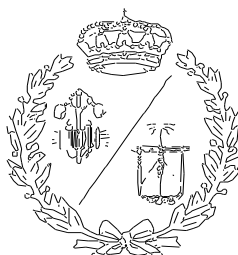


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN UNA
MÁQUINA ELÉCTRICA ASÍNCRONA
INDUSTRIAL DE MEDIA TENSION. RECURSOS
Y TÉCNICAS DE SEGUIMIENTO Y
MONITORIZACIÓN**

**(Insulation degradation in a medium voltage
industrial asynchronous electric machine.
Tracking and monitoring resources and
techniques)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

Autor: Alberto Ortiz Jaén

Tutor: Luis Fernando Mantilla Peñalba

08 - 21

Resumen

En este documento se desarrolla un análisis del deterioro, el envejecimiento general y los mecanismos de fallo de los aislamientos eléctricos instalados en máquinas eléctricas, tanto en el rotor, como en el estátor. Se realizará un estudio pormenorizado de los efectos que dichos fallos tienen sobre la máquina, así como sobre otros mecanismos de fallo.

El estudio recoge una colección de prácticas habituales de supervisión y de medidas empleadas por la industria para evaluar el estado en que se halla el equipo y garantizar la ausencia de síntomas de deterioro en el aislante.

Se describe el gemelo digital, una herramienta propuesta para la vigilancia, inspección, predicción y ensayo de máquinas en la industria 4.0, de cara a su implantación en el ámbito de este trabajo. El análisis de la utilidad y de la versatilidad de esta herramienta se obtendrá a través del desarrollo de un caso práctico.

Como caso práctico, se planteará el diseño de un módulo de gemelo digital. Se trabajará con el lenguaje de programación Python para generar código que reproduzca las condiciones de temperatura de la máquina eléctrica y que genere a partir de estas, información sobre la vida útil remanente del aislamiento considerado.

Este trabajo se ha desarrollado en colaboración con el Centro Tecnológico (CTC) en el marco del programa (POP), que es una iniciativa conjunta del IICANT y la ETSIIT.

- **palabras clave:** Aislamiento eléctrico, Máquina eléctrica, Gemelo digital

Abstract

This document develops an analysis of deterioration, general aging and of failure mechanisms of electrical insulation installed in electrical machines, both in the rotor and in the stator. A detail study will be carried out on the effects that these failures have on the machine, as well as on other failure mechanisms.

The study includes a collection of usual supervision practices and measures used by the industry to assess the state of the equipment and ensure the absence of signs of deterioration in the insulation.

The digital twin is described, a tool proposed for surveillance, inspection and testing of machines in industry 4.0, with a view to its implementation in the scope of this work. The analysis of the utility and versatility of this tool will be obtained through the development of a practical case.

This practical case, will consist in the design of a digital twin module. Python programming language will be used to generate code that reproduces the temperature conditions of the electrical machine, and that generates from these, information on the remaining useful life of the considered insulation.

This form has been developed in collaboration with the Technology Center (CTC) within the framework of the program (POP), which is a joint initiative of the IICANT and the ETSIIT.

- **keywords:** Electrical insulation, Electric machine, Digital twin

Glosario de siglas y acrónimos

FMEA: "Failure Mode and Effect Analysis"; Modo de fallo y análisis de efecto

GD: Gemelo digital

PLM: "Product Lifecycle Management"; Gestión de ciclo de vida de producto

PM: "Predictive Maintenance"; Mantenimiento predictivo

EM: "Electric Machine"; Máquinas eléctricas

AI: "Artificial Intelligence"; Inteligencia artificial

EPRI: "Electric Power Research Institute"

PD: "Partial Discharge" Descarga parcial

VPI: "Vacuum Pressure Impregnation"

RSO: "Recurrent Surge Oscillograph"

RTD: "Resistance Temperature Detector"

SCADA: "Supervisory Control and Data Acquisition"

CT: "Current Transformer"; Transformador de corriente

DF: "Dissipation Factor"; Factor de disipación

SCI: "Squirrel Cage Induction motor"; Motor de inducción de caja de ardilla

VHF: "Very High Frequency"; Muy alta frecuencia

CC: Corriente Continua

CA: Corriente Alterna

HFCT: "High Frequency Current Transformers"

FOC: "Field Oriented Control"; Control orientado al campo

IoT: "Internet of Things"; El Internet de las cosas

BIM: "Building Information Modeling"

LAN: "Local Area Network"; Red local

RUL: "Remaining Useful Life"; Vida útil remanente

ÍNDICE

Resumen	3
Abstract	4
Glosario de siglas y acrónimos	5
Tabla de figuras	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	13
1.2 CONTEXTO Y ANTECEDENTES	14
1.2.1 Marco del trabajo	14
1.2.2 Contexto histórico	15
1.3 MÉTODO DE TRABAJO.....	18
1.4 INTRODUCCIÓN A LOS GEMELOS DIGITALES.....	19
2. PRINCIPIOS GENERALES DE FALLO.....	21
2.1 PROCESOS DE FALLO	21
2.2 TASAS DE FALLO RELATIVAS DE LOS COMPONENTES.....	23
2.3 PREDOMINANCIA DE MECANISMOS DE FALLO	24
2.3.1 Diseño del bobinado.....	24
2.3.2 Calidad de la manufactura.....	25
2.3.3 Entorno operativo	25
2.3.4 Mantenimiento previo.....	26
3. MECANISMOS DE FALLO DEL ESTATOR.....	27
3.1 MÉTODO FMEA PARA DEVANADOS DEL ESTATOR.....	27
3.2 DETERIORO TÉRMICO.....	28
3.2.1 Causas de origen.....	30
3.2.2 Síntomas	30
3.3 CICLO TÉRMICO.....	31
3.3.1 Causas de origen.....	31
3.3.2 Síntomas	32
3.4 BOBINAS SUELTAS EN LA RANURA	32
3.4.1 Causas de origen.....	33
3.4.2 Síntomas	34
3.5 IMPREGNACIÓN DE RESINA INADECUADA	34

3.5.1	Causas de origen.....	35
3.5.2	Síntomas	36
4.	MECANISMOS DE FALLO DEL BOBINADO DEL ROTOR REDONDO	37
4.1	DETERIORO TÉRMICO.....	37
4.1.1	Causas de origen.....	38
4.1.2	Síntomas	39
4.2	POLUCIÓN (“TRACKING”)	39
4.2.1	Causas de origen.....	40
4.2.2	Síntomas	40
4.3	FUERZA CENTRÍFUGA	41
4.3.1	Causas de origen.....	42
4.3.2	Síntomas	43
5.	PRINCIPIOS GENERALES DE ENSAYO Y SEGUIMIENTO.....	45
5.1	PROPÓSITO DEL TESTEO Y EL MONITOREO.....	45
5.1.1	Evaluación de la condición del devanado y vida útil restante del mismo	45
5.1.2	Priorización del mantenimiento	46
5.1.3	Puesta en marcha y pruebas de garantía	46
5.1.4	Determinación de la causa raíz del fallo.....	46
5.2	PRUEBAS FUERA DE LÍNEA VERSUS MONITOREO EN LÍNEA	47
5.3	SISTEMAS EXPERTOS PARA CONVERTIR DATOS EN INFORMACIÓN	49
6.	MONITOREO DE LOS DEVANADOS DE ROTOR Y ESTATOR EN OPERACIÓN.....	51
6.1	MONITOREO TÉRMICO.....	51
6.1.1	Sensores de punto de devanado del estator	52
6.1.2	Obtención de datos e interpretación	54
6.2	FACTOR DE DISIPACIÓN Y CAPACIDAD EN LÍNEA	55
6.2.1	Principio de monitoreo	55
6.2.2	Adquisición de datos e interpretación.....	57
6.3	VIBRACIONES DE COJINETE	57
6.3.1	Sensores de vibración.....	57
6.3.2	Monitoreo de un motor de inducción	58
6.4	DESCARGAS PARCIALES.....	59
6.4.1	Principios de monitoreo	59
6.4.2	Sensores	60

6.4.3	Adquisición de datos	61
6.4.4	Interpretación de datos	62
6.4.5	Identificación de proceso de fallo.....	64
7.	EL GEMELO DIGITAL	66
7.1	MODELADO DEL GEMELO DIGITAL DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE TRES FASES.....	67
7.2	ETAPAS INVOLUCRADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL GEMELO DIGITAL	68
7.3	COMPONENTES DE UN GEMELO DIGITAL	70
7.3.1	Sensores	71
7.3.2	Dispositivos IoT.....	72
7.3.3	Recursos computación en la Nube	73
7.3.4	Software de modelado 3D	74
7.3.5	Software de simulación	74
7.3.6	Inteligencia Artificial y Machine Learning:.....	75
7.3.7	Herramientas de visualizado	76
8.	CASO PRÁCTICO	77
8.1	DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO	78
8.2	ELABORACIÓN DEL ALGORITMO.....	84
8.3	PARÁMETROS Y CONSIDERACIONES.....	93
8.3.1	Consideraciones en el modelado térmico	93
8.3.2	Lenguaje de programación	95
9.	CONCLUSIONES.....	97
10.	BIBLIOGRAFÍA	99
1:	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	99
2:	PRINCIPIOS GENERALES DE FALLO.....	99
3:	MECANISMOS DE FALLO DEL ESTATOR	99
4:	MECANISMOS DE FALLO DEL BOBINADO DE ROTOR	100
5:	PRINCIPIOS GENERALES DE ENSAYO Y SEGUIMIENTO.....	100
6:	MONITOREO DE LOS DEVANADOS EN OPERACIÓN.....	101
7:	EL GEMELO DIGITAL.....	101
8:	CASO PRÁCTICO	102
11.	ANEXOS	104
11.1.1	FMEA Estator.....	105
11.1.2	FMEA Estator.....	106

11.2	Clasificación térmica del aislamiento y límites admisibles	107
11.3.1	Código inicial de predicción de envejecimiento	108
11.3.2	Código inicial de predicción de envejecimiento	109
11.3.3	Código inicial de predicción de envejecimiento	110

Tabla de figuras

FIGURA 1: PORCENTAJES DE FALLO EN VARIOS COMPONENTES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS (JIANGBIAO H. ET AL., 2014 [2] Y GREG C. IAN C. ET AL., 2014 [7]).....	13
FIGURA 2: DEVANADO DEFECTUOSO DEL ESTÁTOR EN UN ALTERNADOR Y BOBINAS QUEMADAS EN LA CONEXIÓN (TEXAS INSTRUMENTS [5])	17
FIGURA 3: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE GEMELO VIRTUAL (GEORGIOS F. ATHANASIOS K. ET AL., 2021 [4])	20
FIGURA 4: COMPONENTES DEL MOTOR RESPONSABLES DE FALLO (GREG C. IAN C. ET AL., 2014 [7])	23
FIGURA 5: FALLO EN TRAMO DE BOBINA DEBIDO AL ENVEJECIMIENTO TÉRMICO EL AISLAMIENTO DE LA PARED SE HA DESPEGADO PARA REVELAR LOS CONDUCTORES, ASÍ COMO LA FALTA DE UNIÓN ENTRE LAS CAPAS DEL PAPEL DE MICA (J. RICHNOW, P. STENZEL ET AL., 2014 [20]).....	29
FIGURA 6: FOTOGRAFÍA DEL LADO DE UNA BOBINA QUE SUFRE LA ABRASIÓN DEL AISLAMIENTO DEBIDO A LOS DEVANADOS SUELTOS (GREG C. & C. MAUGHAN., 2008 [19]).	33
FIGURA 7: "ENGRASE" EN EL LADO DE LOS AGARRES DEL ESTATOR CAUSADO POR EL MOVIMIENTO DE LOS MISMOS (G. C. STONE, RICK W. ET AL., 2009 [13])......	34
FIGURA 8: FALLO CATASTRÓFICO DE UN MOTOR DE CORRIENTE ALTERNA POR DESPRENDIMIENTO DE LAS BARRAS DEL CONMUTADOR DEBIDO A LA FUERZA CENTRÍFUGA (HORNER INDUSTRIAL GROUP, 2019).....	42
FIGURA 9: EMPLAZAMIENTO DEL SENSOR DE TEMPERATURA EN EL BOBINADO DEL ESTATOR [16]	52
FIGURA 10: MEDICIÓN DE LA DIFERENCIA DE CORRIENTE EN CADA FASE UTILIZANDO UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE MUY SENSIBLE ALREDEDOR DE LOS CABLES DE FASE Y NEUTRO. (GENERAL ELECTRIC).....	56
FIGURA 11: ESPECTRO DE FRECUENCIA A 3X LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN PARA UN MOTOR CON BARRAS ROTAS (S. TILLEY, "ROTOR BAR PROBLEM IN ELECTRIC MOTOR", 2009).....	58
FIGURA 12: REPRESENTACIÓN DE LA MAGNITUD DEL PULSO TOMADA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN ONLINE DE DP (IRIS POWER-QUALITROL [59])	62
FIGURA 13: TENDENCIA TÍPICA DE LA MAGNITUD DE LAS DP CON EL TIEMPO EN EL DEVANADO DEL ESTATOR (IAN C. GREG C. ET AL., 2014 [7]).....	63
FIGURA 14: COMPARACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LAS DP EN DOS ESTADORES DE 13.8kV Y 80MVA. EL ESTATOR CON UNA MAGNITUD MAYOR (IZQUIERDA) ESTÁ MÁS DETERIORADO (IRIS POWER-QUALITROL [59]).....	64
FIGURA 15: MULTI-STANDARD SENSORTAG CC2650STK (TEXAS INSTRUMENTS [5])	71
FIGURA 16: MODELO DE GENERADOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO REALIZADO CON AUTODESK 3DS MAX [37]	74
FIGURA 17: DECREMENTO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL PAPEL DE MANILA EN ACEITE (REFRIGERADO CON HIDRÓGENO) REPRESENTADO EN ESCALA LOGARÍTMICA FRENTE AL TIEMPO A ELEVADA TEMPERATURA [47]	80
FIGURA 18: EJEMPLO DE CURVA DE VIDA DEL AISLAMIENTO CARACTERÍSTICA (L.C. WHITMAN ET AL., 1961 [46])	82
FIGURA 19: RANGOS DE TEMPERATURA ADMISIBLE SEGÚN LA CATEGORÍA TÉRMICA DEL AISLAMIENTO [56]	83
FIGURA 20: EJEMPLOS DE CURVAS DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO PARA DISTINTAS PENDIENTES (VALORES DE B) (L.C. WHITMAN ET AL., 1961 [46]).....	85
FIGURA 21: EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO (L.C. WHITMAN ET AL., 1961 [46]).....	86
FIGURA 22: TEMPERATURA REGISTRADA POR EL TERMOPAR (ELABORACIÓN PROPIA)	90

FIGURA 23: HISTOGRAMA DE TEMPERATURAS (ELABORACIÓN PROPIA)	90
FIGURA 24: EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO R (ELABORACIÓN PROPIA)	91
FIGURA 25: VIDA ÚTIL REMANENTE VS VIDA ESPERADA (FABRICANTE) (ELABORACIÓN PROPIA)	92
FIGURA 26: VALORES CONSEGUIDOS DE ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN KJ/MOL POR EL MÉTODO KISSINGER (HEON-GYEONG L. JAE- SEUNG J. ET AL., 2020 [53])	94
FIGURA 27: VALORES CONSEGUIDOS DE ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN KJ/MOL POR EL MÉTODO FRIEDMAN (HEON-GYEONG L. JAE- SEUNG J. ET AL., 2020 [53])	95
FIGURA 28: ALGORITMO DE OBTENCIÓN DE PARÁMETRO DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO R (ELABORACIÓN PROPIA)	108
FIGURA 29: ALGORITMO DE CONSTRUCCIÓN DE LISTA DE PARÁMETROS DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO (ELABORACIÓN PROPIA)	109
FIGURA 30: ALGORITMO DE CONSTRUCCIÓN DE MATRIZ DE PARÁMETROS DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO (ELABORACIÓN PROPIA) .	110

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es frecuente asociar la vida útil de una máquina eléctrica a la de su material aislante, especialmente en aquellas de grandes dimensiones. El fallo del aislante suele ser el resultado de un deterioro gradual, a lo largo del tiempo.

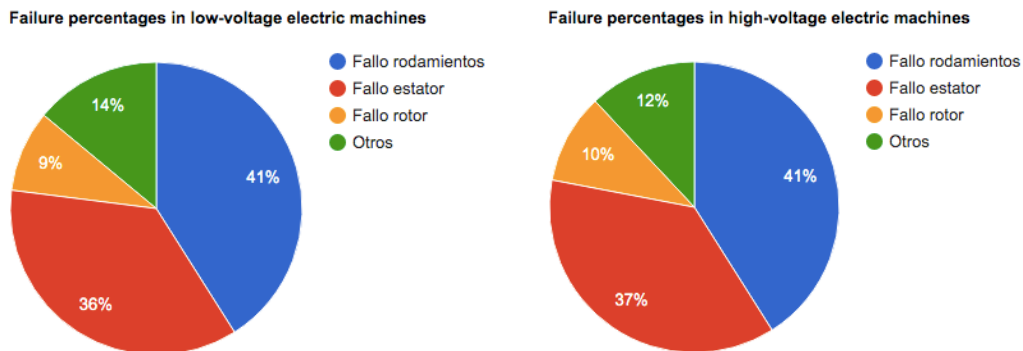


Figura 1: Porcentajes de fallo en varios componentes de las máquinas eléctricas (Jiangbiao H. et al., 2014 [2] y Greg C. Ian C. et al., 2014 [7])

Este envejecimiento es básicamente el resultado de diferentes tensiones: Térmicas, mecánicas, eléctricas y ambientales; que actuarán en paralelo durante la operación de la máquina. Estas sobretensiones alteran el estado de los aislantes, reduciendo la capacidad de actuación de sus propiedades y acelerando el proceso de fallo.

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

Este documento versará sobre el empobrecimiento, la degradación y el fallo en los aislamientos de las máquinas eléctricas industriales. Se estudiarán los fenómenos que pueden conducir a dicho fallo, el efecto que tienen los mismos sobre la máquina y los síntomas que permiten identificarlos.

Se contemplarán los medios habitualmente empleados para la medida y la observación del sistema, así como para el control de los fallos registrados, evaluando la precisión del método de análisis y el seguimiento en el estado del sistema tras la detección del fallo.

Se examinarán las características principales y el funcionamiento general de un aerogenerador asíncrono, con el objetivo de aproximar el problema a un entorno real y de una forma eficiente.

Se elaborará un caso práctico consistente en una propuesta de elaboración parcial de un gemelo digital para un motor asíncrono industrial de media tensión y se investigará la capacidad y competencia del modelo para la representación de las condiciones reales del sistema imitado.

1.2 CONTEXTO Y ANTECEDENTES

1.2.1 Marco del trabajo

Este documento ha sido desarrollado en el marco del Programa de Orientación Profesional (POP). Se trata de la quinta convocatoria de este programa que tiene como objetivo, conectar a los estudiantes del Máster Universitario en Ingeniería Industrial con el mercado laboral desde la etapa académica. La duración del vínculo entre la empresa y el alumno, ha sido negociada para este caso en un periodo de tres meses.

A través de este programa, los alumnos pueden desarrollar y poner en valor su Trabajo de Fin de Máster (TFM) como un ejercicio de práctica profesional.

El programa POP, es una iniciativa del colegio y asociación de Ingenieros Industriales de Cantabria (IICANT), en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación (ETSIIT) de la universidad de Cantabria.

El CTC es la organización que colabora en la elaboración del trabajo. Una fundación privada reconocida como "Centro Tecnológico" por el Ministerio de Economía y Competitividad en el año 2008 y cuyo principal objetivo es la mejora de la competitividad de las empresas mediante la generación de conocimiento tecnológico, realizando actividades de I+D+i y desarrollando su aplicación.

La propuesta con la que el CTC entra en el POP, busca la "obtención de un modelo digital basado en datos de componentes industriales", que entra dentro del campo de actividad de Industria y Energía. Como se ha visto en el apartado 1.1 Objetivos y Alcance, la elaboración del caso práctico en este trabajo, consiste efectivamente, en el diseño de un modelo digital para la predicción basada en datos.

Una de las líneas investigativas del CTC, persigue el desarrollo del Gemelo digital de Máquinas Eléctricas Industriales (GEMELEC). El proyecto estudia también, la repercusión de las rupturas en el aislamiento del bobinado. Esta es la línea investigativa que vincula este trabajo con el proyecto.

1.2.2 Contexto histórico

En el campo del aislamiento eléctrico, los últimos cien años se han sucedido una serie de hitos que han supuesto un crecimiento en la comprensión de los fenómenos dieléctricos.

En 1875, James Clerk Maxwell presentó su teoría de la absorción dieléctrica o polarización inter-facial. En 1889 Paschen reveló su experiencia sobre la descomposición eléctrica del gas en relación al producto de la separación eléctrica y la presión. Posteriormente, Townsend esbozó su teoría de la ionización por colisión de la descomposición de los gases. Unos veinte años más tarde, en 1922, Wagner anunció su teoría de la descomposición térmica de los sólidos [1].

Fue alrededor de 1930 cuando el desarrollo de la mecánica cuántica explicó finalmente la diferencia entre la conducción eléctrica en los metales y en los aislantes.

A pesar de este notable progreso en el conocimiento de los fenómenos dieléctricos, se obtuvieron muy pocas pistas sobre la naturaleza del "envejecimiento" y sobre las técnicas para predecir la vida útil de los materiales y sistemas aislantes eléctricos.

Alrededor de 1900 había, según los estándares actuales, muy pocos tipos de materiales aislantes y éstos, habían tenido un uso suficiente como para haber adquirido una clasificación de duración según la temperatura. Había tan pocos que se podían catalogar los grupos de familias.

La clase "A" incluía materiales fibrosos como el papel, el algodón, etc. Así como la mayoría de las resinas y determinadas gomas naturales. Debían utilizarse a temperaturas moderadas que no superasen los 90°C.

Los materiales de clase "B" presentaban una mayor resistencia al calor y abarcaban la familia de la mica, el amianto u otros materiales refractarios utilizados en combinación con ciertos aglutinantes. Estos aislantes a 125°C tenían una vida útil comparable a la de los materiales de clase "A" a 90°C.

Los materiales de la clase "C" eran esencialmente mica y otros materiales refractarios capaces de soportar temperaturas hasta la incandescencia.

En la década de 1930 se produjo una revolución en el área de los materiales probablemente provocada por la introducción de la química orgánica y de polímeros en la industria eléctrica. Como resultado de esta participación se desarrolló un flujo creciente de materiales sintéticos con propiedades a medida, que sustituyeron a muchos de los materiales aislantes originales y ya probados en servicio.

Es posible caracterizar las propiedades útiles de los nuevos materiales en un periodo relativamente corto. El conocimiento de las características de los materiales permite al ingeniero diseñar sistemas eléctricos para la función especificada con el tamaño y peso mínimos. Sin embargo, el buen funcionamiento de un sistema eléctrico es sólo uno de los dos parámetros necesarios para que un diseño sea viable.

El segundo parámetro es el grado de seguridad en que un equipo funcionará durante el tiempo necesario para el usuario. En otras palabras, mientras que una medida de rendimiento y dimensiones puede obtenerse fácilmente en un nuevo diseño, la ausencia de experiencia de campo (que obviamente falta para los nuevos materiales) proporciona poca o ninguna pista de la vida que puede esperarse en funcionamiento. Por consiguiente, se hace necesaria la realización de algún tipo de prueba para obtener una indicación de la vida útil prevista.

Para comprobar la vida útil de un sistema, hay que tener una noción clara de lo que se espera que haga el aislante. Que el material normalmente habrá de soportar la tensión eléctrica es correcto; sin embargo, en muchos casos deberá también soportar otras tensiones.

La mayoría de las veces el aislamiento tiene como función principal el respaldo de los conductores eléctricos. En un motor, el par es el resultado de la fuerza creada por la corriente en el conductor y el campo magnético circundante. Por otra parte, tanto en los cableados como en los aparatos eléctricos, un cortocircuito puede llegar a crear considerables fuerzas mecánicas entre los conductores. Estos aspectos descritos, advierten que el aislamiento debe tener propiedades tanto eléctricas como mecánicas que protejan al conductor en condiciones de carga normales y anormales.

Las temperaturas elevadas pueden provocar una serie de efectos. El material puede ser intrínsecamente más débil a temperaturas elevadas y, en el caso de los termoplásticos, puede producirse un fallo por el simple hecho de que el material se funde. Este tipo de fallo es rápido y catastrófico, ya que las temperaturas pueden subir rápidamente a la temperatura de fusión en caso de fallo en los conductores.

Por otro lado, una temperatura elevada a largo plazo puede provocar fenómenos químicos internos en el material. Por ejemplo, puede producirse una polimerización interna durante la cual los materiales desarrollan pesos moleculares más altos. Esto conduce inicialmente a una mayor resistencia a la tracción, pero desafortunadamente también a una menor capacidad de alargamiento. Los materiales pueden volverse frágiles hasta el punto en que una simple vibración o un impacto pueden provocar su fractura mecánica.



Figura 2: Devanado defectuoso del estátor en un alternador y bobinas quemadas en la conexión (Texas Instruments [5])

Cuando a las propiedades inherentes del material se añade el efecto del entorno, la predicción del comportamiento del aislamiento se complica. Como ejemplo sencillo, la presencia de aire alrededor de un aislamiento calentado puede provocar una simple degradación oxidativa; dependiendo del material en cuestión, esto puede significar el incremento de la fragilidad o el ablandamiento del material.

Un factor que no se hizo evidente antes de la aparición de muchos nuevos aislamientos es el de la compatibilidad. Si, por ejemplo, un determinado aislamiento de cable magnético se impregna con un barniz o se sumerge en él, es muy posible que, a temperatura ambiente o elevada, se produzca una reacción química entre este aislamiento y el barniz en detrimento de uno u otro.

El propio proceso de fabricación puede constituir una acción perjudicial o dañina. El aislamiento eléctrico deberá ser lo suficientemente resistente como para soportar el abuso mecánico que recibe al ser instalado en el equipo.

En resumen, se espera que el aislamiento resista la tensión y proporcione apoyo mecánico en una amplia gama de temperaturas bajo la exposición a diversos ambientes, considerando la presencia del oxígeno o los productos químicos sin una tasa de degradación demasiado rápida, para que se pueda alcanzar la vida útil deseada.

1.3 MÉTODO DE TRABAJO

El documento trata de definir los mecanismos de fallo característicos en los devanados del rotor y estátor en las máquinas eléctricas de media tensión. A tal efecto, se comienza presentando los principios generales de fallo en los devanados. Se empleará la metodología FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), para determinar que modos de fallo son los más críticos para el escenario planteado. Estos modos se describirán en detalle.

Se procede posteriormente a la descripción de algunos de los principales procesos de seguimiento y control convencionales que introducen al GD.

Seguidamente, se introduce el gemelo digital, su funcionalidad, sus etapas constructivas y sus características principales. Se vinculará la capacidad del gemelo a las características del problema en cuestión.

Si bien, la creación de un gemelo digital pleno involucraría la participación de un equipo de expertos, la compra de instrumental de medida y software de representación visual y de gestión de datos a tiempo real, la elaboración de un módulo sencillo que permita visualizar su funcionamiento y la utilidad en el campo de la degradación de los aislamientos, es posible y será, por tanto, el objetivo final de este proyecto.

Un estudio de las particularidades del aislamiento y sus defectos, revelará qué método de trabajo es el más apropiado para definir en líneas de código el fenómeno del deterioro. Será así mismo necesario, recrear con la mayor precisión posible las condiciones en que opera la máquina, ajustando las temperaturas de forma que devuelvan datos verosímiles y no repetitivos, para poder determinar la eficacia del código ante inputs variados.

Una vez completada la construcción del módulo, se evaluará la capacidad del mismo mediante la simulación de distintos escenarios operativos. Se estudiarán los datos extraídos del simulacro y se procederá a la extracción de las conclusiones del proyecto. La conclusión consistirá en una reflexión sobre los mecanismos de fallo vistos y sobre la utilidad de las herramientas introducidas y su papel en el porvenir de la industria.

1.4 INTRODUCCIÓN A LOS GEMELOS DIGITALES

El gemelo digital se refiere a la construcción de un modelo virtual que imite el comportamiento y el estado de su referente físico. El concepto de gemelo digital ha hecho realidad el paso de los modelos físicos a los digitales en la búsqueda del control, el seguimiento y la retroalimentación constante del ciclo de vida de un sistema. Fue propuesto por Michael Grieves, doctor en la Universidad de Michigan, para un taller de gestión del ciclo de vida del producto (PLM) en 2002, y desde entonces se ha ido extendiendo a los campos de la simulación analógica, el montaje virtual, etc.

Por medio de sensores agregados o integrados, datos como la temperatura, la presión o el flujo son continuamente recopilados. La simulación reflejará todas las circunstancias, condiciones operativas y eventos ocurridos en el sistema real. De esta forma, el gemelo digital experimentará el desgaste y deterioro que el modelo físico, pero virtualmente. Permite el diseño óptimo de un sistema, la predicción a tiempo real, el mantenimiento predictivo, la mejora de la capacidad administrativa de una planta industrial, así como el incremento general del rendimiento de plantas y sistemas [3].

La precisión de este modelo, lo hace óptimo para el estudio previo de las condiciones operativas, previniendo así la exposición precipitada del equipo a la planta de trabajo; También permite contemplar las acciones a tomar para incrementar la eficiencia del equipo en versiones posteriores.

El mantenimiento predictivo (PM) de última generación aplicado a las máquinas eléctricas (EM) se centra en el empleo de métodos de inteligencia artificial (AI) con técnicas de medición y procesamiento ya establecidas mientras explora nuevas combinaciones, para situarse como una técnica rentable para la industria 4.0.

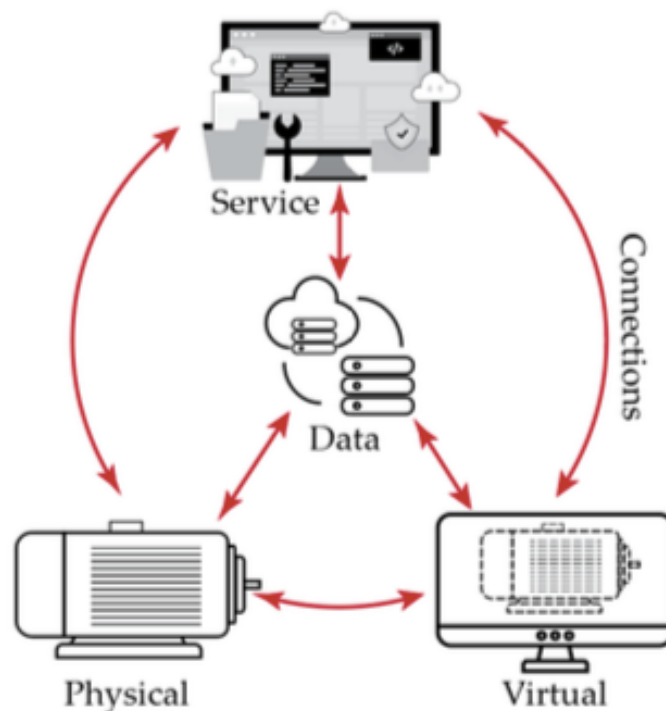


Figura 3: Representación del modelo de gemelo virtual (Georgios F. Athanasios K. et al., 2021 [4])

2. PRINCIPIOS GENERALES DE FALLO

Antes de hablar de los procesos específicos de fallo de los devanados del estátor y del rotor, resulta útil una visión general para situar este tema en su contexto. Hay unas tres docenas de mecanismos de deterioro distintos que pueden operar en los diferentes tipos de rotores y estátors.

En este capítulo se describe por qué hay tantos procesos de fallo y qué es lo que hace que un proceso predomine y acabe provocando un fallo en una máquina concreta.

No se discuten los fallos de la máquina debidos a problemas de cojinetes, problemas estructurales y problemas del sistema de refrigeración (excepto cuando conducen a un sobrecalentamiento del bobinado) (Greg C. Ian C. et al., 2014 [7]).

2.1 PROCESOS DE FALLO

Algunas averías de las máquinas, que se identifican por un fallo a tierra del estátor, un fallo a tierra del rotor o una vibración extremadamente alta, se producen como resultado de un evento catastrófico, independientemente del estado original del aislamiento. No hay forma de anticipar su ocurrencia. Tales eventos consisten en:

- Conexiones inapropiadas de los devanados eléctricos en la fabricación o la reparación de la máquina, que provocan corrientes de circulación extremadamente altas.
- Un objeto metálico suelto en la máquina después de la fabricación o el mantenimiento, que corta el aislamiento del estátor o del rotor.
- Errores de funcionamiento, como la desincronización del generador síncrono, o la desconexión involuntaria del sistema de refrigeración (si está presente).

Aunque estos fallos suelen producirse poco después de la puesta en servicio de la máquina, o de su reanudación tras el mantenimiento, la mayoría de los devanados no fallan como resultado de un acontecimiento catastrófico.

La mayoría de veces, el fallo resulta del deterioro gradual del aislamiento, que deja de tener la resistencia eléctrica o mecánica suficientes, como para soportar las tensiones normales de funcionamiento o para aguantar ciertos fenómenos transitorios eléctricos/mecánicos que se producen durante el funcionamiento normal.

Suele ser el aislamiento el que falla y no el cobre o el acero laminado, ya que las capacidades mecánicas y térmicas de los sistemas de aislamiento predominantemente orgánicos son inferiores a las del cobre, el aluminio o el acero.

El proceso de fallo, término que se utilizará indistintamente como deterioro o envejecimiento, suele ser lento. Los fabricantes han diseñado la mayoría de los motores y generadores industriales y de servicios públicos para que funcionen entre 10 y 40 años antes de que sea necesario rebobinarlos. Por lo tanto, el proceso de fallo debería durar al menos este tiempo.

La fecha en que se producirá el fallo de una máquina no puede predecirse en el caso de los fallos relacionados con el envejecimiento, porque para que se produzca el fallo tienen que darse dos condiciones independientes (Greg C. Ian C. et al., 2014 [7]).

La primera es la reducción de la capacidad eléctrica o mecánica debida a la vejez. Sorprendentemente, los sistemas de aislamiento comunes que se utilizan en los devanados del sistema, tienen una capacidad excelente para continuar en funcionamiento, a pesar de estar muy deteriorados. Así, la segunda condición que suele darse antes del fallo es la aparición de un transitorio mecánico o eléctrico.

Algunos de estos transitorios son:

- Un fallo de fase a tierra en los sistemas de alimentación. Este fallo puede dar lugar a una sobretensión de aproximadamente el doble de la tensión nominal normal, pudiendo llegar a romper el aislamiento del estator envejecido y, por inducción, el aislamiento del rotor.

- Un fallo de la fuente de alimentación (o del sistema eléctrico) que provoca un aumento repentino de la corriente que pasa por el estator (y por inducción, por el rotor), lo que a su vez da lugar a una fuerza mecánica mayor de lo normal que actúa sobre los devanados.
- Los errores del operador, como olvidarse de cerrar los disyuntores del devanado del rotor o abrirlos bajo carga, provocarán tensiones o corrientes muy elevadas en la máquina. Del mismo modo, apagar o no abrir el agua de refrigeración a la máquina, o el bloqueo de los circuitos de ventilación, puede provocar la fusión del aislamiento, especialmente si ya ha envejecido.

Lo importante es recordar que un devanado nuevo con frecuencia podrá soportar los fenómenos transitorios mencionados, porque tiene suficiente resistencia eléctrica y mecánica.

2.2 TASAS DE FALLO RELATIVAS DE LOS COMPONENTES

Los principales componentes de un motor o generador son el devanado del estator, el devanado del rotor y los rodamientos que soportan el rotor. Se han realizado estudios para determinar cuáles de estos componentes son los responsables de la mayoría de los fallos. Aunque es antiguo, el estudio más completo fue el financiado por el EPRI sobre los grandes motores de inducción en la década de 1980. En el estudio se analizaron 7.500 motores y los autores se preocuparon de identificar las causas fundamentales de los fallos.

Component	Percent of motor failures
Bearings	41
Stator	37
Rotor	10
Accessories	12

Figura 4: Componentes del motor responsables de fallo (Greg C. Ian C. et al., 2014 [7])

El 37% de las averías se atribuyeron a problemas en el devanado del estator y el 10% a fallos en el rotor del motor de inducción. Por lo tanto, los devanados son una de las principales causas de los problemas del motor. Hay que tener en cuenta que un mayor porcentaje de problemas con los rodamientos tiende a ocurrir cuando un motor se pone en marcha por primera vez, probablemente debido al equilibrio, la alineación o los problemas con la carga accionada.

2.3 PREDOMINANCIA DE MECANISMOS DE FALLO

Dado que hay muchos mecanismos de fallo, es razonable preguntarse qué determina qué mecanismo causará realmente el fallo en un devanado del estator o del rotor. Principalmente, hay cuatro factores que determinan el proceso de fallo que ocurrirá:

2.3.1 Diseño del bobinado

El fabricante es responsable del diseño de la máquina. Por ejemplo, en un devanado de estator, el fabricante establece la tensión eléctrica media a través del aislamiento, determinando así el grosor del mismo y la tensión de funcionamiento. Las temperaturas de los bobinados se fijan, entre otras cosas, en función de la sección del conductor y del tipo de sistema de refrigeración.

La reducción de un tipo de esfuerzo en el diseño suele provocar el aumento de otro. Por ejemplo, el grosor del aislamiento de la pared de tierra puede reducirse en un devanado refrigerado indirectamente, lo que significa que será más fácil transmitir el calor de los conductores de cobre al núcleo del estator, reduciendo así la temperatura del devanado del estator y el riesgo de fallo debido al deterioro térmico.

Sin embargo, la misma disminución del grosor del aislamiento aumentará la tensión eléctrica y, por tanto, el riesgo de fallo por descargas parciales. El diseñador de la máquina debe realizar estas compensaciones de esfuerzo de diseño. Desgraciadamente, esto da lugar a que algunas tensiones sean mayores, lo que favorecerá un proceso de fallo sobre otro.

2.3.2 Calidad de la manufactura

Muchos ejemplos demuestran como la pobre calidad de los componentes o la instalación conduce a que determinados mecanismos de fallo sean más probables que otros. Si el aislamiento de la bobina del estator en un motor de alta tensión está mal impregnado, se producirán descargas parciales que pueden llegar a perforar el aislamiento. Si los refuerzos y los amarres están mal instalados o incluso faltan en un devanado final del estator, las fuerzas magnéticas durante el funcionamiento o el arranque del motor provocarán vibraciones y una abrasión gradual del aislamiento.

El concepto es que uno o más mecanismos de fallo pueden predominar, dependiendo de la deficiencia de calidad que se produzca.

2.3.3 Entorno operativo

El entorno de funcionamiento se debe en parte a la aplicación y en parte al entorno físico. Evidentemente, si un motor está conduciendo una carga demasiado grande para su capacidad nominal, los devanados del estator pueden sobrecalentarse, provocando un fallo térmico.

Si una máquina síncrona debe suministrar una potencia reactiva excesiva, puede producirse un deterioro térmico en el devanado del estator en los extremos del núcleo debido a un incremento del flujo magnético. En estas situaciones, la aplicación es errónea para la máquina.

El entorno físico que puede afectar a los mecanismos de fallo del bobinado comprende:

- Partículas abrasivas en el aire de refrigeración de las máquinas con ventilación abierta
- Presencia de polvo, humedad y/o aire salado
- Presencia de productos químicos en máquinas con ventilación abierta
- Altitud en máquinas de alto voltaje refrigeradas por aire
- Temperatura ambiente
- Humedad ambiental

2.3.4 Mantenimiento previo

Si un usuario ha decidido no limpiar un devanado en un entorno rico en aceite, éste puede actuar como lubricante y aumentar la posibilidad de que se produzcan fallos relacionados con las vibraciones del devanado.

Asimismo, si el aceite atrapa la suciedad y permite que se acumule, los conductos de refrigeración pueden bloquearse. En consecuencia, el rotor y el estator pueden sufrir un fallo inducido por el calor, a menos que se limpien los devanados y los conductos de aire de refrigeración. Hay muchos otros ejemplos posibles.

Si no se llevan a cabo los procedimientos correctivos oportunos, como la limpieza, el rebordeado o la inmersión/horneado, es más probable que se produzca el fallo.

3. MECANISMOS DE FALLO DEL ESTATOR

Este capítulo presenta los principales mecanismos de envejecimiento y fallo de los devanados del estator. Los únicos mecanismos de fallo que se tratan son los que se deben al envejecimiento gradual del devanado.

No se presentan los sucesos catastróficos que ocurren rápidamente, como la sincronización fuera de fase, la fabricación inadecuada, las conexiones incorrectas del devanado, o la caída de objetos grandes en la máquina que causan un fallo inmediato.

También se describen los síntomas de cada mecanismo de fallo. Y que se observarán con un examen visual del bobinado.

3.1 MÉTODO FMEA PARA DEVANADOS DEL ESTATOR

Como ya se mencionó en el capítulo 2 de este documento, existen docenas de mecanismos de degradación y deterioro de los devanados en máquinas eléctricas. De cara a contemplar con más detalle y determinar, para el caso práctico posterior, cuáles de estos son más críticos en el caso planteado, se elaborará una matriz de modo de fallo y análisis de efecto (FMEA).

Desarrollado en la década de 1950, el método FMEA se ha utilizado para analizar los fallos que surgen en sistemas complejos de diversas industrias. Aunque los propósitos y las terminologías pueden variar en diferentes tipos de industria, los principales objetivos de los diferentes procesos FMEA son anticipar los problemas al principio del proceso de desarrollo y prevenir o minimizar sus consecuencias [11].

El desarrollo de FEMA comienza con la comprensión de los requisitos del sistema, las características físicas del mismo y las variaciones en sus tipos y aplicaciones. Podemos bajo este método, definir los modos de fallo según sean los efectos que nos permiten observar físicamente dicho fallo, o bien, como la forma en que el sistema falla al cumplir su función prevista. Una vez identificados los modos de fallo y sus efectos sobre el sistema se disponen en una tabla.

Se asignan los efectos asociados a cada modo de fallo, de forma que sean fácilmente identificables frente al resto y se establecerá también, un valor de gravedad promedio según sean el riesgo y la frecuencia asociados a cada modo. La tabla confeccionada se incluirá en los anexos bajo la etiqueta 11.1.1 y 11.1.2 FMEA Estator en devanados del estator.

Al no contar con porcentajes precisos de fallo en el escenario de operación descrito (generadores de media tensión instalados en aerogeneradores), se obtendrá la frecuencia y la gravedad de los distintos modos de fallo a través de las menciones en las referencias bibliográficas consultadas.

Los mecanismos de deterioro expuestos en este capítulo corresponderán a los modos de fallo identificados como más críticos por el método FMEA.

3.2 DETERIORO TÉRMICO

El envejecimiento térmico puede producirse a través de diversos procesos, dependiendo de la naturaleza del aislante (termoestable o termoplástico) y del entorno de funcionamiento (aire o hidrógeno).

En las máquinas refrigeradas por aire, en las que el aislamiento es un material termoestable (epoxi o poliéster) o un hilo magnético moderno, el deterioro térmico es esencialmente una reacción química de oxidación; es decir, a temperaturas suficientemente altas, los enlaces químicos dentro de las partes orgánicas del aislamiento se rompen ocasionalmente debido a la vibración inducida térmicamente de los enlaces químicos. Cuando se produce la "escisión" de los enlaces, el oxígeno suele unirse a los enlaces rotos. El resultado es una cadena de polímeros más corta y débil. Macroscópicamente, el aislamiento es más frágil y tiene menor resistencia mecánica.

En el caso del hilo magnético (hilo de bobinado) en los estatores de bobinado aleatorio, el aislamiento frágil resultante del envejecimiento térmico se agrieta fácilmente cuando los conductores de cobre se mueven bajo las fuerzas magnéticas en la puesta en marcha o el funcionamiento normal.

En el caso de los estatores enrollados preformado, la reducida fuerza de unión entre los filamentos y el aislamiento de tierra permite que las capas de la cinta de mica empiecen a separarse, lo que provoca una delaminación. En este punto, dos procesos pueden llevar al fracaso:

1. Los conductores de cobre ya no están bien sujetos y con el tiempo pueden empezar a vibrar unos contra otros debido a las fuerzas inducidas magnéticamente. Como consecuencia de la abrasión en el aislante, se producirán cortocircuitos en los hilos o, lo que es más grave, fallos en las espiras si se trata de un bobinado de varias espiras. Esto creará puntos calientes locales, que luego descomponen el aislamiento de tierra, lo que lleva a un fallo de tierra.
2. Si las bobinas funcionan a una tensión superior a unos 3 kV, puede producirse una descarga parcial (PD) en el aislamiento deslaminado. Dependiendo de la resistencia a la PD de las capas de la cinta de mica, la DP acabará erosionando un agujero a través del aislamiento de tierra o del aislamiento de la vuelta, provocando un fallo a tierra.

Como el proceso es una reacción química de oxidación, cuanto mayor sea la temperatura, más rápida será la reacción y menor será el tiempo en que se degrade el aislamiento.

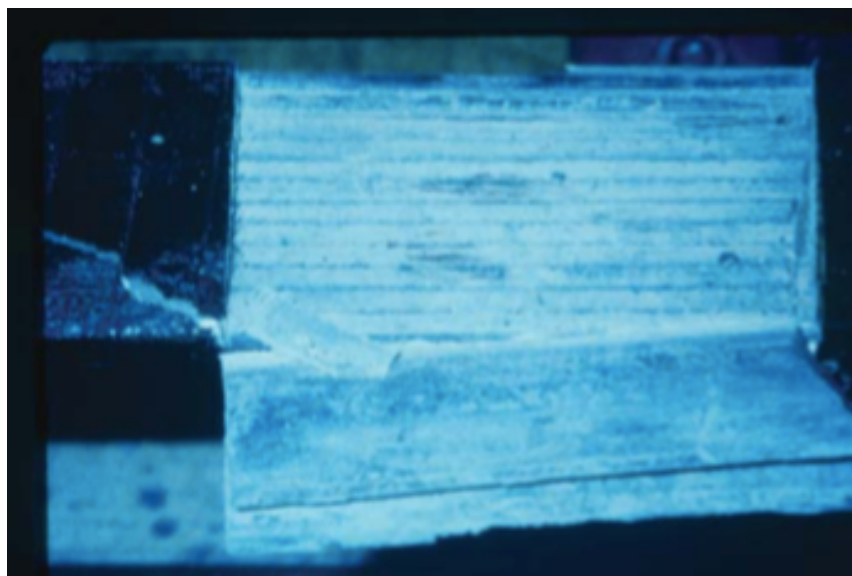


Figura 5: Fallo en tramo de bobina debido al envejecimiento térmico El aislamiento de la pared se ha despegado para revelar los conductores, así como la falta de unión entre las capas del papel de mica (J. Richnow, P. Stenzel et al., 2014 [20])

3.2.1 Causas de origen

El deterioro térmico está causado por el funcionamiento a alta temperatura. Hay una serie de razones por las que pueden producirse altas temperaturas en los devanados, algunas de ellas eran:

- Funcionamiento con sobrecarga. Cuando la carga del motor o generador es mayor que aquella para la que fue diseñado. En general, la temperatura aumentará con el cuadrado de la corriente del estator.
- Intercambiadores de calor sucios, bloqueados u obstruidos que no enfrían adecuadamente el aire
- Diseño deficiente. Por ejemplo, los conductores son demasiado pequeños, hay altas corrientes de circulación por transposiciones inadecuadas (en las máquinas con bobinado preformado); sección transversal de cobre de los hilos conductores demasiado grande, lo que da lugar a pérdidas por corrientes parásitas...
- Fabricación deficiente. Por ejemplo, debido a los cortocircuitos de los filamentos (en los estatores con bobinado preformado), a los cortocircuitos de la laminación del núcleo y a las vías de ventilación bloqueadas porque las bobinas se instalan demasiado juntas en el bobinado final.

3.2.2 Síntomas

Los signos visuales de deterioro térmico dependerán del tipo de aislamiento y bobinado. Las máquinas de bobinado aleatorio mostrarán indicios de que el cable está agrietado o pelado, así como de que el revestimiento de las ranuras y el barniz de unión está descolorido o quebradizo. Los estatores de bobinado termoplástico tendrán un aislamiento hinchado, que sonará "hueco" cuando se golpee con un martillo.

En el estator de bobinado aleatorio, el aislante deteriorado térmicamente puede presentar una reducida resistencia de aislamiento si alguna parte del cable magnético se ha agrietado o desprendido. Además, puede caer el valor de la tensión de ruptura, de la capacitancia y puede aumentar el factor de disipación con el tiempo.

En el estator de bobinado preformado, el deterioro térmico va acompañado de una disminución de la capacitancia con el tiempo y de un aumento del factor de potencia con el tiempo.

3.3 CICLO TÉRMICO

Este mecanismo, también llamado ciclo de carga, es más probable que ocurra en máquinas con núcleos de estator largos (normalmente más de 2 m), y en bobinas/barras enrolladas en máquinas que experimentan muchos arranques y paradas o con cargas que cambian rápidamente (como los son las instaladas en aerogeneradores).

Existen variantes de este mecanismo; cuál de ellas se produce depende del tipo de aislamiento del muro de tierra (termoplástico o termoestable). En todos los casos siguientes, el deterioro será más veloz con cambios de carga más rápidos, núcleos de estator más largos, temperaturas de funcionamiento más altas y/o cambios de carga más frecuentes. La experiencia pasada indica que el proceso tardará normalmente más de 10 años en causar un fallo, pero algunos fallos se han producido en un tiempo más corto.

El Deterioro de los termoestables por ciclo térmico se da cuando la corriente del estator pasa de la ausencia de carga a la plena carga en menos de unos minutos. La temperatura del cobre aumenta rápidamente, provocando una expansión axial del cobre. Al mismo tiempo, la pared de tierra de epoximica está a una temperatura mucho más baja, ya que el calor del cobre tarda algunos minutos en conducirse a través ésta hasta el núcleo del estator. La consecuencia es que, al aumentar la temperatura, el cobre se expande, pero la pared de tierra se expande menos. Esto crea una tensión de cizallamiento axial entre el cobre y la pared de tierra.

3.3.1 Causas de origen

Si se produce alguno de los mecanismos de los ciclos térmicos, las causas fundamentales del fallo son una combinación de:

- Un cambio de carga demasiado rápido para el diseño.
- El funcionamiento a una temperatura demasiado alta del devanado del estator, ya que cuanto mayor sea la temperatura, menor será la fuerza de adhesión; y cuanto menor sea la fuerza de adhesión de las resinas, mayor será la posibilidad de que las interfaces se cizallen.
- Diseño inadecuado del sistema de aislamiento para soportar las tensiones axiales cíclicas.

3.3.2 Síntomas

En los devanados asfálticos, los síntomas macroscópicos de fallo incluyen un aislamiento hinchado en los conductos de ventilación del núcleo y justo fuera de las ranuras. Si se golpea, el aislamiento sonará hueco. También habrá grietas circunferenciales en el muro de tierra, fuera de las ranuras.

En los devanados modernos convencionales de epoxi-mica, no suele haber mucha evidencia visual del problema, si bien, la pared de tierra puede sonar hueca al golpearla.

En el caso de los estatores VPI (Vacuum Pressure Impregnation) globales, habrá signos de abrasión (polvo/grasa) cuando se miren los conductos de ventilación del estator

3.4 BOBINAS SUELTAS EN LA RANURA

Este problema, también denominado descarga de ranura, es asociado en general a los estatores con bobinas o barras de tipo termoestable. El fallo inducido por la bobina suelta es uno de los procesos de fallo más probables en los grandes generadores modernos.

Si la bobina no está bien sujeta, empieza a vibrar. El sistema de aislamiento de la bobina se desplaza con respecto al núcleo del estator, principalmente en dirección radial (es decir, hacia arriba y hacia abajo en la ranura). Como el núcleo del estator está compuesto por láminas de acero, el borde dentado de las láminas en la ranura constituye una superficie abrasiva.

El movimiento de las bobinas en la ranura, desgastará el revestimiento semiconductor (si está presente) y luego el aislamiento de la pared de tierra. La experiencia demuestra que una vez que se ha desgastado aproximadamente el 30% del aislamiento de la pared de tierra, es probable que se produzca un fallo a tierra en el estator, tanto en las máquinas refrigeradas por aire como por hidrógeno, normalmente en las bobinas de mayor tensión (bobinas del extremo de la línea).

3.4.1 Causas de origen

La causa fundamental de este deterioro es la fuerza magnética presente. No obstante, las bobinas y las barras no vibrarán si, para empezar, no están al menos un poco sueltas en la ranura.

Cuando la corriente del estator se incrementa a plena carga, el calor de las pérdidas de cobre aumenta la temperatura en el aislante lo suficiente como para expandir el aislamiento en la ranura. El resultado es que, aunque una bobina esté suelta en la ranura a bajas temperaturas, quedará firmemente sujeta en la ranura a plena carga. Como el coeficiente de dilatación térmica de la epoxi-mica es bajo en comparación con el asfalto y las antiguas resinas de poliéster, si la bobina está suelta cuando está fría, es probable que siga estándolo cuando esté caliente; cuando las fuerzas de la barra son mayores. En consecuencia, el problema de la bobina suelta es más probable en los devanados aislados con epoxi-mica.

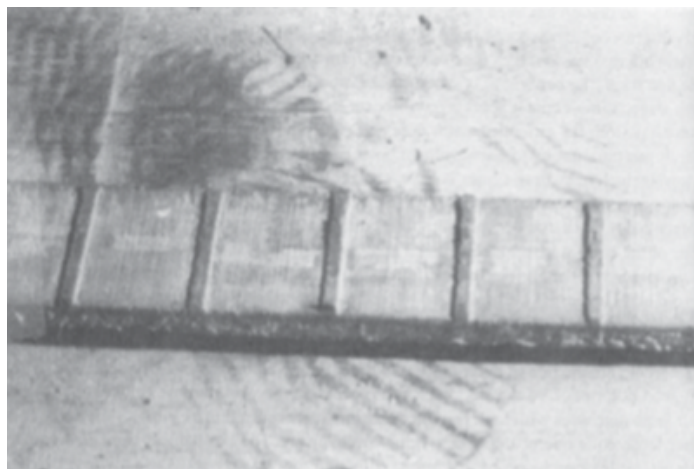


Figura 6: Fotografía del lado de una bobina que sufre la abrasión del aislamiento debido a los devanados sueltos (Greg C. & C. Maughan., 2008 [19]).

3.4.2 Síntomas

Una vez retirado el rotor de un motor o generador, suele ser bastante fácil determinar si las bobinas/barras están sueltas en la ranura. Si el estator no se ha contaminado con aceite, al mirar por los conductos de ventilación del núcleo se puede ver el polvo producido por la abrasión del aislamiento.

Con Frecuencia, una contaminación con aceite soltará los soportes de las bobinas, que producirán un ruido sordo al golpearlas con un martillo.

Aunque, las cuñas estén sueltas, el bobinado puede seguir apretado si las barras/bobinas están bien empaquetadas lateralmente o si se utiliza un muelle de ondulación lateral. Si los agarres se pueden quitar, el daño a las cuñas y al mismo por el golpeo y la abrasión es fácil de ver.

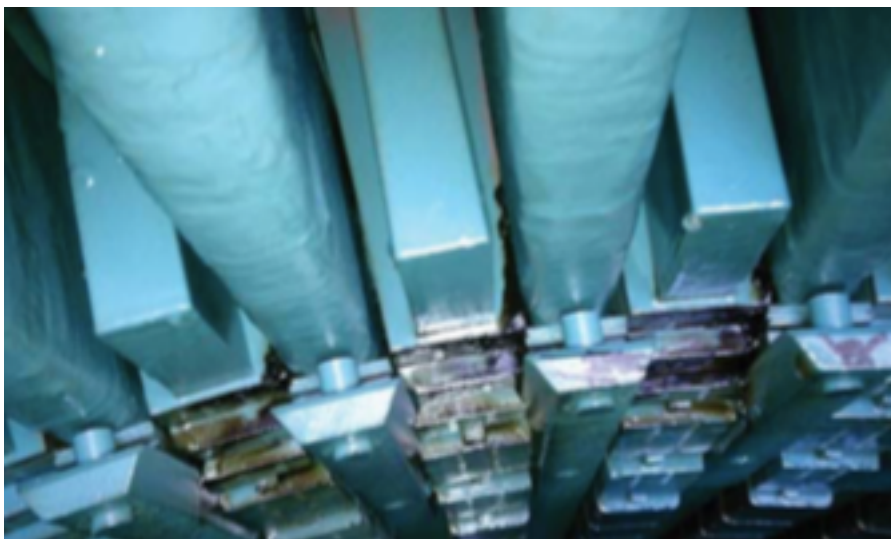


Figura 7: "Engrase" en el lado de los agarres del estator causado por el movimiento de los mismos (G. C. Stone, Rick W. et al., 2009 [13]).

3.5 IMPREGNACIÓN DE RESINA INADECUADA

La mayoría de los estatores con devanado aleatorio son sumergidos en una resina o barniz tras el devanado, para defender al mismo de la suciedad, la humedad y mejorar la transferencia de calor al núcleo. Se consigue también mantener apretados los hilos de la bobina en la ranura, de forma que se evita la abrasión por vibración.

Otro importante motivo por el que impregnar el estator es para eliminar los vacíos que darían lugar a PD.

La impregnación previene la actividad de PD dentro de la pared de tierra (Ground Wall Isulation), al evitar que se formen bolsas de aire. Por razones similares, en el bobinado preformado, la pared de tierra está impregnada por un material rico en resina.

Es más probable que ocurra una impregnación inadecuada que cause la falla del estator en los estatores VPI globales, ya que es más difícil para los procedimientos de control de calidad encontrar una impregnación deficiente en el momento de la fabricación. La falla debido a PD en los vacíos de la pared de tierra puede ocurrir en tan solo 2 años.

La impregnación inadecuada de la pared de tierra en bobinas preformadas puede conducir a temperaturas de funcionamiento más altas puesto que la conductividad térmica de la pared de tierra será más baja, lo que conducirá al deterioro térmico y/o vibración del conductor, resultando en abrasión.

Las DP se producirán en cualquier bolsa de aire que resulte de una mala impregnación entre cobre y el núcleo. Estas PD erosionarán gradualmente un agujero a través del aislamiento. Si el devanado está hecho de bobinas con múltiples vueltas y las bolsas de aire se ubican cerca del aislamiento entre vueltas, entonces la PD solo tiene que erosionar el aislamiento de las mismas (relativamente delgado), para provocar un cortocircuito que cause, casi de inmediato, un fallo a tierra debido a la alta corriente circulante.

3.5.1 Causas de origen

En bobinas VPI con bobinado formado o estatores VPI globales, algunas de las causas fundamentales pueden incluir:

- Aplicación de cinta aislante de pared de tierra deficiente. Al dejar arrugas en la cinta se crea un vacío demasiado grande para ser llenado por la resina de baja viscosidad.
- Viscosidad de resina inadecuada o contaminación química.
- Recubrimiento inadecuado del estator o de la bobina con la resina durante el ciclo de impregnación, o error al no girar la pieza durante el curado para que la resina no se drene de los puntos altos.

- Presión de impregnación y tiempo aplicado inadecuados para la viscosidad de la resina disponible y el espesor del aislamiento.
- Cinta aislante y resina incompatibles.

3.5.2 Síntomas

La mala impregnación es difícil de identificar visualmente en bobinas/barras preformadas, al ser más probable que ocurra junto a los conductores de cobre, lejos de la superficie del aislamiento. En los casos más severos de mala impregnación, la pared de tierra sonará hueca cuando se golpee.

Para máquinas con capacidad nominal de 3 kV o superior, la prueba de PD es la mejor manera de detectar una impregnación deficiente, aunque en bobinas y barras impregnadas individualmente, la prueba "tip-up" de factor de disipación también resulta útil.

La prueba de PD solo será efectiva si la ubicación de la mala impregnación está dentro o fuera de la ranura del estator, pero no en el final de devanado.

4. MECANISMOS DE FALLO DEL BOBINADO DEL ROTOR REDONDO

En este apartado se contemplarán los fenómenos de envejecimiento y los mecanismos de fallo que afectan al aislamiento del devanado del rotor y, en su caso, a los conductores del devanado en los rotores redondos de los generadores síncronos de alta velocidad. También se discutirán las causas de los fallos y los síntomas característicos de los mecanismos de fallo.

Como ya se contempló en el apartado 2.2 “Tasas de fallo relativas de los componentes”, el porcentaje de fallo del rotor es inferior al del estator con un margen notable. Por este motivo, se prescindirá de la realización de una matriz de modo de fallo y análisis de efecto (FMEA) y se remitirá el capítulo a analizar algunos de los mecanismos encontrados más relevantes.

4.1 DETERIORO TÉRMICO

El envejecimiento térmico de los materiales aislantes en los conductores del rotor debido a las altas temperaturas, ha sido el más estudiado y es quizás el que mejor se comprende, ya que era la razón subyacente más común de fallo del bobinado de los tipos de aislamiento más antiguos.

El envejecimiento térmico de los materiales orgánicos, permite que los componentes inorgánicos se vean desplazados por acción de las fuerzas mecánicas cíclicas experimentadas en el funcionamiento del rotor. Como ocurría en el caso del estator, estos fenómenos conducen a la aparición de grietas y huecos en el aislamiento de tierra y a los fallos eléctricos

Los laminados de vidrio aglutinados con resinas epoxi o de poliéster se utilizan comúnmente tanto para el aislamiento de la vuelta como del suelo en los rotores refrigerados por gas directo. La degradación térmica de estos materiales puede tratarse como un fenómeno de tipo químico (descrito por la relación de Arrhenius) y que incluye la pérdida de volátiles, la oxidación, la despolimerización, la contracción, el agrietamiento de la superficie y la fragilidad.

Dado que la temperatura media de funcionamiento del devanado del rotor está en el rango de 60°C-90°C, parece haber un margen de temperatura adecuado, sin embargo, este margen se reduce en los puntos calientes del bobinado. Dependiendo del tipo de sistema de flujo de gas refrigerante, la temperatura estimada del punto caliente podría superar los 130°C, lo que hace del deterioro térmico un problema a considerar.

Este fenómeno se ve incrementado bien por el flujo de oxígeno en caso de que este se emplee como refrigerante, al permitir la oxidación y acelerar el envejecimiento. Así mismo, un aumento de la temperatura supondrá una aceleración de la reacción química y por tanto del proceso de fallo.

4.1.1 Causas de origen

Todos los materiales orgánicos de aislamiento y refuerzo se deterioran con el tiempo debido al calor de los bobinados, que promueve cambios químicos que conducen la degradación de las propiedades del material. La velocidad de deterioro de los materiales de los componentes es una función de sus propiedades térmicas y de las temperaturas a las que se someten.

Las causas de origen de una tasa de envejecimiento inaceptable son:

- El funcionamiento con sobrecarga de trabajo hace que las temperaturas de funcionamiento sean muy superiores a los valores de diseño.
- Enfriamiento inadecuado, que puede deberse a la insuficiencia de aire de enfriamiento, hidrógeno o agua, a puntos muertos locales en el circuito de enfriamiento (debido a un diseño o a procesos de fabricación deficientes), a bloqueos localizados en los sistemas de enfriamiento debido a desechos o al movimiento de las tiras de empaquetamiento de las ranuras, tiras de aislamiento, etc.
- El uso de materiales que tienen propiedades térmicas inadecuadas y que, en consecuencia, se deterioran a un ritmo inaceptable cuando se utilizan dentro de los límites de temperatura de diseño.
- Sobreexcitación de los devanados del rotor durante mucho tiempo.

- Corrientes de secuencia negativa en el devanado del estator debido a un desequilibrio de la tensión del sistema, un funcionamiento defectuoso del disyuntor, etc. Esto conduce a corrientes circulantes en la cara del polo del rotor y en las cuñas del rotor.

4.1.2 Síntomas

En funcionamiento, la primera indicación de envejecimiento térmico puede ocurrir sólo en una etapa avanzada de deterioro cuando se identifican las vueltas en cortocircuito mediante el control del flujo del entrehierro, una alarma de fallo a tierra, o una mayor corriente del eje en caso de deterioro del aislamiento de tierra.

Cuando se apaga, se detecta una lectura de resistencia de aislamiento baja, una lectura de impedancia baja o indicaciones de cortocircuito de giro a partir de un test de RSO (Recurrent Surge Oscillograph) o de sobretensión.

Visualmente, la degradación térmica es fácil de detectar si ha avanzado hasta el punto de ruptura. Los aislantes presentarán agujeros irregulares de material quemado o severos descoloramientos. Cuando el daño aún no ha provocado la perforación, los síntomas se manifestarán en el aislante con una superficie escamosa, grietas, ampollas, fragilidad y decoloración.

4.2 POLUCIÓN ("TRACKING")

Durante el montaje, hay que asegurarse de que se mantiene el aislamiento en las numerosas interfaces de cobre vivo con tierra, ya que constituyen superficies críticas cuya perturbación puede generar cortocircuitos.

La vía de fuga a tierra es generalmente adecuada y suficiente. Sin embargo, durante el servicio, la contaminación en estas interfaces críticas puede reducir la vía de fuga hasta el punto de que se generen cortocircuitos entre espiras o que el devanado haga cortocircuito a tierra.

En un rotor existen cientos de interfaces en las que el aislamiento separa los conductores de cobre de los componentes conectados a tierra, como el forjado, las cuñas, los anillos de retención y los anillos de equilibrio.

La descarga superficial intermitente entre espiras o desde los componentes del bobinado a los componentes conectados a tierra, ocurre cuando estas interfaces de aislamiento se ven comprometidas debido a la contaminación superficial.

La descarga provoca la reacción química de los componentes en el aislante. Se produce carbono y otras sustancias que se alojan en la interfaz, dando lugar a un camino de resistencia reducida que conducirá las posteriores descargas. Con el tiempo, el camino profundiza y ensancha, consiguiendo que la frecuencia de descarga se incremente hasta convertirse en continua. Esto daña aún más la superficie del aislamiento y produce la característica impresión de "quemado" comúnmente conocida como "tracking" [12].

4.2.1 Causas de origen

Las principales fuentes de contaminación que dan lugar al "tracking" en el aislamiento son los polvos de carbono (procedente de las escobillas), el del aire de refrigeración, del cobre desprendido por la abrasión, y de hierro. Si se combina este factor con la humedad, una fuga en el circuito refrigerador o la pulverización de aceite procedente de las juntas y cojinetes, se tendrá un peligroso agravante.

La velocidad del rotor ayuda a orientar el material depositado a lo largo de las numerosas discontinuidades de la superficie del rotor, sobre todo en la región del bobinado final. Una vez se depositan cantidades suficientes, empiezan a producirse descargas superficiales de contacto entre las partes activas y las conectadas a tierra o entre las vueltas de la bobina, lo cual puede degenerar en un "tracking" superficial.

4.2.2 Síntomas

Los síntomas de rastreo no son aparentes durante el funcionamiento hasta que el daño se agrava hasta convertirse en fallos de bobina o de tierra en el devanado. Estos fallos pueden detectarse mediante la supervisión de las vibraciones y del flujo. Después del desmontaje y la inspección, la presencia de contaminantes en la superficie indicaría un fallo debido al "tracking".

En una fase inicial de daño por “tracking”, se encontrarán las características huellas de “quemado” en el aislamiento de la superficie. Los fallos graves a tierra darán lugar a una reducida resistencia de aislamiento y el “tracking” severo de giro a giro puede ser detectado por la prueba de sobretensión del rotor o RSO.

4.3 FUERZA CENTRÍFUGA

Cuando opera a velocidad nominal, el rotor puede llegar a generar grandes tensiones mecánicas en forma de fuerzas centrífugas que pueden superar las 1.500 toneladas en las cuñas y las 15.000 toneladas en cada anillo de retención. En el arranque y apagado del generador las fuerzas tangenciales toman un valor significativamente alto. Un inadecuado aislamiento del rotor puede llegar a agrietarse o a ceder bajo estas fuerzas, pudiendo incurrir en fallos de tierra o de giro.

Las grandes velocidades desarrolladas por el rotor pueden exceder 8.000 veces el peso de los componentes. El propio peso del aislamiento degenera en unos importantes esfuerzos, generalmente de naturaleza compresiva. La naturaleza del aislamiento, le otorga cierta resistencia a la compresión. Sin embargo, la contribución de los conductores al esfuerzo de compresión, supone una tensión total sobre los materiales del aislamiento muy superior.

Los aislantes fabricados con material de calidad y aplicados con márgenes adecuados pueden soportar estas fuerzas de aplastamiento durante una operación a largo plazo. Si bien, cuando los materiales se debilitan debido a un inadecuado control de calidad, u otros mecanismos de envejecimiento como los ya vistos, el aislante puede doblarse, pandearse y agrietarse bajo la influencia de las grandes fuerzas centrífugas. Lo que puede conducir a fallos de giro a giro o fallos a tierra.

Los efectos de las fuerzas centrífugas se contemplan en función del diseño del sistema de arriostamiento del devanado, las propiedades del material utilizado y la frecuencia de los ciclos de arranque y parada.

4.3.1 Causas de origen

Los elevados esfuerzos continuos pueden causar cedencia, agrietamiento, movimiento y distorsión de los materiales del aislamiento, arriostamiento y bobinado si su diseño, la disposición de su restricción o sus propiedades mecánicas son inapropiadas.

Cuando los materiales de agarre del devanado i de unión de los conductores se agrietan, el devanado se afloja y se produce la abrasión del aislamiento debido al movimiento relativo. Eventualmente, esto conduce a fallos giro a giro o a fallos de tierra. Los conductores o las conexiones del devanado, también pueden distorsionarse y fracturarse, provocando circuitos abiertos en el devanado o en casos más extremos, pedazos del conductor pueden llegar a soltarse y saltar hacia el devanado del estator.



Figura 8: Fallo catastrófico de un motor de corriente alterna por desprendimiento de las barras del conmutador debido a la fuerza centrífuga (Horner Industrial Group, 2019)

Las tensiones cíclicas pueden causar el aflojamiento o el fallo por fatiga de los componentes del sistema de aislamiento del devanado. Esto dará como resultado los mismos tipos de fallos que los inducidos por el sobreesfuerzo. En el caso de los anillos de retención del rotor, la falla por fatiga inducida por el estrés cíclico puede provocar fracturas, incendios y daños graves al generador.

4.3.2 Síntomas

La evidencia directa de daño debido a la acumulación de fuerzas centrífugas puede determinarse durante la revisión del rotor. Las primeras etapas del daño se pueden detectar durante la inspección de varios componentes del rotor. Dependiendo de la extensión del desmontaje, los siguientes signos pueden indicar el desarrollo de este mecanismo de fallo en varias etapas:

- Si se ha quitado el anillo de retención, la interfaz del aislamiento del anillo y las secciones de bobinado de los extremos de las bobinas debajo, pueden proporcionar una pista importante. Aparecerá una muesca en la superficie del aislamiento con la forma del devanado del extremo. La profundidad de la muesca debe ser uniforme alrededor de la circunferencia y no exceder el 25 % del espesor del aislamiento en ningún punto. Cualquier variación debe investigarse como elevadas cargas centrífugas localizadas.
- La parte superior de los revestimientos de las ranuras (armadura de las ranuras) puede mostrar desgaste, grietas o mellas debido a la alta fuerza centrífuga que empuja el revestimiento contra los anillos de retención. Esto también es sintomático de un bloqueo inadecuado del revestimiento de la ranura.
- El aislamiento de las vueltas del devanado en el extremo es propenso a sufrir daños por fuerzas centrífugas, especialmente cuando el aislamiento de la sección de la ranura recta se une al aislamiento curvo del extremo. Las juntas traslapadas se utilizan en esta área para garantizar una distancia de fuga adecuada para evitar cortocircuitos. Esto supone un punto débil, que puede romperse bajo las fuerzas centrífugas cíclicas si no se establece correctamente. En condiciones normales solo se podrá realizar la inspección del aislamiento de la vuelta superior, pero si los conductores del devanado deben retirarse para una inspección adicional o por otras razones, se puede observar como superficie de la chapa superior puede mostrar abrasión o agrietamiento en dirección circunferencial, correspondiente a los extremos de los agarres.

- El astillado o el agrietamiento de los bordes en el exterior de los bloques de devanado del extremo pueden indicar daño debido a fuerzas centrífugas.

Durante la operación, los mecanismos de fallo anteriores, pueden no ser evidentes en sus primeras etapas. Cuando el daño ha progresado hasta causar un cambio en el comportamiento operativo, es probable que el rotor exhiba un aumento de vibración y cortocircuitos en los giros, lo que puede detectarse mediante el monitoreo de flujo.

5. PRINCIPIOS GENERALES DE ENSAYO Y SEGUIMIENTO

En este capítulo se analizan varios problemas que son comunes a todas las pruebas y métodos de monitoreo. Para mantener la coherencia, las pruebas deben referirse a las mediciones que se realizan fuera de línea, es decir, durante las interrupciones del motor o generador. El monitoreo se referirá a las medidas tomadas durante la operación normal del motor o generador que arrojan luz sobre la condición de los devanados del rotor y del estator.

5.1 PROPÓSITO DEL TESTEO Y EL MONITOREO

Hay más de 40 pruebas y monitores diferentes que se pueden usar para diagnosticar el estado del devanado del motor y del generador. Uno podría gastar una cantidad considerable de dinero, sin mencionar que la máquina debería estar fuera de servicio durante largos períodos de tiempo, si hiciera todas estas pruebas. Por lo tanto, antes de analizar las pruebas y los controles individuales, revisamos las razones por las que se realizan las pruebas y analizamos los síntomas que determinan qué pruebas y controles se deben realizar.

5.1.1 Evaluación de la condición del devanado y vida útil restante del mismo

Determinar la condición del devanado o estimar su vida útil restante es una razón común para realizar pruebas y monitoreo.

Determinar la vida restante del equipo es difícil, porque la mayoría de las pruebas miden un síntoma, no la causa raíz del fallo. Además, se tiene que, como se ha mencionado previamente, la causa final del fallo estará en un fallo transitorio en el sistema de potencia o un error puntual cometido por el operador. En ausencia de transitorios de voltaje o corriente, el aislante puede continuar cumpliendo su función durante muchos años.

Por tanto, la evaluación del estado de los devanados debe tener un objetivo más limitado, como determinar la probabilidad del deterioro del devanado.

5.1.2 Priorización del mantenimiento

Por lo general, una planta no tiene un solo generador sino varios. Además, el personal de la planta probablemente no tenga ni el tiempo ni los recursos para realizar el mantenimiento de todas sus máquinas. Por lo tanto, las pruebas y el monitoreo pueden ayudar al personal encargado a determinar qué máquinas, están necesitadas de mantenimiento. En otras palabras, los test y el seguimiento ayudan al personal de mantenimiento a determinar de manera comparativa las máquinas con el mayor riesgo de fallo. Esto se puede combinar con el costo de reparación y el impacto del fallo en servicio sobre la producción de la planta, para priorizar cuáles máquinas se deben mantener.

5.1.3 Puesta en marcha y pruebas de garantía

Cuando se compra un motor o generador, o bien al realizarse el rebobinado de una máquina, el contrato entre vendedor y usuario normalmente define los requisitos mínimos que los bobinados deben cumplir bajo prueba. El proveedor suele realizar estas pruebas antes de que la máquina salga de fábrica o durante el primer año de funcionamiento (o cualquiera que sea el período de garantía). Los ejemplos incluyen pruebas "hipot" y pruebas de factor de potencia. Estas pruebas son necesarias para garantizar que los devanados cumplan con las especificaciones.

5.1.4 Determinación de la causa raíz del fallo

Si una máquina falla en servicio o como resultado de una prueba "hipot", es prudente descubrir por qué falló el devanado. El motivo de búsqueda de este problema será:

- Si se realiza una reparación o un rebobinado en una máquina en la que ocurrió la falla antes de lo esperado, la pregunta que surge es: ¿Es probable que vuelva a ocurrir el mismo fallo una vez que la máquina vuelva a estar en servicio? Si se comprende la causa raíz, será posible realizar cambios menores en el devanado durante la reparación, de forma que se extienda su tiempo de funcionamiento.

- Si hay varias máquinas del mismo diseño, al determinar el mecanismo de fallo involucrado en el error de una de estas máquinas, se puede determinar si los otros motores o generadores están sujetos al mismo modo defecto.

A menudo se impone una enorme presión sobre el personal de la planta y del taller de reparación para que vuelvan a poner la máquina en servicio lo antes posible, por lo que rara vez se puede realizar una batería completa de pruebas. Sin embargo, incluso realizar algunas pruebas e inspecciones rápidas puede permitir que se excluyan varios posibles procesos de fallo. Esto puede evitar el futuro agravamiento y el desperdicio de esfuerzos al realizar cambios en el diseño del sistema de aislamiento que, pueden llegar a no ser necesarios.

5.2 PRUEBAS FUERA DE LÍNEA VERSUS MONITOREO EN LÍNEA

Muchas de las pruebas de control y supervisión del estado de un generador se realizan desde los terminales de la máquina, evitando el desmontaje total o parcial. Sin embargo, algunas de estas pruebas, deben ejecutarse con la máquina al menos parcialmente desmontada. Por lo tanto, todas las pruebas fuera de línea, por definición, requerirán al menos de una breve interrupción.

En contraste, el monitoreo en línea se refiere a las pruebas que se realizan durante la operación del motor o generador. Por lo tanto, no se necesita ninguna interrupción, aunque para ciertos tipos de monitoreo, se cambia la condición de funcionamiento de la máquina de forma que se extraiga la mayor cantidad de información de diagnóstico.

En general, se prefiere el monitoreo en línea, ya que:

- Facilita el mantenimiento predictivo, al poderse determinar qué máquinas necesitan pruebas y reparaciones fuera de línea sin sacarlas de servicio.
- No se detiene la máquina para determinar la condición del devanado, al menos para los mecanismos de falla que puede detectar el monitoreo.

- Por lo general, el costo de adquirir datos de diagnóstico es más económico que el de las pruebas fuera de línea, ya que, por lo general, una persona puede recopilar los datos y, lo que toma solo unos minutos. En el monitoreo moderno, la recopilación de datos suele ser automatizada. Por el contrario, las pruebas fuera de línea pueden requerir que algunas personas aíslen la máquina, lleven el equipo de prueba a la máquina, la conecten y ejecuten la prueba.

- Los sobre-esfuerzos que ocurren durante el servicio (temperatura, voltaje y fuerzas mecánicas) estarán presentes. Es decir, es difícil para una prueba fuera de línea simular adecuadamente la distribución de tensión de CA que ocurre en servicio. Un voltaje de CA aplicado para simular la tensión normal de fase a tierra en la ranura dará como resultado un voltaje 60% más bajo entre las bobinas del extremo de línea en diferentes fases, que el ocurrido en servicio.

Las desventajas del monitoreo en línea son:

- Por lo general, hay un costo de capital más alto, ya que se deben instalar sensores e instrumentos de monitoreo en cada máquina. Por el contrario, en los test fuera de servicio, se puede compartir un instrumento para las pruebas en varias máquinas.

- No todos los procesos fallidos se pueden detectar con la supervisión en línea. Por lo tanto, los fallos inesperados, pueden pasar desapercibidos si toda la información de diagnóstico proviene solo de los monitores en línea.

- Como los monitores en línea a menudo se conectan a los sistemas SCADA de la planta, y los buses, así como los protocolos de comunicación cambian con frecuencia, se necesita un esfuerzo continuo para mantener el sistema en funcionamiento.

5.3 SISTEMAS EXPERTOS PARA CONVERTIR DATOS EN INFORMACIÓN

Los sistemas de monitorio producen datos tales como temperaturas, nivel de vibración, magnitudes de descargas parciales, lecturas de resistencia de aislamiento, etc. La lectura de estos datos, otorga información, pero sacar esta información requiere de sistemas expertos.

En la década de 1990, se desarrollaron nuevas tecnologías de software que permitieron la creación de programas de "sistema experto". Los programas informáticos del sistema experto recrean los procesos de razonamiento que utiliza un experto para interpretar los resultados de las pruebas, así como otra información relevante. Si tiene éxito, un sistema experto permite que los no expertos, puedan también convertir los datos en información.

La compañía americana Westinghouse presentó el primer sistema experto en línea capaz de diagnosticar el estado de los devanados del generador. Desde entonces, varios fabricantes estadounidenses y europeos de grandes turbinas han producido sus propias versiones.

La información recogida por los sistemas expertos en línea está destinada tanto a los operadores como al personal de mantenimiento. Si se produce un problema, estos sistemas señalan la causa más probable del mismo y, en caso de que pueda producirse un fallo en poco tiempo, se activa una alarma que alerta al operador.

La mayoría de los programas también producen consejos para el operador sobre las posibles acciones a tomar para evitar la aparición de fallos. Para problemas a más largo plazo, cuyo fallo se puede demorar semanas o años, la salida del sistema experto generalmente está destinada al personal de mantenimiento.

La información que impulsa el diagnóstico proviene de los monitores. Como los generadores de turbina suelen tener una amplia variedad de monitores, el diagnóstico tiende a ser más preciso en tales máquinas. Cuanta más información esté disponible, mayor es la precisión.

Los sistemas expertos comerciales en línea utilizan información de:

- Ranura del estator, sistema de refrigeración y lecturas de temperatura
- Diferenciales de presión del sistema de refrigeración por agua e hidrógeno
- Lecturas de voltaje y corriente de salida
- Mediciones de vibración de rodamientos y marcos
- Niveles de descarga parcial
- Lecturas del rotor

En general, los resultados de las pruebas fuera de línea no están disponibles para el sistema experto. Sin embargo, la mayoría de los programas tienen una gran cantidad de información personalizada integrada con respecto al diseño del generador y los procesos y síntomas de falla más probables.

6. MONITOREO DE LOS DEVANADOS DE ROTOR Y ESTATOR EN OPERACIÓN

Este capítulo describe una serie de métodos de monitoreo diferentes que determinan el estado del devanado durante el funcionamiento normal. Los métodos de este capítulo miden fenómenos térmicos, químicos, mecánicos y eléctricos, que permiten detectar los procesos de fallo en los devanados del estator y del rotor

En la actualidad es posible obtener una probabilidad muy alta de detectar la mayoría de los problemas que pueden conducir al fallo de devanado, sin tener que retirar la máquina de servicio. Por lo tanto, si los recursos de capital están disponibles para implementar todos los métodos apropiados para la máquina, los tiempos entre paradas para inspecciones visuales pueden aumentar considerablemente.

En general, a excepción de las alarmas presentadas a los operadores que indican que se han detectado temperaturas excepcionalmente altas, o bien, espacios de aire muy pequeños en la máquina, la salida de estos monitores está destinada al personal de mantenimiento. Métodos de evaluación como los que se verán en el capítulo posterior, ofrecen información de carácter general sobre el estado de todos los atributos del motor

6.1 MONITOREO TÉRMICO

El deterioro térmico es una de las principales causas de fallo en máquinas enfriadas por aire. Por lo tanto, no sorprende que prácticamente todos los devanados del estator, por encima de unos cientos de kilovatios, se equipen con sensores de temperatura.

En la mayoría de los casos, estos sensores se utilizan durante las pruebas iniciales de aceptación de la máquina. También se conectan a alarmas para advertir sobre variaciones térmicas muy altas. Sin embargo, el personal de mantenimiento puede diagnosticar ciertos procesos de fallo mediante el monitoreo y la tendencia de la temperatura de los devanados.

6.1.1 Sensores de punto de devanado del estator

Los devanados de estator modernos en motores y generadores de grandes dimensiones, tienen normalmente instalados sensores de temperatura, que pueden ser revisados continuamente. Estos sensores miden la temperatura en puntos específicos. Pueden estar en una variedad de ubicaciones:

- Incrustados dentro del bobinado del estator:

En esta ubicación, el sensor es más sensible a la temperatura del cobre que a la temperatura del núcleo o a la temperatura del aire de refrigeración. En la mayoría de motores y generadores enfriados por aire, de 3 a 12 ranuras del estator pueden contener sensores (las ranuras se seleccionan de forma aleatoria). La posición axial del sensor se determina en función del tipo de refrigerado que la máquina recibe. Los sensores deben instalarse al final (o en el medio) de la ranura, donde la temperatura debe ser más alta.

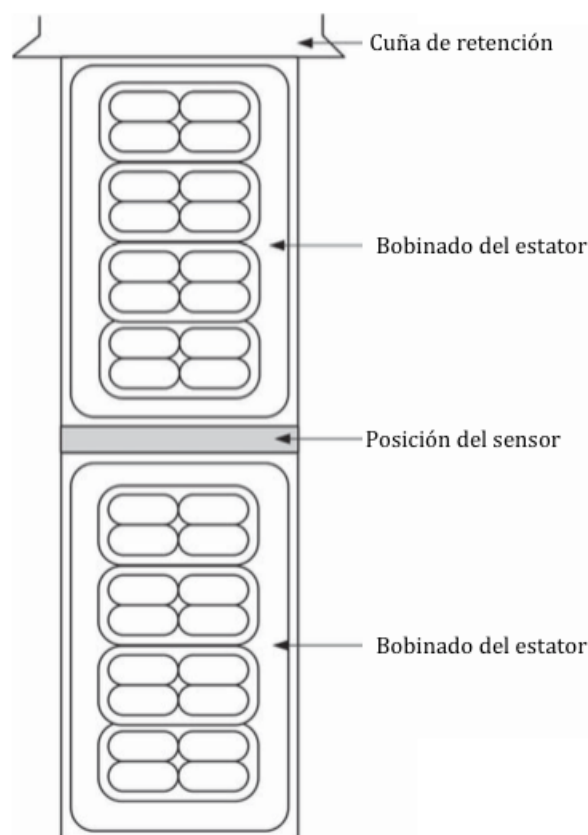


Figura 9: Emplazamiento del sensor de temperatura en el bobinado del estator [16]

- Canales de agua o gas de refrigeración:

En los devanados del estator enfriados directamente por agua, los sensores de temperatura están instalados en el lado de tierra de las mangueras de agua refrigerante, en el extremo del estator donde el agua ha pasado a través de la barra del mismo. De manera similar, los sensores se colocan cerca del conducto de salida de hidrógeno, al final de las barras del estator. Generalmente, hay un sensor para cada barra en un devanado enfriado por agua. En barras enfriadas directamente con hidrógeno, se usa un sensor por cada paralelo.

- En las entradas y salidas de los enfriadores de agua:

Se emplea en máquinas totalmente cerradas para medir la temperatura del refrigerante que sale y regresa a la máquina.

- En el marco del estator:

Esta solo se correlaciona vagamente con la temperatura del devanado.

- En el núcleo del estator:

para medir la temperatura del núcleo.

Hay muchos tipos de sensores de temperatura. El más común es el detector de temperatura de resistencia (RTD). Este sensor aprovecha el hecho de que la resistencia eléctrica de un conductor es directamente proporcional a la temperatura.

Los RTD contienen una delgada tira de metal, de varios centímetros de largo, que tiene una resistencia nominal de 10 o 100 ohmios. Se pasa una corriente fija a través de la tira y se mide el voltaje. Esto permite obtener el valor de la resistencia a una determinada temperatura. Como se conoce la dependencia entre la temperatura y resistencia, se podrá calcular esta primera.

$$R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})]$$

Ecuación 1: Relación de dependencia de la temperatura con la resistencia eléctrica

6.1.2 Obtención de datos e interpretación

La introducción de SCADA, relés de protección computarizados y sistemas de adquisición de datos de máquinas computarizados facilitó el monitoreo directo y continuo de todos los sensores (temperatura, vibración, flujo de refrigerante, etc.) en una máquina. Estos datos pueden ser introducidos en simples programas para levantar un sistema de alarmas dinámico.

Con una calibración inicial y sabiendo que la temperatura de los devanados es aproximadamente proporcional al cuadrado de la corriente, se puede generar una alarma de temperatura incluso si la máquina está funcionando con una carga del 10%.

Esto permite que problemas como los canales de refrigeración que pudieran haber quedado bloqueados inadvertidamente durante el mantenimiento se encuentren, incluso con una carga pequeña y antes de que se produzcan daños importantes en el devanado.

Si hay un aumento constante de la temperatura en condiciones ambientales y de funcionamiento idénticas a lo largo de los años, puede indicar uno de los siguientes problemas:

- Obstrucción gradual de los intercambiadores de calor o de los conductos de refrigerante en el rotor o en el estator. Si la temperatura del devanado y la temperatura del refrigerante aumentan más de unos pocos grados en condiciones de operación constantes, entonces puede ser conveniente planificar una inspección y limpieza.
- Otro motivo que provoca el aumento gradual de la temperatura de los sensores integrados en las ranuras del estator, especialmente si éstas son relativamente constantes en el refrigerante, es la laminación del aislante de la pared de tierra y/o los cortos. A medida que el aislamiento se lamina, la impedancia térmica entre conductores del estator y núcleo aumentará.

- Si hay una variación errática en la temperatura de más de unos pocos grados a lo largo de varios años (en condiciones de operación constantes), entonces una posible causa son los desequilibrios de voltaje entre las fases, que tienden a variar a medida que cambian los requisitos de carga de la planta o los problemas en la calidad de la energía comprada al proveedor.

6.2 FACTOR DE DISIPACIÓN Y CAPACIDAD EN LÍNEA

Otro de los métodos de seguimiento del estado de un generador eléctrico nos permite obtener información sobre la capacitancia y sobre el factor de disipación (DF).

6.2.1 Principio de monitoreo

La capacitancia del aislamiento de pared de tierra del devanado del estator se puede calcular a partir del voltaje que atraviesa el aislamiento y de la corriente capacitiva:

$$C = \frac{I_c}{2\pi fV}$$

Ecuación 2: Fórmula que relaciona la capacitancia con la corriente capacitiva percibida en el bobinado del estator.

Donde f será la frecuencia e I_c la corriente que atraviesa el aislamiento en cuadratura al voltaje. Se tiene pues, que, al medir directamente la corriente capacitiva del bobinado del estator, se podrá aplicar la fórmula previa para obtener el valor de la capacitancia y del factor de disipación.

El método requiere la colocación de un transformador de corriente de alta sensibilidad alrededor de la combinación de conductores neutros y los de voltaje elevado del devanado de un estator conectado en estrella.

La siguiente figura muestra cómo puede aislarse la corriente capacitiva del devanado del estator del resto de las corrientes que circulan hacia o desde el mismo:

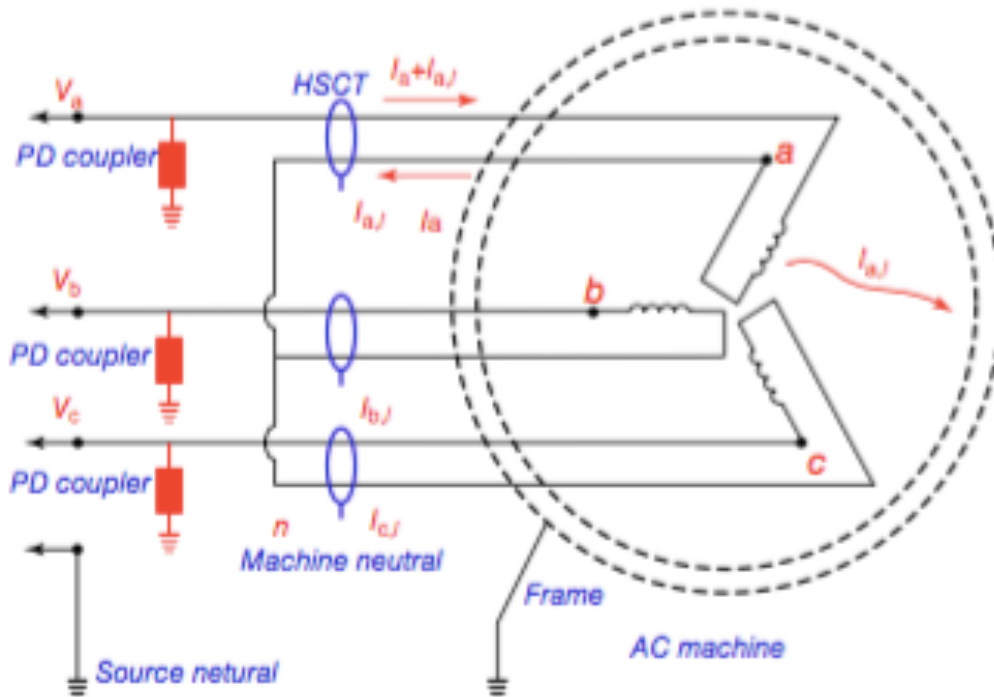


Figura 10: Medición de la diferencia de corriente en cada fase utilizando un transformador de corriente muy sensible alrededor de los cables de fase y neutro. (General Electric).

La corriente de final de fase y la corriente de neutro en una sola fase estarán formadas por la “corriente de carga” y la corriente capacitiva. Si la corriente capacitiva es cero, las corrientes de fase y neutro serán idénticas, y la salida del transformador de corriente (CT) en la Figura 10 será cero. Sin embargo, si el CT es muy preciso y sensible, se producirá una diferencia de corriente neta, que será entonces igual a la corriente capacitiva a través del aislamiento.

Esta diferencia en la corriente es muy pequeña en comparación con la corriente de carga normal (en el rango de 10^{-3}). Por lo tanto, el CT debe ser muy preciso y no ser sensible a la colocación del cable. La capacidad y el factor de disipación se podrán calcular a partir del voltaje y las corrientes de diferencia en fase y en cuadratura, respectivamente.

Esta prueba se puede utilizar tanto en devanados de baja tensión como de alta tensión, siempre que los CT especiales tengan la escala de tensión adecuada. Cuanto mayor sea la graduación en kilovatios del generador, o del motor más difícil será medir con precisión la diferencia de corriente.

6.2.2 Adquisición de datos e interpretación

Dado que el objetivo principal de esta prueba es detectar la contaminación del devanado, y este mecanismo de fallo tiende a ser lento, normalmente sería suficiente con realizar la prueba una vez al año.

Si la tendencia de la capacitancia a lo largo del tiempo aumenta, puede estar señalando la contaminación del devanado. Si, por el contrario, la capacitancia disminuye, puede deberse al envejecimiento térmico del aislamiento del estator. Un aumento en el DF con el tiempo puede indicar cualquiera de estos problemas. Un cambio del 1% en C y DF es significativo.

Nótese que esta técnica determina la condición promedio del aislamiento del devanado, no la condición de la parte más deteriorada del aislamiento. La presencia de revestimientos para el alivio de tensión de carburo de silicio puede disminuir la sensibilidad.

6.3 VIBRACIONES DE COJINETE

El monitoreo continuo de la vibración de los cojinetes es estándar en la mayoría de los grandes generadores. Aunque el propósito principal de este método es advertir sobre problemas con los cojinetes, los datos extraídos a veces se pueden usar para encontrar problemas en los devanados del rotor y los núcleos del estator.

6.3.1 Sensores de vibración

Los acelerómetros piezoeléctricos convencionales se instalan en la carcasa del cojinete. En instalaciones permanentes, las vibraciones radiales serán medidas en dos posiciones separadas 90° sobre dicha carcasa. En caso de que se trate de un monitoreo periódico, los niveles de vibración axial, son también considerados.

Las señales de los acelerómetros se descomponen en magnitud frente a frecuencia con un analizador de espectro. La información se introduce en un ordenador con un software que permita el análisis de espectro y la tendencia de los niveles de vibración con el tiempo.

Sobre la carcasa delo rodamiento, se montan también sondas que indican el desplazamiento del eje. Este tipo de monitoreo se usa en máquinas más grandes con cojinetes de guía de manguito basculante, porque brinda una indicación de cuánto espacio libre del cojinete se está utilizando cuando se producen altos niveles de vibración en el rotor.

6.3.2 Monitoreo de un motor de inducción

Si hay barras de rotor rotas en el rotor de un motor de inducción con jaula de ardilla (SCI), la atracción magnética en el rotor estará desequilibrada, ya que en algunas de las ranuras del rotor no habrá una corriente completa y, por lo tanto, en ciertas partes de la periferia del rotor el campo magnético será menor.

Además, si se realiza un análisis de frecuencia de vibración, la presencia de roturas en el devanado de jaula de ardilla quedará indicada mediante bandas laterales alrededor de la frecuencia de la velocidad de rotación y en múltiplos de esta que se eliminan ($\pm$ frecuencia de deslizamiento $\times$ número de polos del devanado del estator). La siguiente figura muestra las bandas laterales a la velocidad de operación:

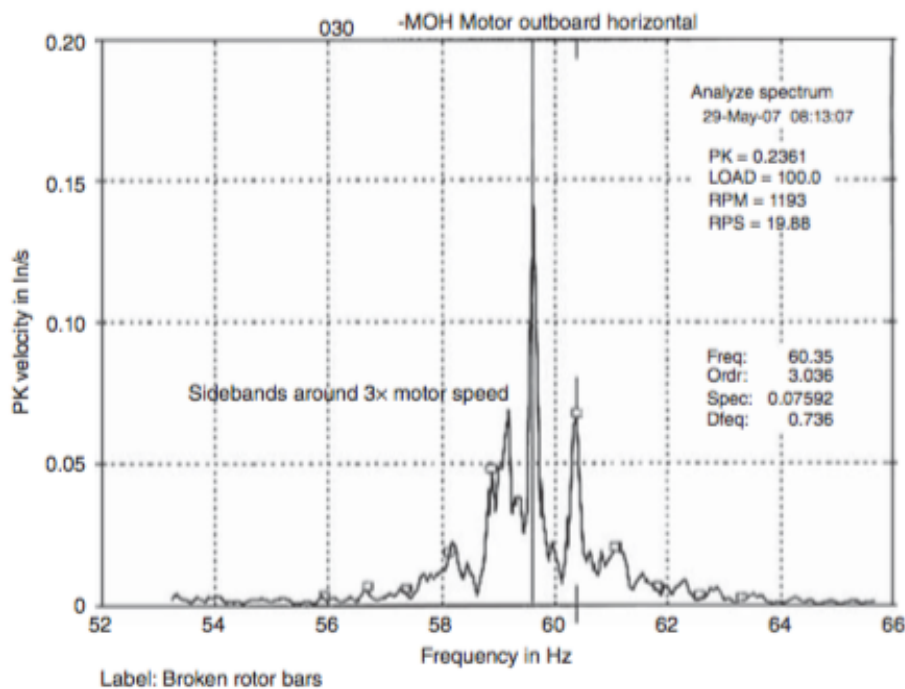


Figura 11: Espectro de frecuencia a 3x la velocidad de operación para un motor con barras rotas (S. Tilley, "Rotor Bar Problem in Electric Motor", 2009)

El monitoreo de vibraciones también puede identificar devanados de rotor con barras sueltas y/o apretadas, devanados fundidos a presión con vacíos en las secciones de la barra.

Si el núcleo del estator está suelto en el marco o si existen espacios de aire no uniformes, habrá una alta componente de vibración radial de la fuente de potencia (2x) que podrá ser detectada por las vibraciones de la caja de rodamientos, si estos están montados sobre soportes, unidos al marco del estator.

6.4 DESCARGAS PARCIALES

Dado que las PD son síntoma, o causa, de casi la mitad de los procesos de falla del estator discutidos en el Capítulo 3, el monitoreo de las PD en línea es una herramienta poderosa para evaluar la condición del aislamiento en estatores con devanado preformado.

El método de monitoreo de las PD puede ser realizado de forma continua y generalmente se realiza a elevada frecuencia (VHF).

6.4.1 Principios de monitoreo

Cada PD crea un pequeño pulso de corriente que se propagará por todo el devanado del estator. Como estos pulsos generalmente duran solo unos nanosegundos, se empleará la transformada de Fourier, para que cada pulso cree frecuencias desde CC hasta varios cientos de megahercios.

Estos pulsos eléctricos serán detectados y procesados de varias maneras diferentes por los diversos sistemas de monitoreo de PD. Los sistemas de monitoreo de PD en línea se presentan en IEEE 1434 e IEC 60034-27-2. En casi todos estos sistemas vamos a encontrar los siguientes elementos:

- Sensores, como antenas, capacitores de alto voltaje en los terminales de la máquina y/o transformadores de corriente de alta frecuencia (HFCT). Estos sensores son sensibles a las corrientes de alta frecuencia de las PD, pero son insensibles al voltaje de frecuencia industrial y sus armónicos. Los sensores se instalan permanentemente en el motor o generador.

- La electrónica convierte las señales de pulso de forma analógica a digital. El enfoque más común, suele ser utilizar analizadores de magnitud de pulso que registran el número de pulsos de PD por segundo frente a la magnitud de las mismas.
- Se suelen emplear técnicas de procesamiento de señales para reducir la información a cantidades manejables y/o ayudar a discriminar las señales de PD en el devanado del ruido eléctrico para garantizar una interpretación más confiable.

6.4.2 Sensores

Históricamente, el primer sensor utilizado para la medición de PD en línea fue un HFCT. El HFCT suele tener un núcleo de ferrita, alrededor del cual se colocan de 10 a 100 vueltas. El ancho de banda de la mayoría de los HFCT comerciales es de aproximadamente 100kHz a 100MHz, en una carga de 50 ohmios. El HFCT, como se usó originalmente, se instala alrededor del cable que conecta el punto neutro del generador con el transformador o impedancia de puesta a tierra del neutro.

Cada PD, que se origina en las bobinas/barras que operan a alto voltaje, se propaga a través del devanado y genera un pequeño pulso de corriente en el circuito de puesta a tierra del neutro, que es detectado por el HFCT.

Los sensores más populares utilizados en el monitoreo de PD en línea son capacitores de alto voltaje instalados en cada terminal de fase. Quizás el 90% de las decenas de miles de máquinas equipadas para el monitoreo en línea usan acopladores capacitivos. [7]

El capacitor bloquea el alto voltaje a 50Hz o 60Hz mientras sirve como una ruta de baja impedancia para pulsos de PD de alta frecuencia. La calificación de capacitor más común es 80pF. En general, los condensadores alimentan una carga de 50 ohmios. El ancho de banda básico del sistema de detección se forma a partir del filtro de paso alto de un condensador en serie con una resistencia. Un capacitor de 80pF será capaz de detectar un contenido de frecuencia del pulso de la PD por encima de 40MHz.

6.4.3 Adquisición de datos

La actividad de las PD en una máquina depende en gran medida de varios factores más allá de la condición previa del aislamiento:

- voltaje del estator (el aumento del voltaje aumenta fuertemente la PD);
- temperatura de devanado (si la pared de tierra está delaminada, entonces la temperatura aumenta y la PD disminuye a medida que los vacíos internos se reducen debido a la expansión de los componentes);
- carga de la máquina (si las bobinas/barras están sueltas en la ranura, el aumento de carga aumentará las fuerzas magnéticas en las bobinas/barras, aumentando la PD).

La edad del motor, también es un factor a considerar. Los aislamientos más nuevos presentarán mayor actividad de PD. El epoxi o el poliéster de los devanados nuevos generalmente están completamente curados cuando se ensaya sobre el estator por primera vez, se curarán gradualmente en los primeros meses de operación. Dado que la resina parcialmente sin curar tiene una constante dieléctrica más alta que la resina curada, se impondrá una mayor tensión en cualquier pequeño vacío dentro de la pared de tierra, lo que resultará en una mayor actividad de PD hasta que la resina esté completamente curada.

Todas estas consideraciones deberán tenerse en cuenta al ensayar sobre la máquina, de forma que se garantice precisión en las lecturas obtenidas.

Actualmente el sistema de monitoreo continuo de PD está más extendido al permitir garantizar que estas PD se detecten con la máxima cantidad de tiempo disponible. Con un software adecuado, los sistemas de monitoreo continuo aseguran que los datos de PD se recopilen junto a las condiciones de funcionamiento de la máquina.

Dichos sistemas también permiten la lectura remota de los resultados de DP, con las comunicaciones apropiadas desde la planta. Esto puede reducir significativamente los costos de monitoreo en plantas en áreas remotas.

6.4.4 Interpretación de datos

La instrumentación de monitoreo de la PD registrará todos los pulsos de PD que se detecten:

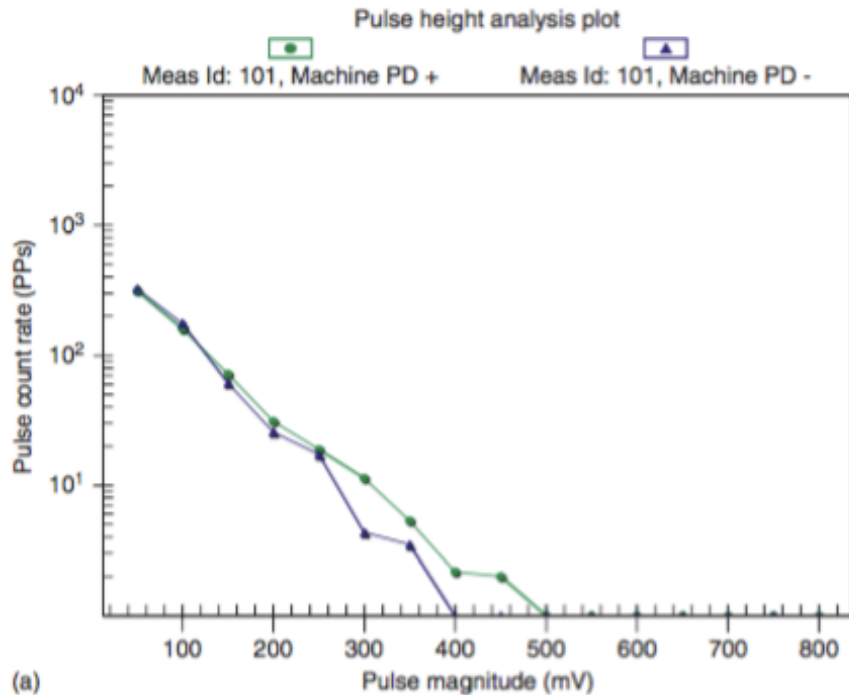


Figura 12: Representación de la magnitud del pulso tomada del sistema de detección online de DP (Iris Power-Qualitrol [59])

Los analizadores de magnitud de pulso permiten que la PD quede registrada digitalmente como un gráfico del número de pulsos frente a la magnitud del mismo. Los monitores de PD modernos también muestran el análisis de la magnitud del pulso en función de la posición de la fase de CA. Dado que se producen pulsos de PD positivos y negativos, estos contadores de pulsos electrónicos tienden a registrar y mostrar las dos polaridades por separado.

El resultado clave a interpretar para cualquier monitor de DP en línea es la magnitud máxima de PD. La lectura de PD más alta registrada, denominada Q_m , es importante porque el sitio de dicha PD asociado con el pico de PD generalmente tendrá el mayor volumen de deterioro. Probablemente si se produce un fallo, ocurrirá en este lugar.

Con la lectura de Q_m , se podrá realizar un estudio tendencial de la PD o un análisis de comportamiento por comparación con máquinas similares.

- Tendencia con el tiempo

Este es el método más común para la interpretación de los datos de DPDP, independientemente del sistema de detección que se utilice. Si el devanado se deteriora, la cantidad de los defectos aumentará, lo que aumenta Q_m . Por lo tanto, si Q_m aumenta con el tiempo, entonces el deterioro aumenta y existe un mayor riesgo de falla. La duplicación de Q_m , cada 6 meses, es una indicación de que se está produciendo un rápido deterioro.

Las PD tienden a saturar después de un fuerte incremento con los años; es decir, la PD puede aumentar rápidamente durante varios años, pero, si el deterioro es significativo, Q_m y otros indicadores de actividad de PD tienden a estabilizarse e incluso pueden disminuir.

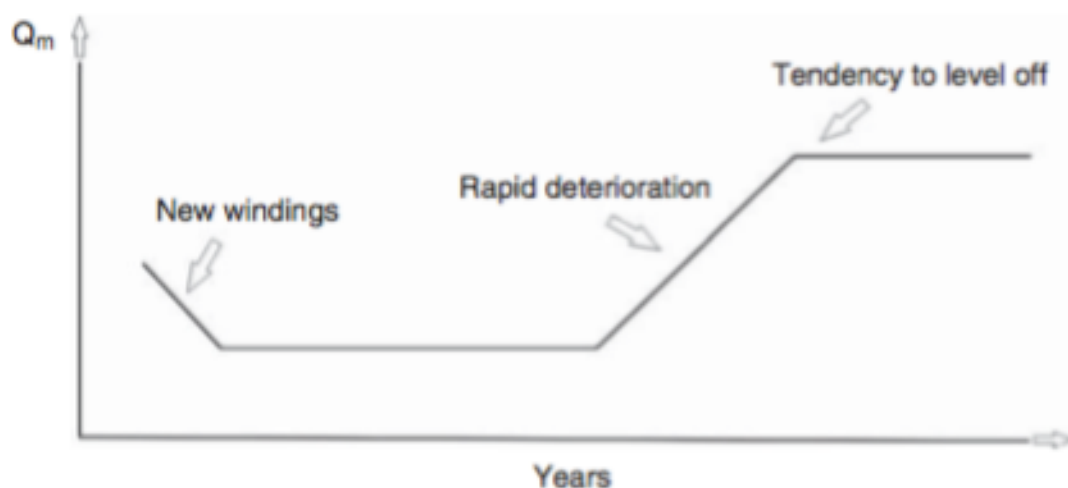


Figura 13: Tendencia típica de la magnitud de las DP con el tiempo en el devanado del estator (Ian C. Greg C. et al., 2014 [7])

- Comparación con máquina similares

La primera medición en una máquina puede proporcionar alguna indicación sobre la condición relativa del aislamiento, pero es la comparación con otras máquinas la que revelará el estado de las PD en el caso de los sistemas de monitoreo instalados en devanados más antiguos, en los que la tendencia puede ser plana. La mejor comparación se da cuando todas las máquinas son idénticas y las mediciones se hacen con el mismo sistema de monitoreo bajo las mismas condiciones de operación.

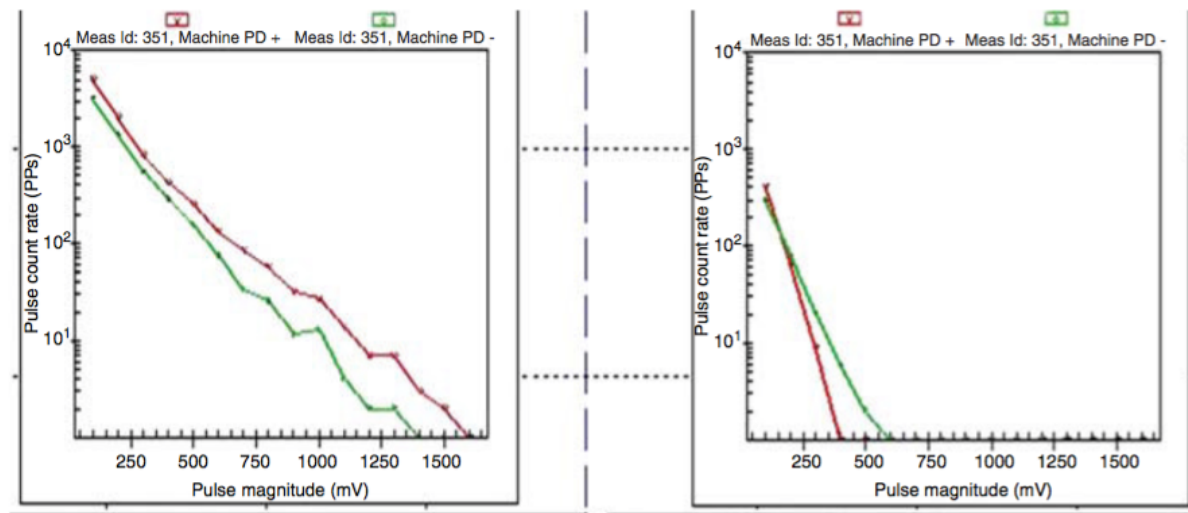


Figura 14: Comparación de la actividad de las DP en dos estatores de 13.8kV y 80MVA. El estator con una magnitud mayor (izquierda) está más deteriorado (Iris Power-Qualitrol [59])

La máquina con el Q_m más elevado tendrá el deterioro más severo y, por lo tanto, es más probable que falle. Debido a que las PD son erráticas, las diferencias de $\pm 25\%$ no son significativas. Sin embargo, si una máquina tiene 10 veces más actividad que otra máquina idéntica, entonces el estator con la mayor actividad deberá someterse a más pruebas y/o inspecciones.

6.4.5 Identificación de proceso de fallo

Si la tendencia de Q_m está aumentando y/o la lectura individual es alta en contraste a la de máquinas similares, entonces los datos de PD pueden ser analizados en profundidad para tratar de determinar cuál es el motivo de esta actividad. El primer indicio de posibles procesos de deterioro proviene del efecto de la "polaridad". Las PD normalmente generarán pulsos tanto positivos como negativos, resultando evidentemente en un Q_m positivo y negativo. Si la relación de $+Q_m/-Q_m$ es:

- Más de 1.5:

Se tiene un predominio del pulso positivo, por lo que la PD podría estar ocurriendo principalmente en la superficie de las bobinas en la ranura. Esto es una indicación de que los devanados están sueltos dentro de la ranura o, de que alguno de los revestimientos semiconductores ha comenzado a deteriorarse.

- Menos de 0,5:

Se tiene un predominio de pulso negativo, lo que puede señalar que la PD está ocurriendo cerca de los conductores de cobre. El predominio negativo ocurriría si las bobinas estuvieran mal impregnadas o si se produjera un deterioro en el ciclo de carga dentro de la ranura.

- Alrededor de 1,0:

En este caso es posible que se esté produciendo una PD en el devanado del extremo, o bien, que haya delaminación de los conductores en la pared de tierra, generalmente causada por el deterioro térmico.

El efecto de polaridad solo será relevante si la PD se produce entre fase y tierra, y no entre fases. Esto se debe a que las PD de fase a fase crean un pulso positivo en una fase y un pulso negativo en la otra fase, o viceversa.

Como se discutió anteriormente, en una máquina con alta actividad, la PD puede verse afectada por varios factores operativos, como la carga, la temperatura del devanado y la humedad. Aunque estos casos dificultan la predicción de la tendencia de los datos a lo largo del tiempo, si se realizan pruebas controladas en la máquina, estas mismas influencias ayudarán a determinar el posible mecanismo de deterioro.

- Si Q_m aumenta con el aumento de la carga (con una temperatura en los devanados constante), entonces, quizás, las bobinas/barras estén sueltas en la ranura.

- Si Q_m aumenta con el aumento de temperatura (con carga constante), entonces el revestimiento de alivio de tensión puede estar deteriorándose.

- Si Q_m disminuye con el aumento de la temperatura del devanado (y el aumento de la carga en muchas máquinas), puede que se haya producido un deterioro térmico o un deterioro del ciclo de carga.

- Si Q_m disminuye con el aumento de la humedad, es probable que se estén produciendo DP en el devanado final, debido al "tracking" eléctrico.

7. EL GEMELO DIGITAL

Como ya se vio en la introducción, el gemelo digital es una nueva tecnología de sistema experto empleado en la industria 4.0 que trata de reunir la información tomada por los sensores y agruparla de forma holística para construir un modelo virtual que simule la operación de la maquinaria.

La necesaria transición a la industria 4.0, ha conducido a la renovación de los equipos, haciendo que estos sean más flexibles y adaptables frente a las emergencias. La operación confiable y a largo plazo de los equipos tiene como requisitos un diseño intrínsecamente seguro y el monitoreo continuo de su condición.

La respuesta a esta necesidad ha conducido al desarrollo del GD. Consiste en un modelo habilitado para la predicción a tiempo real que representa de forma fiel un activo físico concreto. Como cualquier sistema experto, toma los valores reunidos por los sensores (temperaturas, velocidades...) y ofrece resultados numéricos como producto de complejas operaciones construidas para caracterizar un proceso concreto. La diferencia con los sistemas más convencionales reside en la dimensión de la aplicación, la interconexión, la velocidad de operación y su carácter predictivo.

Por ejemplo, si sobre una grúa se dispone un sensor que tome la medida del peso de la carga, se puede programar el gemelo virtual para que estime la deformación de la pluma bajo esa carga, así como la prevista tras cierto trabajando en esas mismas condiciones. Se podrá entonces plantar ciertas alarmas para el caso en que esta deformación exceda la admisible para el material o incluso vincular la misma al efecto que tiene sobre un tercer elemento, por ejemplo, la longitud del cable.

En general, se entiende como gemelo digital a la representación virtual de un activo físico que permite controlar el estado general o bien la condición particular de una parte o el conjunto del sistema, y que se utiliza para la optimización del diseño del sistema, así como para la predicción de defectos y el mantenimiento proactivo.

7.1 MODELADO DEL GEMELO DIGITAL DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE TRES FASES

Los gemelos digitales usados en sistemas motores son de gran importancia para mejorar la eficiencia de la planta, reducir los tiempos de los ciclos operativos y las correcciones sobre el diseño al conceder la oportunidad de simular escenarios, integrar los datos obtenidos, testear y monitorear la máquina.

Con un gemelo digital es posible evaluar cualquier valor físico conociendo la corriente instantánea y el comportamiento electromecánico y térmico del motor de inducción en ese momento. Sin embargo, no será posible instalar sensores en todos los elementos de la máquina (rotor, rodamientos...). Por tanto, algunos valores suelen ser estimados o descritos por parámetros como, por ejemplo, la resistencia eléctrica del rotor. Se trata en estos casos de asemejar el funcionamiento real del motor de forma simple, al no contar con una retroalimentación constante que otorgue un valor más aproximado al real.

Por ejemplo, fijando sensores virtuales, para medir las corrientes trifásicas del estator, un gemelo digital puede simular los voltajes del estator, las corrientes inducidas del rotor, el torque generado, y todos los parámetros necesarios para el Control Orientado al Campo (FOC) (Stocco, 2020) [40].

En realidad, el valor que se trata de reproducir, varía con las diferentes condiciones de temperatura o carga. Esta variación constante hace que sea difícil modelar el sistema correctamente, lo que puede llevar a una pérdida de eficiencia cuando el motor opere en condiciones diferentes a la nominal.

Para los sistemas de motores eléctricos, a menudo se aplica un gemelo digital para la detección de fallos. Mediante la medición de corrientes, el par calculado se comparará con ciertos umbrales, utilizados para mostrar mensajes de advertencia según sea el tipo de anomalía detectada (Stocco 2020). Como ya se vio en los capítulos 3 y 4, estas anomalías se encuentran generalmente vinculadas a cambios en la temperatura

Las altas temperaturas pueden aumentar la probabilidad de problemas de eficiencia y fallos en el aislamiento. Si las condiciones de trabajo (par de carga y velocidad de rotación) son constantes y estables durante suficiente tiempo, un modelo térmico dentro de un gemelo digital permitiría calcular los valores futuros de temperatura y resistencia, consiguiendo así que la refrigeración pueda activarse cuando sea necesaria (Stocco, 2020) [40].

Los gemelos digitales para el control de la energía de generación y el estado de los generadores, han supuesto un cambio radical en el paradigma de la manutención y el seguimiento en plantas energéticas. Esta tecnología le da al ingeniero la capacidad de administrar y monitorear de forma remota, a través de un panel de control, el estado de los motores en su ubicación. En instalaciones de aerogeneración, el control del estado de las corrientes y las tensiones percibidas puede registrarse entre ciertos márgenes a partir de los cuales, alertas serán enviadas a los operadores (SmartSense 2018).

Dada la cantidad de fenómenos que tienen lugar durante la operación de una máquina eléctrica y la profusión de materias involucradas, la creación de un gemelo digital, se pone en manos de un equipo multidisciplinar de expertos que puedan parametrizar el modelo haciendo que se aproxime lo máximo a la realidad. La dimensión y precisión del proyecto depende tanto de la capacidad económica como logística de la empresa interesada.

7.2 ETAPAS INVOLUCRADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL GEMELO DIGITAL

Se identifican las siguientes fases constructivas:

- Creación:

Los elementos físicos se configuran con un gran número de sensores para medir las entradas críticas del proceso y su entorno. Las mediciones de los sensores pueden clasificarse a grandes rasgos en dos categorías: Medidas operativas relacionadas con las pautas de rendimiento físico de los equipos productivos y datos ambientales o externos que afecten al funcionamiento de los elementos.

- Comunicación:

La comunicación en los gemelos digitales será entre sus componentes y la interfaz de datos. Se identifican los siguientes elementos en esta fase: El procesamiento de extremos, que emplea su interfaz para la conexión de los sensores y la transmisión de las lecturas relevantes a través del sistema; La interfaz de comunicación ayuda a transferir la información del sensor a las funciones integrales; La seguridad de extremos introduce cortafuegos, claves de aplicación, cifrado y certificados de dispositivos para evitar que la información sea filtrada o alterada.

- Agrupación:

Consiste en la introducción de los datos encontrados en un repositorio. Las medidas adquiridas son procesados y preparados para el análisis.

- Análisis:

Los datos generados por el sistema de análisis.

- Reconocimiento:

Representación de los datos analíticos recogidos, a través de un cuadro de mando con ciertos elementos visuales, destacando las áreas en las que los modelos de gemelos digitales y los análogos del mundo físico muestran diferencias inaceptables en una o más dimensiones y señalando las áreas que pueden necesitar ser investigadas o modificadas.

- Acción:

La retroalimentación de los conocimientos obtenidos del paso previo en los elementos físicos y los procesos digitales es lo que hace posible el éxito del gemelo digital. La información se pasa por un codificador y se introduce en el actuador del proceso, responsable del movimiento o control del mismo.

El gemelo digital, no siempre será responsable de la acción tomada sobre su contrapartida física. Se trata principalmente de una herramienta para la supervisión y el monitoreo del estado de la máquina; La acción puede ser lograda por medios externos al gemelo.

7.3 COMPONENTES DE UN GEMELO DIGITAL

Los gemelos digitales requieren típicamente de varios elementos:

1: Modelo virtual: Una réplica virtual del activo físico, como puede ser una máquina, un edificio o un sistema. Este modelo puede incluir información detallada sobre el diseño del activo, su geometría y propiedades.

2: Datos de sensor: Información en tiempo real capturada de los sensores y demás dispositivos de seguimiento usados para actualizar y validar los datos proporcionados por el modelo virtual.

3: Simulación y analítica: Herramientas y capacidad de ensayo para que el usuario pueda optimizar el desempeño del activo físico. Esto puede incluir la simulación de diferentes escenarios y analíticas que identifiquen patrones y tendencias en los datos.

4: Interfaz de usuario: La forma que tienen los usuarios de interactuar con y visualizar el gemelo digital. Es posible incluso desarrollar un sistema web, una interfaz para dispositivos móviles o incluso una experiencia de realidad virtual o aumentada.

5: Conectividad: La capacidad de conectar con otros sistemas y con ciertas herramientas de digitalización, tales como IoT, BIM, y softwares de otras empresas; lo que permite la integración perfecta de datos y modelos entre distintos sistemas.

6: Seguridad: Medidas tomadas para proteger los datos y al modelo de los accesos y la manipulación no autorizada. Se incluye el encriptado, el control de accesos y otros protocolos de seguridad que aseguran la integridad y la confidencialidad del gemelo digital.

Estos elementos que caracterizan al gemelo digital, requieren por su parte de ciertos dispositivos y software especializado. A continuación, se explican algunos de los dispositivos más comúnmente vistos en las instalaciones de gemelos digitales. No obstante, cada sistema, tendrá sus particularidades, por lo que los instrumentos usados en cada caso, dependen de la aplicación.

7.3.1 Sensores

Estos aparatos son empleados para recolectar datos del objeto físico o del sistema que está siendo modelado. Los sensores pueden medir un amplio rango de propiedades: Temperatura, humedad, presión, vibración y más. Según sea la aplicación, se habrán de usar distintos tipos de sensores.

En el capítulo 6, se muestran los sensores térmicos óptimos para el modelo considerado. Se tratan de sensores termopares, introducidos en las ranuras de la máquina eléctrica. Como se verá más adelante, esta disposición ofrece medidas de la temperatura en una localización que es de crítica importancia para el modelado digital del gemelo.

Para aplicaciones menos exigentes, es posible trabajar con sensores multi-standard. Se tratan de dispositivos de pequeño tamaño que guardan una variedad de sensores en su interior. Si bien cuentan con una durabilidad más reducida, que impide su funcionamiento en posiciones más cruciales, ofrecen una amplia capacidad de medida en un solo útil y la posibilidad de conexión instantánea a red.

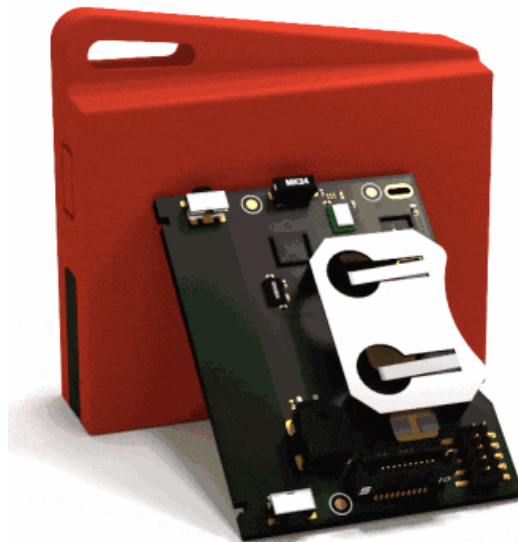


Figura 15: Multi-Standard SensorTag CC2650STK (Texas Instruments [5])

El dispositivo mostrado en la figura superior es un ejemplo de sensor multi-standard fabricado por Texas Instruments. Incluye sensores de medida de humedad, temperatura, presión, un acelerómetro y un giroscopio.

7.3.2 Dispositivos IoT

Los dispositivos IoT (Internet of Things) son empleados para transmitir los datos recogidos por los sensores a la nube, o a otro almacén según sea el interés del usuario o su capacidad administrativa.

Estos dispositivos son, entre otros, los denominados “Gateways”. Se tratan de ordenadores que operan como nexo entre distintas redes y aplicaciones. Estos dispositivos pasan la información, los datos u ciertas comunicaciones de un formato de protocolo a otro, a través de los softwares de propiedad específicos para cada aplicación. Un router, puede funcionar también como “Gateway” [60].

También son los responsables de la comunicación de información entre las redes empresariales y el Internet. Las empresas suelen usar protocolos en sus redes de área local (LANs), que difieren de los empleados por Internet. En estos casos, el “Gateway”, actuará como un conversor de protocolo que permitirá el intercambio de información con Internet.

Pueden también entrar en la categoría de dispositivos IoT los propios de la computación de proximidad o “Edge Computing”. Estos son dispositivos que procesan en cierta medida los datos antes de comunicarlos. Existen algunos sensores capaces de procesar la información registrada, por ejemplo, son capaces de realizar una conversión de unidades o de desprestigiar ruidos y datos irrelevantes, de forma que se limite la cantidad de datos que recibe el sistema. La aplicación del paradigma de la computación de proximidad va a permitir ampliar la velocidad operacional del sistema, ayudando en el paso al procesado en tiempo real.

En conclusión, para la elaboración de un gemelo digital, serán necesarios dispositivos capaces de recibir la información, ya sea a través de puertos específicos para buses de datos o a través de alguno de los sistemas de transmisión “wireless”, tales como Bluetooth o redes inalámbricas locales. Dichos dispositivos, serán también capaces de comunicar esta información a la plataforma de almacenamiento y procesado.

7.3.3 Recursos computación en la Nube

Los recursos de computación en la nube son los empleados para almacenar y procesar los datos recolectados por los sensores. La nube también es la encargada de “hospedar” al gemelo digital, al cual cualquier usuario puede acceder, ya sea para supervisar, analizar o simular, desde cualquier puerto de acceso a internet.

La nube es el concepto que refiere a un conjunto de servicios (almacenaje, servidores, bases de datos, software, analíticas...) disponibles en el Internet (“the cloud”) y que ofrecen al usuario recursos más flexibles, facilidad para obtener innovación y economías de escala. El usuario podrá acceder a estos servicios desde cualquier punto de conexión a Internet. Algunos servicios son gratuitos, mientras que otros requieren de un desembolso económico.

La computación en nube o “Cloud Computing” se refiere típicamente al uso de software especializado, como plataformas de administración, software de infraestructura y herramientas de desarrollo. Estos programas se usan para crear, establecer y gestionar aplicaciones y servicios en línea.

Ejemplos de plataformas de administración de los servicios en la nube son:

- AWS Management Console
- Azure Portal
- GDP Console

Ejemplos de software de infraestructura en la nube son:

- Amazon Elastic Compute Cloud (EC2)
- Microsoft Azure Virtual Machines
- Google Compute Engine (GCE)

Ejemplos de herramientas de desarrollo

- AWS Elastic Beanstalk
- Azure App Service
- Google App Engine

7.3.4 Software de modelado 3D

El software de modelado en 3D, es empleado para crear una réplica virtual del objeto físico o sistema. Los programas empleados permiten reproducir modelos detallados de elementos complejos en tres dimensiones. La forma, el material constitutivo y el tamaño, quedan registrados y representados en el modelo virtual que este software configura.

Existen varios softwares capaces de realizar el modelado 3D de un sistema, pero son principalmente tres los usados para la representación virtual de un activo físico en el contexto gemelo digital [37].

- Autodesk 3ds Max
- Sketch Up
- Autodesk Maya

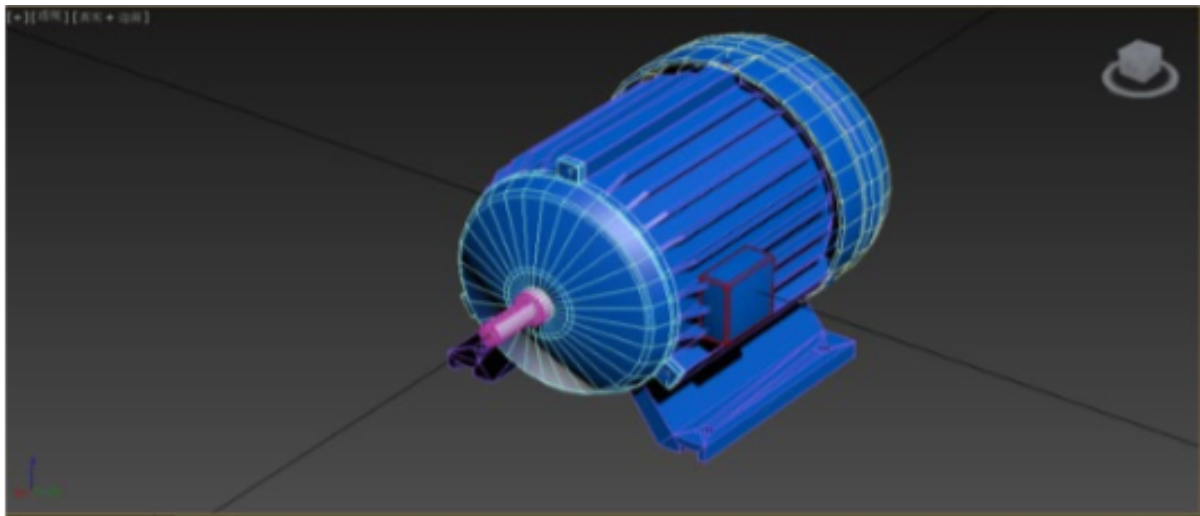


Figura 16: Modelo de generador trifásico asíncrono realizado con Autodesk 3ds Max [37]

7.3.5 Software de simulación

El software de simulación es empleado para reproducir las simulaciones en el gemelo digital, para probar y analizar su comportamiento. Este software puede ser usado para simular diferentes escenarios y condiciones, y puede proveer valiosas perspectivas sobre la actuación de su contrapartida en el mundo material. Existen una gran variedad de herramientas de simulación que pueden ser usadas para la creación de un gemelo digital.

1. Software de simulación multi-físicas: Estas herramientas son capaces de simular el comportamiento de un gran rango de sistemas físicos y se pueden usar para crear gemelos digitales, para cualquier contexto, desde sistemas mecánicos hasta edificios. Algunos ejemplos de estos programas son: ANSYS, COMSOL Multiphysics y Abacus.
2. Software BIM (Building Information Modeling): El software BIM es más comúnmente empleado para crear gemelos digitales de edificios y de infraestructura. Algunos ejemplos son: Autodesk Revit o ArchiCAD.
3. Software de proceso de simulación: Estas herramientas se usan para simular el comportamiento de procesos industriales, y pueden también ser usadas para crear gemelos digitales de instalaciones de fabricación, plantas químicas y otras operaciones industriales. Ejemplos de este tipo de programa son: Aspen HYSYS, ProSimPlus y SuperPro Designer.
4. Software de simulación de gemelos digitales: Programas especialmente creados para la simulación con gemelos digitales, como: PTC Thingworx Siemens Mindsphere, GE Predix y Bosch IoT Suite.
5. Motores de Juego: Los motores para juegos están ganando importancia de forma incremental de cara a la creación de simulaciones de gemelo digital, especialmente para las aplicaciones de realidad virtual. Algunos de los ejemplos incluyen: Unity y Unreal Engine.

7.3.6 Inteligencia Artificial y Machine Learning:

Las herramientas de Inteligencia Artificial y Machine Learning pueden ser utilizadas para analizar los datos y hacer predicciones del comportamiento futuro del sistema físico. Estas herramientas pueden identificar patrones y anomalías en los datos, lo que permite anticipar los posibles fallos.

Estas herramientas pueden ser incorporadas en la propia programación del gemelo, por lo que se pueden decir que no requieren de un software extra. En el caso práctico, se observan mejor estas capacidades predictivas.

7.3.7 Herramientas de visualizado

Los dispositivos de visualizado son los usados para exhibir el gemelo digital y sus datos de un modo accesible para el usuario. Estas herramientas se pueden usar para crear modelos 3D interactivos, "dashboards" o tablas de instrumentos y otras opciones de visualización que faciliten la lectura de los datos expuestos.

La lista de componentes descrita, pretende describir una imagen general de los elementos que son necesarios para la configuración convencional de un gemelo digital. Otras tecnologías pueden ser usadas según la aplicación del gemelo y sus características intrínsecas.

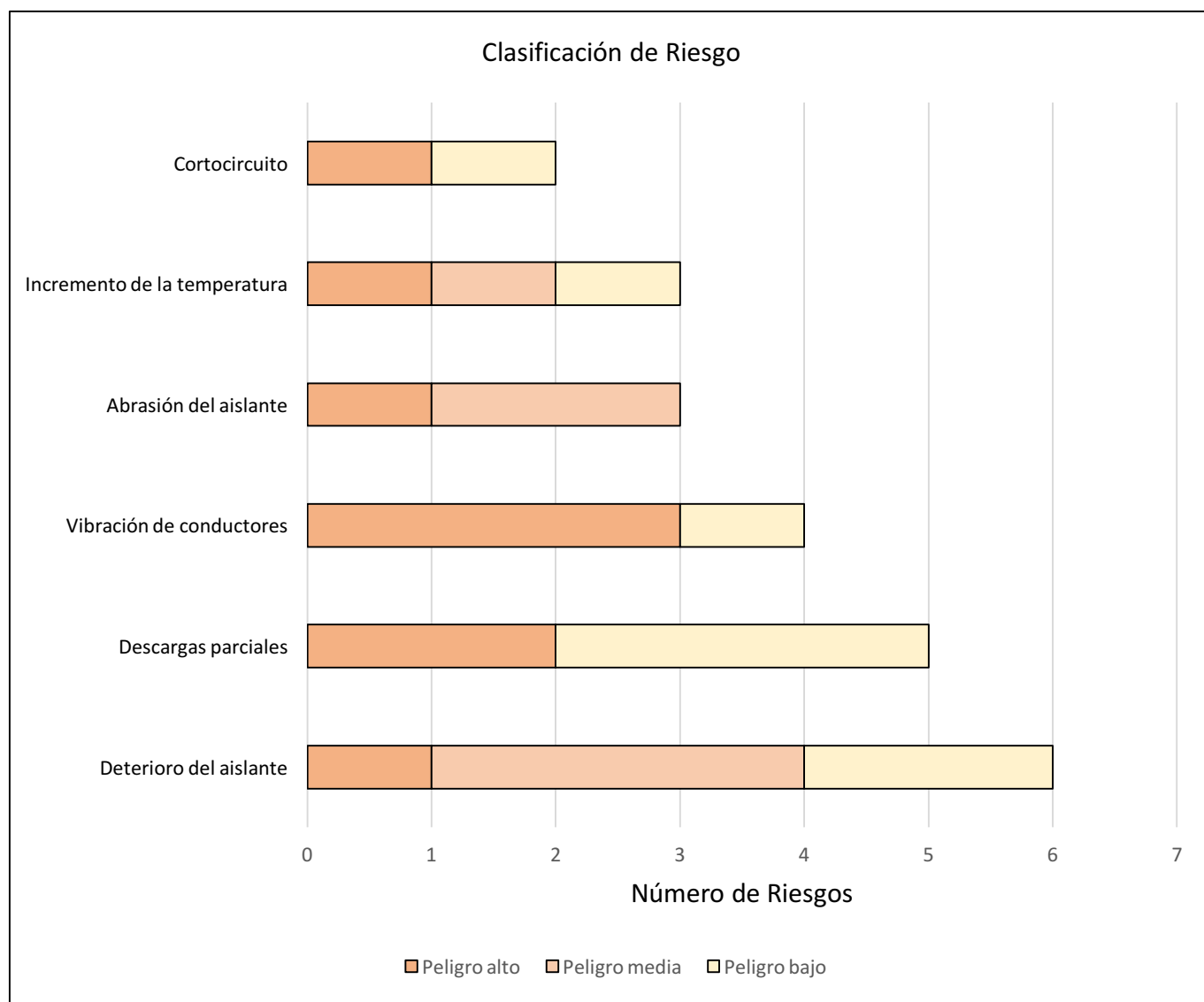
Por ejemplo, el uso de tecnología de realidad virtual y aumentada, puede utilizarse para visualizar el gemelo digital de un modo más inmersivo, que permita al usuario la interacción con el modelo virtual de una forma más realista.

El carácter multidisciplinar y la cantidad de softwares y dispositivos con los que es posible trabajar, hace del diseño de un gemelo digital completo una labor ardua y compleja. Por otra parte, la configuración y programación del mismo es un trabajo que requiere de un equipo de expertos especializados, que puedan reproducir los fenómenos y las condiciones de operación. Por esto mismo, para el caso práctico, se ha optado por elaborar un módulo simple, que muestre el proceso de creación, configuración y funcionamiento del mismo.

8. CASO PRÁCTICO

Se elaborará a continuación un posible módulo de gemelo digital. Se verán los pasos involucrados en su diseño y las consideraciones tomadas a fin de obtener un modelo fiable y de extraer datos relevantes para el problema que se plantea en este documento.

Durante la elaboración de la matriz de modos de fallo y análisis de efectos se llegaron a las siguientes conclusiones:



Gráfica 1: FMEA de los devanados del estator (Elaboración Propia)

La matriz FMEA se podrá observar en los anexos 9.1.1 y 9.1.2

Como se observa, el deterioro del aislante bien sea este motivado por las reacciones químicas que tienen lugar a altas temperaturas en los materiales empleados como tales, bien por el propio envejecimiento y desgaste que conlleva el uso y la edad, es la principal causa de fallo del aislamiento.

El estudio de las descargas parciales también fue considerado en las etapas iniciales de este proyecto, pero la dificultad y las variedades que presenta este fenómeno confieren a las ecuaciones asociadas al mismo una dificultad demasiado elevada para la dimensión que pretende alcanzar este escrito.

Por lo tanto, y dada la amplitud de los defectos posibles, volcaré mi estudio en el modelado del deterioro del aislante. Este mismo deterioro, puede de por si conllevar un estudio de considerable magnitud si no se toman ciertas licencias y se trata de acotar el problema.

8.1 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

El fenómeno del deterioro queda íntimamente relacionado a la temperatura puesto que esta determina el instante en que ciertas reacciones como la de oxidación de aislamiento van a tener lugar. Es por esto que estudios como el propuesto por L.C. Whitman [46], describen el deterioro en función de tiempo, esto es, el tiempo relativo de vida remanente del aislamiento frente a la edad real del mismo en función de la temperatura de operación y del tipo de aislante empleado.

Otros documentos, como el de Thomas W. Dakin [47], buscan la forma de medir los cambios en las propiedades físicas o eléctricas del aislamiento tras el envejecimiento térmico. Se emplea para este caso la consideración de una concentración particular del químico constituyente del aislante.

Expresándolo matemáticamente, se puede asumir que:

$$P = f(C) \quad (1)$$

Donde P es la propiedad que se pretende estudiar y C la concentración del constituyente químico en cuestión. En general, la transformación molecular del material con el tiempo, se suele expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n \quad (2)$$

Donde C es el número variable por unidad de volumen o concentración, K es la constante de velocidad y n será el exponente que determine el orden de la reacción (generalmente entre 1 y 3). La constante de velocidad, K es dependiente de la temperatura, la concentración de catalizadores y la de otros posibles agentes que intervengan en la reacción.

Integrando la ecuación previa, asumiendo que $n=1$, se tiene que:

$$\log_e C = -Kt + \log_e C_0 \quad (3)$$

$$C = C_0 e^{-Kt} \quad (4)$$

Desafortunadamente, muchos procesos de deterioro en el aislamiento no siguen un simple mecanismo de reacción de primer orden. Compuestos que entren o afecten a la misma, han de ser tenidos en cuenta, por lo que, para trabajar en este fenómeno, se suelen emplear fórmulas que describan la transformación de forma general:

$$f_0(C) = -K_0 t \quad (5)$$

En esta nueva fórmula, la constante K_0 es dependiente de la temperatura, pero no del tiempo. La forma de la función $f_0(C)$ se asume independiente a la temperatura. En el caso de una simple reacción de primer orden, la ecuación (5) sería igual a la (3) y $f_0(C)$ sería igual a $\log_e C$.

Ahora si se introduce la relación entre la propiedad física y la concentración del agente químico constituyente más importante dado en la ecuación (1), se obtiene la siguiente ecuación:

$$f_0'(P) = -K_0 t \quad (6)$$

Un diagrama gráfico de $f_0'(P)$ frente al tiempo devuelve una línea recta, y una línea recta, se puede extrapolar fácilmente para predecir la condición de la propiedad física en cualquier momento posterior tras determinar la pendiente.

En caso de no conocer la forma matemática de la función $f_0'(P)$, se podrá establecer mediante la medida y el trazado de una gráfica que represente el cambio de la propiedad física (P), a una temperatura elevada que permita finalizar el test en un tiempo razonable. La dependencia de la temperatura de la velocidad de reacción sigue muy de cerca una ley exponencial:

$$\frac{f_0'(P)}{t} = K_0 = Ae^{-B/T} \quad (7)$$

$$\log_e(K_0) = -\frac{B}{T} + \log(A) \quad (8)$$

En esta expresión A y B son constantes, T es la temperatura absoluta. En el siguiente ejemplo, se representa la reducción de la resistencia a tracción frente al tiempo empleando las fórmulas descritas.

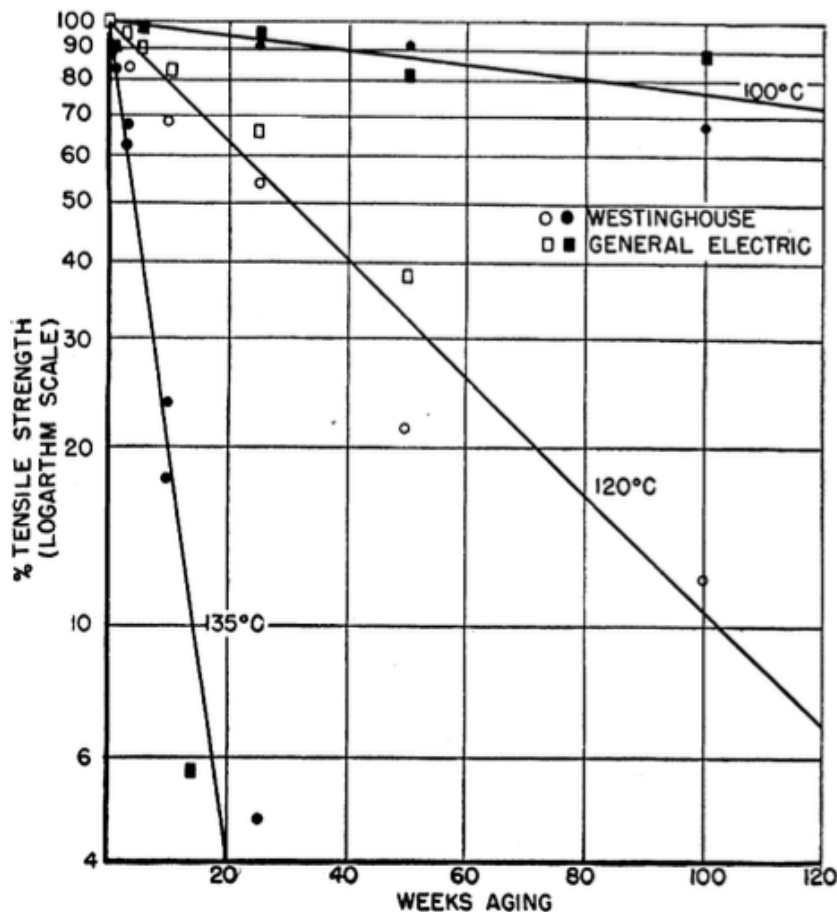


Figura 17: Decremento de la resistencia a tracción del papel de manila en aceite (refrigerado con hidrógeno) representado en escala logarítmica frente al tiempo a elevada temperatura [47]

En este gráfico, la evolución de la resistencia a tracción, queda como una línea recta. Al estar representada sobre una escala logarítmica, se intuye la dependencia con la reacción de primer orden (ecuación 3).

Sin embargo, aunque los métodos y las ecuaciones descritas nos dan una idea adecuada de la forma en que se estudian los fenómenos vinculados al aislamiento, lo buscado no es la evaluación de las propiedades del mismo con el tiempo sino la predicción de la vida remanente. Se tratará entonces de vincular el deterioro a las causas que lo producen y de sacar de la función que describe este fenómeno un pronóstico atinado de la vida útil remanente del aislante.

A tal fin se estudia el método propuesto por L.C. Whitman, que vincula de forma general el envejecimiento en unidades de tiempo, con la variación de la temperatura del generador. Una gran mayoría de los aislamientos se deterioran de acuerdo con la teoría de la velocidad de reacción de Arrhenius y, como ya se ha visto, los datos de envejecimiento del aislamiento se convierten en una función de línea recta si los logaritmos de las horas hasta el fallo (o hasta algún porcentaje de la resistencia original) se grafican como ordenadas y las temperaturas absolutas de envejecimiento se trazan como abscisas.

La ecuación de esta función puede representarse como:

$$\log_e(t) = \frac{b}{T} - a \quad (1.1)$$

Donde t es la vida del aislamiento en horas, T la temperatura absoluta del aislante en grados Kelvin b , es la pendiente de la curva de vida del aislante y a , el factor de frecuencia.

En esta ecuación, b , es también igual a la energía de activación para aquella reacción particular dividida por la constante de los gases ideales de Ludwig Boltzmann. Por otra parte, a , será el logaritmo del factor de frecuencia de encuentro molecular.

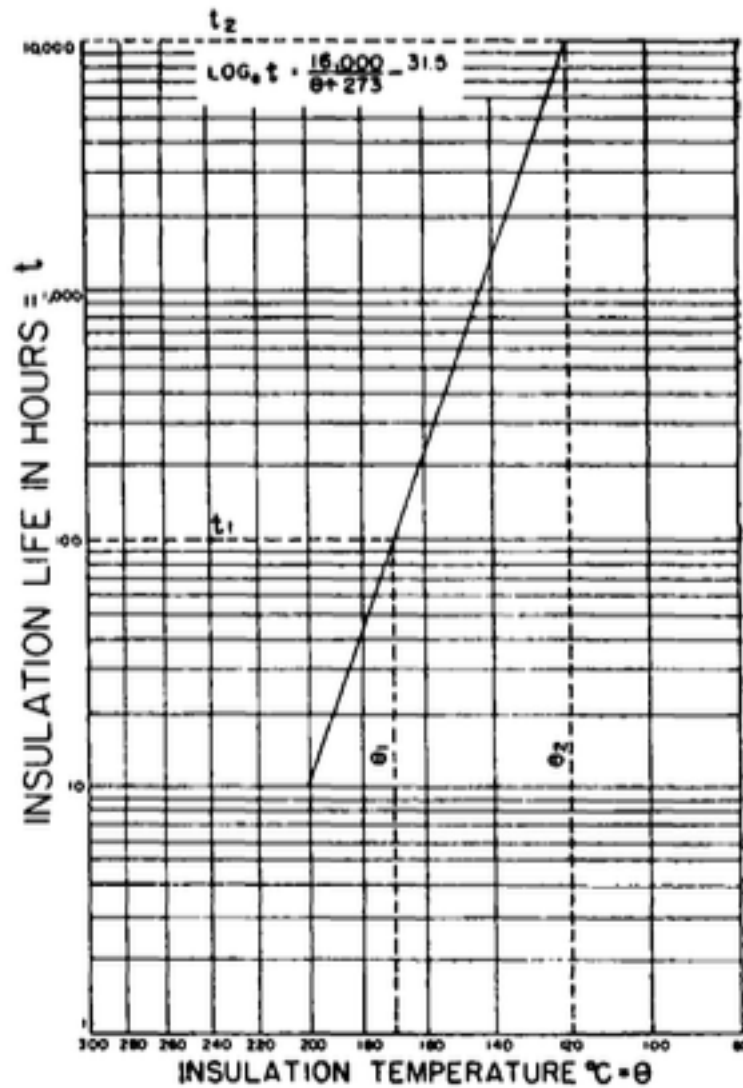


Figura 18: Ejemplo de curva de vida del aislamiento característica (L.C. Whitman et al., 1961 [46])

La figura superior, muestra la curva característica de vida del aislamiento. Comparando varios aislamientos, el valor de b tiene un interés particular, al ser la pendiente aquella que describe el envejecimiento frente al cambio en la temperatura.

La pendiente podrá evaluarse mediante la siguiente expresión:

$$b = \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (2.1)$$

Donde T_i es la temperatura absoluta en grados Kelvin (K) y t_i es el tiempo.

Para convertir la curva característica del aislamiento, a la ecuación 1.1 se ha de determinar el valor de a , que evidentemente será:

$$a = \frac{b}{\theta + 273} - \ln(t) \quad (3.1)$$

Donde θ , será la temperatura en grados centígrados para t horas de vida.

Es importante, por tanto, declarar el rango de temperaturas en el que las máquinas eléctricas instaladas en aerogeneradores van a oscilar, ya que, en función de este rango, los aislamientos empleados tendrán una cierta categoría y unas determinadas características químicas. La siguiente figura representa los rangos térmicos vinculados a cada categoría de aislamiento.

INSULATION CLASS					
A	E	B	F	H	
105°C	120°C	130°C	155°C	180°C	DESIGN TEMP.
				15°C	THERMAL MARGIN
			10°		
		10°C			
	5°C				
5°C					ALLOWABLE TEMP RISE
60°C	75°C	80°C	105°	125°C	
40°C	40°C	40°C	40°C	40°C	AMBIENT TEMPERATURE

Figura 19: Rangos de temperatura admisible según la categoría térmica del aislamiento [56]

Los proveedores de aislamientos, clasifican los empleados para turbinas de viento en la categoría F. Se estimará pues, que la temperatura media o de referencia prevista para la operación de un aerogenerador será de 115C°, dando un margen térmico admisible de 30C° y un margen crítico de 10C°.

La temperatura de referencia es tomada del fabricante (anexo 11.2)

En el desarrollo de un gemelo digital, se busca la simulación a tiempo real. La evaluación continua del estado no es posible, luego se buscará que los sensores tomen medidas en periodos lo más cortos posibles. Se evaluarán, por tanto, estos periodos y se compararán como distintos ciclos de carga.

A tal fin, es conveniente introducir el concepto de envejecimiento relativo. Este método, asignará un factor de unidad a la temperatura máxima o de referencia de la curva característica, sobre un periodo de tiempo específico. El envejecimiento a cualquier otra temperatura, será entonces una fracción o múltiplo del envejecimiento a la temperatura tomada como referencia.

La expresión que permite trazar las curvas de envejecimiento relativo es la siguiente:

$$\log(R) = b \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right] \quad (4.1)$$

Donde R es el envejecimiento relativo del aislamiento, esto es, el múltiplo o fracción del envejecimiento real que hubiese sido conseguido, de haber permanecido la máquina a la temperatura de referencia T_0 . La temperatura tomada como media de del ciclo analizado será T , y la pendiente de la curva de envejecimiento relativo, b .

8.2 ELABORACIÓN DEL ALGORITMO

Un método conveniente para la construcción de la curva de envejecimiento relativo sería fijar un valor para la pendiente b , determinar la temperatura de referencia y diagnosticar el envejecimiento obtenido en cada periodo de muestreo. Para que el proceso resultase más preciso, opté al principio por calcular la pendiente b , para cada periodo, tomando la temperatura previa como T_1 , y la actual como T_2 .

Sin embargo, como se mencionó previamente, la pendiente b , corresponde también a la energía de activación dividida por la constante de Boltzmann, por lo que es un valor intrínseco a la naturaleza del material aislante, con lo cual, no será posible iterar con el valor del mismo.

El código creado en Matlab correspondiente a la configuración del programa en su etapa inicial se registra en el anexo 11.3, junto con la explicación del mismo.

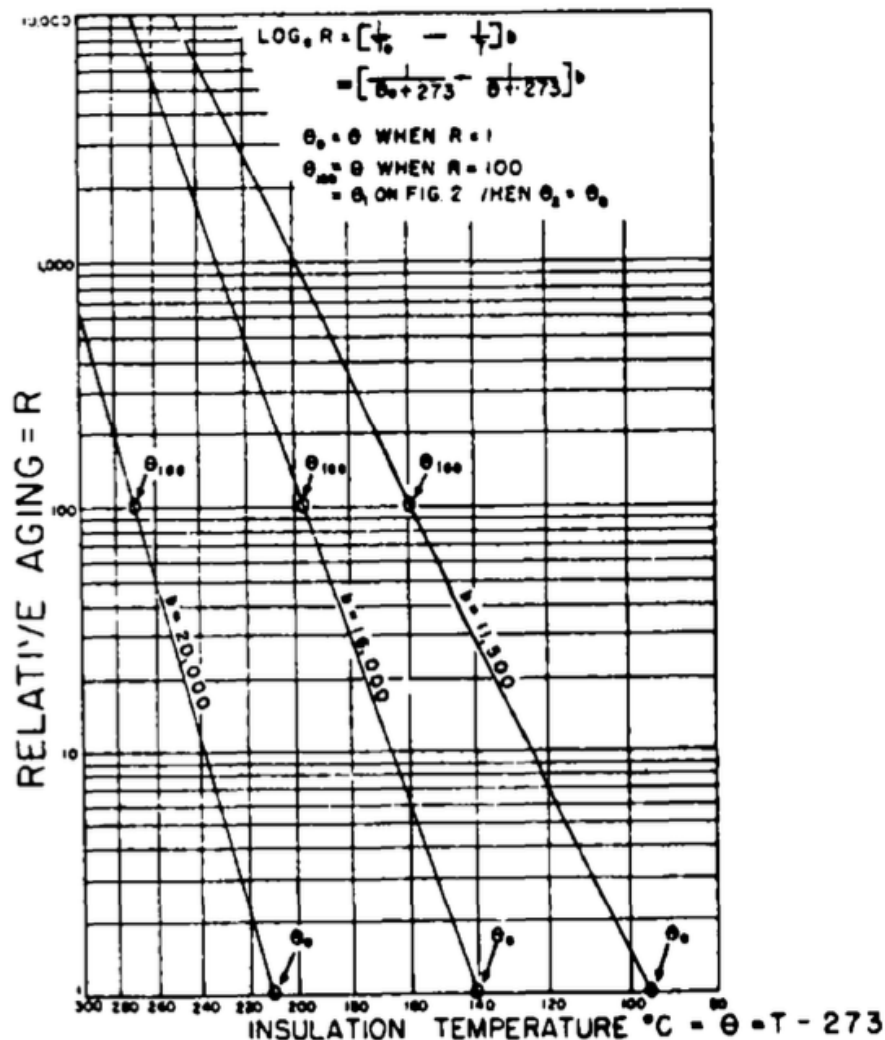


Figura 20: Ejemplos de curvas de envejecimiento relativo para distintas pendientes (valores de b) (L.C. Whitman et al., 1961 [46])

En el ejemplo de la figura superior, se evalúa la temperatura para la cual en distintos materiales (distintas pendientes b) se logra un envejecimiento relativo 100 veces superior al envejecimiento bajo las condiciones térmicas de referencia.

Se propone el siguiente ejemplo para explicar el envejecimiento relativo y lo que se pretende obtener de su cálculo: Se asume un aparato con un ciclo térmico de 24 horas que funciona a una temperatura de referencia de 140°C y tiene una energía de activación, $b=16000$.

Time in Hours	Temp. in C	R in Aging Units	Relative Aging in Hours
8.....	140.....	1.....	$8 \times 1 = 8$
8.....	180.....	30.....	$8 \times 30 = 240$
8.....	200.....	136.....	$8 \times 136 = 1,088$
			1,336

Figura 21: Ejemplo de aplicación del concepto de envejecimiento relativo (L.C. Whitman et al., 1961 [46])

Como se puede observar, si la temperatura en el primer periodo de ensayo de 8 horas es de 140C°, se tiene que el envejecimiento relativo, $R=1$. Lo que indica que el envejecimiento relativo es igual al real. En las siguientes 8 horas la temperatura aumenta a 180C°; al superar la temperatura de referencia, se empieza a percibir un envejecimiento relativo, que en este caso será de 30. En el último periodo muestreado, la temperatura sube a 200C°, por lo que el envejecimiento percibido será de 136.

Se calcula después el envejecimiento que ha sufrido la máquina en las 24 horas (El caso presentado es una exageración; los saltos térmicos que se consideran para el ejemplo son instantáneos):

$$8 + 240 + 136 = 1336; \quad \frac{1336}{24} = 55.6$$

El resultado indica que la máquina habrá envejecido 55.6 veces lo que lo hubiese hecho, en caso de haber estado operando durante 24 horas a 140C. Este será también el equivalente de 55.6 días de trabajo durante 24 horas a la temperatura de referencia.

Si bien, como se ha mencionado, el caso es una exageración de la realidad, este método nos puede servir para estimar el envejecimiento en periodos más cortos de tiempo, en lo que la diferencia térmica es tan pequeña, que podría considerarse instantánea. Este no será el caso en el siguiente código ya que la cantidad de datos con que se trabajaría sería demasiado extensa.

El programa a elaborar operará entonces de forma similar, pero tomará las temperaturas en intervalos más cortos. Se empleará para la construcción del código el programa Python, más compatible con las etapas posteriores del gemelo digital que Matlab. En primer lugar, será necesario importar las librerías numéricas de dicho programa:

```
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

A continuación, se introduce el valor de la pendiente a considerar según el material de aislamiento empleado. Para la elaboración de este modelo se empleará la pendiente mostrada en la referencia [46].

b=16000

Se define la función TAP_Arrhenius, que toma como inputs la temperatura registrada en un instante (T2), la temperatura registrada el instante previo (T1), la temperatura de referencia (T0), el momento en que se toma la medida (t2), y el instante previo (t1). Esta función devolverá el parámetro de envejecimiento térmico (R).

```
def TAP_Arrhenius(T0,T1,T2,t2t,t2):
    if T2>T0:
        R=math.exp(-b*(1/(T0+273)-1/(T2+273)))
    else:
        R=math.exp(b*(1/(T0+273)-1/(T2+273)))
    return R
```

El motivo por el que se han de poner las condiciones de temperatura está en la naturaleza del fenómeno. El envejecimiento relativo de un aislamiento no puede ser negativo. Consiste en un parámetro que multiplica el tiempo real para determinar cuánto deterioro ha sufrido el aislante en ese tiempo. Por tanto, este parámetro será superior a uno cuando la temperatura sea más alta que la de referencia e inferior a uno cuando sea menor.

Para la evaluación del simple programa y, de cara a valorar las posibilidades del mismo, se introducirá una serie de valores y eventos que devuelvan el envejecimiento bajo ciertas condiciones.

Introducimos la temperatura de referencia, que como ya se explicó, dada la clase del aislamiento característico de estos generadores, será de 115°C. La temperatura media oscilará entre los 90°C y los 100°C; se tomará la temperatura inferior, pero el valor podrá ser ajustado por el operador o el encargado de planta.

Será necesario considerar la evolución de los aislamientos a lo largo de su vida útil, por lo que para evitar la saturación de datos y con la intención de presentar el programa, se tomarán muestras en intervalos de 12 horas para 2 años de muestreo. Se estima que la vida útil de los aislantes instalados utilizados en estos equipos, es de 80.000 horas (Baldor Basics [57]).

```
T0=115; TM=90;
H=12; AM=2; VU=10;
n=int((AM*365*24-H)/H) # Número de muestras a tomar
t=np.linspace(2,n*H,n) # Vector de tiempo de muestreo
```

Inicializamos los arrays; Se utilizará el vector de tiempos de muestreo para darle la dimensión correcta al vector de temperaturas a configurar. Estas temperaturas se modificarán a partir de la media, de forma que presenten una variabilidad aleatoria.

```
T=[Tm]*n
T+=(40*np.random.normal(size=n, scale=0.5))
```

Será posible también introducir eventos que modifiquen el comportamiento habitual, para comprobar la capacidad de adaptación del programa y poder estudiar la respuesta del sistema supuesta.

```
T[0:50]-=55 # Trabajo en vacío
T[200:300]+=35 # Sobrecarga del eje
T[400:450]-=55
```

Como ejemplo, se introduce un evento que afectará a las muestras de la 0 a la 50. En este caso se simula que la operación en vacío de la máquina, lo que supone una reducción temporal de la temperatura del orden de 55°C. Se introduce un incremento de la temperatura de 35°C, que se puede deber, por ejemplo, a una sobrecarga del eje motor ocurrida entre los días 200 y 300.

Finalmente se supone que el motor vuelve a trabajar en vacío entre los días 400 y 450, volviendo a caer su temperatura 55°C.

Inicializamos una serie de vectores. R (sin unidades) será el parámetro de la degradación, 'Ageing' (medido en horas) será el vector de degradación total mientras que 'RUL' (remaining useful life) registrará las horas de vida útil remanente. Todos los valores se actualizarán para cada medición.

```
R=np.zeros(n)
Ageing=np.zeros(n)
RUL=np.zeros(n)
```

Se comenzará con el cálculo paso a paso, según sean las observaciones de temperatura para cada instante temporal:

```
R[0]=1
RUL[0]=0
Ageing[0]=R[0]*(t[1]-t[0])
for i in range(1,n):
    T1=T[i-1]
    T2=T[i]
    t1=t[i-1]
    t2=t[i]
    R[i]=TAP_Arrhenius(T0,T1,T2,t1,t2)
    Ageing[i]=R[i]*(t2-t1)
    RUL[i]=RUL[i-1]+Ageing[i]
```

Para observar el efecto de las consideraciones térmicas sobre el estado de los aislamientos se podrán esbozar gráficas que permitan al responsable de la máquina reconocer rápidamente la situación. El siguiente código permite visualizar las temperaturas alcanzadas en cada hora de funcionamiento, lo que nos da una idea de la tendencia general de la misma y contrastarla con celeridad a la temperatura establecida como referencia. Los valores fuera del rango admisible o razonable, se atribuyen a la aleatoriedad introducida.

```
plt.figure(figsize=(14,4))
plt.plot(t,T,'m-.' label='Temp(t)')
plt.plot(0,t[-1],[T0,T0], label='T0')
plt.title('Temperature measured in each sampling by the thermocouple')
plt.ylabel('Temperature °C')
plt.xlabel('time(hours)')
plt.legend(loc='best')
plt.xlim(0,t[-1])
plt.show()
```

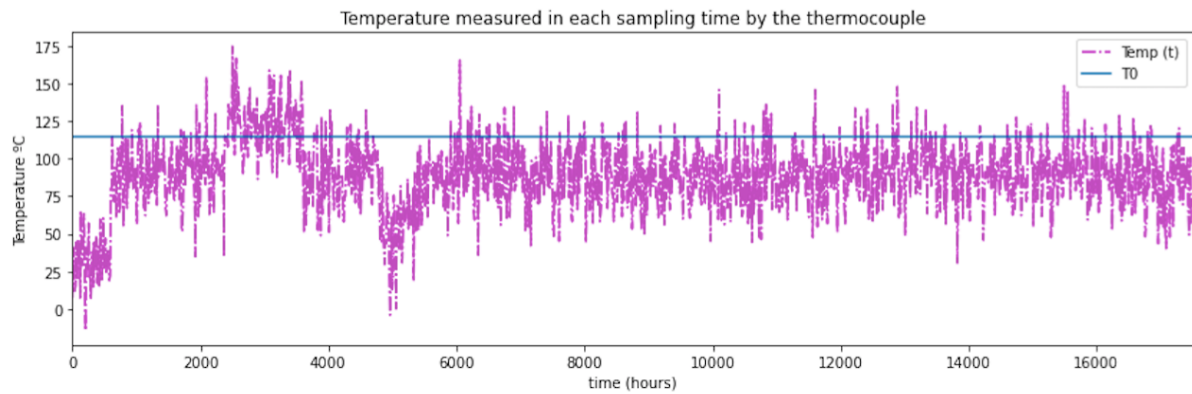


Figura 22: Temperatura registrada por el termopar (elaboración propia)

Cabe mencionar que la presencia de los picos en la gráfica, no representaría fielmente la realidad, puesto que los incrementos o decrementos percibidos en horas consecutivas son en general de pequeña magnitud y vinculados a la inercia propia de todo fenómeno térmico.

Otra posible forma de controlar las tendencias que presenta la máquina es a través de un histograma de las temperaturas registradas en el periodo considerado. Para el ejemplo de aplicación, como se mencionó previamente se ha optado por un tiempo de muestreo de 2 años (17520 horas):

```
plt.figure(figsize=(14,4))
plt.title('Temperature Histogram')
counts, bins=np.histogram(T,100)
plt.stairs(counts,bins)
plt.plot([T0,T0],[0,np.max(counts)])
plt.ylim(0,np.max(counts)+1)
plt.ylabel('Histogram (times)')
plt.xlabel('Temperature ranges (°C)')
plt.show()
```

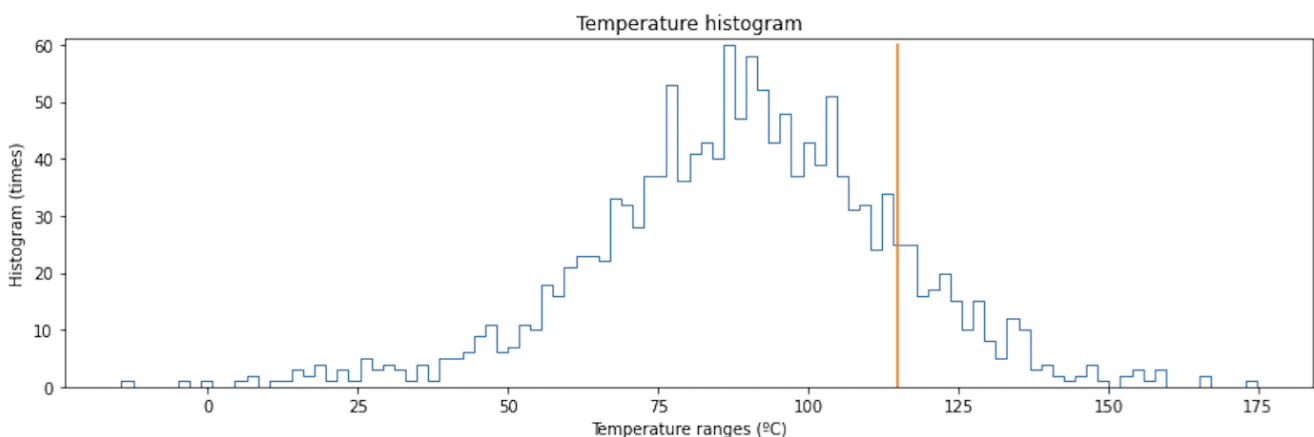


Figura 23: Histograma de temperaturas (elaboración propia)

Como cabe esperar, la temperatura se ha distribuido en torno a la media de 90°C. La distribución de la temperatura, si bien irreal, está configurada conforme a la realidad, puesto que, en la mayoría de los casos, durante la operación normal de la máquina, esta operará con valores inferiores a los de la referencia, siendo los valores tomados por encima de esta, aquellos que más degradan el aislamiento.

Otra posible gráfica de análisis, puede representar el valor del parámetro R calculado para cada muestra. De esta forma se podrá saber que instantes han contribuido más a la evolución del envejecimiento y estudiar las causas posibles. El siguiente fragmento de código nos permite elaborar la gráfica descrita:

```
plt.figure(figsize=(14,4))
plt.plot(t,R)
plt.title('Thermal Ageing Parameter R(t)')
plt.ylabel('Relative ageing')
plt.xlabel('time (hours)')
plt.xlim(0,t[-1])
plt.show()
```

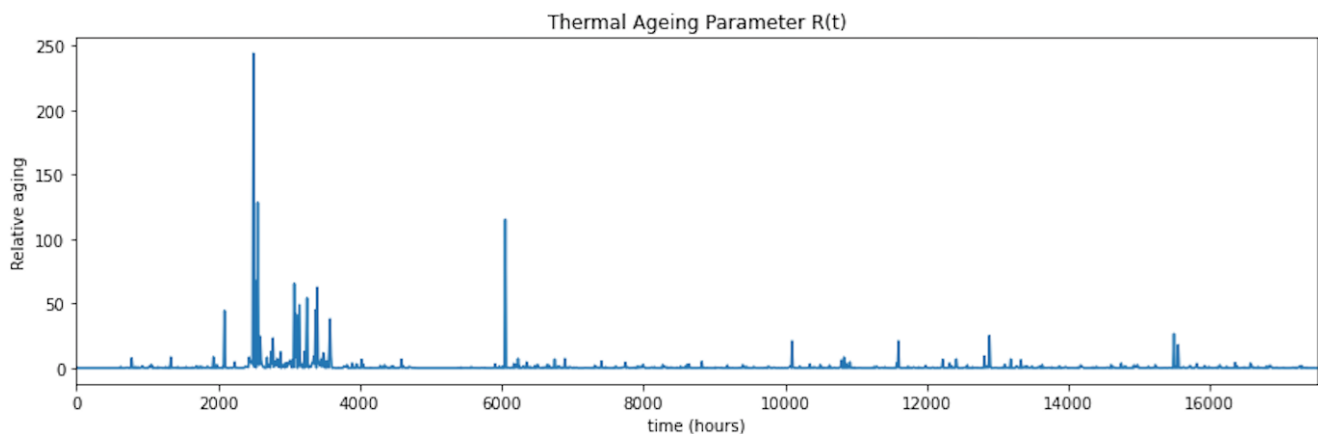


Figura 24: Evolución del parámetro de envejecimiento relativo R (elaboración propia)

Este gráfico, permite también verificar la relación entre la temperatura y la degradación si se compara con el propuesto en la figura 22. Como se puede observar, el fenómeno aleatorio que disparó la temperatura por encima de la de referencia a las 2600 horas de funcionamiento, dispara también la R, lo que supone una caída importante de su tiempo de vida remanente. Esto vuelve a ocurrir a las 6000 horas de funcionamiento, lo que quizá pueda atribuirse al evento introducido de sobrecarga del eje.

Se ha visto como la variación de la temperatura afecta al parámetro R de envejecimiento relativo. Como es evidente, esto tiene su repercusión sobre la vida del aislante que se acortará correspondientemente. Para poder ver el grado en que varía la vida útil remanente al enfrentarse a los eventos térmicos modelados en el código, se escriben las siguientes líneas:

```
plt.figure(figsize=(14,8))
plt.plot(t,VU*365*24-RUL,'b-.',label='RUL(t)')
plt.plot([0,VU*365*24],[VU*365*24,0],'r-',label='Expected life (manufacturer)')
plt.title('RUL(t) Vs Expected life-line (as manufacturer)')
plt.ylabel('Remaining Useful Life - RUL (h)')
plt.xlabel('time (hours)')
plt.xlim(0,t[1])
plt.ylim(VU*365*24-RUL[-1],VU*365*24)
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
plt.show()
```

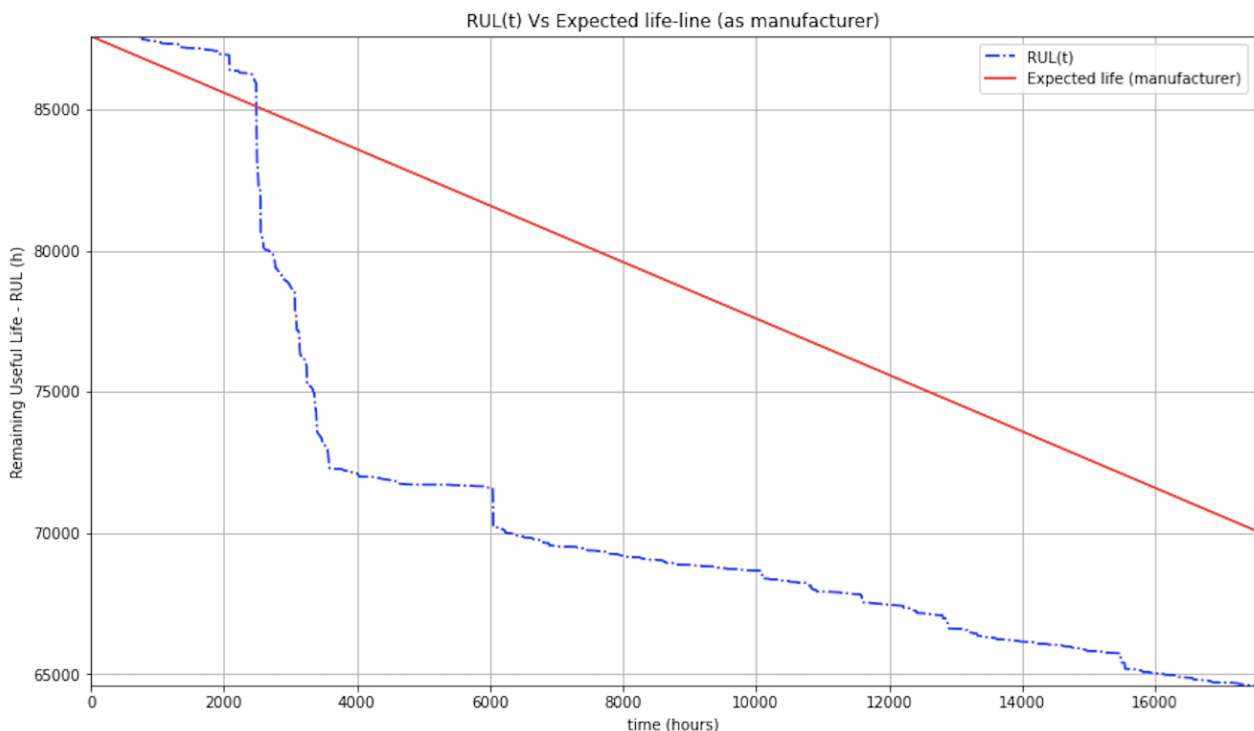


Figura 25: Vida útil remanente vs vida esperada (fabricante) (elaboración propia)

En este gráfico se puede apreciar el beneficio que tiene el trabajo en vacío sobre el aislamiento de la máquina; el evento inicial, programado para los primeros 50 días (1200 horas), tiene un efecto regenerador sobre la misma alargando su vida útil por encima de la esperada para ese periodo. Por otro lado, el evento aleatorio analizado para las figuras 22 y 24, tiene también una repercusión visible sobre esta gráfica.

Durante el tiempo en que el mencionado incremento térmico tiene lugar, la vida útil remanente cae por debajo de la esperada, desplomándose hasta las 72000 horas. La caída drástica, se repite para el otro fenómeno ya visto en los casos anteriores, el aumento de temperatura que tiene lugar a las 6000 horas de funcionamiento. No obstante, se puede apreciar que la curva que describe el deterioro tiene una pendiente inferior a la esperada, por lo que, de no haber ocurrido el fenómeno catastrófico anterior, es posible que la vida de la máquina se hubiese prologado por más tiempo de lo estipulado por el fabricante

8.3 PARÁMETROS Y CONSIDERACIONES

8.3.1 Consideraciones en el modelado térmico

Para la configuración de un modelo más ajustado a la realidad, se podría optar por un cambio en las condiciones térmicas. En caso de tener una base de datos con históricos de las temperaturas alcanzadas en planta, podrían utilizarse los datos reales para crear una curva de temperaturas sobre la que introducir la variabilidad.

En el caso de los aerogeneradores, la operación continua y la exposición a la meteorología que, además, varía según la localización de la planta y el clima de la región; hace del modelado de las condiciones térmicas una labor complicada. Es por esto, que las máquinas se preparan para trabajar bajo un amplio rango de temperaturas.

Por otra parte, el origen de esta temperatura está mayormente en el núcleo de la máquina. El calor se transmite de forma radial hacia los diferentes componentes del generador, por lo que los fabricantes tendrán que ajustar sus productos a distintos rangos.

Los fabricantes de rodamientos, establecen los límites de funcionamiento de su producto en 100°C y -30°C (JTEKT Corporation [52]). En el exterior de la carcasa, la temperatura ambiente en el entorno de la máquina, suele considerarse de 40°C (ver anexo 11.2). El componente expuesto a la mayor temperatura, será por tanto el aislamiento.

No solo es el componente más expuesto, también, es el más vulnerable por lo que la aplicación de nuevas tecnologías o materiales que reduzcan esta debilidad o la creación de métodos que permitan monitorear o predecir el estado del mismo, ha sido siempre de gran interés para la industria.

Es por esto que, desde el primer análisis practicado sobre los aislamientos, los materiales han evolucionado para soportar temperaturas mucho más altas. Las temperaturas de referencia tomadas para los estudios predictivos han ido aumentando en consecuencia hasta alcanzar el promedio actual de 115°C.

La pendiente empleada en el algoritmo, b , era el cociente de la energía de activación entre la constante de Boltzmann. Esta energía de activación es propia de cada material. La obtención de los valores de E_a , se persigue a través de múltiples métodos:

Material	Activation energy E [kJ/mol]
PE	307.87
UPE	374.25
PP	299.47
PTFE	247.50

Figura 26: Valores conseguidos de energía de activación en KJ/mol por el método Kissinger (Heon-Gyeong L. Jae-Seung J. et al., 2020 [53])

Los compuestos materiales ensayados en este estudio fueron materiales aislantes empleados en la actualidad tales como: Polímeros de polietileno (PE), y de polipropileno (PP), Polietileno de alto peso molecular (UPE) y el Politetrafluoroetileno (PTFE).

La pendiente obtenida se calculará dividiendo estas E_a , entre la constante de Boltzmann. Por ejemplo, para el caso del polietileno, se conseguiría la siguiente pendiente:

$$b = \frac{307.87}{8.314} * 10^{-3} = 37,030.31 \left(\frac{1}{K} \right)$$

El valor obtenido, si bien alto, está en el rango del visto en el caso práctico

Los autores del estudio proponen, sin embargo, un método más preciso de medida. A continuación, se refieren en consecuencia, los valores hallados a través del método Friedman:

Activation energies of polymer materials determined by the Friedman method											
Material	Activation energy, E (kJ/mol)									Average E_a	$\alpha = 0.3 \sim 0.6$ Average E_a
	Degree of conversion α										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		
PE	142.47	256.41	271.56	263.77	263.51	256.47	242.12	227.26	199.83	235.93	263.83
UPE	168.85	269.26	287.03	286.79	301.63	282.95	260.95	238.04	202.48	255.33	289.60
PP	257.66	300.69	313.04	293.63	293.16	287.93	304.31	320.85	312.15	298.16	296.94
PTFE	267.86	244.03	230.01	252.97	231.68	251.20	238.64	218.37	200.48	237.26	241.48

Figura 27: Valores conseguidos de energía de activación en KJ/mol por el método Friedman (Heon-Gyeong L. Jae-Seung J. et al., 2020 [53])

En este caso se obtienen varias lecturas de la energía de activación según el grado de conversión del material. La pendiente obtenida en este caso para el polietileno es la siguiente:

$$b = \frac{235.93}{8.314} * 10^{-3} = 28,377.44 \left(\frac{1}{K} \right)$$

Pero si tomamos el valor inicial, con un grado de conversión de $\alpha = 0.1$ se obtiene la siguiente pendiente:

$$b = \frac{142.47}{8.314} * 10^{-3} = 17,136.16 \left(\frac{1}{K} \right)$$

Muy parecido al usado en el caso práctico, que, como se indicó en el capítulo 8.3 fue el recogido de las referencias [46]

8.3.2 Lenguaje de programación

Pese a que la fase de prueba y error se realizó con el software de Matlab, la ejecución del programa definitivo se trazó para Python. Python consiste en un lenguaje de programación de alto nivel y código abierto [60]. Algunas de las características de Python que convierten en un programa óptimo para este tipo de aplicaciones son:

- Sintaxis sencilla: La escritura en Python tiene una sintaxis clara y fácil de entender, siendo por tanto un programa accesible tanto para principiantes como para desarrolladores experimentados.

- Amplia gama de aplicaciones: Python se usa para una amplia variedad de campos, como la ciencia de datos, el aprendizaje automático, el desarrollo web, la automatización, la robótica y la ciencia de la computación.
- Interoperabilidad: Python cuenta con una buena interfaz de programación de aplicaciones (API) para comunicarse con otros lenguajes y sistemas, lo que facilita la integración con otros sistemas y software.
- Eficiente: Python tiene un gran rendimiento en comparación con otros lenguajes interpretados gracias a su implementación particular de tipos de datos y estructuras de datos.
- Amplia comunidad y recursos: La extensa comunidad de desarrolladores y su amplia gama de recursos en línea, como documentación, tutoriales, y paquetes de software, garantiza la funcionalidad continua del programa.

9. CONCLUSIONES

Existe una gran cantidad de modos posibles de fallo tanto en el rotor como en el estator de una máquina eléctrica. Se ha visto como cada uno de estos fallos puede provocar una cierta variedad de efectos adversos. Hasta que los avances técnicos nos permitan evitar este daño, la industria cuenta solo con herramientas pasivas, que permitan monitorearlo y predecirlo.

El gemelo digital, es una de estas herramientas desarrolladas de cara a la transición a la industria 4.0. No solo informará de forma gráfica y precisa del estado del aislamiento en motores y generadores, sino que tratará de pronosticar el estado futuro de estos, anticipando la necesidad de cualquier tipo de reparación y mantenimiento necesario.

El fallo inesperado de la máquina o el peligro de una falla catastrófica se ve reducido en gran medida, con lo que los gastos asociados a la reparación o la detención del proceso productivo también disminuyen.

La magnitud de la inversión, depende de la capacidad económica que tenga la entidad y de la complejidad que se desee programar en el gemelo digital. Para modelos más complejos, será necesaria una gran capacidad logística que permita al gemelo trabajar con más datos, ya sea instalando una mayor cantidad de sensores, o bien, registrando sus medidas para periodos más cortos de tiempo.

Es incluso posible introducir algoritmos adaptables, que se ajusten a nuevos modelos cada vez que reconozcan un patrón concreto. Para ciertos eventos propios de algunos procesos productivos o plantas en la que la influencia de los fenómenos externos como el clima regional o los cambios de estación suponen una dificultad añadida, esta herramienta supone, en mi opinión un cambio radical del paradigma.

Lo que pretendía el caso práctico presentado en el capítulo 8, era la síntesis de un módulo típico de gemelo digital. La elaboración de un gemelo digital más completo, hubiese involucrado el diseño de un modelo digital del motor sobre el que representar los datos, tanto medidos como calculados.

Sin embargo, el carácter multidisciplinar y las dimensiones del proyecto en ese caso, lo convierten en una labor imposible para una única persona. El objetivo de este trabajo era, por tanto, demostrar el funcionamiento básico y las utilidades de esta herramienta y pienso, que se ha conseguido.

En conclusión, el mantenimiento predictivo de los aislamientos de un motor eléctrico es una técnica esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia de la máquina. Usando técnicas de análisis de datos y modelado, es posible predecir el estado de los aislamientos y tomar medidas preventivas antes de que ocurra un fallo.

La tecnología del gemelo digital permite simular el comportamiento de la máquina en diferentes condiciones, lo que ayuda a identificar los problemas potenciales y a planificar el mantenimiento preventivo. La combinación de sensores, el IoT, el Cloud Computing, software de modelado, simulación y visualización, y los recursos de la inteligencia artificial y del aprendizaje automático, permiten una mejor comprensión del comportamiento de la máquina y una mejor toma de decisiones.

10. BIBLIOGRAFÍA

1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- [1] E.L. Brancato., 1978: *Insulation Ageing: "A Historical and Critical Review"*
- [2] Jiangbiao H. et al., 2014: *"Diagnosis of Stator Winding Short-Circuit Faults in an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine"*
- [3] Jack J., Melinda H. et al., 2022: *"Requirements for the application of the Digital Twin Paradigm to offshore wind turbine structures for uncertain fatigue analysis"*
- [4] Athanasios K., Georgios F. et al., 2022: *"Data Mining in Electrical Machine Maintenance Reports"*
- [5] Texas Instruments: <https://www.ti.com/>

2: PRINCIPIOS GENERALES DE FALLO

- [6] M. R. Wilkinson, P. J. Tavner et al., 2004: *"Extracting Condition Monitoring Information from a Wind Turbine Drive Train"*
- [7] Greg C., Ian C. et al., 2014: *"Electrical Insulation for Rotating Machines"*
- [8] U. Shipurkar, K. Ma et al., 2015: *"A review of failure mechanisms in wind turbine generator systems"*

3: MECANISMOS DE FALLO DEL ESTATOR

- [9] Peter L. et al., 2000: *"Software FMEA Techniques"*
- [10] K. Xu, L. C. Tang et al., 2002: *"Fuzzy assessment of FMEA for engine systems"*
- [11] D. H. Stamatis., 2003: *"Failure Mode Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution"*
- [12] J. H. Dymond, N. Stranges et al., 2002: *"Stator Winding Failures: Contamination, Surface discharge, Tracking"*

[13] G. C. Stone, Rick W. et al., 2009: "Examples of Stator Winding Insulation Deterioration in New Generators"

[14] D. Aziz, A. Gholami et al., 2009: "Analysis of the Deterioration Effects of Stator Insulation on the its Electro-Thermal Property"

[15] R. Bartnikas & R. Morin., 2004: "Multi-Stress Aging of Stator Bars with Electrical, Thermal, and Mechanical Stresses as Simultaneous Acceleration Factors"

[16] R. E. Fenton, C. V. Maughan et al., 1992: "Preventative Maintenance of Turbine-Generator Stator Windings"

[17] G. C. Stone, J. F. Lyles et al., 1991: "A Thermal Cycling Type Test for Generator Stator Winding Insulation"

[18] H. Zhu & C. Morton et al., 2006: "Quality Evaluation of Stator Coils and Bars under Thermal Cycling Stress"

[19] G. C. Stone & C. Maughan., 2008: "Vibration Sparking and Slot Discharge in Stator Windings"

[20] J. Richnow, P. Stenzel et al., 2014: "Influence of Different Impregnation Methods and Resins on Thermal Behavior and Lifetime of Electrical Stators"

4: MECANISMOS DE FALLO DEL BOBINADO DE ROTOR

[21] G. C. Stone, E. A. Boulter et al., 2004: "Rotor Winding Failure Mechanisms and Repair"

[22] F. Filippetti, A. Bellini et al., 2013: "Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines: State of Art and Future Perspectives"

[23] M. Sasic, G. C. Stone et al., 2011: "Motor and Generator Windings"

5: PRINCIPIOS GENERALES DE ENSAYO Y SEGUIMIENTO

[24] G. C. Stone., 2002: "Advancements during the Past Quarter Century in On-line Monitoring of Motor and Generator Winding Insulation"

[25] Martin R, Jose A. et al., 2015: "Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and fault Detection: State of the Art"

[26] G. C. Stone and J. Kapler., 1998: "Stator Winding Monitoring"

6: MONITOREO DE LOS DEVANADOS EN OPERACIÓN

[27] G. C. Stone., 2013: "Condition Monitoring and Diagnosis of Motor and Stator Windings – A Review"

[28] S. S. Goundar, M. R. Pillai et al., 2016: "Real Time Condition Monitoring System for Industrial Motors"

[29] S. B. Lee, G. C. Stone et al., 2020: "Condition Monitoring of Industrial Electric Machines: State of the Art and Future Challenges"

[30] M. Hikita, M. Kozako et al., 2010: "Partial Discharge Phenomena in Artificial Cavity in Epoxy Cast Resin Insulation System"

[31] Y. Merizalde, L. Hernández-Callejo et al., 2017: "State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors"

[32] S. Tilley., 2009: "Case History –Rotor bar problem in an electric motor"; *Vibration Magazine* 26(4)

7: EL GEMELO DIGITAL

[33] Stefano C., Nicola D. et al., 2020: "The Design of a Digital-Twin for Predictive Maintenance"

[34] A. Rasheed, O. San et al., 2020: "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective"

[35] A. Mayr, M Weigl et al., 2018: "Electric Motor Production 4.0 – Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors"

[36] O. G. Brylina, N. N. Kuzmina et al., 2020: "Modeling as the Foundation of Digital Twins"

[37] X. Jitong, W. Lin et al., 2020: "Design and Development of a Digital Twin System for Intelligent Motor"

[38] P. Aivaliotis, K. Georgoulas et al., 2019: "The use of Digital Twin for predictive Maintenance in manufacturing"

[39] L. Magadán, F. J. Suárez et al., 2020: "Real Time Condition Monitoring System for Industrial Motors"

[40] Kulterer, K & Widerström., 2022: "Classification of digitalisation technologies for electric motor driven systems"; *Electric Motor Systems* May-2022

[41] S. V. Rao., 2020: "Using a Digital Twin in Predictive Maintenance"

[42] F. Tao, Q. Qi et al., 2022: "Digital Twin Driven Service"

[43] G. Chaudhary, M. Khari et al., 2022: "Digital Twin Technology"

8: CASO PRÁCTICO

[44] G. Jones, N. Frost et al., 2020: "Introduction to Predictive Models for Motor Dielectric Aging"

[45] L. C. Whitman, P. Doigan et al., 1954: "Calculation of Life Characteristics of Insulation"

[46] L. C. Whitman., 1961: "Simplified Methods of Calculating Insulation Life Characteristics"

[47] Thomas W. Dakin., 1948: "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon"

[48] A. Rassolkin, V. Rjabtsikov et al., 2020: "Digital Twin of an Electrical Motor Based on Empirical Performance Model"

[49] D. Proksch, S. Stütz et al., 2021: "Development of a Digital Twin for an Induction Motor Bearing Voltage Simulation"

[50] K. Gillen, R. Bernstein., 2010: "Review of nuclear plant safety cable aging studies with recommendations form improved approaches and for future work"

[51] A. Plota, A. Masek et al., 2020: "Lifetime prediction methods for degradable polymeric materials – a short review"

[52] JTEKT., 2015: "Wind Turbine Generator Products; CAT.NO.B1002E-2"

[53] H. G. Lee, J. S. Jung et al., 2021: "Measurement of Activation Energy and Accelerated degradation Time by Thermal Analysis Methods for Polymeric Insulating Materials"

[54] I. Blanco., 2018: "Lifetime Prediction of Polymers: To bet or not to bet-is this the question?"

[55] J. Wise, K. Gillen et al., 2015: "An ultrasensitive technique for testing the Arrhenius extrapolation assumption for thermally aged elastomers"

[56] Von Roll., 2011: "Sistemas aislantes para generadores";
<https://www.vonroll.com/en/>

[57] E. Cowern., 2017: "Baldor Basics: Motors; Power Transmission Engineering"; <https://www.powertransmission.com/>

[58] WEG Motores., 2021: "Guía de especificación de motores eléctricos";
www.weg.net / Rev: 06

[59] Iris Power Qualitrol; <https://irispower.com/>

[60] Gartner; <https://www.gartner.com/en>

11. ANEXOS

En este apartado se incluirán las tablas y gráficos referenciados en el documento superior. Los anexos se agruparán por capítulo y orden de aparición.

11.1.1 FMEA Estator		Efectos observados					
Modo de fallo	Evaluación de riesgo	Deterioro del aislante	Vibración de conductores	Incremento de la temperatura	Abrasión del aislante	Descargas parciales	Cortocircuito
Oxidación del termoestable	Alta	X	X				X
Agrietamiento de la circunferencia	Baja	X	X	X			
Ausencia parcial de resina aglutinante	Alta		X	X	X	X	
Movimiento radial del conductor en la ranura	Alta		X			X	
Degradación del semiconductor	Baja					X	
Descargas de ranura de alta intensidad	Baja					X	
Sobretensión transitoria	Baja						

11.1.2 FMEA Estator		Efectos observados					
Modo de fallo	Evaluación de riesgo	Deterioro del aislante	Vibración de conductores	Incremento de la temperatura	Abrasión del aislante	Descargas parciales	Cortocircuito
Formación de camino conductor entre fases	Moderada	X					
Presencia de partículas abrasivas	Moderada				X		
Reacción con agentes químicos	Baja	X					X
Ionización del espacio entre conductores	Baja					X	
Vibración del final de devanado	Moderada	X			X		
Conexiones eléctricas pobres	Moderada	X		X			

Tabla 1: FMEA de los devanados del estator (Elaboración Propia)

11.2 Clasificación térmica del aislamiento y límites admisibles

Temperature ratings, temperature rise allowances and hot-spot allowances for various enclosures and service factors of standard motors				
Insulation System Class	A	B	F	H
Temperature Rating in Degrees Centigrade	105°	130°	155°	180°
Temperature Rise Allowance by Resistance (Based on 40° C Ambient Temperature)				
All Motors with 1.15 Service Factor (Hot Spot Allowance)	70 *	90 *	115 *	— *
Totally Enclosed Fan Cooled Motors (Hot Spot Allowance)	60 (5)	80 (10)	105 (10)	125 (15)
Totally Enclosed Non-Ventilated Motors (Hot Spot Allowance)	65 (0)	85 (5)	110 (5)	135 (5)
Motors other than those listed above (Hot Spot Allowance)	60 (5)	80 (10)	105 (10)	125 (15)

* When operating at service factor loading the hot spot temperatures can actually exceed the insulation rating resulting in shortened motor life.

Tabla 2: Clasificación térmica del aislamiento y límites admisibles según el tipo de máquina y refrigeración (Baldor Basics, 2017 [57])

11.3.1 Código inicial de predicción de envejecimiento

```
function [R,m3]=temp(m0,m1,m2,t1,t2,t3)
    b=(log(t2)-log(t1))/(1/(m2+273)-1/(m1+273));

    if b<0

        R=exp(-b*(1/(m0+273)-1/(m2+273)));
        K=log(t2+t3)-log(t1);
        m3=(1/(K/b+1/(m1+273)))-273;
    end

    if b>0

        R=exp(b*(1/(m0+273)-1/(m2+273)));
        K=log(t2+t3)-log(t1);
        m3=(1/(K/b+1/(m1+273)))-273;
    end

end

% m0: Temperatura de referencia
% m1: Temperatura previa
% m2: Temperatura actual
% t1: Instante inicial (min)
% t2: Instante final (min)
```

Figura 28: Algoritmo de obtención de parámetro de envejecimiento relativo R (elaboración propia)

Este código recibe como input los valores descritos en el comentario verde (m_0 , m_1 , m_2 , t_1 y t_2). Los instantes inicial y final, representan el momento en que son tomadas las muestras para la evaluación de la pendiente, b . El instante inicial, al operar con logaritmos ha de considerarse por tanto uno en lugar de cero. El input t_3 representará el instante para el cual se desee vaticinar la temperatura.

Los outputs son R , el envejecimiento relativo resultante de la operación del generador entre los instantes t_1 y t_2 ; y m_3 , la temperatura pronosticada para la máquina en caso de continuar operando con la tendencia registrada en el instante t_3 .

Nótese que la pendiente en ese caso, define las condiciones en que la R ha de ser calculada, de ahí los bucles de condicionantes 'if'.

11.3.2 Código inicial de predicción de envejecimiento

```

function [n,m]=list(A)
    i=1; j=2; m0=140; t1=1; t2=10; t3=60;

    for l=A
        m1=A(i); m2=A(j);
        [R,m3]=temp(m0,m1,m2,t1,t2,t3);
        n(i)=R; m(i)=m3;

        if j<numel(A)
            i=i+1; j=j+1;
        else
            break
        end
    end
end

```

Figura 29: Algoritmo de construcción de lista de parámetros de envejecimiento relativo (elaboración propia)

En este caso, la función toma como inputs una lista de temperaturas (los valores registrados por los sensores en cada periodo) y devuelve para cada dos de estos valores el correspondiente envejecimiento y la temperatura prevista.

Cabe destacar que las listas resultantes de la operación de este algoritmo serán de una dimensión inferior (en una unidad) a la lista introducida como input.

11.3.3 Código inicial de predicción de envejecimiento

```
function [A,B]=matr(C)
    i=1; A=[]; B=[];

    for l=C
        l=transpose(l);
        [n,m]=list(l);

        if i==1
            A=[n]; B=[m]; i=i+1;
        else
            A=[A;n]; B=[B;m];
        end

    end

    A=transpose(A); B=transpose(B);
end
```

Figura 30: Algoritmo de construcción de matriz de parámetros de envejecimiento relativo (elaboración propia)

La última función opera de la mano de las dos anteriores. En este caso se supone la introducción de varios sensores en la máquina, registrando cada uno la temperatura de una determinada sección de la misma. Tendremos, por lo tanto, una serie de listas de temperaturas registradas en cada sensor que disponemos en forma de matriz.

Transponemos para operar con las columnas y operamos como en los casos anteriores para obtener una matriz que contenga en cada fila la evolución del envejecimiento relativo vinculado a cada sensor.

El objetivo final de esta serie de programas será el de determinar la sección o parte del equipo en que el envejecimiento es más susceptible de causar la falla del mismo, obteniendo, así mismo, la velocidad de deterioro y su vida útil remanente.