de detectar el sobrecalentamiento en máquinas eléctricas [Sawada 1972].

Desde el desarrollo de la radio comunicación, el ruido de radio frecuencia es producido por las escobillas montadas en conmutadores o anillos colectores de máquinas eléctricas giratorias fue posible captarlo. “El principio de la técnica se basa en que los voltajes de radiofrecuencia producidos son proporcionales al grado de chispas”. Cabe mencionar,

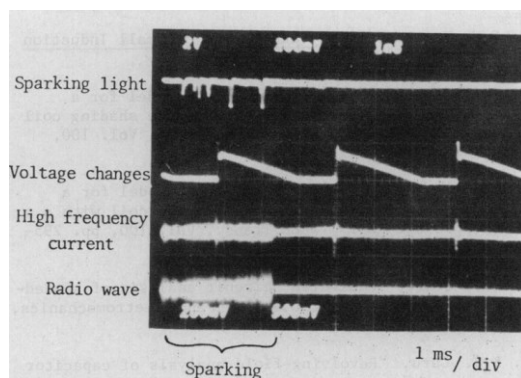
para un caso concreto, que estudios de laboratorio de las caídas de voltaje en la superficie de contacto de las escobillas de carbón en los anillos colectores, muestran que existe un nivel de voltaje crítico (rango de 9 a 12 v), en el cual las chispas de las escobillas se convierten en arcos destructivos [Sawada 1972]; tener en cuenta que ya varios niveles de potencial de arco habían sido reportados en [Padmanabhan 1965] y [R. Holm 1962] previamente. Factores como la polaridad de la escobilla, espesor de pátina, condiciones atmosféricas, los materiales de los anillos deslizantes y la calidad de la escobilla afectan también la variación de la caída de potencial de contacto del arco. Y su nivel de daño dependerá del tiempo que se mantenga dicho arco.

Hasta ese momento, *no se conocía ningún medio adecuado para controlar el potencial de chispas de las escobillas en los anillos colectores de sistemas turbina-generador* en los que la excitación del campo contenía picos de ruido de alta energía en la misma banda de frecuencia que el potencial de chispas a controlar [Sawada 1972]. El uso de técnica evitaba el rápido deterioro de anillos colectores y de conjuntos de porta escobillas, dada la formación de arcos inesperados.

En 1983, fue desarrollado por el laboratorio de investigación en energía de Hitachi ltd un dispositivo de monitoreo continuo para colector, capaz de detectar las chispas en su fase temprana en generadores. *Una antena dipolar (instalada dentro de un generador, con frecuencias de resonancia de 50 a 430 MHz)* es usada como detector y era capaz capturar las ondas de radio emitidas por las chispas, siendo el parámetro más sensible en la monitorización de señales [Michiguchi 1983].

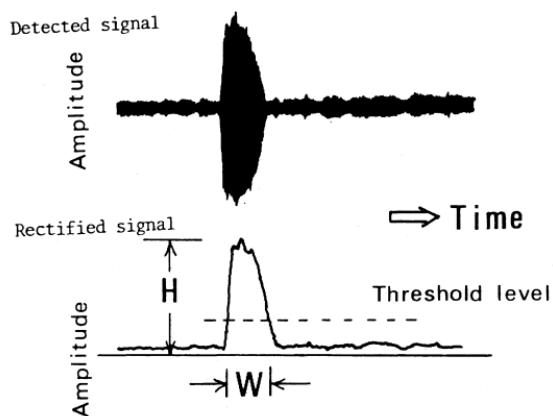
Este último método tiene buena sensibilidad en comparación con otros métodos que incluyen detección : *(1) luz generada de las chispas con fotodetector* (solo es posible captar la luz intermitente), *(2) cambios de voltaje entre anillos y escobillas* (método de baja sensibilidad a las chispas), y *(3) corriente de chispas de alta frecuencia* (Las chispas se pueden detectar mediante un transformador de corriente y como limitantes puede haber una disminución de la alta frecuencia, debido a una fuga de la señal a través de las capacitancia parásita entre conductores). *La figura 70 muestra* las formas de onda de estos métodos y *el método de ondas de radio* (La antena no detecta el ruido generado por la conmutación de tiristores, dado que se reduce desde su fuente de ruido a las escobillas y el ruido de radiofrecuencia de sistemas de excitación de la conmutación suelen disminuirse) [Michiguchi 1983].





**Figura 70.** Formas de Onda de las señales detectadas, métodos tradicionales vs radio frecuencia como el más sensible y no intrusivo hasta 1983 [Michiguchi 1983].

Siguiendo un poco más éste último método, se puede decir, que un monitoreo eficaz se requieren dos elementos técnicos esenciales: una antena adecuada para la detección de chispas y la selección de técnicas de procesamiento de señales que puedan extraer el parámetro de estudios con cierta sensibilidad a la magnitud de las chispas.



**Figura 71.** Típica onda de señal de Chispas en la Amplitud Vs tiempo. Parámetros  $H$ (altura),  $W$ (ancho) y Área ( $H \times W$  es el más sensible) por encima del nivel de umbral [Michiguchi 1983].

Dado que las señales de frecuencia oscilan entre 10 y 100 MHz y el área ( $H \times W$ ) es calculada como indicador de chispa y se puede generar un nivel de la alarma cuando los datos procesados alcancen cierto umbral. Las señales de chispas no tienen características significativas en sus formas de onda [Michiguchi 1983].

Como se ha podido observar, se han realizado varios intentos por cuantificar la actividad de chispas en motores DC; no obstante, la mayoría de los enfoques han sido intrusivos, pues implica la instalación de sensores (*caso de sensores UV indicadores de conmutación* [Mersen 4, 2017]) a muy poca distancia de la máquina o sensores internos (antenas bipolares [Michiguchi 1983], *sensores ópticos* [Barwany, 1991]), lo cual se vuelve poco práctico cuando el ambiente de operación del motor está contaminado (Polvo de carbón, aceite, grasa y otros contaminantes), el espacio necesario para su implementación en la máquina, su ajuste dimensional; no permite a los sensores medir con eficacia el comportamiento real del síntoma que se quiere monitorizar; aun cuando

no son afectados por ruidos magnéticos ni eléctricos. También se han propuesto métodos basados en aplicación de termografía [Hu, 2012], ello implica el acceso al sistema de escobillas del conmutador, que en gran número no es fácil de acceder.

En investigaciones anteriores se demostró el efecto de la conmutación sobre la *corriente de armadura* [Treanor 1995]; de hecho, se realizó la correlación de inspección visual, la señal obtenida de un sensor óptico y los resultados del análisis (Wavelet) basado en ondículas de la corriente de armadura de un motor DC [Kliman, 2003]. En estos trabajos se comprobó que el fenómeno del chispeo genera incrementos en las amplitudes de algunos armónicos (frecuencia de paso de barra en un *factor de 5* veces [Treanor 1995]), de la señal de corriente de armadura, usando (Fast Fourier Transform) como MCSA (Motor Current Signature Analysis); y la mayoría de ellos ubicados en la región de baja frecuencia del espectro y la introducción de un indicador de chispas permite entonces, definir la calidad de la conmutación en motores DC [Velasco, 2022].

Como puede verse, las investigaciones de casi 100 años han apuntado al interés de estudio de la actividad (Intensidad y número) de chispas en motores DC; sin embargo, las herramientas (Transformada en tiempo Corto de Fourier, TSFT y la Transformada Discreta de Wavelet, DWT) aún no estaban totalmente desarrolladas y no permitían determinar las frecuencias específicas afectadas por el fenómeno, ni indicadores de cuantificación de la actividad de chispas que nos permitieran definir el nivel de gravedad y con ello determinar los umbrales de operación normal, alarma, mantenimiento y parada del equipo.

Recientes aplicaciones metodológicas y predictivas han usado técnicas de análisis de corrientes en estado transitorio (durante proceso de arranque de motores, [Antonino 3 2020]) y han mostrado ser más exactas y confiables cuando se requiere dictaminar el estado de salud de un motor. Con respecto al presente estudio; se pueden apreciar fallos relacionados con los sistemas de la conmutación y las escobillas [Velasco, 2022], [Antonino 2, 2021], lo cual se vuelve interesante desde el punto de vista del mantenimiento.

## 5.2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO: TÉCNICA DE ANÁLISIS DE CORRIENTE EN ESTADO TRANSITORIO.

El análisis transitorio es un método utilizado en ingeniería eléctrica para estudiar el comportamiento de circuitos o sistemas durante la transición de un estado a otro. En máquinas eléctricas rotativas un estado transitorio puede identificarse como el cambio de velocidad de giro en un motor de un estado inicial hasta un estado final o viceversa; es el caso de un arranque desde un estado en reposo a su estado estacionario o variaciones de velocidad generadas por variadores de frecuencia en sistemas que los tienen implementados.

La implementación de técnicas de diagnóstico en estado transitorio en máquinas DC permitan determinar el estado de los distintos componentes, que van desde problemas

mecánicos hasta fallas eléctricas. Dentro de las causas más comunes pueden citarse: escobillas desgastadas, problemas con el conmutador, fallas en el aislamiento, fallas en el rotor, sobrecargas, fallas en rodamientos, sobrecalentamiento, entre otros. Ser capaces de detectar cuando un síntoma de una avería se hace presente, sobre todo en su fase incipiente con monitoreos periódicos pueden ayudar a detectar problemas potenciales antes de que conviertan en fallos.

Siendo más precisos al analizar el comportamiento del conmutador y la escobillas durante condiciones transitorias, es posible identificar a problemas asociados con el mal contacto de las escobillas, daño del conmutador o contaminación. Adicionalmente, el análisis transitorio puede revelar irregularidades en el proceso de conmutación, como vibración de las escobillas o distribución desigual de corriente entre los segmentos del conmutador.

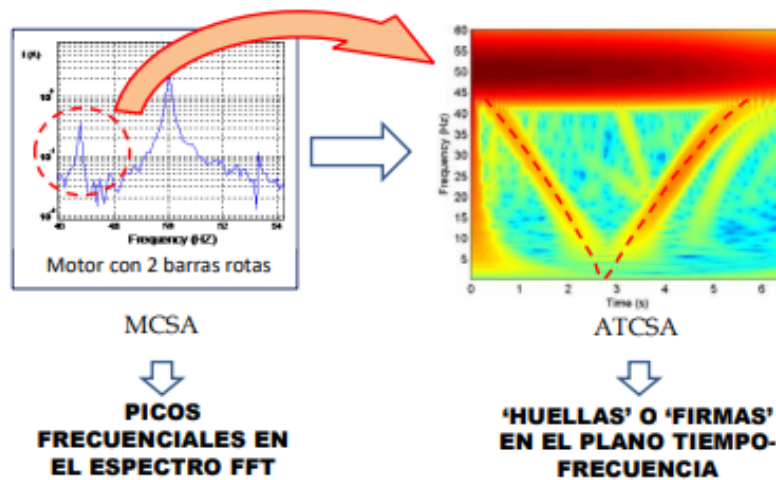
Para el caso concreto del análisis de la chispa en la conmutación de motores/generadores DC, la metodología propuesta implica analizar las formas de onda de voltaje y corriente de armadura durante el arranque, aceleración, desaceleración y operación en estado transitorio.

La “Advanced Transient Current Signature Analysis” (ATCSA), es una técnica de diagnóstico para identificar y analizar fallos en máquinas rotativas, como motores, generadores y bombas. La ATCSA incorpora técnicas avanzadas de procesamiento de señales y análisis de datos para extraer información más detallada de las firmas de corriente transitoria. El en presente se emplea la Transformada de Fourier de Corto Tiempo (STFT, “Short-Time Fourier Transform”) para el procesamiento de la señal, analizando las propiedades de frecuencia de la señal de corriente de armadura en el dominio del tiempo. El uso de esta herramienta de procesamiento de señal se ha justificado en su simplicidad, bajo coste computacional y disponibilidad en paquetes matemáticos convencionales [Velasco, 2022].

Es claro mencionar, aunque esté fuera del alcance del presente trabajo, que el análisis transitorio puede ayudar a cuantificar los efectos térmicos asociados a un arqueo excesivo pueden provocar calentamiento localizado en el motor debido a pérdidas resistivas en la interfaz entre las escobillas y el conmutador y se puede evaluar el nivel riesgo de sobrecalentamiento o daño en el aislamiento.

A diferencia del método clásico, “Motor Current signatura Analysis” (MCSA), la idea del método del análisis transitorio ya no consiste en detectar ciertas componentes frecuenciales asociadas a la avería en el espectro FFT, sino en estudiar cómo evolucionan en el tiempo las frecuencias de los armónicos de fallo (mapa tiempo-frecuencia). A este respecto, se ha demostrado que las componentes de fallo, que se presentan a ciertas frecuencias bien definidas en régimen permanente, varían sus frecuencias de forma muy característica durante el régimen transitorio [Antonino 1

2017], a continuación, se ilustra en la *figura 72*, el caso de un motor asíncrono donde se comparan las dos técnicas.



**Figura 72.** Comparación ilustrativa entre la técnica Clásica MCSA (Estado Estacionario) y Avanzada ATCSA (Estado Transitorio) analizando un motor con 2 barras rotas en el devanado de inducción. Tomado de la página 49, [Corral 2018].

### 5.2.1. FUNDAMENTOS Y VENTAJAS DE LA TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO

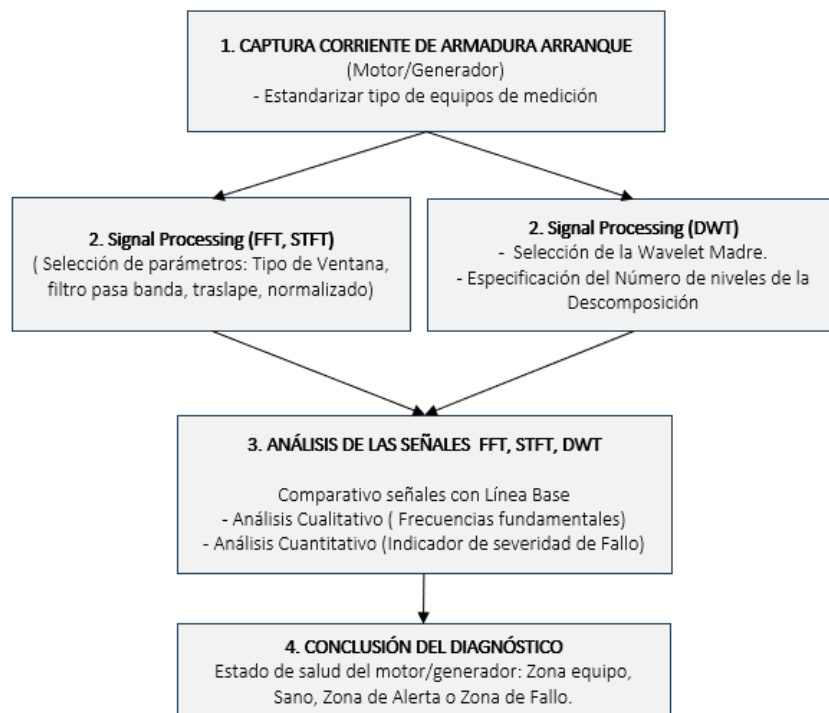
La técnica se basa en registrar la forma de onda de la corriente demandada por el motor durante un estado transitorio elegido a una cierta frecuencia de muestreo capaz de cubrir el espectro de frecuencia que se desea evaluar y luego analizarla posteriormente mediante el uso de técnicas de procesamiento de señal adecuadas para la detección de sus armónicos y su evolución hasta el fallo.

La técnica de análisis avanzado de corriente tiene *importantes ventajas* (aplicables tanto a técnicas MCSA como ATCSA), frente a otras alternativas, como son (Algunas tomadas de [Antonino 1 2017]):

- *Posibilidad de monitorización remota del estado del motor:* Las señales de corriente necesarias se puede realizar desde los bornes propios del motor, desde la cabina del motor o desde un cuadro de alimentación del motor en condiciones de máxima seguridad si fuera el caso. Su ventaja respecto a otras técnicas es que no requiere acceder al propio motor (como si ocurre en técnicas como análisis de vibraciones o termografía).
- *Carácter no invasivo o intrusivo:* La medida de señal de la corriente que el motor demanda, se realiza de manera no invasiva, es decir, sin afectar la operación misma del motor. No es requerida la instalación de sensores, se ejecuta de manera simple colocando una pinza amperimétrica.

- *Simplicidad del equipamiento y software de análisis:* El equipamiento es relativamente simple, pues para registrar la forma de onda de la corriente basta con una pinza amperimétrica y un osciloscopio de mínimas prestaciones (frecuencias de muestreo del orden de 10 kHz son suficientes) y debe ser capaz de registrar la corriente durante un cierto intervalo de tiempo (al menos 30 – 40 s). Por otro lado, el software necesario para el procesamiento de señales es también simple y está disponible en varios paquetes comerciales (**F**ast **F**ourier **T**ransform (FFT) y **D**iscrete **W**avelet **T**ransform (DWT), **S**hort **T**ime **F**ourier **T**ransform (STFT), por nombrar algunos.
- *Transversalidad:* *La técnica se puede aplicar a máquinas rotativas en servicio y es adaptable a todo tipo de sistemas de excitación empleando escobillas de carbón.*
- *Economicidad:* El equipamiento necesario (Pinza amperimétrica + Osciloscopio) se pueden adquirir a costes reducidos según el grado de aplicación.
- *Amplia cobertura de averías:* como se ha mencionado cada técnica es válida para un determinado rango de fallos. La técnica de análisis de corriente ha demostrado un gran potencial en la detección de fallos de rotor, excentricidades (relacionadas con desalineamientos y desequilibrio), fallos de cojinetes y rodamientos como herramienta complementaria a la técnica de vibraciones, sobre todo cuando tenemos motores sumergidos, fallos en el sistema de transmisión (engranajes o sistemas a base de correas y poleas). En el caso de estudio, vamos a ampliar su cobertura a averías relacionadas con la conmutación en motores/generadores DC.
- *Monitoreo continuo:* puede integrarse con sistemas de monitoreo en línea para proporcionar el estado de la máquina en tiempo real, detectando así de forma temprana cambios en el comportamiento de la máquina.
- *Mejora la seguridad:* al identificar y abordar fallos de forma proactiva, contribuye a mejorar la seguridad en el lugar de trabajo al reducir el riesgo de accidentes y fallos de equipos que podrían poner en peligro a los trabajadores y al patrimonio cesante de la compañía.
- *Reducción de costos de Mantenimiento:* al implementar estrategias de mantenimiento predictivo basadas en ATCSA, las organizaciones pueden reducir los costes asociados con el mantenimiento preventivo y correctivo, además, evitan fallos graves, que minimizan los costes de reparación y reemplazo de equipos.

## 5.2.2. GESTANDAR GENERAL DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA ATCSA.



**Figura 73.** Esquema Tomado y ajustado con los pasos para la aplicación de la metodología [Corral, 2018].

- a. *Captura de la corriente de armadura de arranque:* La medida de la corriente se puede hacer de forma remota, en el cuadro del motor en la subestación o en el Motor control Center; es una metodología no invasiva y se requiere un osciloscopio y una pinza amperimétrica. En el momento de captura de la señal transitoria se requiere que la frecuencia de muestreo  $f_s$  esté entre 10kHz @16 kHz para tener una buena resolución en el análisis de ventanas de inspección en frecuencias bajas (mínimo:10000 muestras/s), son las recomendadas para la aplicación del método.
- b. *Aplicación de la STFT/DWT:* Se puede usar el paquete Matlab® para el análisis tiempo-frecuencia del Signal Processing Toolbox™. No obstante, Matlab y/o Python disponen de comando que permiten la programación de la STFT, DWT por el usuario. Para ello, tiene dos posibles caminos:

Para la STFT se debe seleccionar el largo de ventana, tipo de ventana (Haming, Hanning, Kaiser, etc), el traslape, el tamaño de ventana.

Para la DWT, se debe seleccionar el tipo wavelet madre (determina los coeficientes de los filtros utilizados en el proceso de filtrado, preferible de orden superior como el caso de la *Daubechies* o *Dmeyer*) y especificar el número de

niveles  $n$  de descomposición (refinamiento de análisis en bandas de frecuencias. Se recomienda  $n = 8$ .)

- c. *Análisis de las señales STFT*: Este análisis tiene dos vías; una *cualitativa*, que está basada en la identificación de patrones de las frecuencias fundamentales y su evolución causados los componentes de fallo, en las señales resultantes del espectrograma (mapa *tiempo-frecuencia*). Y una *cuantitativa*, que se centra en el grado de severidad de las averías del motor. Se demostró en ensayos de laboratorio su gran fiabilidad y permite complementar el análisis cualitativo. Así se definen indicadores de fallo con relación a la evolución de la energía de la señal respecto a una señal definida como Línea Base y umbrales de mantenimiento proactivo.
- d. *Conclusión de Diagnóstico*: Se define el estatus de salud del motor/generador. ya sea se encuentre en la zona definida como saludable, zona de alerta y zona de alarma de fallo inminente.

Cabe resaltar que con la información ilustrada en [Cabañas 1998], [Antonino 3 2020] es claro que ninguna técnica se ha mostrado universalmente válida para detectar todos los posibles tipos de fallos o averías en máquinas rotativas y la experiencia demuestra que cada técnica resulta adecuada para ciertos fallos y la fiabilidad del diagnóstico de un equipo será el resultado de la aplicación de la suma conjunta de un número de técnicas.

## CAPITULO 6: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 6.1. EQUIPOS DE MEDIDAS EMPLEADOS

Como se ha mencionado la sección anterior, la metodología propuesta es relativamente simple, debido al equipamiento necesario para la aplicación de la técnica. Se requiere de un osciloscopio, una Pinza amperimétrica y una aplicación digital para el procesamiento de las señales. A continuación, una descripción de cada uno de ellos:

Osciloscopio Digital Yokogawa, modelo DL850: Es un registrador de formas de onda de prestaciones avanzadas utilizado para visualizar y analizar señales eléctricas en el dominio del tiempo. Además de cumplir con las funciones propias como osciloscopio, ofrece una amplia gama de características y funcionalidades que lo hacen adecuado para una variedad de aplicaciones en áreas como electrónica, ingeniería eléctrica, investigación y desarrollo; y no menos importante, permite el almacenamiento de datos para su posterior procesamiento. A continuación, algunas características destacadas del modelo DL850.

Tiene Interfases de comunicación, como puerto USB, LAN y GPIB que facilitan la conexión con otros dispositivos y la transferencia de datos. Cuenta con 16 entradas analógicas, tiene capacidad de almacenamiento significativa, lo que permite capturar y almacenar grandes cantidades de datos; de hecho, la frecuencia máxima de muestreo que puede alcanzar es de 100MS/s con una resolución alta de ancho de banda, lo que permite capturar señales de alfa frecuencia, del orden de 16 bits (65536 Muestras/segundo o 65,5 KHz). Cabe recordar que para una correcta aplicación del método se recomiendan frecuencias de muestreo de 10000 muestras/s o superiores. Y el tiempo de muestreo es el tiempo de arranque del equipo o definido de otra manera, el tiempo dura el estado transitorio más el estado estacionario.

También cuenta con funcionalidades avanzadas de análisis, pantalla táctil y interfaz de usuario intuitiva; por último, es un equipo modular, lo cual permite la ampliación de módulos.

A continuación, se lista la información de su ficha técnica:

- Máx. índice de muestreo: 100 MS/s <sup>(3)</sup>
- Ancho de banda de frecuencia: 20 MHz <sup>(3)</sup>
- Número de canales de entrada: máx. 128 (8 ranuras) <sup>(3)</sup>
- Entradas lógicas: máx. 128 (modelo 720230)
- Resolución A/D: 16 o 12 bits <sup>(3)</sup>
  
- Rango de configuración del eje de tiempo: 100 ns/div a 3 días/div <sup>(3)</sup>
  
- Máx. longitud de grabación: estándar 250 Mpts Opción /M1 opción: 1 Gpts /M2 opción: 2 Gpts



- Número de formas de onda para matemática entre canales: Máx. 8
- Número de formas de onda para matemática en tiempo real: Máx. 16 (opcional)
- Unidad de medios integrada: Ranura para tarjeta de memoria SD (estándar)// HDD de 160 GB (opcional)// HDD externo I/F (opcional)
- Interfaz de comunicación: USB 2.0 (estándar) // 1000Base-T Ethernet (estándar)// GP -IB (opción)
- Otras opciones: Interfaz IRIG// Cálculo definido por el usuario// Potencia de salida de la sonda
- Pantalla: Pantalla LCD TFT a color de 10,4 pulgadas
- Dimensiones: 355 mm (ancho) x 259 mm (alto) x 180 mm (largo)
- Peso: Aprox. 6,5 a 9,0 kg (dependiendo del tipo y número de módulos a equipar)

\*1: con módulo aislado de alta velocidad y sonda aislada

\*2: archivos de base de datos creados con CANdb o CANdb++ de Vector Informática para definición de señales.

\*3: depende de los módulos de entrada

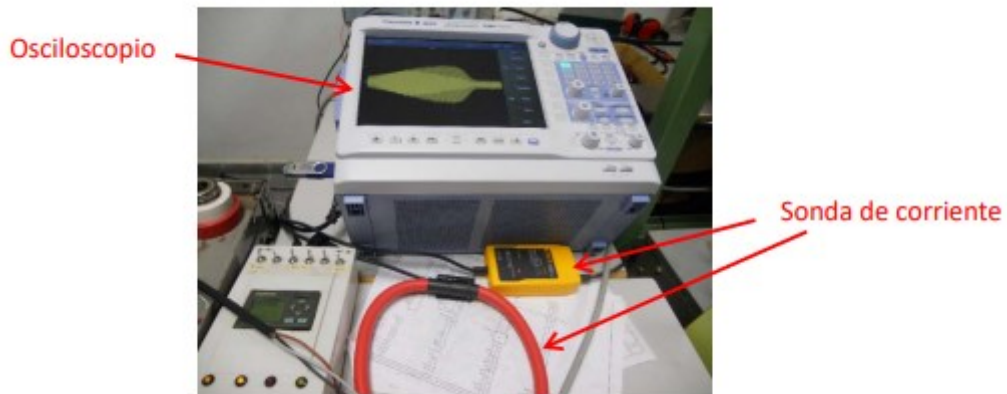
*Pinza Amperimétrica:* Es una sonda flexible diseñada para medir corriente eléctrica en sistemas de potencia y distribución; se ha conectado al osciloscopio para la medición de las señales de corriente de armadura. Se destacan algunas características como son: Su flexibilidad, Amplio rango de medición, buena precisión, buena conectividad y su robustez.

Es una **sonda tipo Rogowski** de la marca **Fluke** y modelo **CA i3000s Flex**, con las siguientes características principales, según su ficha técnica:

- Rangos de medida: 30 A / 1 mV/A, 300 A / 10 mV/A, 3.000 A / 100 mV/A
- Diámetro máximo del conductor a medir: 178 mm
- Diámetro del cable de la cabeza: 14,3 mm
- Radio de curvatura de la cabeza: 38,1 mm
- Impedancia de carga: 100 kW mínimo
- Precisión (a +25 °C):  $\pm 1$  % del rango (45 Hz a 65 Hz)
- Linealidad (10 % a 100 % del rango):  $\pm 0,2$  % de lectura
- Categoría de seguridad: CAT III 600 V
- Rango de frecuencias: de 10 Hz a 50 kHz (-3 dB)
- Error de fase:  $< \pm 1^\circ$  (45 Hz a 65 Hz),  $\pm 10^\circ$  (a 20kHz)
- Sensibilidad de posición (con cable  $> 25$  mm desde el acoplamiento):  $\pm 2$  % del rango.
- Fuente de alimentación: 2 pilas alcalinas AA MN 1500 LR6, 400 horas, indicador de batería baja.
- Coeficiente de temperatura:  $\pm 0,08$  % de lectura por °C

- Tensión de trabajo (ver apartado Normas de Seguridad): 600 V CA rms o CC. Además, gracias a la flexibilidad y ligereza de los toroides, permite la medición de conductores gruesos y en zonas de difícil acceso sin interrumpir el circuito.

A continuación, se ilustra un ejemplo de toma de medición de una señal con los equipos mencionados.

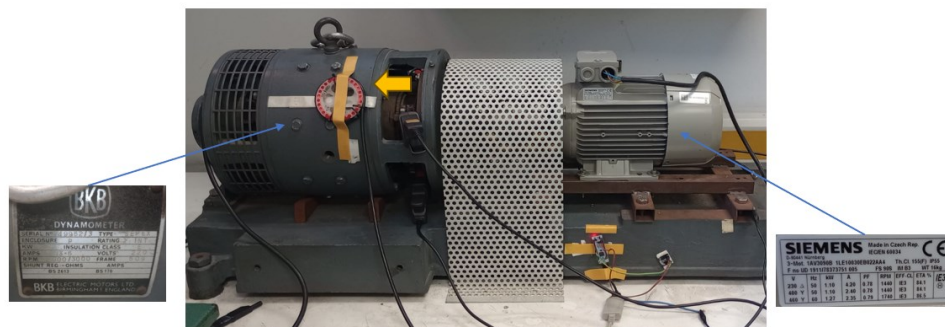


**Figura 74.** Equipo de medida para la adquisición de Señales [Velasco 2022].

## 6.2. ANALISIS DE LABORATORIO: DETECCIÓN DE CHISPAS DE MOTOR/GENERADOR DC DEBIDO A LA PÉRDIDA DE PRESIÓN DEL RESORTE DEL PORTAESCOBILLA.

El presente trabajo se concentra en monitoreo de la corriente de armadura cuando una o más escobillas del resorte pierden presión sobre el conmutador ya sea debido al desgaste normal de las escobillas o por la pérdida de tensión del resorte de la porta escobillas. Los ensayos de laboratorio fueron realizados en condiciones de temperatura ambiente a 20 °C en condiciones controladas, sin contaminación y altura a nivel del mar.

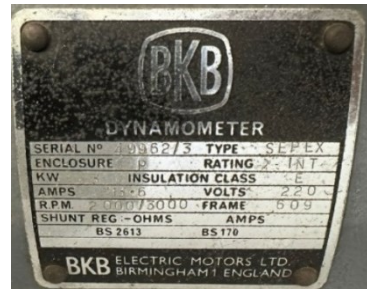
La *figura 75* indica el esquema del montaje y disposición del Generador DC (Actuando como Secundario), acoplado a Motor AC (Primario)



**Figura 75.** Motor SIEMENS (Primario), Generador BKB Electric Motors LTD (Secundario).

El Generador DC está bobinado en derivación tipo Shunt (paralelo), y tiene las siguientes características:

- Potencia Nominal( $P_n$ ) = 3kW,
- Voltaje Nominal  $U_n = 220V$ ,
- Corriente Nominal de Armadura= 13.6A,
- Velocidad Nominal  $n_n = 2000/ 3000rpm$ ,
- Corriente máxima de Excitación = 0,339 A,
- Configuración: tipo Shunt o Paralelo.



**Figura 76.** Generador BKB Electric Motors LTD (Secundario): Características y Plaqueta de identificación.

Motor Primario: motor trifásico de inducción, tipo jaula de ardilla, SIEMENS de la Serie 1LE1



AC, con las siguientes características:

- Potencia Nominal( $P_n$ ) = 1.1kW,
- Voltaje Nominal  $U_n = 220/400 V \frac{\Delta}{Y}$ ,
- Corriente Nominal = 4.2/2.4 A  $\frac{\Delta}{Y}$ ,
- Velocidad Nominal  $n_n = 1440 rpm$ ,
- $\cos \phi = 0.78$ , 50 Hz.



Producto	
Número de artículo (número de mercado)	1LE1003-0EB02-2AA4
Descripción de producto	SIMOTICS GP tipo de motor: 1AV3090B motor de baja tensión, IEC rotor en jaula de ardilla, con refrigeración natural, IP55 clase de temperatura 155(F) según 130(B) caja de aluminio Premium Efficiency IE3, 4 polos * tam. 90S * 1,1 kW (50 Hz) 1,27 kW (60 Hz) 60 Hz, P60: IE2 color estándar RAL 7030, siempre que no se indique una clave para seleccionar otro color; como fabricante del producto figura Siemens o Innomatics. 50 Hz 3 AC 230 VD/400 VY * 60 Hz 3 AC 460 VY IM B 3, SIN PROTECCION MOTOR Caja de bornes arriba

**Figura 77.** Motor SIEMENS (Primario): Características y Plaqueta de identificación. Tomado de: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ES/Catalog/Product/?mlfb=1LE1003-0EB02-2AA4&SiepCountryCode=ES>

- Arrancador *Schneider* -

CARACTERÍSTICAS DEL ARRANCADOR	
Potencia Nominal	4 kW
Frecuencia Nominal	50 Hz
Tensión Nominal de Empleo	400 V
Tensión Nominal de Alimentación	24 V DC
Intensidad Nominal Máxima de Empleo	9 A
Par inicial de Arranque	30...80%
Rampa de Tensión de Arranque	1 to 5 s.
Rampa de Tensión de Parada	-
Limitación de Corriente	-
Fases Controladas	R - S
Conexión	En Línea
Modelo	SCHNEIDER ATS01N109FT



**Figura 78.** Principales características y circuito de potencia del arrancador Schneider [SCHNEIDER 2013].

En cuanto al funcionamiento del sistema, el Motor de Inducción SIEMENS de 1.1 KW es alimentado a través de un arrancador suave y una regulación en la rampa de arranque (5 Segundos) y luego el voltaje inicial de arranque (según hoja de características del arrancador suave) se va regulando para que llegue a los valores nominales en el tiempo que se ha definido. El motor de inducción actuando como primario y a plena carga, arrastra al generador DC.

Al mismo tiempo se emplea un rectificador, cuya función es pasar la Corriente Alterna AC a Corriente directa DC, para alimentar la excitación del motor DC. Por último, para completar el circuito se tiene un banco de baterías (con una capacidad máxima de 7,5 A) que se encarga de consumir y disipar la energía que se está generando.

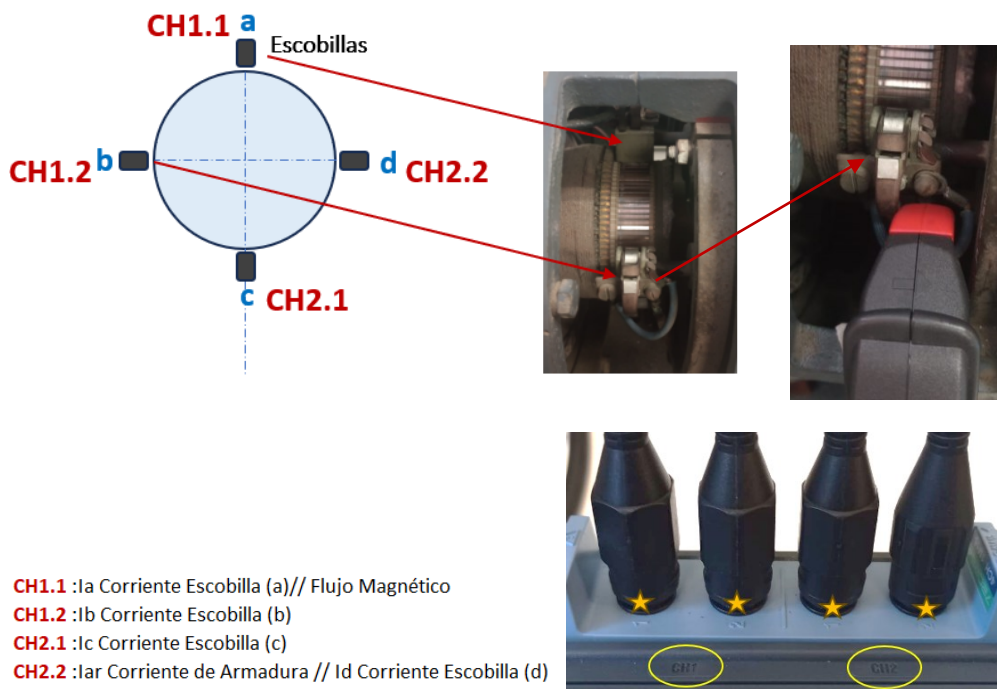


**Figura 79.** Comprobación de la medida RMS de Corriente de Armadura y de Excitación para cada Prueba usando polímetros comerciales.

En el montaje propuesto el generador DC no está trabajando a su máxima capacidad (ver figura 76), pero el motor de inducción (Ver figura 77) y el banco de resistencias si lo hacen. No obstante, se quiere comprobar que aun cuando el generador trabaje a la mitad de su capacidad máxima, es posible detectar la presencia de chispas en fase temprana con la técnica propuesta y su efecto en la corriente de armadura. De este modo, poder mostrar la fiabilidad de esta.

**Medidas sobre el motor universal de 3KW:** Las mediciones fueron tomadas de la corriente de armadura del generador DC. Éste fue arrancando como un generador, siendo impulsado con un motor asíncrono de un 1.1 KW como se mencionó anteriormente. Recordemos que constructivamente, el generador está configurado con **96 barras/bobinas** y por tanto con **96 Delgas** sobre su conmutador. En el conmutador se distribuyen 4 **escobillas** a  $90^\circ$  (ver figura 80), con graduación de tensión (ver figura 81), con lo cual era posible realizar graduaciones y provocar fallos por baja presión de las escobillas sobre el conmutador; así, inducir a la chispa simulando situaciones de desgaste excesivo de escobillas, logrando eventos de mala conmutación.

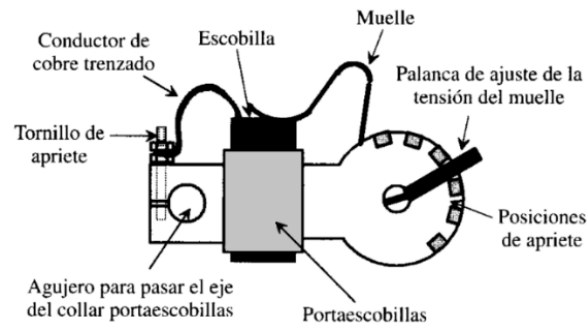
La figura 80, muestra la denotación empleada en la adquisición de señales. El montaje de laboratorio descrito permite medir en 4 canales con mediciones de las corrientes de armadura, corrientes en las escobillas y flujo magnético para diferentes configuraciones de la tensión del resorte de las escobillas. El presente trabajo solo se centró en el análisis de la corriente de armadura.



**Figura 80.** Escobillas tipo rectangular de ubicación radial: posición vista frontal en dirección **a** ( $0^\circ$ ), **b** ( $90^\circ$ ), **c** ( $180^\circ$ ), **d** ( $270^\circ$ ). La denotación CH1.1, CH1.2, CH2.1 y CH2.2 hace referencia al canal del osciloscopio que captura la señal con pinzas amperimétricas.

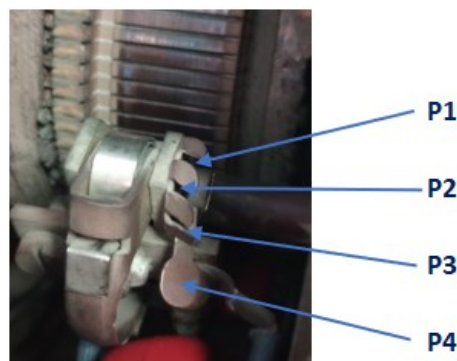
Se registraron diferentes niveles de inspección de tensión del resorte, pasando de estados saludables del motor hasta obtener diferentes niveles y estados de falla evolutivos. El nivel de presión de la escobilla sobre el conmutador se regula ajustando la tensión del resorte helicoidal del sistema porta-escobillas. El cambio de tensión en una o varias escobillas, permite simular estados de situaciones reales de desgaste. Así mismo el nivel de chispa estará asociado a la combinación de presión de las escobillas sobre el conmutador, lo cual será demostrado en los apartados siguientes.





**Figura 81.** Configuración Típica Resorte Tipo muelle espiral, retomando la figura 22 [Fraile 2003].

Para una descripción más detallada, fueron bautizadas las posiciones de la tensión del resorte tipo muelle espiral de las escobillas en 4 niveles de presión, cuando el motor está en estado sano. Siendo **P4** la presión máxima, **P1** la mínima respectivamente. Para condiciones de fallos se definieron **P0**, sin tensión (ya con presencia de chispas) y **P-1** lo que deduce que la escobilla se ha desgastado tanto que tiene un ligero *Gap* con el conmutador (presencia de chispas más intensas). La medición y control específica de la tensión del resorte está fuera del alcance del presente trabajo y es además la configuración del motor no nos permite graduar la tensión de forma progresiva de modo de podamos correlacionar el cambio de parámetros. Ver *Figura 82*. Donde se definen las posiciones de tensión del resorte de la porta escobillas.



**Figura 82.** Presión resortes Helicoides **P0** (*Gap* entre Escobilla-conmutador), **P1** (*Menor Tensión*), **P2**, **P3** (*Tensión intermedia*), **P4** (*Máxima Tensión*).

Como se ha mencionado en secciones y apartados anteriores, el sistema conmutador/escobillas son la fuente más frecuente de problemas asociados a contactos defectuosos entre el conmutador y escobillas, desgaste excesivo, desgaste desigual de las escobillas, deformación del conmutador, contaminación / suciedad, etc. Uno de los principales síntomas de la mayoría de estos fallos es la aparición de chispas en la región de contacto entre las escobillas-conmutador; su presencia e intensidad, contribuye al deterioro del generador DC; y es por ello, la importancia de su estudio y monitoreo.

Una vez definidos los niveles de presión de las escobillas, fueron parametrizados 16 niveles de Línea Base, relacionados con los 4 niveles de tensión del resorte (**P1**, **P2**, **P3** y **P4** respectivamente) en estado saludable y para cada nivel de tensión, se definieron 4

niveles de carga del motor primario en modo porcentual (0%, 50%, 75% y 100%) para un total de 16 estados medidos. También, se parametrizaron 3 estados motor con fallo a los 4 niveles de carga empleando combinaciones de estados sin tensión y Gap ( $P0$  y  $P-1$ ) para sumar 12. En resumen, tenemos 28 estados de señales y con toma de datos de 10 @ 15 repeticiones.

Ahora bien, dentro los 16 estados (Línea Base) se eligieron 4 estados de motor sano en condición de trabajo más crítico (al 100% de capacidad de trabajo) y 3 de modo de fallo.

En las secciones siguientes de ilustrarán los resultados obtenidos en 7 total niveles de inspección, que hemos considerado a su vez como estados de evolución de la falla, pasando de motor sano (Nuevo o recién ejecutado de un mantenimiento preventivo) ajustando la presión de tensión del resorte helicoidal del sistema porta-escobillas, pasando por un estado incipiente de chispas (4 estados mencionados) hasta llegar a un estado severo de chispas (7mo nivel). Por tanto, variando la presión de contacto entre la escobilla-conmutador de una escobilla o varias escobillas, entendiendo que en una situación real el desgaste de las escobillas no es igual en el tiempo, ni la tensión del resorte es la misma para cada escobilla dada la naturaleza misma de los materiales de construcción y la posición de la escobilla en el conmutador; este a favor o no de su peso propio. Las señales fueron medidas, con frecuencia de muestreo (en estado transitorio y estacionario)  $f_s = 10 \text{ kHz}$ , y se aplica el método definido en la *figura 73* (son procesadas con código programable en Python empleando la técnica Transformada de Fourier de tiempo Corto (*STFT*)). A continuación, se detallan los estados y condiciones de medición de la corriente de armadura en el generador DC (Actuando como Secundario).

Voltaje Nominal  $U_n = 220V$ ,

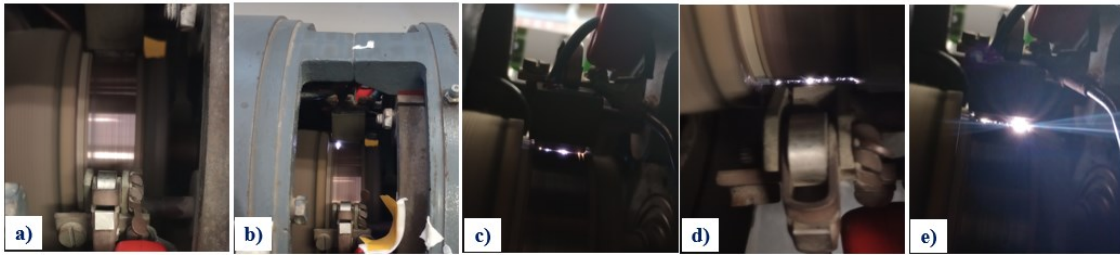
Corrientes Nominales de Armadura Ensayadas = 0.55A, 3.75A, 5.65A y 7.00A

Corrientes nominales de Excitación = 0.0A, 0.123A, 0.220A y 0.339A

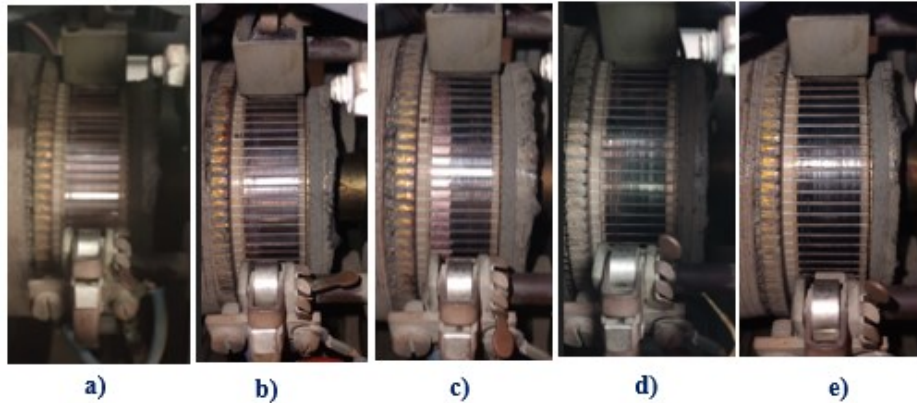
Velocidad Nominal  $n_n = 1495, 1482, 1462$  y  $1440 \text{ rpm}$

La representación de la evolución del fallo por chispa es mostrada en diagramas tiempo-frecuencia donde se pueden comparar y cuantificar la evolución de armónicos tanto en baja como en alta frecuencia durante un cambio de estado. La *figura 83*. Muestra *a)* motor sano y *b)* casos falla considerado en nivel moderado o umbral alerta y *c), d), y e)*. son niveles de alta actividad de chispas donde se encuentra el sistema en nivel de riesgo. Estos últimos estados son típicos de gran deterioro de las escobillas y de la superficie del conmutador acompañado de un aumento de temperatura. Ver *figura 84*.





**Figura 83.** *a) Motor Sano b) Nivel Chispa dentro del umbral de Alerta, c), d) y e) Altos niveles de Chispa dentro del umbral de riesgo de daño.*



**Figura 84.** *a) Motor Sano, b) Nivel Moderado de Chispas, c), d) y e) Altos niveles de Chispa y desgaste de Pátina, Conmutador y Escobillas.*

Como se aprecia en la *figura 84*, la actividad de las chispas se concentra en los puntos de contacto entre las escobillas / conmutador; Investigaciones a través de los años demostraron que la actividad de chispas incrementa las amplitudes de los armónicos fundamentales de las señales de Corriente de Armadura y dichas están ligados a la frecuencia de rotación del conmutador, que a su vez está ligada a la frecuencia de rotación ( $f_r$ ) del Generador DC (Secundario) ó del Motor de inducción (Primario).

A continuación, pasaremos a deducir la magnitud del armónico fundamental o de mayor energía y su relación con la velocidad de giro del motor. Dado que el motor primario es el motor Asíncrono, la velocidad de rotación del sistema está definido por el deslizamiento ( $s$ ), ver (16).

$$n_{np} = n_s(1 - s) = 1440 \text{ rpm} \quad (16)$$

Por otra parte, la frecuencia fundamental de rotación está definida por (17).

$$f_r = \frac{n_{np}}{60} = \frac{1440 \text{ rpm}}{60} = 24 \text{ Hz} \quad (17)$$

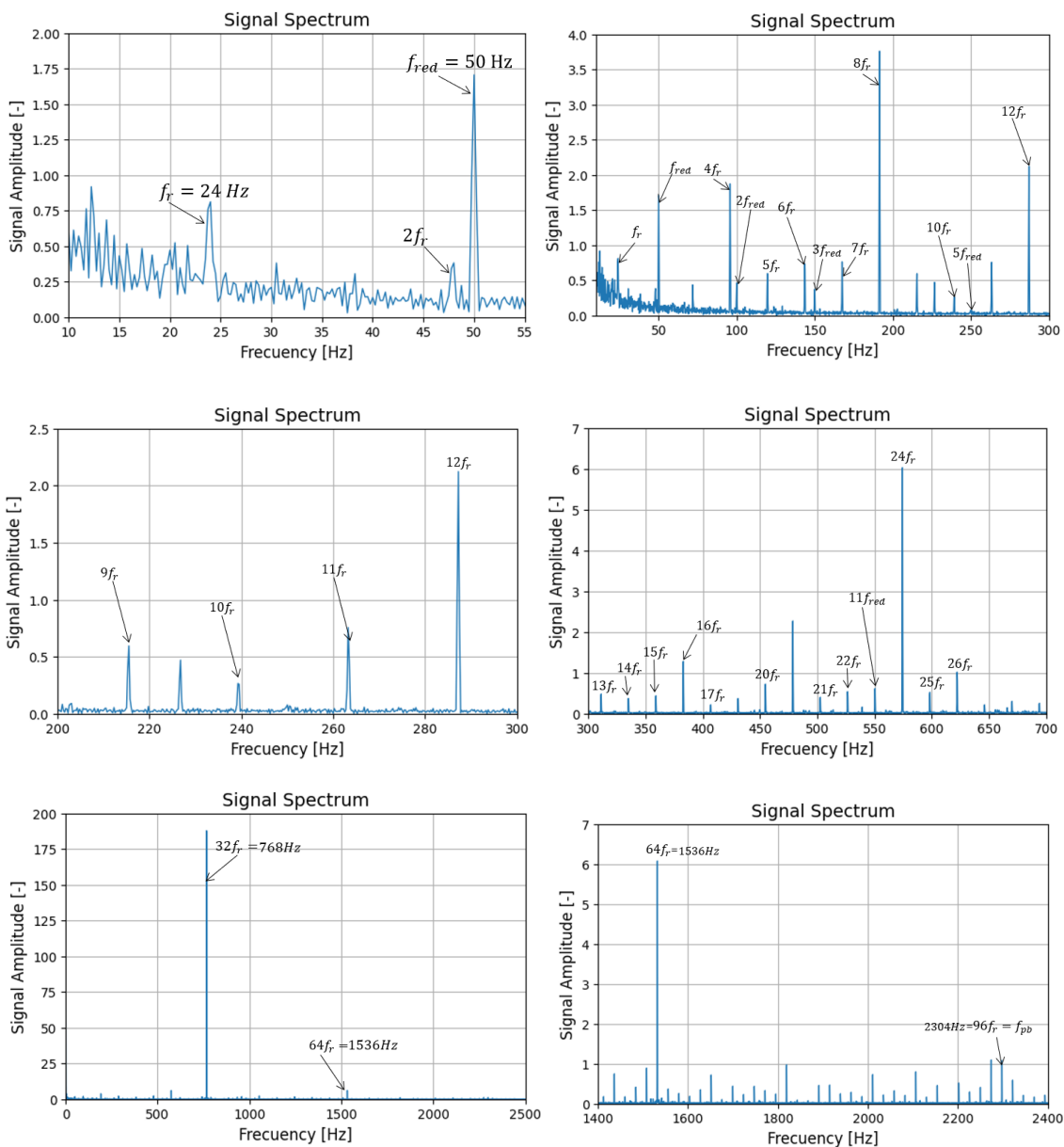
Se espera entonces un incremento en la amplitud de las componentes de la frecuencia de rotación y sus armónicos múltiplos cuando exista conmutación deficiente/ presencia de chispas. También se demostró que el armónico principal de la frecuencia de paso de barra  $f_{pb} = N_d f_r = 2304 \text{ Hz}$ . A su vez todos los armónicos secundarios están definidos tendrán por las expresiones:  $2f_r, 3f_r, \dots, k_1 f_r, \text{ y } k_{m\acute{a}x} = 96$ .

Los resultados experimentales demostraron que el armónico principal con mayor energía está definido por la ecuación (18)

$$f_p = \frac{f_{pb}}{3} = 768 \text{ Hz} \quad (18)$$

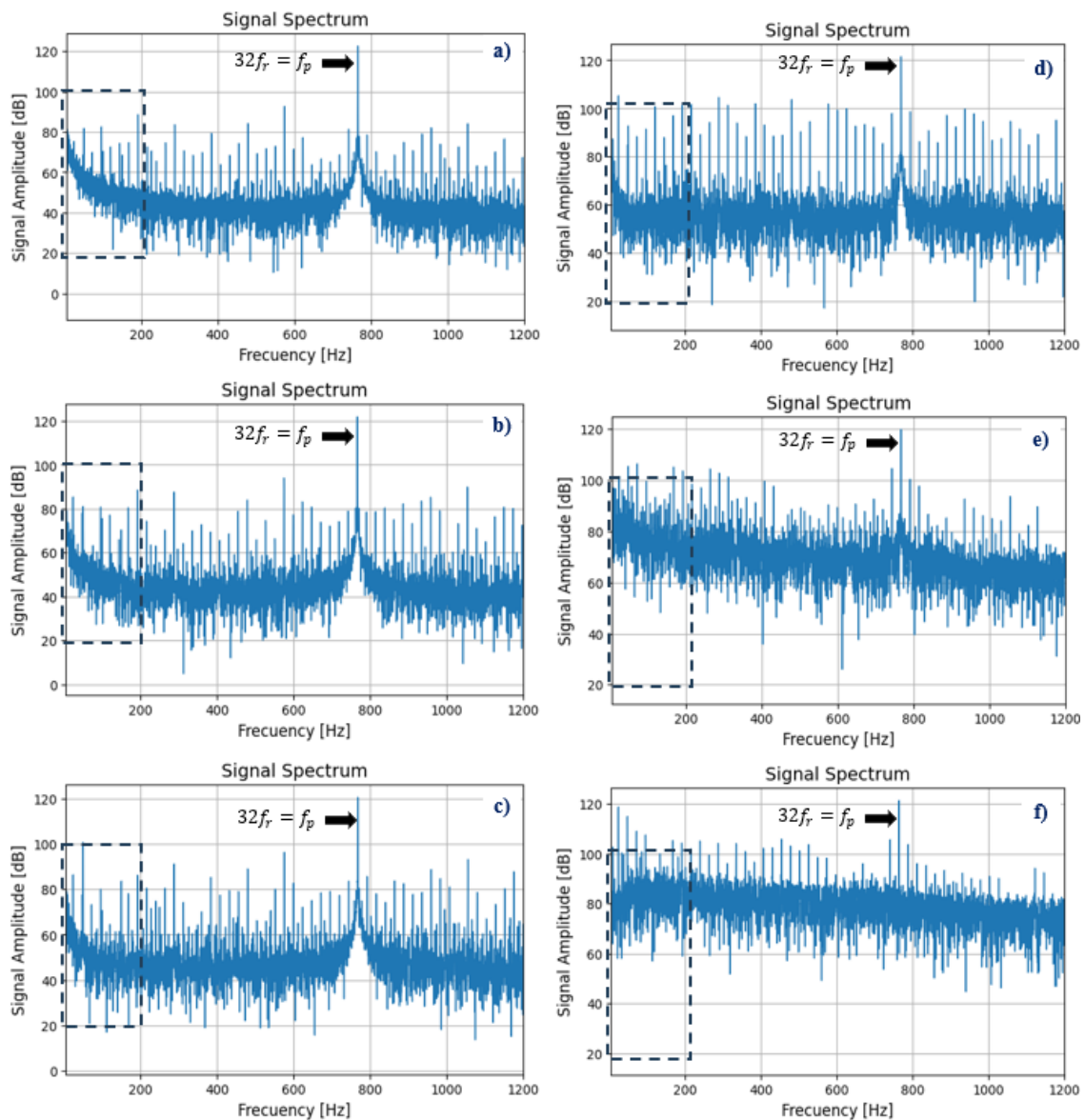
### 6.3. ANÁLISIS EN ESTADO ESTACIONARIO

En la *figura 85* se identifican los armónicos fundamentales y múltiplos de los espectros de FFT de señal de Corriente de Armadura en estado estacionario. La variación energética de los armónicos será relevante en su asociación con la evolución del fenómeno de chispas. Por ahora se identifican los asociados a la frecuencia de rotación  $f_r$  y frecuencia de barra de conmutación  $f_{pb}$ .



**Figura 85.** Identificación de armónicos fundamentales de la señal de Línea Base y que son múltiplos de la frecuencia de red y múltiplos de la velocidad de rotación.

Por otra parte, en la *figura 87* muestra diferentes dos categorías de fallo de chispas incipiente *a), b) y c)* y grave *d), e) y f)* que evolucionan de forma progresiva. Obsérvense los incrementos de amplitud en los armónicos definidos en una ventana de inspección, delimitada por un rango de frecuencias entre 0Hz y 200 Hz y un rango de amplitudes de la señal de Corriente de Armadura entre 20dB y 100 dB. Estos análisis confirman la presencia de los componentes de fallo mencionados y el aumento progresivo de las amplitudes (*r.m.s*) y de forma similar, los valores Peak-Peak (Pico-Pico) conforme empeora el fallo.



**Figura 86.** FFT espectro de corriente de Armadura en estado estacionario para *a), b) y c)* Generador Saludable y evolución incipiente de fallo *d), e) y f)* Generador en estados de fallo leve a crítico.

#### 6.4. ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO

En la *figura 86* se evidencia, mediante el análisis de FFT en estado transitorio, cuyos resultados concuerdan con [Barwany 1991], [Treanor 1995]. Igualmente, cuando la actividad de chispas está presente, los armónicos de baja frecuencia (5-250 Hz) son quienes presentan una mayor actividad y este comportamiento obedece al hecho que la conmutación es incompleta. Por consiguiente, es posible realizar el estudio de evolución de falla con análisis transitorio (Procesos de arranque del Generador) usando STFT en bajas frecuencias y obtener variaciones cuantitativas, definiendo indicadores de gravedad de fallo respecto a un estado inicial o línea Base de referencia, por ejemplo, un equipo nuevo o el último estado mantenimiento preventivo del Generador DC. Si bien, otros armónicos de alta frecuencia también cambian su energía, en nuestro caso concreto de la anomalía, su efecto en términos de mantenimiento, no son tan significativos con relación al diagnóstico que se pretende exponer el actual trabajo. Ver *figura 87*.

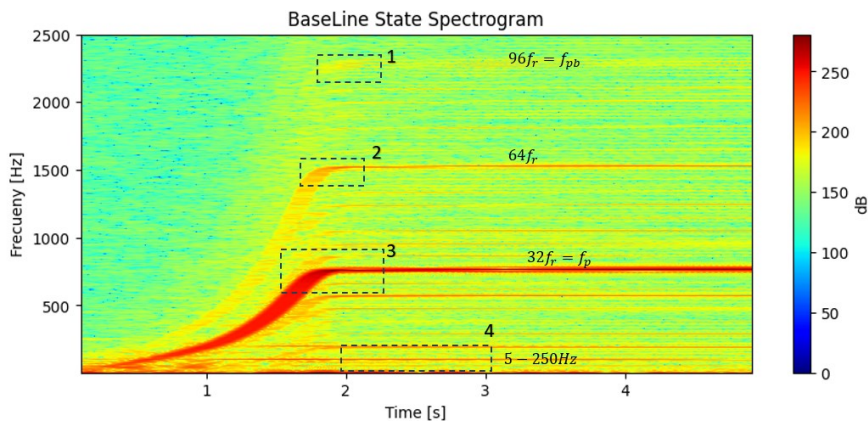
Teniendo en cuenta el indicador de falla sugerido por [Velasco 2022], hemos definido, un método comparativo de inspección y por tanto se deben calcular dos indicadores de nivel de energía equivalente al valor *r.m.s* para cada estado. El primero, será el indicador de referencia de línea Base y el segundo el estado de inspección actual. Tal y como se definen en las ecuaciones (19) y (20) respectivamente.

$$\gamma_{sparking\ Base} = r.m.s(En_{i,j})_{i = t_o \dots t_f; j = f_0 \dots f_f} \quad (19)$$

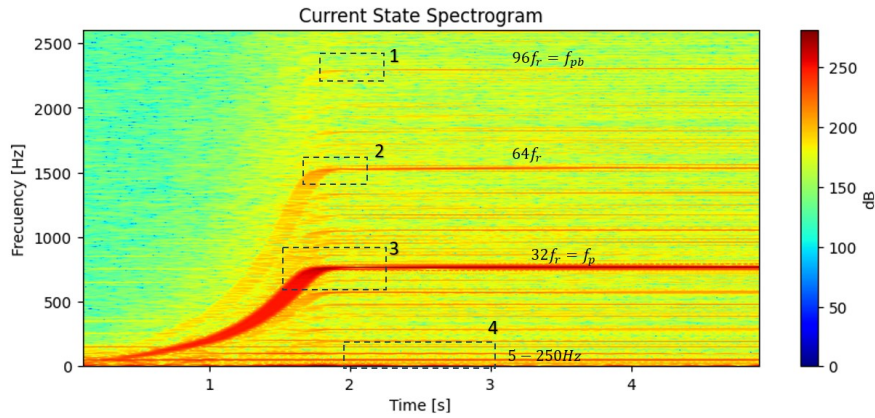
$$\gamma_{sparking\ Actual} = r.m.s(En_{i,j})_{i = t_o \dots t_f; j = f_0 \dots f_f} \quad (20)$$

El indicador de Severidad de Fallo adimensional, será la variación porcentual del estado energético actual definido por (20) respecto a un estado saludable del equipo o línea Base (19). Ver Ecuación (21).

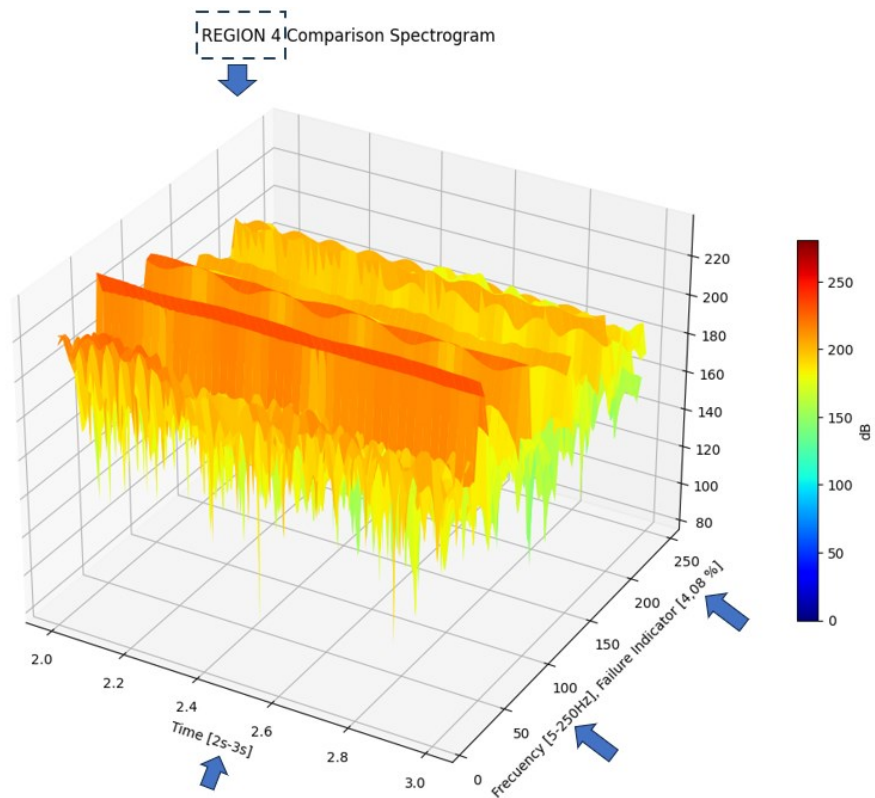
$$\Delta_{sparking} [\%] = \frac{\gamma_{sparking\ Actual}}{\gamma_{sparking\ Base}} \times 100\% \quad (21)$$



**Figura 87.** Análisis 2D STFT de la Línea Base [0-5 s] tiempo de arranque., [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de bajas frecuencias.



**Figura 88.** Análisis 2D STFT del estado de menor tensión de Resortes (P1). [0-5 s] tiempo de arranque., [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo  $\Delta_{\text{sparking}} = 4,08\%$ .

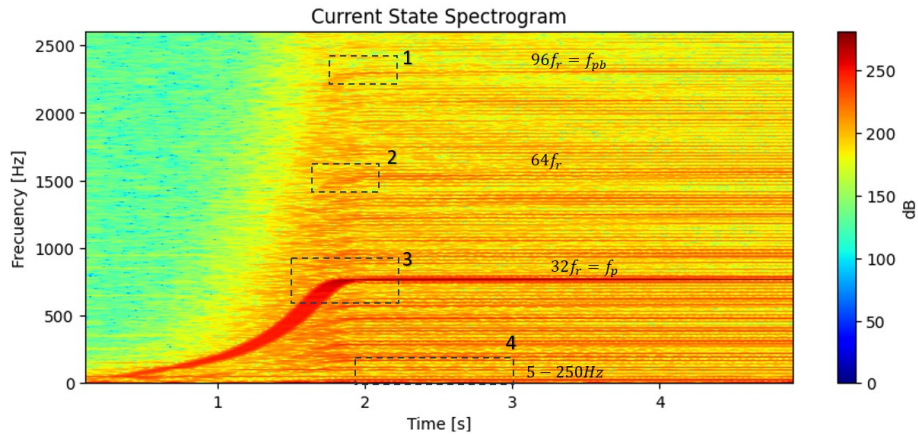


**Figura 89.** Análisis 3D STFT Línea Base vs Estado de Menor tensión de Resortes, de la Zona o Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla  $\Delta_{\text{sparking}} = 4,08\%$

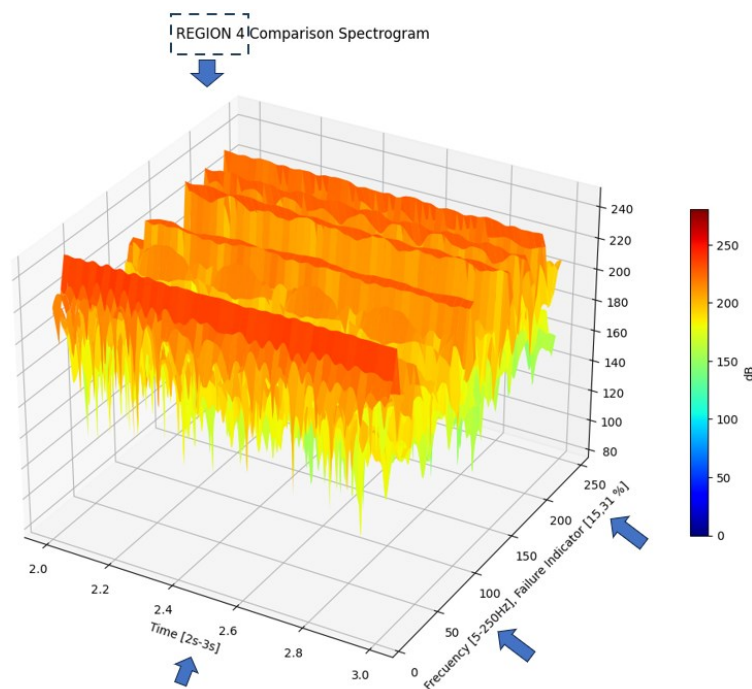
Las figuras 87, 88 y 89 muestran un análisis STFT, de estado incipiente de fallos, de la corriente de armadura entre estados sanos del generador. En primer lugar, es considerado el estado óptimo (Línea Base), ver *figura 87* y el estado de mínima tensión de los resortes (nivel límite del umbral zona saludable), ver *figura 88*, de la porta escobilla. Por tanto, se estima que cuando el indicador de fallo,  $\Delta_{\text{sparking}}$  se aproxima al 5%, aparecerá la actividad de chispa.



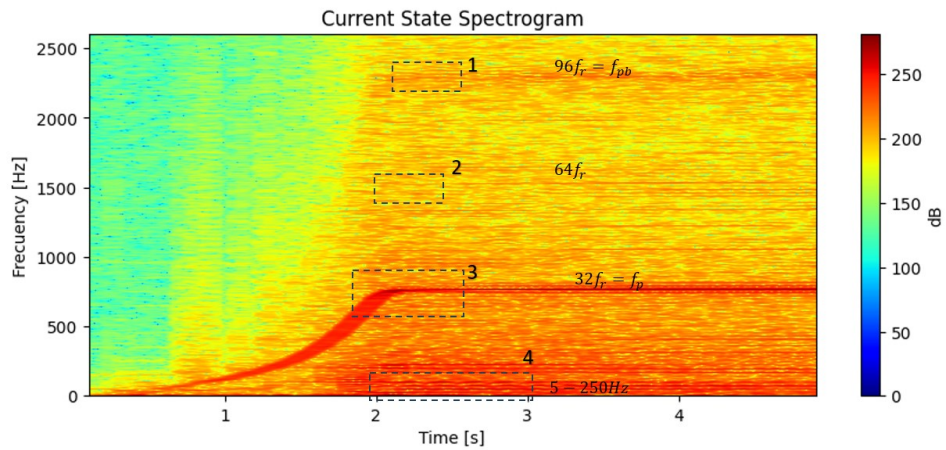
A continuación, se evidencia la evolución de actividad de alta actividad de chispas (**2D**, con ventana de inspección [0-5 s] tiempo de arranque., [0-2500 Hz] rango de frecuencia) y **3D**, con ventana de inspección, región 4, delimitado por [2-3 s] tiempo de arranque., [5-250 Hz] rango de frecuencia) con su respectiva evolución de indicador de severidad de fallo  $\Delta_{\text{sparking}} = 15,31\%$ ,  $29,42\%$  y  $33,36\%$ .



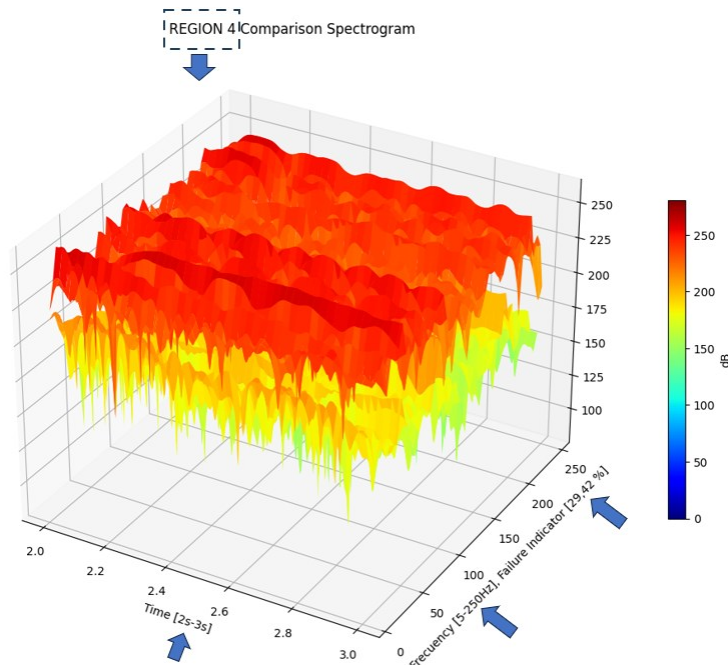
**Figura 90.** Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes (**P0**). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo  $\Delta_{\text{sparking}} = 15,31\%$ .



**Figura 91.** Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla  $\Delta_{\text{sparking}} = 15,31\%$

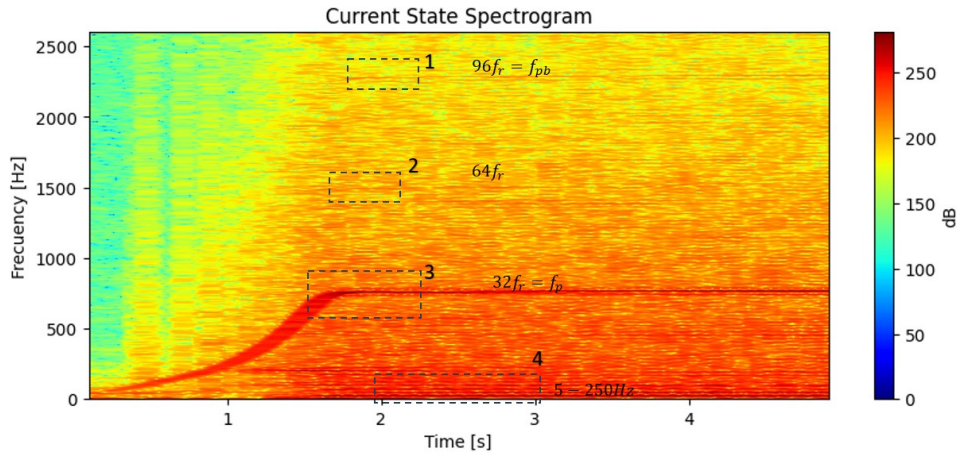


**Figura 92.** Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes (P-1). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo  $\Delta_{\text{sparking}} = 29,42\%$ .

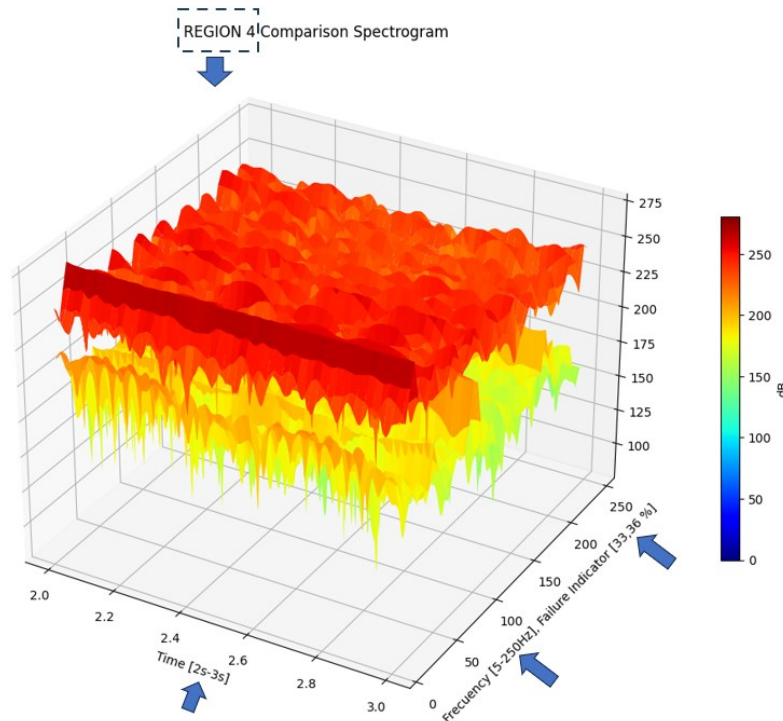


**Figura 93.** Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla  $\Delta_{\text{sparking}} = 29,42\%$





**Figura 94.** Análisis 2D STFT del estado de tensión de Resortes (P-1). [0-5 s] tiempo de arranque, [0-2500 Hz] rango de frecuencia, 1, 2, 3 y 4 son ventanas o zonas de inspección que se han definido para evaluar cambios en el tiempo. Sobre La Zona 4, se tiene el Indicador de fallo  $\Delta_{\text{sparking}} = 33,36\%$ .



**Figura 95.** Análisis 3D STFT Línea Base vs Moderada actividad de fallo, Región 4, con ventana de inspección definida por [2-3 s] tiempo, [5-250 Hz] rango de frecuencia, indicador de falla.  $\Delta_{\text{sparking}} = 33,36\%$ .

Finalmente en la *Tabla 14*. Se resumen los resultados obtenidos de la *region 4*. Cabe notar en que los análisis 2D y 3D de la STFT de detallaron de los estados 1,2, 6, 7 y 8 respectivamente. Sin embargo en la tabla se ilustran todos los simulados en laboratorio.

	Region 4	Time [seg]	Frecuency [Hz]	Failure Indicator $\Delta$ [%]
Base Line	No Sparking	[2-3]	[5-250]	0,00%
State 1	No Sparking	[2-3]	[5-250]	0,08%
State 2	No Sparking	[2-3]	[5-250]	1,04%
State 3	No Sparking	[2-3]	[5-250]	1,32%
State 4	No Sparking	[2-3]	[5-250]	2,08%
State 5	No Sparking	[2-3]	[5-250]	4,09%
State 6	Moderate Sparking	[2-3]	[5-250]	15,31%
State 7	Severe Sparking	[2-3]	[5-250]	29,42%
State 8	Severe Sparking	[2-3]	[5-250]	33,36%

New Machine	0%	
Optimal operation	< 5%	Schedule Next Maintenance
Very limited operation	5-15%	Equipment to be intervened
Critical Operation	15-20%	Stop Equipment
Imminent Failure	25-35%	Equipment must not be operated

**Tabla 15.** Indicador de severidad de chispas ( $\Delta_{sparking}$ ) propuesto para 8 estados, de los cuales con su ventana de inspección.

Adicionalente, en la *Tabla 14*. Se resume los valores obtenidos de indicador de fallo  $\Delta_{sparking}$  propuesto por la ecuación (21). Con los resultados, desde el punto de vista del mantenimiento proactivo, podremos definir umbrales de operación que permiten mejorar la fiabilidad y disponibilidad del Motor/Generador.

## CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS Y TRABAJOS FUTUROS

### CONCLUSIONES GENERALES

- La aplicación de estrategias de Mantenimiento Proactivo nos permite optimizar el plan de Mantenimiento de un activo; a su vez, incrementar su disponibilidad, mejorar la seguridad del proceso, mejorar el rendimiento operacional. Paralelamente podemos documentar, auditar, actualizar, lograr tener historial del equipo, mejorar la relación coste/riesgo-efectividad de las tareas de mantenimiento, disminuir la ocurrencia de fallos, aumentando el “Mean Time Between Failures” MTBF por sus siglas en inglés y no menos importante, nos permite analizar del costo del ciclo de vida para la sustitución del activo e inventario de recambios. De esta manera, poder tomar decisiones basado en datos confiables [Amendola 2022].
- Cuando se produce una pérdida de presión en el resorte del portaescobilla en un Generador/Motor DC, puede ocasionar chispas debido a factores mecánicos y eléctricos y dentro de ellos cabe mencionar defectos asociados al desgaste de las escobillas, mal contacto entre conmutador/escobilla, deformación del conmutador o vibraciones excesivas. Por tanto, diagnosticar y evaluar su actividad en su fase incipiente son fuente esencial para la toma de decisiones en mantenimiento.
- La implementación de técnicas como “Advanced Transient Current Signature Analysis” (ATCSA), en sistemas de monitoreo remoto y continuo de análisis espectral de corriente, nos permite determinar estado de salud de una Máquina Eléctrica Rotativa (de cualquier tipología o configuración) al monitorizar en tiempo real, señales de corriente producidas por la máquina durante procesos transitorios de arranque, apagado u cambios de velocidad asociados a la operación o gobernados por variadores de frecuencia.
- Los resultados del actual trabajo de investigación comprobaron que la presencia del fenómeno del chispeo produce *incrementos en las amplitudes de diferentes armónicos ubicados tanto en la región de baja frecuencia* y su detección temprana es muy importantes en operaciones donde existe un suministro continuo e ininterrumpido de energía eléctrica, así como en operaciones de producción 24/7. No obstante, un indicador adimensional de tipo porcentual que relacione el valor energético *r.m.s.* de la densidad de energía de la corriente de armadura en regiones del mapa de tiempo-frecuencia nos permite definir umbrales de motor sano, motor con alerta de avería y motor en estado crítico.

- Transformada de Fourier de tiempo Corto (STFT) como herramienta de Análisis Avanzado ATCSA, nos permite dar una representación más precisa del comportamiento eléctrico del Motor/Generador, dado que implica adquisición de datos de alta resolución o tasas de muestreo. Además de permitirnos descomponer las señales de corriente transitoria en sus componentes de frecuencia y así extraer características relevantes asociadas con diferentes tipos de fallo.
- La metodología utilizada tiene un doble enfoque; por un lado, *cualitativo*, centrado en la detección de patrones creados por las componentes de fallo en las señales resultantes del análisis STFT y, por otro lado, *cuantitativo*, basado en la definición de un indicador de severidad de fallo [Corral 2018] [Velasco 2022] [Antonino 2 2021].
- La herramienta permite que el usuario pueda identificar los armónicos fundamentales de frecuencia mediante la toma de una línea base de señales que es considerada como un estado óptimo del equipo (Nuevo, pocas horas de uso, estado de último mantenimiento y puesto en servicio) que sirve como estado de referencia en tiempo inicial; posteriormente se toman señales que deberán ser comparadas respecto a la línea base ya definida. Las franjas de frecuencia que requieren comparación podrán seleccionarse por el usuario y así obtener los KPIs de evolución de la falla.
- Resultados del presente trabajo demuestran también que la evolución de la falla en umbrales saludables del Motor/Generador es casi lineal, sin embargo, una vez se manifiesta la falla, la chispa, su incremento se acelera de forma exponencial debido a la caída drástica de la eficiencia en los procesos de conmutación que suceden 96 veces/ segundo para nuestro caso. Se vuelve más importante aún el concepto de mantenimiento proactivo, dando significancia a su detección en el síntoma en su fase incipiente.
- La técnica puede ser automatizada en aplicaciones industriales en donde es necesario el monitoreo continuo y es requerido conocer el estado de salud del motor/generado en tiempo real. Adicionalmente, la técnica es aplicable en sistemas que monitorizan diferentes parámetros a la vez e implementan técnicas complementarias al análisis de corriente. También y no menos importante, se puede automatizar en sistemas con PDIs, variadores de frecuencia, arrancadores suaves y carga variables que generan estados transitorios de operación.
- La técnica puede mejorarse, incorporando técnicas de *Machine Learning* que son permitidas, al poder usar el historio de señales capturadas, para *predecir* momentos de fallo a través del tiempo.

- La adquisición de la información monitorizada también dar el salto a sistemas IO Link para la administración de las señales y mantener la equivalencia de las señales digitales lo más cercano a la realidad de las señales analógicas capturadas por los transductores de los sensores.

## CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS

Como resultado de investigación se tienen tres documentos científicos; dos a congresos ICEM 2024, Italia, septiembre 2024 y IEEE-ECCE 2024, Arizona, octubre, 2024, que se encuentran bajo revisión de los comités evaluadores. Por otra parte, Un aporte a revista científica, IEEE, que se encuentra en desarrollo y con entrega en junio, 2024. El trabajo actual es el punto a partida para la elaboración de una posible Tesis Doctoral futura. A continuación, el detallan cada uno.

### Comunicaciones a Congresos

1. J. Salas-Robles, V. Biot-Monterde and J. Antonino-Daviu, "Advanced Analysis of Armature Currents Signals for Sparking Detection in DC Motors and Generators." ICEM 2024 - 26th International Conference On Electrical Machines, Torino, Italy, September 2024. Track Diagnostics and condition monitoring, Status: Under\_Review.



**Figura 96.** ICEM 2024, Internatinal Conference on ELectrical Machices Congress

2. J. Salas-Robles, V. Biot-Monterde and J. Antonino-Daviu, "Analysis of Stray Flux Signals for Sparking Fault Detection in DC Motors and Machines." IEEE-ECCE 2024 Energy Conversion Congress and Exposition, Arizona, USA, October 2024. Paper Topics: G07, Noise, Vibration, Reliability, Machine Diagnostics and Protection. Status: Under\_Review.



Figura 97. IEEE-ECCE2024, Energy Conversion Congress & Expo.

### Publicaciones a Revista

1. J. Salas-Robles, V. Biot-Monterde and J. Antonino-Daviu, " **Current and Stray Flux Combined Analysis for Sparking Detection in DC Motors/Generators Using Entropy Indicators**" MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), Journal Entropy, junio 2024, Status: In progress.



Figura 98. MDPI, Journal Entropy

### **Contribución de la Técnica a Mejoras de Planes de Mantenimiento Predictivo.**

- Disminución de ordenes de trabajo correctivo, menores costos asociados a pérdidas por paradas no programadas, mayor durabilidad de los repuestos, mayor disponibilidad del equipo y mejor fiabilidad del diagnóstico.
- En caso de una inversión en equipos portátiles de diagnóstico, para implementarlos en el plan de mantenimiento predictivo; tiene como ventaja en que los mismos equipos y la misma técnica de análisis en estado transitorio o régimen permanente puede ser empleada en motores de Corriente A.C. (inducción), en la detección de fallos asociados a fallos del rotor.
- La técnica se puede transversalizar a otra categoría de Motores, como es el como los de tipo Síncronos de Anillos Rozantes-Escobillas que pueden presentar los mismos síntomas asociados al fenómeno de la chispa.

## BIBLIOGRAFÍA

- [ABB 2002] ABB, *Asea Brown Boveri. Máquinas de CC, DMI. Instrucciones de Funcionamiento y Mantenimiento. 16464NOVA\_3BSM003045-1\_ed3.indd*
- [Amendola 2022] Amendola, *Depool. T. (2022). ABC de la Gestión de Activos. PMM Institute for learning.*
- [Antonino 1 2017] Jose A Antonino-Daviu, “Mantenimiento Predictivo de Motores Eléctricos Industriales Mediante Análisis de la Corriente”, actas del 6º Congreso Español de Mantenimiento, AEM, Tarragona 28-30 marzo, 2017.
- [Antonino 2 2021] DAVIU, Jose Alfonso Antonino; PLA, Pablo Marino Velasco. A non-intrusive method for sparking assessment in brush dc-motors based on wavelet analysis. En *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2021. p. 1-5.
- [Antonino 3 2020] Antonino-Daviu, J. Electrical Monitoring under Transient Conditions: A New Paradigm in Electric Motors Predictive Maintenance. *Appl. Sci.* 2020, 10, 6137. <https://doi.org/10.3390/app10176137>
- [Barwany 1991] S. M. Barwany and G. Thomas, "A non-intrusive system (SMS) to monitor sparking along the brush/commutator interface of a DC machine," 1991 Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 341), London, UK, 1991, pp. 72-76
- [Cabañas 1998] Cabanas, M. F. (1998). *Técnicas para el mantenimiento diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo.
- [Chapman 2012] CHAPMAN, Stephen J., et al. *Máquinas eléctricas*, 2012.
- [Cortes 1977] Manuel, Cherta. Cortes. (1974). *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomos I, II y III. Barcelona Técnicos Asociados.*
- [Carbone Lorraine 2013] GROUPE CARBONE LARRAINE, GUÍA TÉCNICA, escobillas para máquinas eléctricas 2013, [www.elec.carbonelorraine.com](http://www.elec.carbonelorraine.com), [https://www.motronic.es/upfiles/manteniments\\_img/files/cambio-de-escobillas-es\\_5406.pdf](https://www.motronic.es/upfiles/manteniments_img/files/cambio-de-escobillas-es_5406.pdf)
- [Corral 2018] Corral Hernández, J. Á. (2018). *Aportaciones al diagnóstico de averías en motores eléctricos basados en el análisis avanzado de corrientes* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). <https://riunet.upv.es/handle/10251/106368>
- [Domínguez 2008] Domínguez, F. M. (2008). *Reparación y bobinado de motores eléctricos*. Paraninfo Cengage Learning.
- [G. S. Dunn 1905] G. S. Dunn, "Discussion on “limits of injurious sparking in direct-current commutation”,” in *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 24, no. 9, pp. 916-921, Sept. 1905, doi: 10.1109/PAIEE.1905.6742540.



[Fitzgerald 1984] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Beiza Valls, E. (1984). Teoría y análisis de las máquinas eléctricas.

[Flinders 1999] F. Flinders, J. Zhang and W. Oghanna, "Investigation on excessive commutator and brush wears in DC traction machines," Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475), Hong Kong, China, 1999, pp. 200-205 vol.1, doi: 10.1109/PEDS.1999.794560

[Fraile 2003] Fraile Mora, J. (2003). Máquinas eléctricas. 5ta Edición

[Fraile 2016] Fraile Mora, J. (2016). Máquinas eléctricas. 8va Edición

[Gómez 2020] GÓMEZ SUÁREZ, I. V. Á. N. (2020). *Mantenimiento electromecánico de motores eléctricos*. Ediciones Paraninfo, SA.

[Guerrero 2003] Guerrero, A., Sánchez, O., Moreno, J. A., & Ortega, A. (2003). Electrotecnia. McGraw-Hill/Interamericana de España.

<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>

[H. Tanaka 2010] H. Tanaka, N. Morita, K. Sawa and T. Ueno, "Carbon Brush and Flat Commutator Wear of DC Motor Driving Automotive Fuel Pump in Various Fuels," 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/HOLM.2010.5619463

[Helwing 1 2020] HELWING PRODUCTS, INC. CINSAMEX, 2020 TC2016SP\_Spanish\_Guía de Especificaciones para Escobillas de Carbón. <https://www.helwigcarbon.com/>

[Helwing 2 2013] HELWIG CARBON (10/2013). Carbon Brushes, A Comprehensive Guide, for Industrial and Railway Technology, HC Pocket Guide. <https://www.helwigcarbon.com/>

[R. Holm 1962] R. Holm, "Theory of the Sparking during Commutation on Dynamos," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 81, no. 3, pp. 588-594, April 1962, doi: 10.1109/AIEEPAS.1962.4501368

[Hu 2012] F. Hu, Q. He, J. Wang, Z. Liu, and F. Kong, "Commutation Sparking Image Monitoring for DC Motor." *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* April 2012.

[Kliman 2003] G. B. Kliman, D. Song and R. A. Koegl, "Remote monitoring of DC motor sparking by wavelet analysis of the current," *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003.*, Atlanta, GA, USA, 2003, pp. 25-27, doi: 10.1109/DEMPED.2003.1234542.

[Kosow 2021] Kosow, I. L. (2021). Máquinas eléctricas y transformadores. Reverté.

[Manzano 2002] Manzano, J. J., & José, J. (2002). Mantenimiento de máquinas eléctricas. Madrid Thomson/Paraninfo.

[Martín 2012] Martín, J. C. (2012). Máquinas eléctricas. Editex.

[M. S. May 1962] M. S. May, "Current density in carbon brushes," in Electrical Engineering, vol. 81, no. 3, pp. 208-209, March 1962, doi: 10.1109/EE.1962.6446783

[Mersen 1 2017] Mersen, Carbon brushes for motors and generators, 27/06/2017, <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 2 2017] AE-TDS/14 - Brush sparking, 10/07/2017, TECHNICAL NOTE ■ STA BE 16-33 GB, 10/07/2017, <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>

[Mersen 3 2017] PTT-TDS/11 - Pressure on carbon brushes, TECHNICAL DATA SHEET, TDS -11, 10/07/2017, <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>

[Mersen 4 2017] Mersen, PTT-maintenance tools - commutation indicator, PTT - maintenance tools - commutation indicator, 01/07/2017. <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 5 2017] Mersen, AE-TDS/02 - Condition of the surface of commutators and rings-roughness, 10/07/2017, <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 6 2017] Mersen, AE-TDS/03 - Chamfering of commutator bar edges / machining of ring helical grooves, 10/07/2017. <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 7 2017] Mersen, PTT-TDS/04 - Dimensions t, a, and r of carbon brushes and brush-holders, 10/07/2017. <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 8 2017] Mersen, AE-TDS/05 - Losses in brushes, 10/07/2017, <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Mersen 9 2017] Mersen, AE-TDS/15-Brush-wear, 10/07/2017. <https://www.mersen.es/es/noticias-y-medios/publicaciones>.

[Michiguchi 1983] Y. Michiguchi, S. Tanisaka, S. Izumi, T. Watanabe and I. Miyashita, "Development of a Collector Ring Monitor for Sparking Detection on Generators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 4, pp. 928-933, April 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.317805.

[Morena 2012] J. de la Morena Cancela, "Eficiencia energética en motores eléctricos. Normativa IEC 60034-30", II Congreso de Eficiencia Energética, Madrid, Octubre 2012.

[Morita 2007] N. Morita, T. Ueno, T. Otaka and M. Arata, "Comparison of Brush Dynamic Operation Characteristics for Turbine Generator Steel Collector Ring," Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, USA, 2007, pp. 205-210, doi: 10.1109/HOLM.2007.4318218.

[Moberly et al Johnson 1959] L. E. Moberly and J. L. Johnson, "The effect of variable high-altitude humidity on the wear of nondusting brushes," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, vol. 78, no. 4, pp. 263-267, Sept. 1959, doi: 10.1109/TAL.1959.6371571.

[Noguera 2020] Noguera, Sara F. Máquinas eléctricas, 2020

[Lozowski 2001] G. E. Lozowski, "Maintenance concerns for good operation of DC motors," Conference Record of 2001 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.01CH37209), Portland, OR, USA, 2001, pp. 223-232, doi: 10.1109/PAPCON.2001.952972.

[Padmanabhan 1965] K. Padmanabhan and A. Srinivasan, "Some Important Aspects in the Phenomenon of Commutator Sparking," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, no. 5, pp. 396-404, May 1965, doi: 10.1109/TPAS.1965.4766211.

[Pozueta 2010] Pozueta, M. A. R. (2010). Constitución de las máquinas eléctricas. *Universidad de Cantabria*. [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2271/course/section/2193/tema\\_05.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2271/course/section/2193/tema_05.pdf)

[Renown 2013] Renown Electric (10/2013). Renown Electric's Guide to Carbon Brushes for Motors & Generators. [Resources | Renown Electric Motors & Repair \(renown-electric.com\)](https://www.renown-electric.com/resources/brushes)

[Roumanis 1956] S. J. Roumanis, "The Null Point Method of Commutation Adjustment [includes discussion]," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 75, no. 3, pp. 147-152, Jan. 1956, doi: 10.1109/AIEEPAS.1956.4499286

[Sawa, K. 1 2013]. Electrical Brushes. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_432](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_432)

[Sawa, K. 2 2013]. Sliding Electrical Contacts and Materials. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_439](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_439)

[Sawada 1972] F. H. Sawada, S. C. Barton and G. H. Gunnoe, "Early Detection and Warning of Excessive Carbon Brush Sparking," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, no. 1, pp. 167-171, Jan. 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293327.

[Serrano 2017] Serrano Iribarnegaray, L., & Martínez Román, J. A. (2017). Máquinas eléctricas. *Colección Académica. Editorial UPV*.

[Shin, WG 2010] Shin, WG., Lee, SH. An analysis of the main factors on the wear of brushes for automotive small brush-type DC motor. *J Mech Sci Technol* 24, 37–41 (2010). <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1135>

[SkjØlberg 2009] J. K. SkjØlberg, H. F. Ohma and M. Runde, "Wear Rates and Current Distribution of Carbon Brushes on Steel Slip Rings," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 4, pp. 835-840, Dec. 2009, doi: 10.1109/TEC.2009.2025416

[Timsit, R.S. 2013]. Electrical Contacts: Scientific Fundamentals. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_429](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_429)

[Treanor 1995] M. P. Treanor and G.B. Kliman, "Incipient Fault Detection in Locomotive DC Traction Motors". 49th Meeting of the Society. for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, VA, April 18-20,1995

[vdocuments.net 2015] vdocuments.net (28/03/2015) by Savana-render (Schunk Kohlenstofftechnik, SKT/GB4, frequently asked questions, [Schunk Kohlenstofftechnik SKT / GB4 Page: 1 Frequently asked questions Frequently asked questions - FAQ - \[PPT Powerpoint\]](https://www.vdocuments.net/2015/03/28/savana-render-schunk-kohlenstofftechnik-skt-gb4-frequently-asked-questions-faq-ppt-powerpoint/) (vdocuments.net)

[Velasco 2022] Velasco-Pla, P. M., & Antonino-Daviu, J. (2022, September). Sparking Detection in Brushed dc Motors through the Analysis of the Armature Current under the

Starting. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1537-1541). IEEE.

[Yukosavic 2013] Vukosavic, Slodoban N. (2013). *Electrical Machines*. Power Electronics and Power Systems, spring.

[webstore.iec 1990] *Informe Técnico IEC 61015/TR*: “Porta escobillas para máquinas eléctricas-Guía para la medida del empuje estático aplicado a las escobillas”,1990, <https://webstore.iec.ch/publication/4298>.

[Zhou, X. 2013]. Electric Contact, Elements, and Systems. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_386](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_386)

## ANEXO I: Análisis Económico

MEMORIA ECONÓMICA.....	2
1. Introducción.....	2
2. Descripción del método presupuestado.....	2
2.1. Mano de Obra.....	2
2.2. Activos o Equipos empleados.....	2
2.3. Insumos y Materiales.....	3
3. Justificación de precios.....	3
4. Desglose de precios detallados.....	4
5. Presupuesto Total.....	6

### Listado de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Cuadro de Amortización de precios mensual.....	4
<b>Tabla 2.</b> Deduciones presupuesto reuniones.....	5
<b>Tabla 3.</b> Deduciones presupuesto de los ensayos de laboratorio desarrollado en un periodo de un mes.....	5
<b>Tabla 4.</b> Deduciones presupuesto del procesamiento, programación y procesamiento de señales.....	5
<b>Tabla 5.</b> Deduciones de consumo de material fungible.....	5
<b>Tabla 6.</b> Presupuesto de la Redacción de la Tesis.....	6
<b>Tabla 7.</b> Presupuesto Total Proyecto de Investigación.....	6

## MEMORIA ECONÓMICA.

### 1. Introducción

En el presente capítulo del trabajo de fin de máster se divide varias secciones. En la primera parte, se detallan los gastos asociados a la ejecución de la investigación de implementación de la técnica "Avance Transient Current Signature Analysis" (ATCSA) por sus siglas en inglés, en Motores/Generadores DC para diagnosticar y cuantificar fallos asociados a la calidad de conmutación cuando existe pérdida de presión de contacto entre conmutador/escobilla y aparece el fenómeno de la chispa.

El estudio se divide en el presupuesto de mano de obra, los gastos derivados a los ensayos de laboratorio, los equipos de medición y consumibles utilizados durante la elaboración de la tesis. En apartados posteriores, se detallarán los precios que han sido asignados a cada criterio, basado en las tarifas legales vigentes del año 2024.

Cabe resaltar, que la investigación tuvo lugar en las instalaciones del Laboratorio del IT (Instituto Técnico de la Energía) destinado a diferentes investigaciones en Maquinas Eléctricas Rotativas. Por consiguiente, en el presupuesto se excluye el costo asociado al IVA ni el beneficio industrial. No obstante, si la investigación hubiese financiada por una empresa externa al departamento, se contemplarían los costos asociados dentro del presupuesto.

En las siguientes secciones se justifican y se desglosan los gastos asociados al proyecto. Al final se totaliza.

### 2. Descripción del método presupuestado

En esta sección se detallan las categorías presupuestarias definidas y se desglosan. También se define el método utilizado para estimar las amortizaciones de los activos fijos.

#### 2.1. Mano de Obra

Los costos de la mano de obra relacionan los gastos de personal que se ha involucrado en la ejecución de la investigación. Se expresan las Horas-Hombre y se define el valor unitario por euros/H-H. En este caso específico, han participado un ingeniero técnico industrial, un estudiante de Máster de ingeniería de Mantenimiento y Tutor de la Tesina, quien es Doctor y profesor de departamento.

#### 2.2. Activos o Equipos empleados

Los equipos utilizados para la adquisición de ensayos forman parte del inventario de activos del instituto IT. Por ello, en lugar de considerar el costo de adquisición, se tomará en cuenta los costos de amortización. A continuación, se resumen:

## Equipos Experimentales

- Osciloscopio Digital Yokogawa, modelo DL850
- Sonda tipo Rogowski, marca: Fluke y modelo: CA i3000s Flex
- Dynamometer Marca: BKB electric Motors.
- Motor de Inducción Siemens 1LE1
- Arrancador Soft Schneider ATS01N109FT
- Tacómetro
- Polímetro UNITEC

## Equipos Personales

Se requiere una laptop para almacenar las señales adquiridas, junto con licencias Microsoft y la licencia de Google Colab de Phyton para el procesamiento de señales. La amortización en este caso, se estiman valores unitarios y se incluyen el presupuesto general.

### 2.3. Insumos y Materiales

Se incluyen los gastos de material para ensayos, compra y cantidad y se estima el consumo eléctrico de los ensayos y para alimentar los sistemas informáticos.

### 3. Justificación de precios

Los costes de mano de Obra a continuación se definen en función del su salario y horas trabajadas promedio al año con la expresión (1) de este anexo.

$$\text{coste hora} = \frac{\text{Salario Bruto Anual}}{\text{Horas trabajo/año}} \quad (1)$$

al año se definen de la ecuación (2), al tomar el numero de semanas de un año (52 semanas) y restar las semanas de vacaciones (6 semanas de vacaciones incluyendo festivos), multiplicando esa diferencia por la cantidad de horas estipuladas de trabajo semana (40 horas a la semana).

La investigación ha sido llevada por el estudiante de Máster como propuesta de su trabajo fin de Máster. El tiempo estimado para su realización fue de 8 meses y se estima un salario equivalente a una beca de convenio con valor hora mínimo establecido.

$$\text{Horas trabajo/año} = (52 - 6) \times 40 = 1840 \text{ Horas/año} \quad (2)$$



Los cálculos para cada caso se muestran a continuación:

$$coste_{Industrial Ing} = \frac{16000}{1840} = 8,7 \text{ euros/hora}$$

$$coste_{Doctor} = \frac{32000}{1840} = 17,39 \text{ euros/hora}$$

$$coste_{Master student} = 4,7 \text{ euros/hora}$$

#### 4. Desglose de precios detallados

Para desglosar los precios, se tiene los siguientes bloques:

- Gastos de equipos y materiales.
- Recurso humano: incluye el valor equivalente al tiempo empleado de cada participante al proyecto.
- Amortización de equipos: Se consideran como que han sido activos alquilados, debido a que se usan en muchos varios proyectos dentro del Instituto Tecnológico.

El periodo total establecido para los costes de amortización  $C_{amort}$ , de vida de equipos de laboratorio es de 5 años y contablemente los periodos de amortización se calculan porcentualmente en meses (60 meses). Como se requiere establecer la amortización parcial, se determina teniendo en cuenta el periodo de tiempo de ensayos de laboratorio dividido entre el periodo total establecido para la amortización, ver ecuación (3):

$$C_{amort} = \frac{1 \text{ mes de Ensayos}}{60 \text{ meses}} = 0.0167\% \quad (3)$$

El presupuesto parcial será  $C_{amort}$  multiplicado por el costo del activo. Ver a continuación el listado de precios de activos.

#### Cuadro de Precios de Amortiguación de los Equipos

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Amort[%]	Importe [€]
Ud	Sala de Ensayos (Alquiler)	1	120.000,00 €	1,67%	2.000,00 €
Ud	Osciloscopio Yokogawa DL850	1	15.000,00 €	1,67%	250,00 €
Ud	Pinza Amperimetrica CA i3000s Flex	1	750,00 €	1,67%	12,50 €
Ud	Motor/Generador DC BKB	1	5.000,00 €	1,67%	83,33 €
Ud	Motor Asíncrono 1LE1	1	500,00 €	1,67%	8,33 €
Ud	Elementos Electricos Schneider	1	1.000,00 €	1,67%	16,67 €
Ud	Tacómetro	1	250,00 €	1,67%	4,17 €
Ud	Polímetro	2	100,00 €	1,67%	1,67 €
Ud	Banco de Resistencias	1	5.000,00 €	1,67%	83,33 €
Ud	Equipo Informático	1	1.500,00 €	1,67%	25,00 €
Ud	Licencias de Programas informáticos	1	900,00 €	1,67%	15,00 €
SubTotal 1					2.500,00 €

**Tabla 1.** Cuadro de Amortización de precios mensual

### Cuadro: Reuniones entre miembros del proyecto

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€/hora]	Importe [€]
h	Doctor/ Tutor Tesina	6	17,39 €	104,34 €
h	Ingeniero Industrial/ Doctorando	4	8,70 €	34,80 €
h	Estudiante de Máster	10	4,70 €	47,00 €
Sub_Total 3				<b>186,14 €</b>

*Tabla 2. Dedicaciones presupuesto reuniones.*

### Concepto: Realización de ensayos y adquisición de Datos

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
Ud	Sala de Ensayos (Alquiler)	1	2.000,00 €	2.000,00 €
Ud	Osciloscopio Yokogawa DL850	1	250,00 €	250,00 €
Ud	Pinza Amperimetrica CA i3000s Flex	1	12,50 €	12,50 €
Ud	Motor/Generador DC BKB	1	83,33 €	83,33 €
Ud	Motor Asíncrono 1LE1	1	8,33 €	8,33 €
Ud	Elementos Electricos Schneider	1	16,67 €	16,67 €
Ud	Tacómetro	1	4,17 €	4,17 €
Ud	Polímetro	2	1,67 €	3,33 €
Ud	Banco de Resistencias	1	83,33 €	83,33 €
Ud	Equipo Informático	1	25,00 €	25,00 €
Ud	Licencias de Programas informáticos	1	15,00 €	15,00 €
h	Ingeniero Industrial/ Doctorando	120	8,70 €	1.044,00 €
h	Estudiante de Máster	120	4,70 €	564,00 €
Sub_Total 4				<b>4.109,67 €</b>

*Tabla 3. Dedicaciones presupuesto de los ensayos de laboratorio desarrollado en un periodo de un mes.*

### Concepto: Simulaciones y Procesamiento de Señales

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
h	Estudiante de Máster	240	4,70 €	1.128,00 €
Ud	Ingeniero Industrial/ Doctorando	4	8,70 €	34,80 €
Ud	Equipo Informático	1	15,00 €	15,00 €
Sub_Total 5				<b>1.177,80 €</b>

*Tabla 4. Dedicaciones presupuesto del procesamiento, programación y procesamiento de señales.*

### Concepto: Consumo de Materiales

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
kW	Energía Eléctrica	400	0,25 €	100,00 €
Ud	Material Sala de Ensayos	1	50,00 €	50,00 €
Sub_Total 6				<b>150,00 €</b>

*Tabla 5. Dedicaciones de consumo de material fungible.*

### Concepto: Redacción del proyecto

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio [€/hora]	Importe [€]
h	Doctor/ Tutor Tesina	4	17,39 €	69,56 €
h	Ingeniero Industrial/ Doctorando	4	8,70 €	34,80 €
h	Estudiante de Máster	200	4,70 €	940,00 €
			Sub_Total 7	<b>1.044,36 €</b>

*Tabla 6. Presupuesto de la Redacción de la Tesis.*

Antes de dar el consolidado del presupuesto hay que aclarar dos aspectos fundamentales:

- Los mismos equipos pueden ser empleados para el diagnóstico de síntomas en las tres tipologías de motor eléctrico: *Motor DC*, *Motor Asíncrono (de inducción)* y *Motor Síncrono* sin tener que hacer inversiones adicionales.
- Dado que el Osciloscopio digital Yokogawa modelo DL850, tiene Capacidad de una variedad de opciones de conectividad, puertos de comunicación y múltiples canales de entrada, que permite la captura simultánea de varias señales, es posible implementar otras técnicas predictivas para comparar y analizar en tiempo real, en entornos que van desde laboratorios de investigación hasta industriales. Para ello, se adquieren sensores de Flujo magnético, Acelerómetros, sensores de ultrasonido de contacto o micrófonos junto a accesorios de instalación, para analizar otros fallos asociados a los equipos.

## 5. Presupuesto Total

Finalmente, se resumen

Concepto	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
Reuniones	4	186,14 €	186,14 €
Ensayos y Adquisición de Datos	1	4.109,67 €	4.109,67 €
Procesamiento de Datos y simulación	1	1.177,80 €	1.177,80 €
Material fungible	1	150,00 €	150,00 €
Equipo Informático	1	1.500,00 €	1.500,00 €
Redacción del Proyecto	1	1.044,36 €	1.044,36 €
Total			<b>8.167,97 €</b>

*Tabla 7. Presupuesto Total Proyecto de Investigación.*

La inversión total del proyecto de investigación de técnicas predictivas por análisis Avanzado de corriente, a Motores/Generadores DC para análisis de chispas asciende a OCHO MIL CIENTO SESENTA Y SIETE EUROS con NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS.



**ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030**

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

<b>Objetivos de Desarrollo Sostenibles</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>No Procede</b>
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>				
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>				
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>				
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>				
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>				
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

\*\*\*Utilice tantas páginas como sea necesario.

## ANEXO II: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2020

### Relación TFM con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2020.

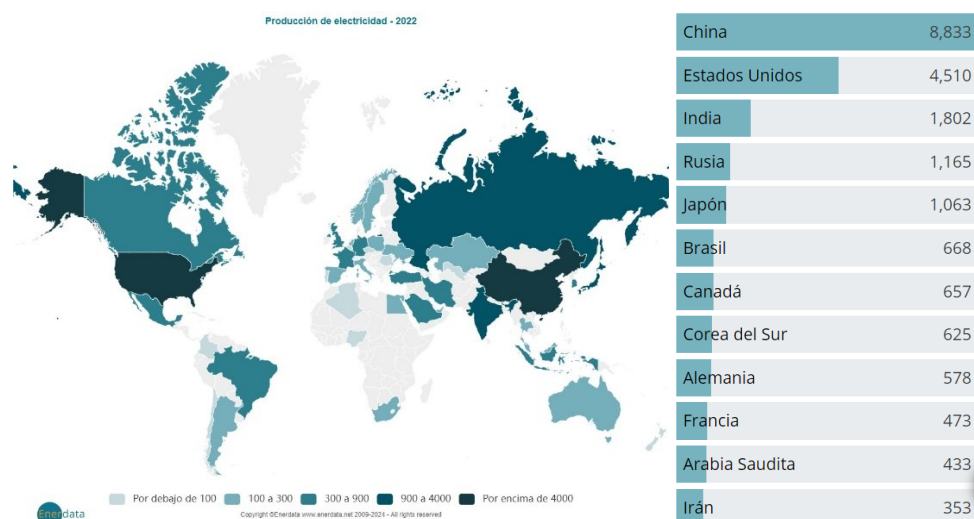
**Ámbito Geográfico:** Todo el Mundo

**Sector:** Industria (Automotriz, Alimentación, Industria Química, Metalúrgica y Energética).

**Áreas:** Mantenimiento, Producción, Manufactura

A continuación, un desglose de la relación del trabajo de investigación con respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible donde se enmarcan los objetivos de cada grupo siendo los de mayor influencia los del **grupo 9 y 8**; luego con una menor influencia los **grupos 7, 12, 13 y 17**.

A modo de introducción, en lo que corresponde a la producción de Energía Eléctrica (TWh) mundial China, Estados Unidos (> 4000 TWh), India, Rusia y Japón (900 >4000 TWh) se sitúan como los mayores productores de Electricidad para el año 2022. Al mismo tiempo son los mayores consumidores de electricidad.



||Fuente: <https://datos.enerdata.net/electricidad/estadisticas-mundiales-produccion-electricidad.html>

Cada vez se utiliza más electricidad en los sectores industrial, particular y de servicios y, más recientemente, en el sector del transporte por carretera, con el desarrollo de los vehículos eléctricos. El tamaño del mercado de motores eléctricos se estima en 136,95 mil millones de dólares en 2024, y se espera que alcance los 191,82 mil millones de dólares en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 6,97% durante el período previsto (2024-2029).

**Electric Motor Market**  
Market Size in USD Billion  
CAGR 6.97%



Source : Mordor Intelligence

Periodo de Estudio	2019 - 2029
Volumen del mercado (2024)	USD 136.95 mil millones de dólares
Volumen del mercado (2029)	USD 191.82 mil millones de dólares
CAGR(2024 - 2029)	6.97 %
Mercado de Crecimiento Más Rápido	Asia Pacífico
Mercado Más Grande	Asia Pacífico
Principales actores	

\*Nota aclaratoria: los principales jugadores no se ordenaron de un modo en especial

\*Compound Annual Growth Rate (CAGR)

Source: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/electric-motor-sales-market>

Se estima que en la actualidad existen un poco más de 300 millones de motores eléctricos a nivel mundial, los cuales consumen entre el 40 al 50% de la energía generada en el planeta. El uso de motores de Corriente Directa (DC) o Motores de Corriente Continua, **requieren mantenimiento a lo largo de toda su vida**; lo que se traduce en mayor costo de operación [Velasco 2022].

Una de las fallas más comunes en máquinas DC, es el fenómeno de las chispas en sistemas Conmutador/escobillas, que obedecen a síntomas de una incorrecta operación de funcionamiento relacionada a diferentes causas de tipo mecánico, eléctrico y condiciones ambientales [ABB 2002] [Mersen 1 2017]. Las técnicas aplicadas de mantenimiento sean en general tipo preventivo y correctivo. Sin embargo, gran número de empresas industriales que aún tiene en sus procesos equipos DC requieren mejores técnicas avanzadas de diagnóstico, no intrusivas, que mejoren la fiabilidad de los procesos y disponibilidad de los activos [Corral 2018].

Se espera que el mercado mundial de motores DC sea testigo de una CAGR (Tasa de Crecimiento Anual Compuesta) de más del 4,0% durante el período 2022-2027.

**Global Brushed DC Motor Market**  
Market Size  
CAGR >5%



Source : Mordor Intelligence

Study Period	2020 - 2029
Base Year For Estimation	2023
CAGR	> 5.00 %
Fastest Growing Market	Asia-Pacific
Largest Market	Asia-Pacific
Market Concentration	High
Major Players	

\*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order

\*Compound Annual Growth Rate (CAGR)

Fuente: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-brushed-dc-motor-market>.

### Brushed DC Motor Industry Segmentation

The scope of the Global Brushed DC Motor Market includes:

Voltage	Less Than 75 kV Between 75 kV - 375 kV Higher Than 375 kV
Application	Residential Commercial Industrial Automotive
Geography	North America Europe Asia-Pacific South America Middle-East and Africa

Fuente: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-brushed-dc-motor-market>.

- El mundo avanza constantemente hacia modos de transporte más limpios, lo que lleva a los países a expandirse hacia los vehículos eléctricos (VE). Desde 2022, BMW está intentando crear el **BMW iX M60** sin imanes utilizando la tecnología de motores DC.
- Los desarrollos tecnológicos para el avance de la tecnología de motores DC prevé el aumento de la densidad de potencia.
- Es probable que la región Asia-Pacífico domine el mercado durante el periodo previsto debido al crecimiento del sector industrial en la región.

## 1. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

El proyecto de Investigación se identifica plenamente con el Objetivo 9, el cual pretende construir infraestructuras resilientes, **promover la industrialización sostenible** y **fomentar la innovación**. El crecimiento económico, el desarrollo social y la acción por el clima dependen en gran medida de las inversiones en infraestructuras, el desarrollo industrial sostenible y el progreso tecnológico.

La **industrialización** inclusiva y sostenible, junto con la **innovación** y la infraestructura, pueden dar rienda suelta a las fuerzas económicas dinámicas y competitivas que generan empleo e ingresos. Estas desempeñan un papel clave a la hora de introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso **eficiente de los recursos**. La expansión de **nuevas industrias** significa una **mejora** del **nivel de vida** para gran parte de la población. El **medioambiente** se verá beneficiado si las industrias aplican prácticas sostenibles.

Al mismo tiempo promover la **investigación científica**, mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales y automotrices en cuando a *la implementación de técnicas avanzadas de monitoreo para el control de procesos y diagnóstico de equipos*, de forma tal que se empleen los repuestos hasta el final de su vida útil y los recursos de energéticos se usen con la mayor eficiencia posible. Tal y como se exponen en los objetivos 9.4, 9.5.b.

Los avances en tecnológicos en instrumentación, procesamiento de datos, simulación de sistemas dinámicos y técnicas predictivas son aportes importantes que permiten un mayor crecimiento económico e industrial. A su vez la industria podrá subvencionar más investigaciones.



9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las **industrias** para que sean **sostenibles**, utilizando los **recursos con mayor eficacia** y promoviendo la **adopción de tecnologías** y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas



**9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales** de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

- **9.b** Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas

## 2. TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

Tener una mayor transferencia de tecnología en nuestros procesos productivos significa una mayor productividad económica, un aumento PIB, personal más Cualificado y un uso consciente y eficiente de los recursos naturales que permitan mitigar la degradación del medio ambiente. Los Objetivos 8, 7, 12 y 13 los expresan claramente en los incisos mencionados a continuación que se relacionan con el trabajo realizado.



**8.2** Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, **la modernización tecnológica y la innovación**, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.

**8.4** Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, **la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales** y procurar desvincular el crecimiento económico de **la degradación del medio ambiente**, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados

## 3. ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE



**7.3** De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la **eficiencia energético.**

Nuestro día a día depende de una energía segura y asequible. No obstante, el consumo de energía sigue siendo la principal causa del **cambio climático**, ya que representa alrededor del

60 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. La tasa mundial de acceso a la energía eléctrica aumentó del 87 % en 2015 al 91 % en 2021.

#### 4. PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES



**12.a** Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles

#### 5. ACCIÓN POR EL CLIMA



**13.3** Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana

#### 6. ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS

Por último y no menos importante, la divulgación de las investigaciones en escenarios académicos como congresos, revistas científicas y cátedras en alianzas con universidades, empresas e institutos de investigación permitirá un crecimiento científico más rápido y ayudará al desarrollo industrial de los países debido a la implementación y automatización de las investigaciones aplicadas a la industria en general.



**17.7** Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión a los países en desarrollo en condiciones favorables, incluso en condiciones concesionarias y preferenciales, según lo convenido de mutuo acuerdo.

**17.8** Poner en pleno funcionamiento, a más tardar en 2017, el banco de tecnología y el mecanismo de apoyo a la creación de capacidad en materia de ciencia, tecnología e innovación para los países menos adelantados y aumentar la utilización de tecnologías instrumentales, en particular la tecnología de la información y las comunicaciones