

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

“ANÁLISIS DEL DETERIORO CAUSADO POR
SOLICITACIONES DE TENSION Y CORRIENTE
AL SISTEMA DIELECTRICO DE LOS ENCHUFES
MINEROS 3M DE CLASE 25 kV y 500 A”

WILLIAM ANDRÉS YÉVENES CONTRERAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

PROFESORES GUÍAS: JOHNY MONTAÑA & ROGER SCHURCH
CORREFERENTE: CLAUDIO CASTRO TORRES (3M)

ABRIL 2022

Dedicatoria

*Quiero dedicar este trabajo con cariño a mi papá,
estoy muy agradecido por todo el apoyo que me diste estos 9 años en la universidad.*

*Querido viejo,
desde chico me enseñaste a trabajar duro para alcanzar mis sueños,
la persona quien soy es gracias ti,
te amo.*

Resumen

Por experiencia de 3M, se conoce que la duración media de un enchufe minero es de 2 a 3 años y que la principal razón de su corta vida útil es causa de su manipulación (golpes y arrastre), sin embargo, no se tiene certeza si los efectos de la corriente y tensión de operación contribuyen en la corta vida útil del enchufe.

El objetivo de este documento es analizar la hipótesis que la fatiga eléctrica también es responsable del deterioro acelerado del aislante del enchufe, es decir, los fenómenos de sobretensión y sobrecorriente también están participando en el envejecimiento prematuro del aislante eléctrico de los enchufes mineros.

Este trabajo ha consistido en emular el daño que sufriría el sistema de aislación eléctrica de un enchufe minero de clase 25kV de marca 3M (la probeta) una vez este se encuentre en operación en la faena minera. En concreto, se desea cuantificar el deterioro que sufre la probeta ante el esfuerzo térmico y eléctrico, efectos producidos por la corriente y la tensión eléctrica.

En general, se ha intentado emular en laboratorio una probeta que haya estado en operación durante 2 años y 100 días, sometiéndola a 136°C durante 400 horas y aplicando trenes de impulsos tipo maniobra de 75kV.

Una vez completados los ensayos de envejecimiento acelerado en las probetas, no se observaron variaciones importantes de los parámetros de diagnóstico para afirmar que se ha perdido la calidad del aislante, más bien, se observó que las probetas sometidas a 136°C mantuvieron su calidad de aislamiento y no sufrieron deterioro suficiente para afirmar que su vida útil ha terminado o esté por acabar. Se concluye que **la temperatura provocada por la corriente eléctrica y los transitorios de tensión no afectan en la vida útil promedio de 2 a 3 años de los enchufes mineros y se reafirma que la principal razón de su corta vida útil es causa de su manipulación.**

Los ensayos propuestos y ejecutados en el laboratorio no consideran el efecto que puede tener la humedad y otros factores ambientales o químicos, por lo que no se descarta que estos agentes tengan participación en la vida útil del enchufe.

Abstract

From 3M's experience, it is known that the average life of a mining plug is 2 to 3 years and that the main reason for its short life is due to handling (shock and dragging), however, it is not certain whether the effects of operating current and voltage contribute to the short life of the plug.

The objective of this paper is to analyze the hypothesis that electrical fatigue is also responsible for the accelerated deterioration of the plug insulator, i.e., overvoltage and overcurrent phenomena are also participating in the premature aging of the dielectric system of mining plugs.

This work has consisted of emulating the damage that the electrical insulation system of a 25kV class mining plug of 3M brand (the test piece) would suffer once it is in operation at the mine site. Specifically, it is desired to quantify the deterioration suffered by the specimen under thermal and electrical stress, effects produced by current and electrical voltage.

In general, an attempt has been made to emulate in the laboratory a specimen that has been in operation for 2 years and 100 days, subjecting it to 136°C for 400 hours and applying 75kV shunting type impulse trains.

Once the accelerated aging tests were completed on the specimens, no significant variations were observed in the diagnostic parameters to affirm that the quality of the insulation has been lost; rather, it was observed that the specimens subjected to 136°C maintained their insulation quality and did not suffer sufficient deterioration to affirm that their useful life has ended or is about to end. It is concluded that the temperature caused by the electric current and voltage transients do not affect the average useful life of 2 to 3 years of the mining plugs and it is reaffirmed that the main reason for their short useful life is due to their handling.

The tests proposed and carried out in the laboratory do not consider the effect that humidity and other environmental or chemical factors may have, so it is not ruled out that these agents may influence the useful life of the plug.

Índice

Capítulo 1	Introducción.....	1
Capítulo 2	La probeta – El aislante eléctrico de los enchufes mineros	6
Capítulo 3	Pruebas de envejecimiento acelerado en la probeta	13
Sección 3.1	Envejecimiento ante sollicitación de esfuerzo térmico.....	15
3.1.1	Trabajos de ejemplo sobre el envejecimiento acelerado por temperatura....	18
3.1.2	Prueba de envejecimiento acelerado por temperatura a la probeta	23
Sección 3.2	Envejecimiento ante sollicitación de esfuerzo eléctrico	26
Sección 3.3	Planificación del procedimiento de envejecimiento acelerado.....	29
Capítulo 4	Criterios para el diagnóstico dieléctrico.....	31
Sección 4.1	Parámetros DC	36
4.1.1	Resistencia de aislamiento.....	41
4.1.2	Índice de polarización	42
Sección 4.2	Parámetros AC.....	44
4.2.1	Descargas parciales.....	46
4.2.2	Capacitancia y factor de disipación.....	51
Sección 4.3	Frequency Response Analysis.....	60
Capítulo 5	Análisis de resultados.....	65
Sección 5.1	Parámetros DC	68
Sección 5.2	Parámetros AC.....	71
Sección 5.3	Frecuency Responce Analysis.....	78
Capítulo 6	Conclusiones	80
Referencias.....		83
Anexos		87

Capítulo 1

Introducción

Justificación del tema

Dentro de la industria minera es común la implementación de maquinaria pesada para la extracción de mineral, dichas máquinas, en su vasta mayoría, suelen operar con electricidad por lo que necesitan estar conectadas a una red eléctrica, ver Figura 1-1. Esta conexión entre el equipo y la fuente de alimentación se realiza mediante tendidos relativamente cortos de cables apantallados trifásicos de media tensión, unidos por medio de enchufes macho y hembra, también de media tensión, otorgando una alta flexibilidad en el movimiento de equipos cuando se agota un punto de extracción o simplemente cuando se desplaza la maquinaria. En la Figura 1-2 se muestra un esquema de un sistema eléctrico minero para la extracción de mineral.



Figura 1-1: Fotografía de maquinaria minera en operación [1].



Figura 1-2: Ejemplo ilustrativo de un sistema eléctrico minero para la extracción de material y elementos comercializados por 3M Chile para la industria minera del país [2].

Ante la necesidad por parte de la industria minera de unir secciones de cables en media tensión, la empresa 3M Chile ofrece enchufes mineros de media tensión de hasta clase 15kV y se encuentra en desarrollo de una versión de clase 25 kV.

La División Eléctrica de 3M Chile ha estado recibiendo consultas por parte de sus clientes de la industria minera sobre cuáles son los parámetros que condicionan la vida útil de los aislantes en los enchufes de tipo minero. De la experiencia de 3M, es sabido que los enchufes en minería tienen una duración muy corta dada las exigencias del terreno y que la mayoría de las veces el deterioro del enchufe se asocia a impactos, golpes y/o arrastre debido a su manipulación. No obstante, de igual manera existen en minería ciertas áreas donde este tipo enchufes se encuentran estáticos y exentos de maltratos mecánicos, como el caso de los enchufes empotrados, que igualmente han sufrido deterioro temprano de su vida útil, lo que produce una mayor incertidumbre de la causa de la falla por lo que existe la necesidad de evaluar otros factores que pudieran ser los causantes del deterioro y/o envejecimiento acelerado.

De la técnica de alta tensión se conoce que principalmente un aislamiento sólido se envejece por la acción de los esfuerzos TEAM (Térmicos, Eléctricos, Ambientales y Mecánicos) [3]. De la experiencia de 3M en la industria minera, se plantea la hipótesis que **la fatiga eléctrica es la responsable del deterioro temprano del aislante**, es decir, los fenómenos de sobretensión y sobrecorriente están provocando el envejecimiento prematuro del aislante eléctrico de los enchufes mineros. Sin embargo, se requiere realizar un estudio que permita demostrar esta hipótesis y con ello tomar las acciones necesarias para presentar las mejoras en este dispositivo o encontrar una manera de anticipar la falla, evitando así dejar fuera de servicio el equipamiento minero a causa de una falla imprevista del enchufe.

El objetivo del trabajo de título consiste en validar o refutar la hipótesis planteada mediante ensayos de laboratorio al sistema aislante de los enchufes mineros de clase 25 kV, en adelante “la probeta”. El estudio estará centrado principalmente en la sollicitación térmica y eléctrica, efectos causados por la corriente eléctrica y la tensión de operación, de niveles y formas temporal a definir basados en la literatura, normativa y pruebas.

Mediante el presente documento, se propone diseñar un procedimiento metodológico basado en la normativa internacional, que contemple: ensayos de rutina, ensayos de envejecimiento acelerado, evaluación y diagnóstico del material aislante de un enchufe minero clase 25kV y 500A. Lo anterior tiene en cuenta que no hay una norma específica para el enchufe minero de media tensión y en la práctica al momento de ensayar se homologa con la norma de otro elemento.

Para salir de las pruebas clásicas en la evaluación de un sistema de aislamiento, como la medición del *factor de pérdidas* y las *descargas parciales* que se usarán en este trabajo como herramientas sólidas de contraste, se quiere añadir la novedad de evaluar los resultados del envejecimiento en la probeta mediante la técnica FRA (Frequency Response Analysis) con equipo existente en el laboratorio de la Universidad, y de este modo, una vez determinada e implementada la mejor manera de realizar esta prueba en los enchufes mineros, generar un registro de su comportamiento a medida que se va envejeciendo progresivamente la probeta en laboratorio.

La técnica FRA es utilizada principalmente para el diagnóstico de transformadores de potencia. La novedad de usar esta herramienta de evaluación en una aplicación diferente, como es el caso de la probeta, trae como contraparte el desconocimiento si dará o no un resultado realmente útil del cual se puedan sacar conclusiones, ya que no existe o es escasa la documentación en este tipo de aplicación particular. Sin embargo, de haber un resultado favorable, esta técnica sería una buena candidata para evaluar en terreno el estado de los enchufes mineros de características similares y tal vez permita determinar la vida residual o un patrón de comportamiento que genere un estado de alarma crítica y atención inmediata, sumado a que en general los equipos que realizan el FRA son de tamaño y peso reducido, instalación relativamente simple, niveles de tensiones y corrientes de prueba seguros para el operador y el objeto a ensayar, y dado que se dispone del equipo en el Laboratorio de Alta Tensión, se puede descartar una variable no menor que es su elevado costo de adquisición.

A continuación, se presenta el objetivo general y el conjunto de objetivos específicos orientados a validar o debatir la idea que los fenómenos de sobretensión y sobrecorriente están provocando el envejecimiento prematuro de los enchufes mineros 3M.

Objetivo general

Evaluar el deterioro causado por solicitaciones de tensión y corriente al aislamiento eléctrico de poliamida utilizado en el enchufe minero de clase 25 kV y 500 A de 3M Chile (Probeta), mediante ensayos de laboratorio que envejeczan al aislamiento y mediante mediciones de parámetros dieléctricos que permitan identificar y cuantificar su estado.

Objetivos específicos

- ❖ Determinar los parámetros dieléctricos que permitan cuantificar y evaluar en la probeta su estado dieléctrico y la progresión de su envejecimiento artificial, mediante literatura/normativa y ensayos previos realizados en el Laboratorio de Alta Tensión Casa Central (LAT).
- ❖ Diseñar procedimiento de ensayo para la medición de los parámetros dieléctricos de la probeta, de forma independiente o conjunta, tomando en cuenta los criterios de ensayo de la Normativa Internacional, para ser aplicado y realizado en Laboratorio a la probeta.
- ❖ Diseñar procedimientos de ensayos de sobretensión y/o sobrecorriente que envejezca y deteriore de forma progresiva al aislamiento de la probeta en Laboratorio, intentando reproducir de forma comparativamente similar las fallas en terreno presentadas en probetas clase 15kV, para la evaluación de los parámetros dieléctricos en el tiempo y comparación.
- ❖ Diseñar un procedimiento que permita en laboratorio ensayar la probeta mediante la técnica FRA (Frequency Response Analysis), que logre arrojar información del dieléctrico y con ello evaluar la aplicabilidad de la técnica y el resultado de los datos registrados.
- ❖ Establecer criterios y/o recomendaciones en base a los resultados del presente trabajo, para el diagnóstico de probetas instaladas en terreno, sujetas a la operación térmica estacionaria.

Capítulo 2

La probeta – El aislante eléctrico de los enchufes mineros

De la experiencia de 3M se conoce que las máquinas móviles para la extracción de mineral, como la mostrada en la Figura 1-1, en promedio suelen estar alejadas unos 3 kilómetros desde el punto de extracción y el suministro de energía eléctrica. Dentro de la industria comercializadora de cables mineros es común encontrar a la venta cables de media tensión con longitudes de 300 metros enrollados en carretones, por lo que, es obligatorio el uso de enchufes mineros (también llamadas *coplas mineras*) para unir secciones de cables y alcanzar la longitud necesaria para la operación de la máquina en el lugar deseado. En la Figura 2-1 se muestra una copla minera comercializada por 3M, desde la imagen es posible observar la *carcasa metálica* y los *pinos macho* del enchufe. En la Figura 2-2 se muestra un cable de media tensión enrollado en un carretón y con un enchufe minero instalado en un extremo del cable.

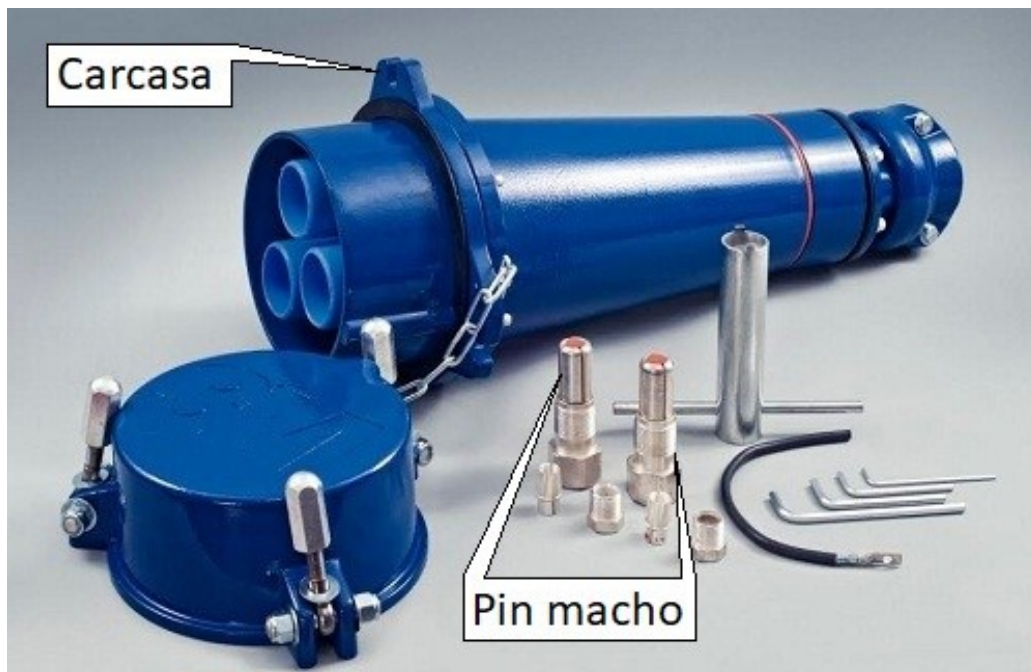


Figura 2-1: Enchufe o Copla para la minería de clase 15kV de marca 3M [4].



Figura 2-2: Cable trifásico de media tensión enrollado en un carretón y con un enchufe minero instalado [5].

Adentrándonos en nuestro caso de estudio, en la Figura 2-3 se muestra un dibujo en 3D de la copla minera de clase 25kV y 500A, junto a todas las piezas que conforman el enchufe en su totalidad. De la Figura 2-3 es posible observar algunos elementos como el *pin hembra* y el *aislador eléctrico* del enchufe, este último es la probeta.

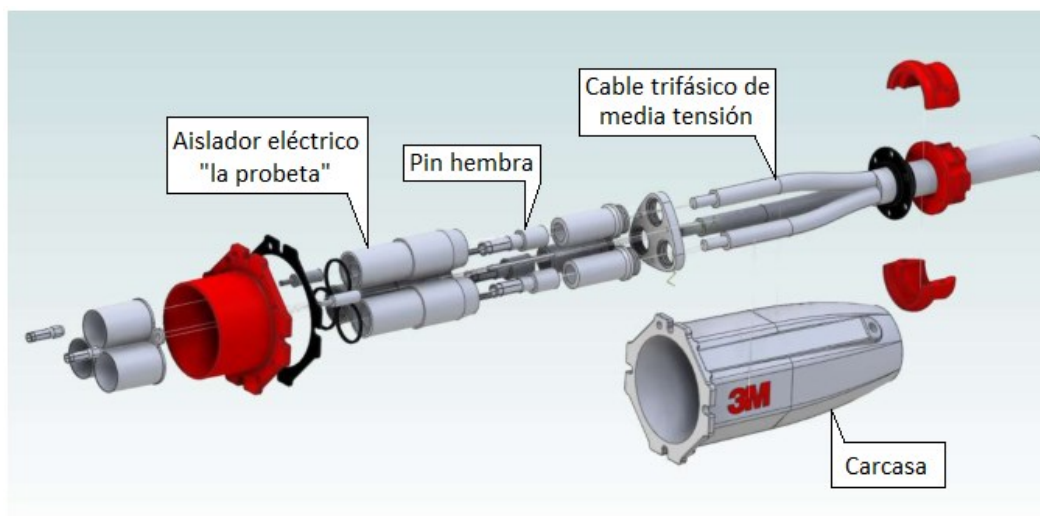


Figura 2-3: Dibujo en 3D del enchufe minero clase 25kV de marca 3M [6].

La vida útil del enchufe depende del estado de su aislación eléctrica, pues, si el material dieléctrico no es capaz de aislar las fases de media tensión del cable, entonces se producen arcos eléctricos dentro del enchufe lo que provocaría la activación de las protecciones eléctricas y la suspensión del suministro eléctrico con tal de evitar algún accidente, además, se deja fuera de operación a la maquinaria pesada de extracción, generando millonarias pérdidas por interrumpir el ritmo de producción de la planta. Asimismo, un enchufe en mal estado es un peligro mortal para los operarios de la planta y una fuente de incendios.

Yendo directo a la copla minera bajo estudio, en la Figura 2-4 (a) se muestra el conexionado que va por el interior del enchufe minero, es posible observar las tres fases del cable de media tensión con los pines hembra instalados en los extremos del cable y siendo insertados en el interior del aislante eléctrico (cilindros de color blanco). La vista frontal del enchufe se muestra en la Figura 2-4 (b) y en la Figura 2-4 (c) se tiene una fotografía mostrando exclusivamente los cilindros dieléctricos del enchufe, es decir, la probeta.

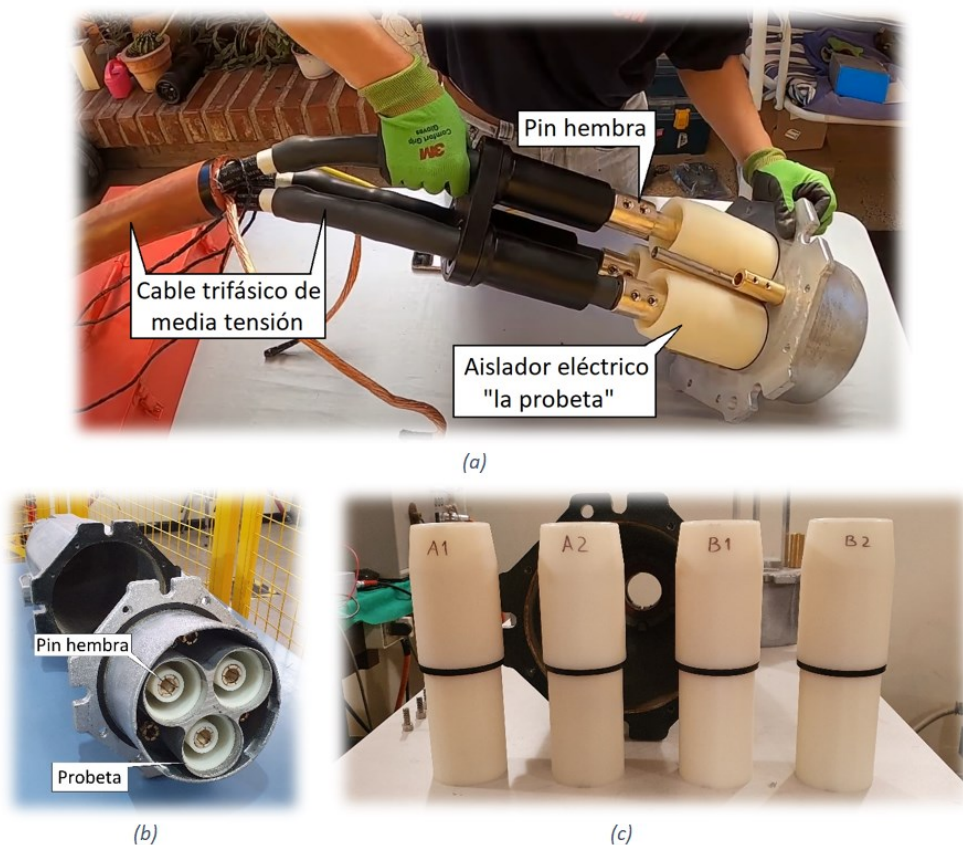


Figura 2-4: Fotografías del enchufe minero 3M clase 25kV.

La probeta está hecha de un tipo de poliamida ignífugo (plástico que al inflamarse no propaga la llama) comercializado por Mitsubishi, conocido bajo el nombre comercial de “Ertalón® 6 PLA”. El enchufe minero y todas sus piezas son fabricadas en Chile, por medio de la empresa Wünkhaus.

La probeta es elaborada a partir de sólidas barras cilíndricas y se les da forma con el torno, se utiliza el Ertalón® 6 PLA como dieléctrico de las fases del enchufe dado su buen comportamiento eléctrico y frente a la temperatura. Las principales características de la probeta se resumen a continuación en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Principales características del aislante eléctrico del enchufe minero hembra clase 25kV y 500A de marca 3M.

Información general de la probeta			
Propietario:	3M	Material:	Ertalón® 6 PLA
Ubicación:	Providencia, Chile	Voltaje nominal:	25 kV
Fabricante:	Wünkhaus	Operación térmica:	-40 °C hasta +105 °C
Año de fabricación:	2021	Constante Dieléctrica (ϵ_r):	3.4
Descripción:	Aislador para enchufe hembra clase 25 kV	Rigidez Dieléctrica:	50 kV/mm (seco) 20 kV/mm (húmedo)

Para más información, la ficha técnica del enchufe minero hembra/macho de clase 25kV de 3M y del material Ertalón® 6 PLA se encuentra en la sección de Anexos (página 88).

Como información relevante, se cuenta con información sobre las **causas más comunes** y el **lugar de falla** de los cables utilizados en la industria minera (considere el conjunto de cable/enchufe). Los datos provienen de una empresa del sector minero y se prefiere mantener en secreto el nombre de la empresa y la marca de los enchufes que utiliza, sólo se puede mencionar que no son enchufes de marca 3M. La información mostrada a continuación se basa en 78 informes, elaborados entre los meses de abril-mayo-junio del año 2021, provenientes de un taller de reparación del conjunto cable/enchufe minero.

Cabe destacar que un mismo cable y/o enchufe puede tener más de un lugar de falla o más de una sola causa de falla. En el Figura 2-5 se muestra el lugar de falla de un conjunto cable/enchufe para la minería, de la Figura 2-5 es posible observar que **los enchufes son el lugar más frecuente de ocurrencia de una falla**, seguido de la aislación exterior del cable de media tensión. En el Figura 2-6 se presentan las causas de falla del conjunto cable/enchufe minero; es posible observar que el gran responsable del deterioro del cable/enchufe es por su manipulación (impacto y tracción) seguido de la **fatiga de material y la sobrecorriente**.

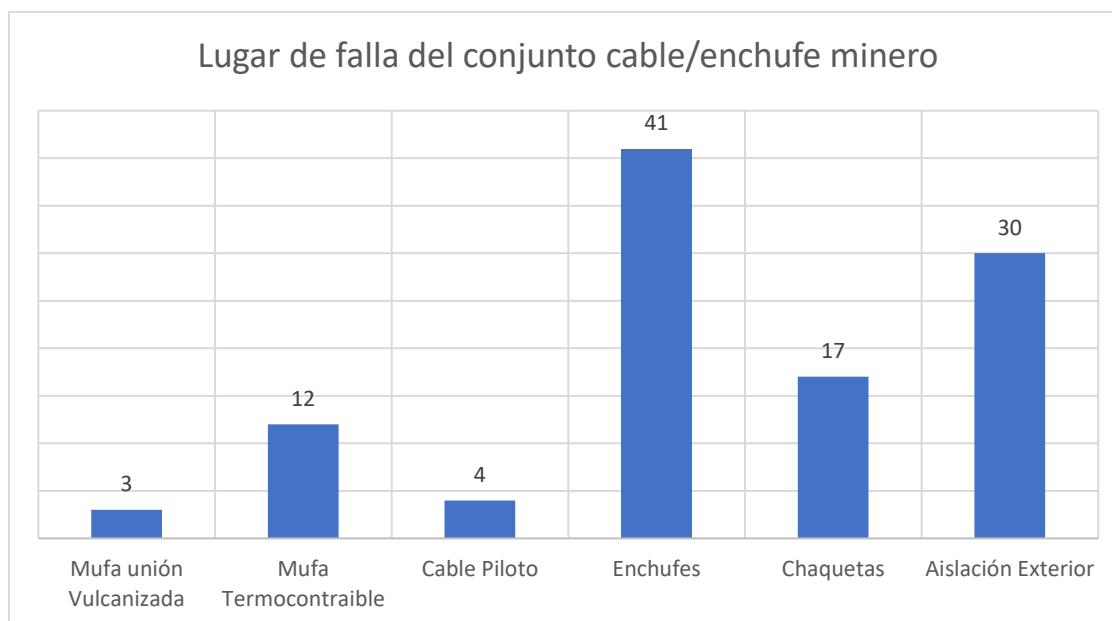


Figura 2-5: Lugar de falla del conjunto cable/enchufe minero en operación.

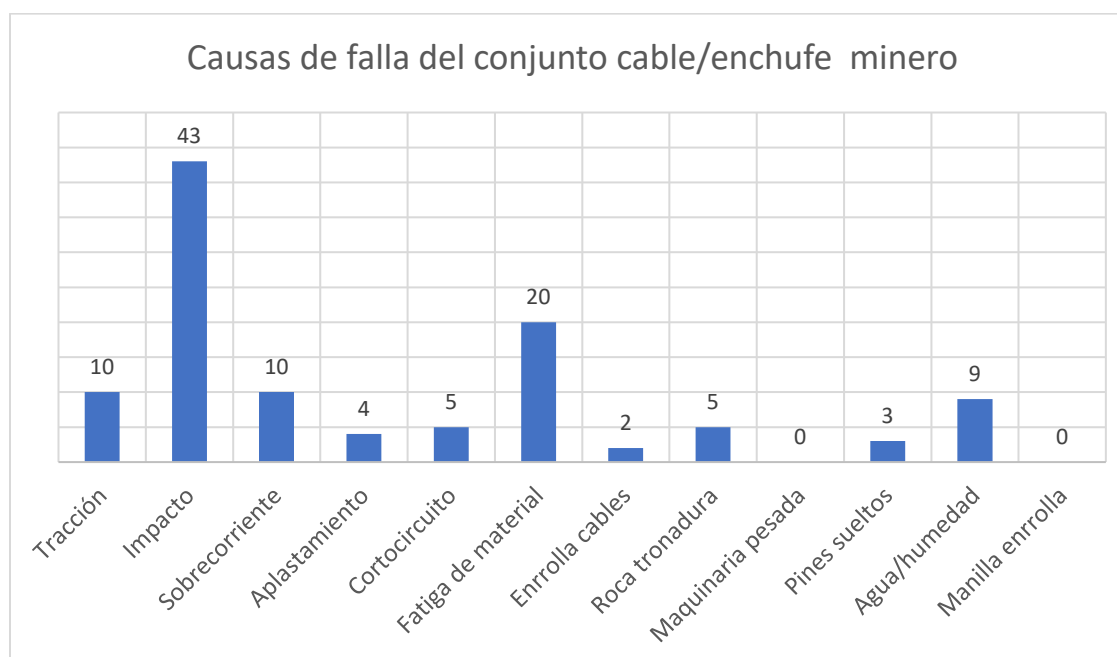


Figura 2-6: Causas de falla del conjunto cable/enchufe minero en operación.

La información extraída de la Figura 2-5 y la Figura 2-6 confirma parcialmente la hipótesis que **la fatiga eléctrica es la responsable del deterioro prematuro del aislante del enchufe minero**, el objetivo de este trabajo de título es validar o refutar esta idea en base a pruebas en laboratorio que permitan envejecer la probeta y cuantificar el daño a causa del estrés eléctrico.

De antemano se sabe que ningún material dura para siempre y que el desgaste es un proceso natural e irremediable, pero ¿qué provoca este desgaste?, de [3] se sabe que las causas del deterioro de un dieléctrico pueden amontonarse en cuatro grandes grupos, estos son: *el esfuerzo térmico, eléctrico, ambiental y mecánico* (TEAM).

El *esfuerzo térmico* hace referencia a la degradación por causa de la temperatura que se ve expuesto el material, el *esfuerzo eléctrico* ante la sollicitación de la tensión de servicio, los *esfuerzos mecánicos* se asocian a vibraciones/impacto/tracción/compresión y los *esfuerzos ambientales* son mediante agentes atmosféricos como el polvo, humedad, radiación UV y productos químicos u otros contaminantes que puedan tener un efecto perjudicial en las propiedades del material.

Dado que la probeta está confeccionada a partir de un polímero, la degradación de un polímero se define como la separación de las cadenas poliméricas que dan forma a su composición química [7], este rompimiento de las cadenas poliméricas es causa de los esfuerzos *TEAM* y como resultado se tiene que el material se vuelve más frágil, pierde el color original y/o se vuelve de un tono amarillento, aparecen grietas, entre otros. En la Figura 2-7 (a) se muestra a modo de ejemplo el rompimiento teórico de la cadena de poliestireno a causa del calor y en la Figura 2-7 (b) se tiene una botella de plástico en distintas fases de degradación.

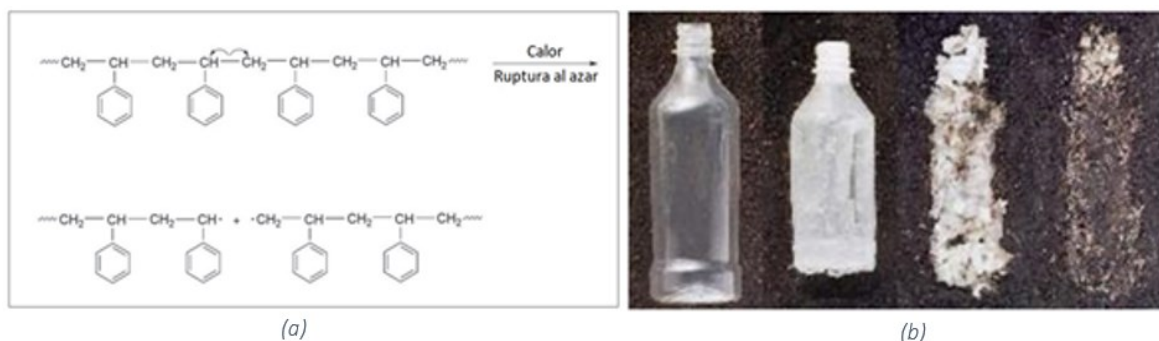


Figura 2-7: Ejemplos de la degradación polimérica [7] [8].

Cabe destacar que en la práctica el deterioro de cualquier material nunca depende exclusivamente de un único factor, más bien, es el resultado de la combinación de múltiples agentes. En la Tabla 2-2 se mencionan algunos agentes y el tipo de degradación que causan al ser combinados.

Tabla 2-2: Ejemplos de esfuerzos que deterioran un material dieléctrico [9].

Agente externo	Tipo de degradación
Luz solar	Fotodegradación
Calor	Degradación térmica
Agentes atmosféricos	Degradación oxidativa
Humedad	Degradación hidrolítica
Hongos y microorganismos	Biodegradación
Luz + oxígeno	Fotodegradación oxidativa
Calor + oxígeno	Degradación termoxidativa
Luz + humedad	Degradación fotohidrolítica
Luz + calor + humedad + hongos + oxígeno + alta tensión + golpes	Degradación en el mundo real

A lo largo de este segundo capítulo, se ha mostrado el enchufe minero en estudio y la probeta a ensayar en laboratorio. Si bien los materiales se deterioran por varios factores a la vez, este trabajo de título está limitado principalmente al estudio del daño en la probeta a causa del esfuerzo eléctrico (efecto de la tensión eléctrica) y térmico (efecto de la corriente eléctrica), dejando fuera los esfuerzos mecánicos y ambientales, dado que se busca debatir la hipótesis que la fatiga eléctrica es la responsable del deterioro precipitado del aislante del enchufe minero.

A continuación, se da inicio al *Capítulo 3: Pruebas de envejecimiento acelerado en la probeta*, aquí se explican y argumentan los ensayos que se proponen para deteriorar a la probeta de forma artificial, controlada y acelerada en el laboratorio bajo el contexto de reproducir de forma similar la operación de un enchufe minero en terreno.

Capítulo 3

Pruebas de envejecimiento acelerado en la probeta

El objetivo final de los ensayos de envejecimiento avanzado es calcular el tiempo de vida útil de los materiales. Se busca conocer cómo se comportaría un material ante las exigencias de operación para el cual fue pensado y conocer su desempeño con el paso del tiempo.

A modo general, se examina en laboratorio el desempeño de un material dentro de un periodo de tiempo razonable, es decir, si se tiene pensado que la vida útil de un nuevo material es de 30 años, entonces se podría hacer un seguimiento de dicho material durante sus 30 años de servicio para luego hacer algún tipo de modificación o mejora, luego hay que esperar 30 años más para notar si hubo cambios. Este procedimiento no es práctico por lo que las pruebas de envejecimiento acelerado buscan obtener un deterioro equivalente de años en cuestión de meses.

Para la ejecución de los ensayos de envejecimiento acelerado, el material es sometido ante la sollicitación de los esfuerzos que lo deterioran bajo condiciones exageradas de operación para luego establecer una equivalencia de tiempo entre lo que tarda un deterioro acelerado y uno real.

La prueba de envejecimiento acelerado **ideal** es uno que contemple **todos los factores (y combinaciones de estos) que afectan la vida útil del material**, mientras mejor se simule la operación real del material, pues, mejor se conoce el deterioro del material. Sin embargo, mientras más factores de deterioro se consideren, no solamente más complejo se vuelven las pruebas a realizar, sino que también se vuelve más costoso y se requiere de más tiempo para realizar el estudio, por lo que, muchas veces conviene escoger los factores de mayor interés y descartar el resto.

Adentrándonos en nuestro caso de estudio, el enchufe minero clase 25 kV de 3M, se desea simular el daño que sufriría el sistema de aislación eléctrico (la probeta) una vez ésta se encuentre en operación en la faena minera, en concreto: se desea cuantificar el deterioro que sufre la probeta ante el esfuerzo térmico y eléctrico, efectos producidos por la corriente y la tensión eléctrica.

El funcionamiento de una faena minera en Chile es 24/7, continuo y sin descanso, se sabe que los cables de media tensión para la minería operan con normalidad a 90°C mientras que pueden llegar a alcanzar 130°C por causa de una sobrecarga de emergencia. Por otro lado, la máquina extractora de materia prima se encuentra constantemente cargando, descargando y moviendo grandes masas de mineral, por lo que se piensa que con frecuencia se producen transitorios de tensión por el cable y enchufe minero a causa de la operación de la máquina extractora.

Se piensa que el principal agente de deterioro es la temperatura, seguido de los transitorios de tensión. Se omiten pruebas de deterioro por sollicitación de tensión de servicio estacionario ya que se cree que no es un factor de deterioro que afecte de forma crítica al sistema de aislación.

A continuación, en la *Sección 3.1* y la *Sección 3.2*, se argumenta el esfuerzo térmico y eléctrico al que se somete la probeta.

Para conocer solamente el ensayo propuesto de envejecimiento ejecutado en laboratorio diríjase directamente a la *Sección 3.3*.

Sección 3.1

Envejecimiento ante sollicitación de esfuerzo térmico

Este ensayo está parcialmente basado en la normativa internacional IEEE Std 98 – 2016: “IEEE Standard for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials” [10]. Esta normativa tiene como objetivo ser una guía para la obtención del parámetro *Temperature Index* (TI), mediante ensayos en laboratorio. Si bien este trabajo no consiste en obtener el parámetro TI de la probeta, se utiliza este concepto para la prueba de estrés térmico.

El concepto *Temperature Index* se mide en grados Celsius (°C) y relaciona las variables **propiedad ↔ tiempo ↔ temperatura** de un material sólido. Por ejemplo, si se tiene un material con TI igual a 90°C, se puede interpretar que si dicho material es sometido a 90°C durante 20.000 horas entonces pierde un 50% de una propiedad, esta propiedad puede ser la *masa* del material, la *resistencia a la tracción*, la *tensión de ruptura dieléctrica*, entre otros. Un ejemplo ilustrativo del concepto TI se muestra en la Figura 3-1.

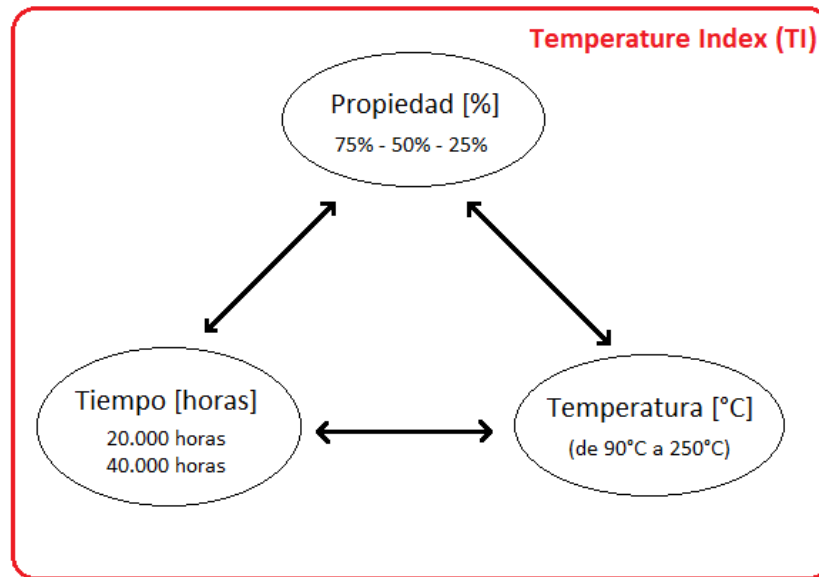


Figura 3-1: Variables que relaciona el Temperature Index (TI).

Es importante señalar que el TI se relaciona con una sola propiedad, por lo que puede haber más de un parámetro TI para un mismo material. Algunos ejemplos de *propiedades*, *tiempos* y *temperaturas* típicas que relaciona el TI se muestran a continuación:

- ❖ Propiedades: Pérdida de masa (Loss of mass), Resistencia a la tracción (Tensile strength), Resistencia a la ruptura eléctrica (Dielectric breakdown strength), entre otros. El TI relaciona cuando estas propiedades de un material disminuyen al 50% de su valor inicial, después de haber sido sometido a temperatura durante un tiempo determinado. Otros valores alternativos de pérdida son al 75% y 25%.
- ❖ Temperaturas: desde 95°C hasta 254°C.
- ❖ Tiempos: 5.000, 20.000 y 40.000 horas (puede ser otro, pero hay que especificar).

Cabe destacar que el fabricante del material debe indicar explícitamente la *propiedad* y los valores de *temperatura* y *tiempo* que relaciona el TI. Para más información, en la sección de Anexos, en la Tabla B-1 (pág. 92), se muestran materiales aislantes y propiedades de prueba.

A modo de ejemplo, se tienen los resultados de un *ensayo de resistencia térmica* y se muestran en la Figura 3-2 (a), nótese que el material seleccionado ha sido sometido a 4 temperaturas distintas durante casi 7.000 horas. De la Figura 3-2 (a) se puede elegir cuando la propiedad del material disminuye hasta un 50% de su valor inicial, entonces los valores de cada curva de temperatura ubicados al 50% (puntos de colores) pueden describirse mediante la relación de Arrhenius entre el logaritmo del tiempo y el recíproco de la temperatura absoluta, en grados Kelvin, dando origen al gráfico mostrado en la Figura 3-2 (b). De este último gráfico, nótese el **comportamiento lineal del deterioro del material en función de la temperatura** dando lugar al deseado parámetro *Temperature Index* (TI).

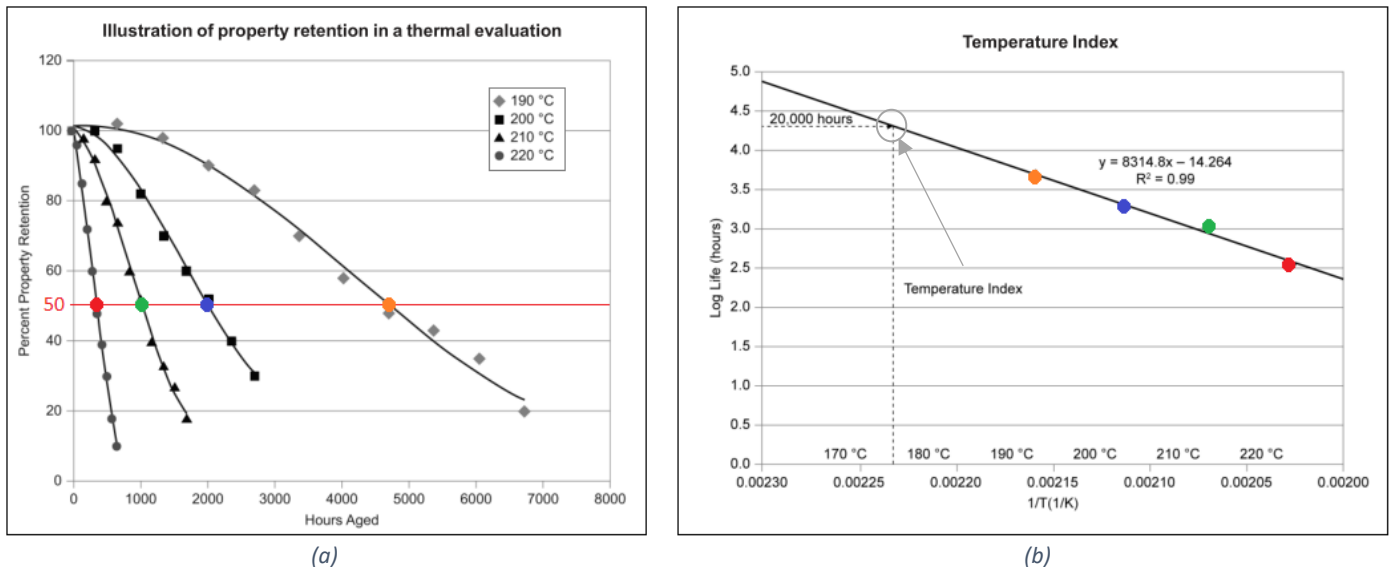


Figura 3-2: Relación entre los resultados de una prueba de resistencia térmica y la obtención del Temperature Index [10].

La relación lineal entre el logaritmo del tiempo y el recíproco de la temperatura absoluta solamente se obtiene si el esfuerzo térmico es el único responsable del deterioro del material [10]. Realizar una prueba de resistencia térmica no asegura obtener el TI, depende de cada material. En laboratorios certificados, la obtención del TI suele tomar al menos de 7 a 8 meses [11].

Contar con el TI de un material es de gran utilidad durante la fase de diseño de algún equipo ya que permite comparar la velocidad del deterioro de distintos materiales y estimar el tiempo de vida útil ante el esfuerzo térmico.

Para un mayor entendimiento del concepto explicado en la esta sección, a continuación, se presentan dos trabajos [12] [13] que se desarrollan en torno al *temperature index* (TI) o *índice de temperatura*.

3.1.1 Trabajos de ejemplo sobre el envejecimiento acelerado por temperatura

A la fecha de este trabajo de título no se ha encontrado documentación respecto a pruebas de envejecimiento acelerado que relacione el **deterioro dieléctrico ante el estrés térmico** de los enchufes mineros ni tampoco del material Ertalón 6® PLA (material que constituye la probeta).

El primer trabajo [12] fue publicado en el año 1998 y consiste en obtener el TI del polímero polibutilentereftalato (PBT) mediante ensayos de vida útil convencionales a largo plazo con tiempos de pruebas por sobre las 5000 horas versus una técnica analítica que promete obtener un valor aproximado del TI en menos de 300 horas.

En [12] se seleccionan dos propiedades a estudiar del PBT en función de la temperatura, la primera es la rigidez dieléctrica, del inglés electric strength (ES), donde se observó que esta propiedad aumentó con el tiempo de envejecimiento hasta un máximo y luego disminuyó hasta valores cercanos al inicial. Un ejemplo de este comportamiento se muestra en la Figura 3-3, donde la rigidez dieléctrica (ES) se traza en función del tiempo de envejecimiento para las probetas envejecidas a 170°C. De esta prueba el autor concluye que la rigidez dieléctrica es quizás la propiedad de diagnóstico más común en los ensayos de vida útil de los aislamientos poliméricos, pero esto no es válido para el PBT, al menos en los rangos de temperatura y tiempo investigados.

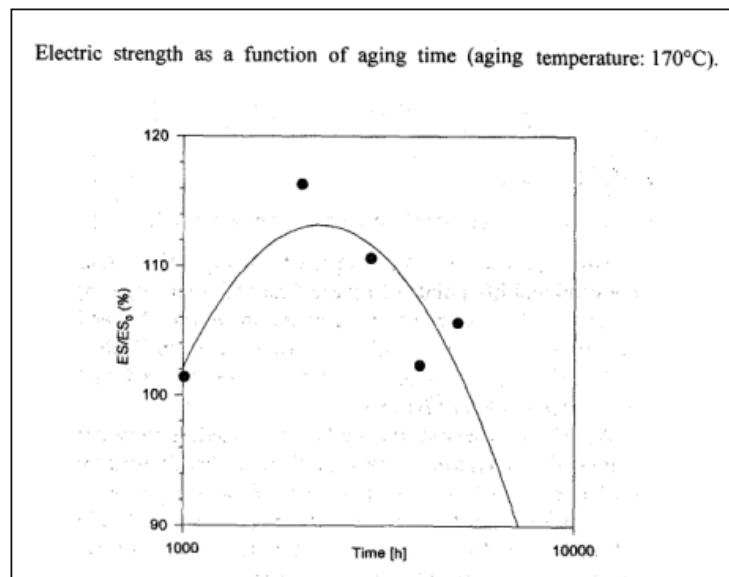


Figura 3-3: Rigidez dieléctrica del polímero PBT envejecido a 170°C [12].

La segunda propiedad que se analiza del PBT es la resistencia a la tracción, del inglés tensile strength (TS). Para esta prueba se han envejecido probetas de PBT a 140, 150, 160 y 170°C hasta que la propiedad de resistencia a la tracción se reduzca al 50% de su valor inicial para cada temperatura. Los resultados de esta prueba se muestran en la Figura 3-4, los valores están referidos a la TS inicial (TS_0).

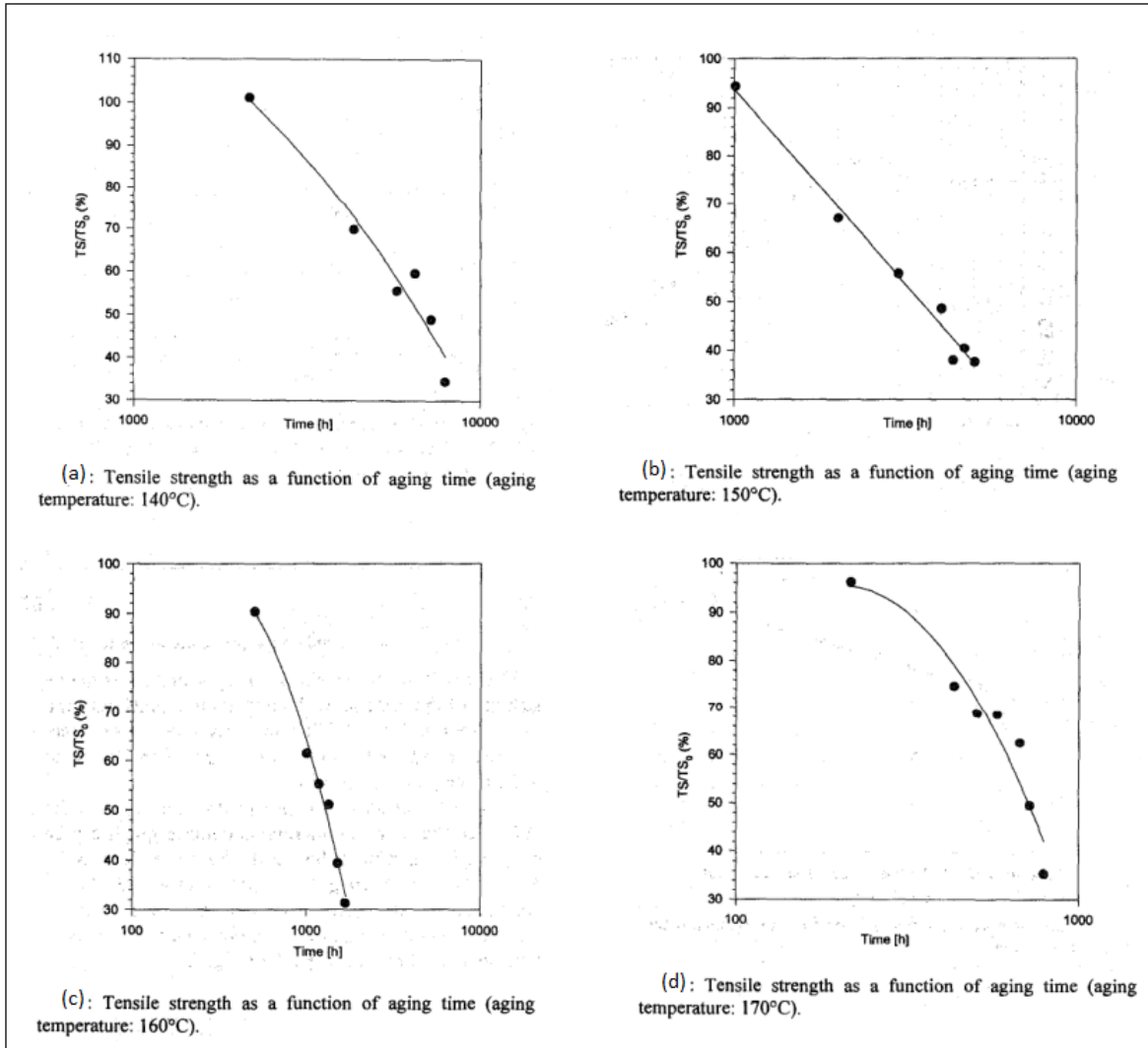


Figura 3-4: Resistencia a la tracción del polímero PBT envejecido a 140, 150, 160 y 170°C [12].

Nota: si se hubiesen puesto las cuatro curvas de la Figura 3-4 en un mismo gráfico, se tendría el gráfico mostrado en la Figura 3-2 (a).

Al considerar los datos de la Figura 3-4, cuando se alcanza el 50% de la resistencia a la tracción inicial para cada temperatura, es posible originar la gráfica mostrada en la Figura 3-5, misma gráfica que se ha mostrado en la Sección 3.1, en la Figura 3-2 (b).

De la gráfica de resistencia térmica del polímero PBT (Figura 3-5), se observa una relación lineal entre el deterioro de la resistencia a la tracción del PBT por causa de la temperatura y el tiempo que necesita para lograr dicho deterioro. De este gráfico se obtiene un TI de 128,5°C, es decir, el material PBT pierde el 50% de la resistencia a la tracción cuando es sometido durante 20.000 horas a 128,5°C o bien a cualquier combinación de tiempo y temperatura que se seleccione por sobre la recta mostrada en la Figura 3-5.

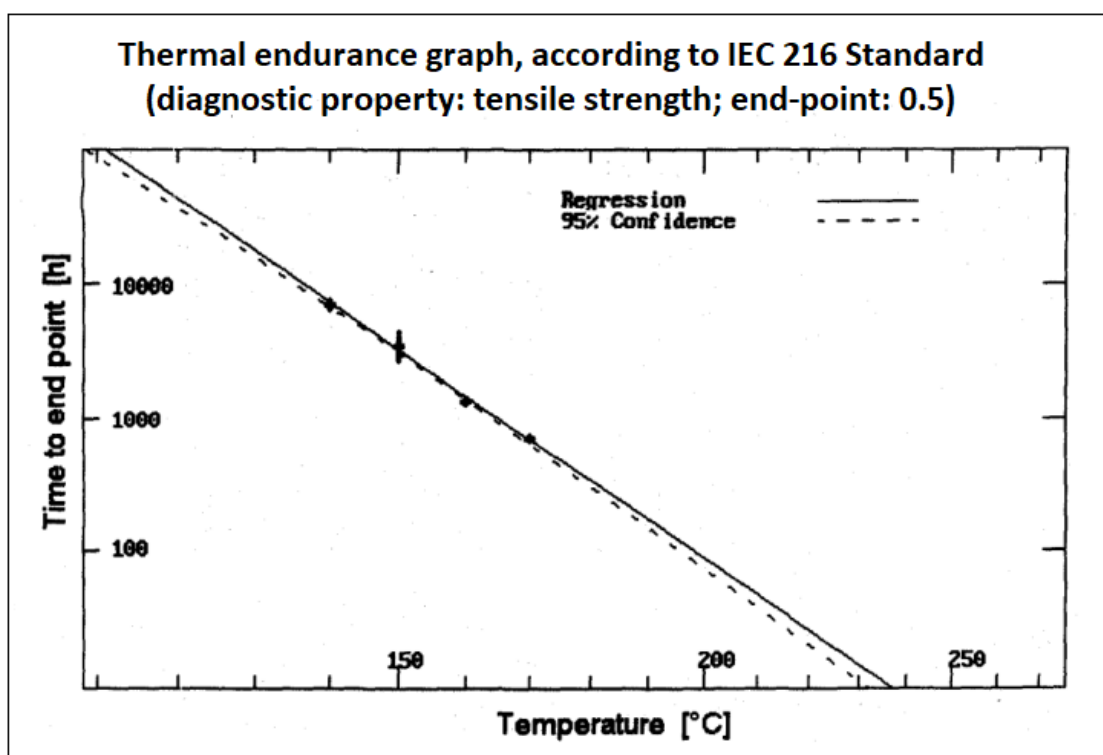


Figura 3-5: Resistencia térmica del polímero PBT de acuerdo con el método convencional de la IEC 216 [12].

Por otro lado, la técnica analítica (método no convencional), arroja un TI de 129,2°C para la misma propiedad, por lo que dicha técnica ha demostrado ser muy eficaz para la evaluación de la resistencia térmica a corto plazo de las poliolefinas y los poliésteres como el PBT. Cabe destacar que el tiempo total de prueba requerido por la técnica analítica es de unos cientos de horas, mientras que el tiempo requerido según el método convencional es de más de 5000 horas.

El segundo trabajo [13] fue publicado en el año 1986 y consiste en la evaluación experimental de propiedades de resistencia térmica de materiales aislantes termoestables y compuestos, el documento también propone nuevos procedimientos y utilizar temperaturas de ensayo más bajas que los métodos tradicionales de la época.

Una de las pruebas realizadas en [13] fueron ciclos de envejecimiento por temperatura en una resina epoxi cicloalifática, con el objetivo de encontrar los parámetros que posiblemente afecten a la determinación del TI. Se ha mostrado una dependencia de la rigidez dieléctrica (ES) ante el espesor de la muestra, ver Figura 3-6 (a). Además, la experiencia ha demostrado que esta resina mejora su resistencia contra el envejecimiento térmico si las probetas son pretratadas durante 100 horas a una temperatura cercana al TI estimado, se dice que el material se vuelve más homogéneo, pierde humedad y se estabiliza térmicamente, la Figura 3-6 (b) muestra las curvas de rigidez dieléctrica, pertinentes a los ensayos a 220°C para una resina epoxi cicloalifática, realizados en (a) sin pretratamiento y (b) con pretratamiento durante 90 horas a 130°C.

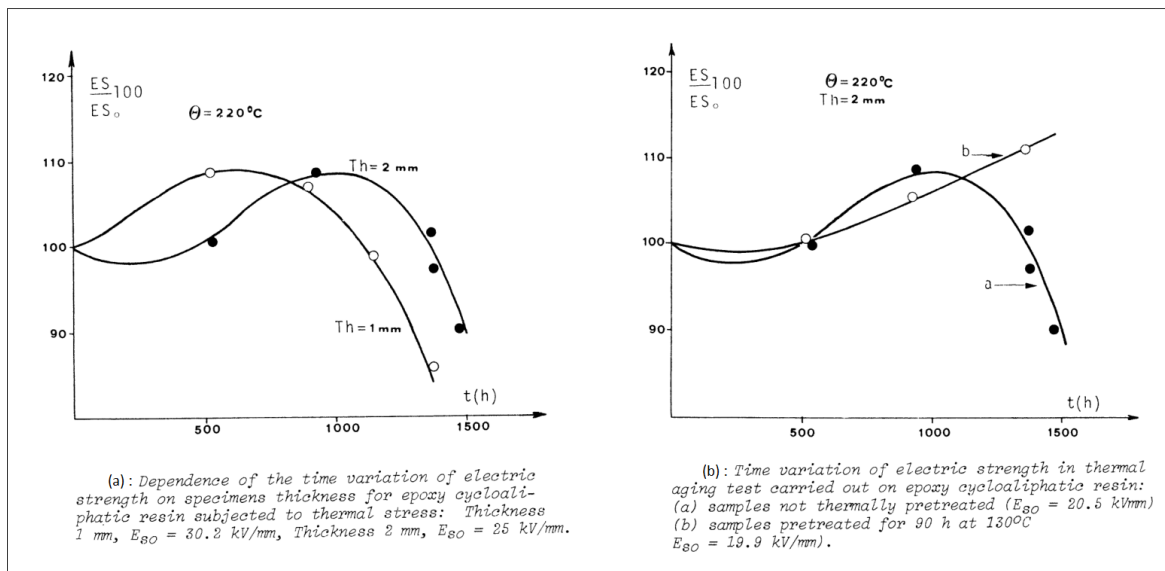


Figura 3-6: Rigidez dieléctrica y pérdida de masa de la resina epoxi cicloalifática ante el estrés térmico [13].

El documento también menciona que para generar una gráfica de resistencia térmica de una propiedad es importante una selección adecuada del *punto final o end point* (porcentaje de disminución de una propiedad respecto el punto inicial), cuyos límites no pueden definirse de forma sencilla ya que las gráficas de resistencia térmica se elaboran en base a un punto final establecido, si este criterio cambia entonces la gráfica y el TI buscado también cambia. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 3-7 donde se observan tres rectas de resistencia térmica del papel aislante Nomex mylar Nomex, la recta (a) corresponde cuando la masa inicial de la probeta se reduce a un 94% de su valor inicial (*end point* de 0.94), la recta (b) hasta un 95% (*end point* de 0.95) y la recta (c) hasta un 97.5% (*end point* de 0.975). De la misma figura, nótese que, para un mismo tiempo, ejemplo 20.000 horas, se tienen distintas temperaturas según la intersección con cada recta, por ende, distintos TI, para el mismo material pero distinto criterio de *punto final*.

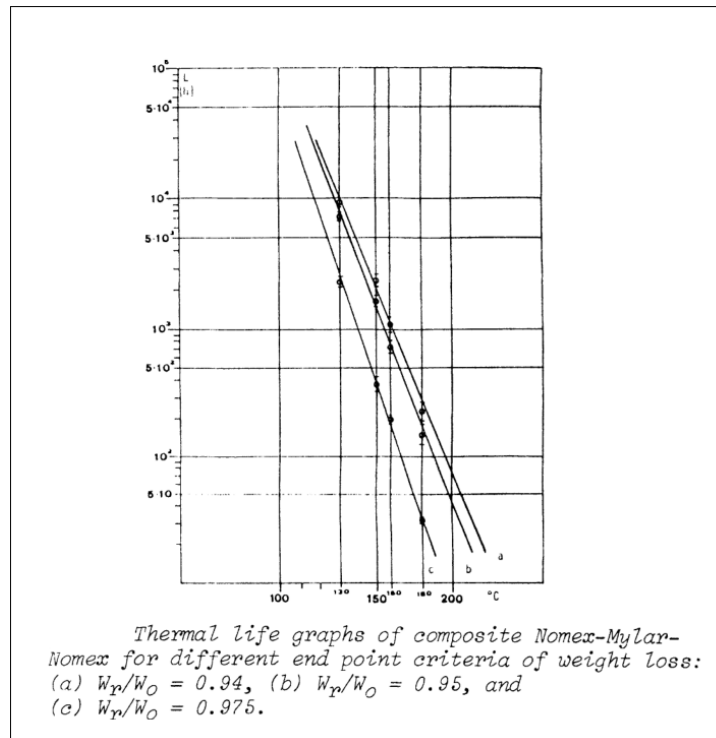


Figura 3-7: Resistencia térmica del papel aislante Nomex mylar Nomex para tres end points diferentes [13].

La obtención del *temperature index* (TI) consiste en correlacionar el *punto final* con una *propiedad* para la que se conoce un criterio de fallo objetivo. Parte de las conclusiones de [13], sugiere que para la *rigidez dieléctrica* (ES) una disminución de un 50% del valor inicial puede considerarse como criterio de falla real de los sistemas aislantes sometidos a esfuerzos eléctricos.

3.1.2 Prueba de envejecimiento acelerado por temperatura a la probeta

En conformidad con la sección anterior, para el caso de la probeta en estudio, que está confeccionada a partir del material Ertalón® 6 PLA, desde su ficha técnica (Tabla A-4, pág. 91) se conoce que:

El material Ertalón® 6 PLA pierde un 50% de su propiedad *Tensile strength* (resistencia a la tracción) si es sometido a 90°C durante 20.000 horas, o bien, a 105°C durante 5.000 horas.

Con la información anterior es posible confeccionar la Figura 3-8 que se muestra a continuación.

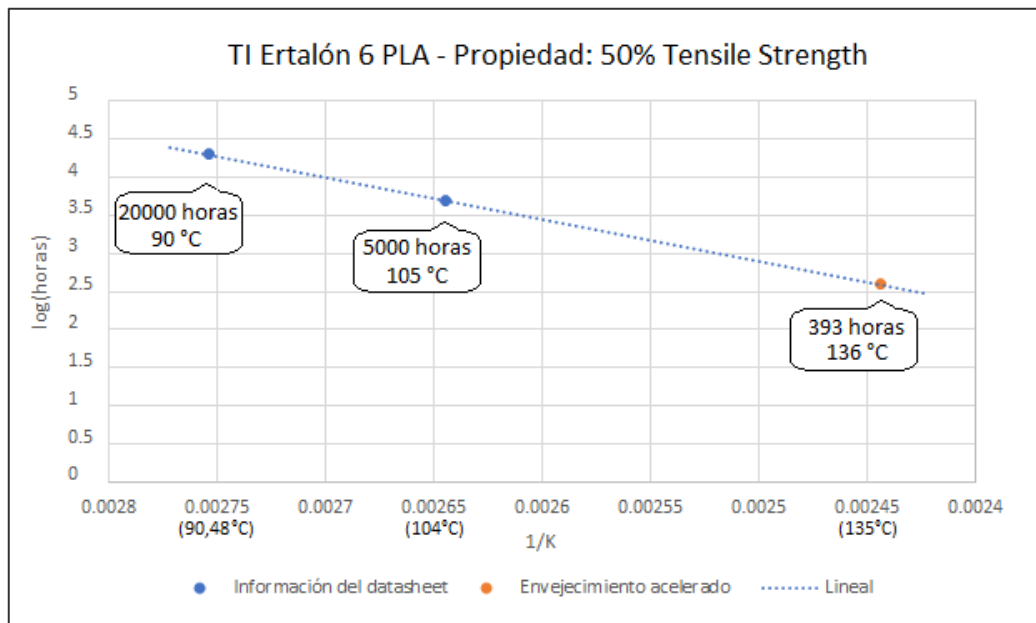


Figura 3-8: TI Ertalón® 6 PLA, tiempos y temperaturas para reducir hasta un 50% su resistencia a la tracción.

Es sabido que el conjunto cable/enchufe para la minería suele operar a 90°C, por lo que tomaría 20.000 horas de servicio continuo (2 años y 100 días) para lograr que la propiedad de *resistencia a la tracción* de la probeta alcance el 50% de su valor original. Se puede interpretar que la probeta después de 2 años de servicio se vuelve el doble de frágil, pues, si se tracciona, se necesita la mitad de fuerza que una probeta nueva. Para no tener que esperar 2 años para conseguir este efecto, en base a la Figura 3-8, es posible acelerar el deterioro utilizando una temperatura de 136°C durante 393 horas.

De la experiencia de 3M, se sabe que los enchufes mineros comercializados por 3M tienen una duración de aproximadamente de 2 años y que su corta duración es causada por daño mecánico (impacto y aplastamiento), la Figura 2-6 da evidencia de aquello. No obstante, y de igual manera, existen en minería ciertas áreas donde este tipo enchufes se encuentran estáticos y exentos de maltratos mecánicos, como el caso de los enchufes empotrados, que igualmente han sufrido deterioro temprano de su vida útil, lo que produce una mayor incertidumbre en el porqué de la falla.

Dado que se conoce que los enchufes mineros de 3M tienen una duración promedio de 2 años, se propone el siguiente ensayo de envejecimiento de la probeta:

- ❖ Someter al aislante eléctrico (la probeta) a un esfuerzo térmico de 90°C y 136°C durante 393 horas, mediante un horno, con la intención de comparar la calidad dieléctrica de la probeta ante un deterioro normal versus uno acelerado.
- ❖ Con el envejecimiento acelerado se intenta reproducir el deterioro térmico que tendría una probeta después de haber estado en operación continua a 90°C durante 2 años y 100 días.

Nota: Las variables de tiempo (393 horas) y temperatura (136°C) han sido seleccionadas en base la tendencia lineal de la Figura 3-8 y también ante la necesidad de realizar los ensayos en el laboratorio de la universidad en un plazo dentro de un semestre académico.

De la información proporcionada por el fabricante del material con el que está hecha la probeta, se conoce que después del ensayo térmico la probeta pierde un 50% su propiedad mecánica de resistencia a la tracción, volviéndose más frágil, **pero se desconoce el estado de su calidad como aislante eléctrico ante el esfuerzo térmico.**

Para cuantificar y realizar seguimiento a la calidad dieléctrica de la probeta ante un ensayo de resistencia térmica, la normativa IEEE Std 98 recomienda medir algunas de las siguientes variables: *factor de disipación (también llamado factor de pérdidas o tangente delta “ $\tan \delta$ ”), constante dieléctrica (ϵ), capacitancia (C), resistividad (ρ) y/o resistencia de aislamiento (R_a).*

De las técnicas de la alta tensión, se puede mejorar un diagnóstico de la calidad de un aislamiento eléctrico sólido si también se consideran los parámetros: *índice de polarización (IP)* y descargas parciales (*DP*). Finalmente, los parámetros de diagnóstico a medir en laboratorio son los que se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: *Parámetros de diagnóstico de la calidad de un aislamiento eléctrico sólido, parámetros sugeridos por IEEE Std-98 versus parámetros elegidos para el desarrollo de este documento.*

Parámetros sugeridos por IEEE Std 98	Parámetros elegidos
❖ Factor de disipación	❖ Factor de disipación
❖ Constante dieléctrica	❖ Capacitancia
❖ Capacitancia	❖ Descargas parciales
❖ Resistividad (superficie o volumen)	❖ Resistencia de aislamiento
❖ Resistencia de aislamiento	❖ Índice de polarización

Finalmente, se ha descrito la propuesta del esfuerzo térmico que ha de ser aplicado al aislante eléctrico del enchufe minero 3M y se han seleccionado los parámetros de diagnóstico para hacer el seguimiento a la calidad dieléctrica de la probeta.

La teoría sobre cómo se interpretan los parámetros de diagnóstico se detalla en el *Capítulo 4: Criterios para el diagnóstico dieléctrico*, allí se resume la información necesaria para realizar el análisis de los datos obtenidos en laboratorio.

Sección 3.2

Envejecimiento ante sollicitación de esfuerzo eléctrico

Lo que se intenta reproducir en laboratorio es el deterioro de la calidad dieléctrica de la probeta por transitorios de tensión, dado que la máquina extractora de materia prima se encuentra constantemente cargando, descargando y moviendo grandes masas de mineral, por lo que se piensa que con frecuencia se producen transitorios de voltaje por el cable y enchufe minero a causa de los constantes cambios de inercia del motor de la maquinaria.

A la fecha de este documento, no se ha encontrado documentación de pruebas de envejecimiento acelerado por transitorios de tensión producto de la operación de máquinas mineras, por ende, lo que viene a continuación es una propuesta de elaboración propia.

Como una fuente por donde comenzar, se tiene el documento Mine Power Systems [14], es un libro estadounidense del año 1991 que fue creado ante la necesidad de contar con una referencia técnica para los estudiantes de ingeniería en minas y trata sobre el diseño de sistemas de potencia para la industria minera. De su capítulo 11 “Transitorios y sobretensiones” se definen varios tipos de transitorios de la red eléctrica minera, entre ellos resulta de interés el transitorio llamado “switching transient” el cual es causado por operaciones de conmutación, es decir, cuando hay cambios bruscos de tensión y/o corriente en la red eléctrica por causa de la operación normal del sistema.

La conmutación es la acción de interrumpir o dar continuidad de tensión o corriente, algunos ejemplos de conmutación puede ser la operación de un interruptor o el encendido/apagado de cargas eléctricas (motores, luces, hornos, taladros, microondas, etc).

Se piensa que la máquina extractora minera es una fuente persistente de transitorios de tensión y corriente dado que su operación consiste en la carga, descarga y desplazamiento de grandes masas de mineral por lo que el motor eléctrico de estas máquinas se encuentra constantemente entrando y saliendo del reposo (arranque frecuente del motor).

Es normal la presencia de transitorios de tensiones y corrientes en una red eléctrica, pero existe un límite entre magnitudes normales y anormales.

Como información relevante, del documento Mine Power Systems se extrae:

Las operaciones de conmutación representan la mayor parte de los fenómenos transitorios en los sistemas de energía de las minas y, salvo los golpes directos de los rayos, los transitorios más destructivos de los sistemas de energía son iniciados por esta fuente. Cada vez que se acciona un interruptor, puede producirse un transitorio, que puede clasificarse en dos tipos: **normal y anormal**. Los transitorios de tensión y corriente normales se consideran una característica del funcionamiento correcto, y su resultado máximo es una **tensión o corriente transitoria no mayor (pero normalmente menor) que dos veces la tensión o corriente de estado estacionario máxima del sistema**. Los transitorios que superan este nivel se denominan anormales y son el resultado de un funcionamiento o diseño incorrecto de los componentes.

En conformidad a la cita anterior, es posible decir que: si el enchufe minero 3M es de clase 25 kV_{rms} con un valor peak de $25 \cdot \sqrt{2} = 35,36\text{ kV}_{peak}$, entonces se espera que los transitorios de tensión producto de la operación de una máquina minera sean con normalidad inferior a $2 \cdot 35,36 = 70,72\text{ kV}_{peak}$. Sin embargo, se ha seleccionado aplicar 75 kV_{peak} en vez de $70,72\text{ kV}_{peak}$ ya que es la magnitud más cercana a un valor estandarizado por la norma IEC 60071-1 “Insulation co-ordination” [15] (Tabla B-2, Anexos).

Dado que se aplican impulsos maniobra de 75 kV en vez de 70 kV, se ha decidido aplicar sólo impulsos de polaridad negativa ya que provocan un deterioro menos agresivo en un aislamiento sólido que los impulsos de polaridad positiva.

Para simular el efecto de los transitorios de tensión en la probeta, preliminarmente se propone aplicar un tren de impulsos tipo maniobra, ya que son los impulsos que simulan transitorios por conmutaciones, de amplitud 75 kV y polaridad negativa.

Lamentablemente se desconoce la frecuencia en que ocurren los transitorios de tensión por el enchufe minero en operación real, por lo que, dada la experiencia en el laboratorio de la universidad, para evitar el sobrecalentamiento de los equipos del laboratorio se ha propuesto aplicar 1 impulso tipo maniobra cada 5 minutos durante 3 horas.

Otro punto desfavorable es que no se tiene una relación de tiempo entre el deterioro causado por el ensayo propuesto y un deterioro por causa de una operación normal. Sin embargo, se pretende cuantificar el daño a causa de los impulsos de tensión y estudiar el efecto combinado que provocan los impulsos en una probeta envejecida por temperatura.

Finalmente, el ensayo propuesto para envejecer en laboratorio a la probeta es:

- ❖ Aplicación de un tren de impulsos tipo maniobra de polaridad negativa, de amplitud 75 kV, cada 5 minutos durante 3 horas.

Los impulsos serán aplicados directamente en los puntos vivos del enchufe minero (en los pines hembra) y la tierra es mediante la masa del enchufe (la carcasa). El esquema que muestra la manera en cómo se aplica el impulso a la probeta se muestra en la Figura 3-9.

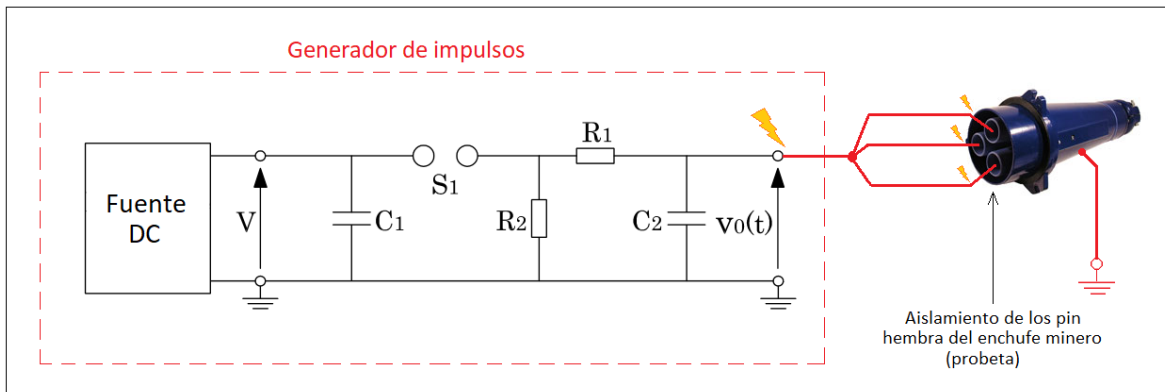


Figura 3-9: Esquema básico de un generador de impulsos [16].

Cabe mencionar que la forma de aplicar los impulsos es fase-neutro, mientras que la magnitud del impulso fue calculada en base a la tensión de operación línea-línea del enchufe, sin embargo, la normativa IEC 60071-1 “Insulation co-ordination” define que para equipos con tensiones de operación entre 1kV y 245kV, la magnitud de tensión de los impulsos línea-línea son iguales a las fase-neutro.

Se ha descrito la propuesta del esfuerzo eléctrico que ha de ser aplicado al aislante eléctrico del enchufe minero 3M, los parámetros de diagnóstico fueron los exhibidos en la Tabla 3-1 de la *Sección 3.1* y serán siempre los mismos. Toda la planificación de la prueba de envejecimiento que se ejecuta en laboratorio se presentan a continuación en la *Sección 3.3*.

Sección 3.3

Planificación del procedimiento de envejecimiento acelerado

Los antecedentes mostrados a continuación están en base a lo mencionado en la *Sección 3.1* y *Sección 3.2* del presente capítulo.

Antecedentes de la sollicitación de estrés térmico

- ❖ Someter al aislante eléctrico (la probeta) a un esfuerzo térmico de 90°C y 136°C durante 393 horas, mediante un horno, con la intención de comparar la calidad dieléctrica de la probeta ante un deterioro normal versus uno acelerado.
- ❖ Con el envejecimiento acelerado se intenta reproducir el deterioro térmico que tendría una probeta después de haber estado en operación continua a 90°C durante 2 años y 100 días.

Antecedentes de la sollicitación de estrés eléctrico

- ❖ Aplicación de un tren de impulsos tipo maniobra de polaridad negativa, de amplitud 75kV, cada 5 minutos durante 3 horas.

El total de probetas son 4 y estas se dividen en dos grupos: Grupo A y Grupo B. Cada grupo consiste en 2 unidades de aislante eléctrico del material Ertalón® 6 PLA perteneciente al enchufe minero 3M clase 25kV.

Grupo A: Probeta A1 y Probeta A2 (grupo sometido a 90 °C durante 4 ciclos de 100 horas)

Grupo B: Probeta B1 y Probeta B2 (grupo sometido a 136 °C durante 4 ciclos de 100 horas)

Adicionalmente, las probetas A2 y B2, después de cada ciclo de 100 horas de horneado, serán sometidas a un ensayo de impulso tipo maniobra, de amplitud 75kV, polaridad negativa, cada 5 minutos durante 3 horas.

Considerando que el laboratorio de alta tensión cuenta con solo un horno, en la Figura 3-10 se muestra un esquema ilustrativo de la prueba de envejecimiento.

Los parámetros para cuantificar la calidad del aislamiento eléctrico de la probeta son: *Resistencia de aislamiento, Índice de polarización, Factor de pérdidas, Capacitancia, Descargas parciales y análisis de respuesta de frecuencia FRA.*

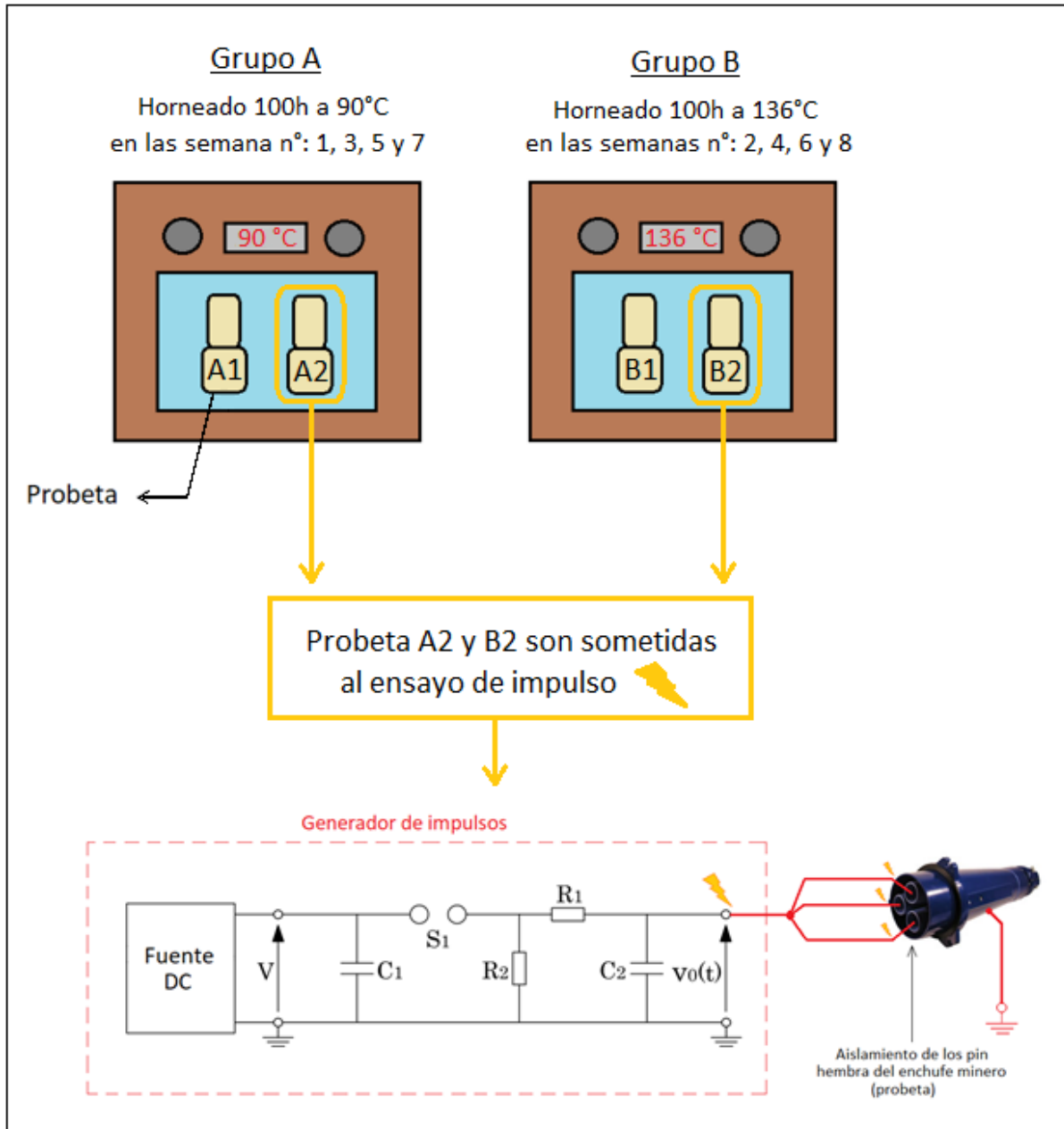


Figura 3-10: Ejemplo ilustrativo del ensayo de envejecimiento de la probeta por estrés térmico y eléctrico.

Nota: Toda la información sobre la metodología adoptada en laboratorio sobre la prueba de envejecimiento se encuentra en la sección de *Anexo D – Metodología de las pruebas de envejecimiento acelerado y medición de los parámetros de diagnóstico*, en la página 100.

Capítulo 4

Criterios para el diagnóstico dieléctrico

Para comenzar este capítulo es necesario responder qué es un dieléctrico. En términos prácticos, un dieléctrico es un medio material sólido, líquido o gaseoso que pone gran resistencia al flujo de corriente eléctrica, al contrario de un medio conductor que facilita el paso de corriente eléctrica. La industria eléctrica estudia y utiliza los materiales dieléctricos, también llamados aislantes eléctricos, para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos y proteger la integridad de las personas, aislando zonas donde exista o existirá una diferencia de potencial capaz de provocar daños a la salud o a la propia máquina. Las aplicaciones más comunes son los cables, motores, generadores, confección de condensadores, la gravilla de subestaciones y en general cualquier aparato que necesite de energía eléctrica para funcionar y la zona donde estos se encuentran.

Un material dieléctrico puede ser considerado como una agrupación de partículas con carga eléctrica. Estas cargas se modelan en dos tipos: **cargas libres**, son las responsables de la circulación de la corriente eléctrica, y cargas asociadas o **dipolos**, conjunto formado por pares de carga eléctrica de signo opuesto, el movimiento de este último conjunto está limitado sólo a la rotación y no cuenta con libre desplazamiento. Los materiales dieléctricos no son buenos conductores eléctricos porque contienen una escasa cantidad de cargas libres, más bien, su estructura está formada mayoritariamente por dipolos [16].

Existen varias propiedades que caracterizan a los materiales dieléctricos, en el mundo de la ingeniería, los aspectos más relevantes se describen brevemente a continuación:

- **Estructura cristalina:** Es la forma tridimensional en que se distribuyen en el espacio los átomos de un material. Los enlaces que interconectan y mantienen unidos a los átomos o moléculas forman verdaderas paredes que dificultan la libre circulación de la carga libre y la rotación de los dipolos. La densidad de la estructura cristalina de un material determina si este se encuentra en estado sólido, líquido o gaseoso. En la Figura 4-1 se muestra una imagen a modo de ejemplificar este concepto, se muestra una fotografía del cuarzo junto a la estructura cristalina que lo representa.

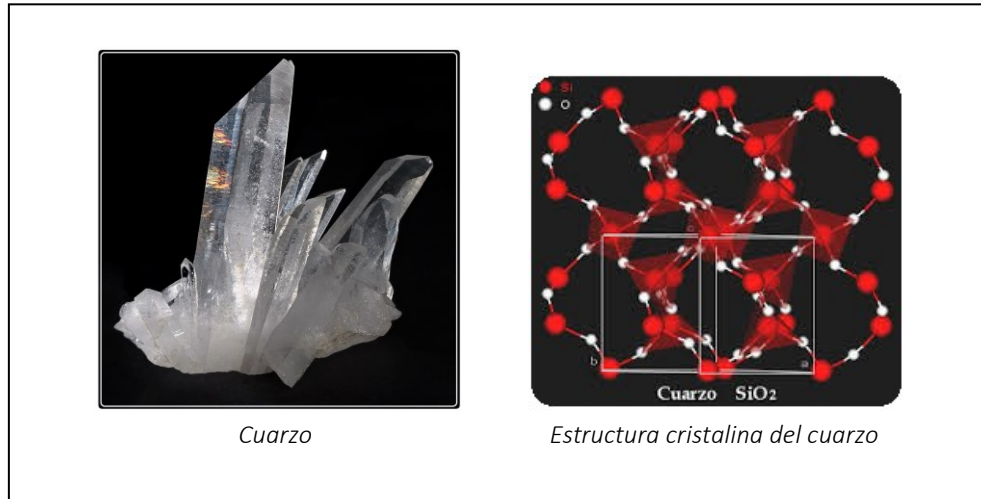


Figura 4-1: Imagen del cuarzo y de la estructura cristalina que lo representa [17].

- **Rigidez dieléctrica (E_D):** se define como el valor máximo del campo eléctrico aplicado en que un material dieléctrico, sometido en un sistema de electrodos de campo homogéneo, pierde su propiedad aislante [18]. Cada material se caracteriza por un valor límite de E_D y es medido en $[V/m]$ ó $[kV/cm]$.
- **Conductividad eléctrica (σ):** el valor de este parámetro es característico de cada material, relaciona la cantidad de corriente que es capaz de fluir a través de un medio material al ser sometido ante una intensidad de campo eléctrico [18]. Un buen conductor eléctrico presenta un alto índice de conductividad, al contrario de un dieléctrico; donde σ es cercano a cero. Es medido en siemens por metro $[S/m]$.
- **Polarización (P):** En base a [16] [19] [20], cuando un campo eléctrico externo es aplicado sobre un dieléctrico, las moléculas dipolares que conforman la estructura cristalina del material aislante rotan hasta alinearse en la misma dirección del campo externo, esta tendencia de alineación de los dipolos en dirección al campo externo se denomina *polarización*. Existen principalmente cuatro tipos de polarización y más adelante se explica en qué consisten estos mecanismos.
- **Permitividad dieléctrica (ϵ):** Los diferentes tipos de materiales dieléctricos no se polarizan con la misma intensidad ante la misma sollicitación de campo eléctrico, ϵ cuantifica el grado de polarización que alcanza un material al ser sometido ante un campo eléctrico externo, su unidad de medida es $[F/m]$. La permitividad del espacio vacío es de $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} [F/m]$.

En general, la permitividad dieléctrica es del orden de 10^{-12} y por motivos prácticos se suele utilizar el término de *permitividad relativa* (ϵ_r), este último es adimensional e indica la permitividad de un material respecto al vacío, es decir: $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ [–]. Algunos ejemplos de permitividad relativa son: $\epsilon_{r\text{aire}} = 1$, $\epsilon_{r\text{agua destilada}} = 80$.

Para explicar el concepto de polarización, a manera ilustrativa, en la Figura 4-2(a) se muestran dipolos distribuidos aleatoriamente de un material aislante que es sometido ante un campo eléctrico externo. Luego, en la Figura 4-2(b) se aprecia que los dipolos rotan hasta lograr alinearse en la misma dirección que el campo externo. Ahora, si se tiene un dieléctrico de grosor d y es sometido ante sollicitación de un campo eléctrico externo de magnitud $\vec{E}_{ext}$, los dipolos se alinearán en la misma dirección del campo dando lugar a la formación de delgadas capas de dipolos, ver Figura 4-2(c). La nueva distribución de los dipolos del aislante forma un campo eléctrico interno de magnitud $\vec{E}_{int}$ que se encuentra en sentido opuesto al campo externo original, obteniéndose así, un campo resultante neto de menor magnitud que el campo inicial.

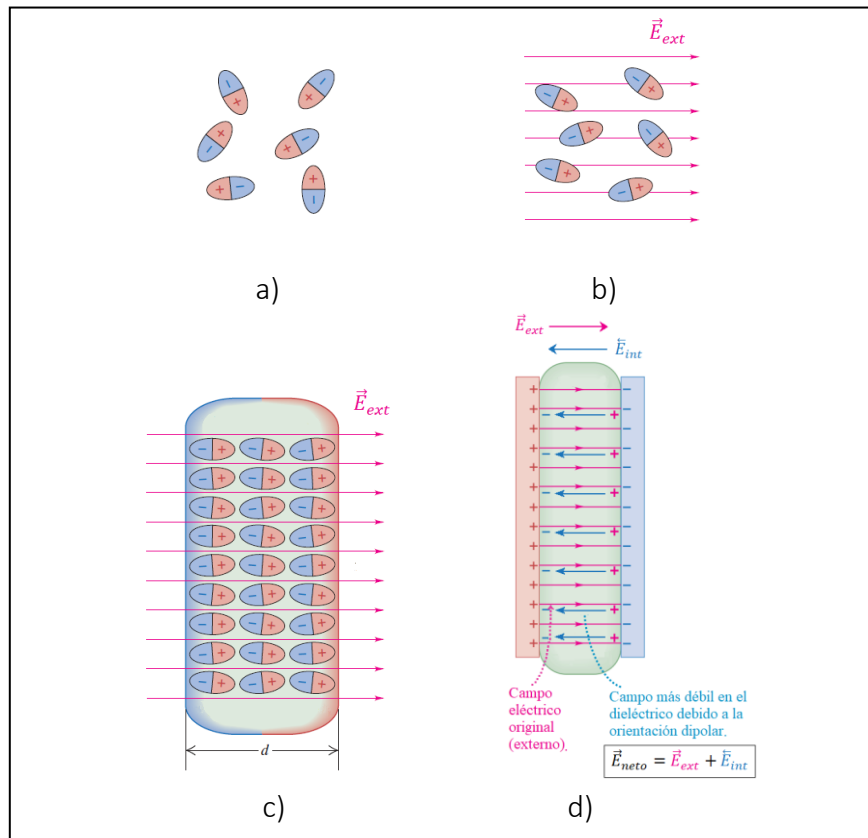


Figura 4-2: Ilustración de la polarización en materiales dieléctrico [20].

En resumen, la polarización trae como consecuencia la redistribución de la carga eléctrica de las moléculas que constituyen el material aislante, dicha distribución de carga logra formar un campo eléctrico interno que se opone al campo eléctrico externo, dando como resultado un campo neto de menor magnitud que el campo externo inicial.

Para ilustrar el efecto de la polarización en una aplicación dentro de la ingeniería eléctrica, desde [20] se ha extraído la Figura 4-3 donde se muestra un electrómetro (voltímetro) que mide la diferencia de potencial entre dos conductores sin permitir un flujo apreciable de carga eléctrica (Q), en la Figura 4-3(a) se muestra un condensador en vacío inicialmente cargado, con magnitud de carga Q en cada placa y diferencia de potencial V_0 . En la Figura 4-3(b) se tiene exactamente el mismo condensador ya mencionado, pero se ha insertado una lámina sin carga de un material aislante, por ejemplo, una lámina de vidrio. Los experimentos muestran que la magnitud de la diferencia de potencia V_0 disminuye a un valor V . Al retirar el material dieléctrico entre las placas del condensador la diferencia de potencial vuelve a su valor original de V a V_0 lo que demuestra que las cargas originales en las placas no han cambiado.

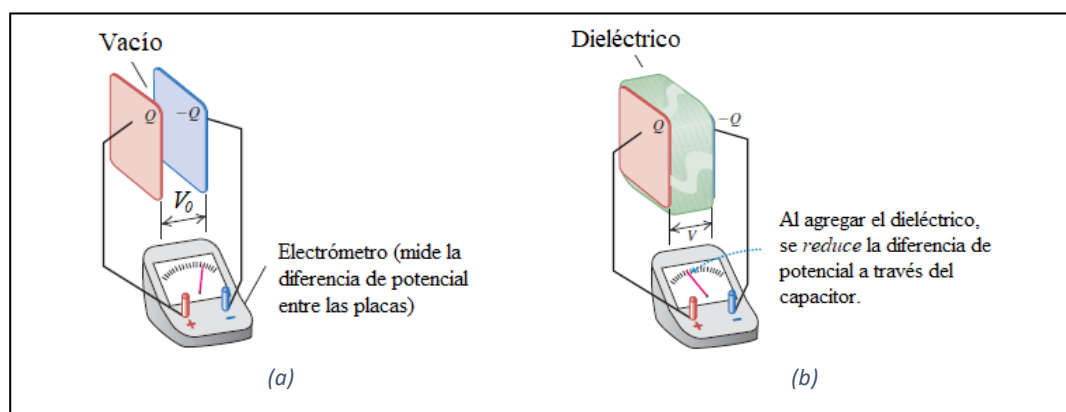


Figura 4-3: Efecto de un dieléctrico entre las placas paralelas de un capacitor [20].

El principal motivo por el que los materiales dieléctricos no facilitan el flujo de corriente eléctrica es porque el medio material (sólido, líquido o gaseoso) consigue atenuar la sollicitación de campo eléctrico debido a que cuenta con una estructura molecular con escasa cantidad de carga libre y gran cantidad de dipolos.

La polarización es reversible, al retirar la fuente de voltaje y cortocircuitar los terminales, las cargas libres y los dipolos se relajan; volviendo a su posición de equilibrio original. Este efecto reversible de la polarización es el responsable de que aparezca voltaje en los terminales de un condensador después de haber sido desenergizado.

Respecto al fenómeno de polarización, se pueden definir cuatro mecanismos en que los átomos y moléculas dipolares consiguen alinear sus polaridades en la dirección del campo eléctrico externo que se aplica [21], estos son: La polarización *electrónica, atómica, orientación dipolar e interfacial*.

La polarización electrónica es el *momento* (giro) del par núcleo-electrón y la polarización atómica es el *momento* que realizan las moléculas complejas que conforman el material. Estos dos mecanismos de polarización se pueden suponer instantáneas, en comparación a la polarización por orientación dipolar e interfacial, debido a que ocurren extremadamente rápido, en periodos de tiempo entre 10^{-15} y 10^{-12} segundos.

La polarización dipolar es el *momento* (giro) de los dipolos que quedan enjaulados dentro de los huecos de la estructura cristalina del material, configurando dipolos permanentes que se orientan en la dirección del vector de campo solicitante, los materiales con esta característica son denominados *materiales polares*. Los dipolos enjaulados no provocan polarización en ausencia de un campo externo, se encuentran orientados al azar y son sensibles a cambiar su orientación a causa de la vibración de otras moléculas por agitación térmica. La polarización dipolar se establece en periodos entre 10^{-4} y 10^{-9} segundos, este tiempo puede incrementar considerablemente ya que la polarización dipolar es altamente sensible a la temperatura en que se encuentra el material, la presencia de humedad y la incrustación de impurezas en el interior del aislante desde la manufactura. Que el efecto de polarización dipolar incremente su tiempo de relajación significa que al material le tomará más tiempo en descargarse y volver a su estado inicial de reposo una vez este sea desenergizado.

La polarización interfacial se produce en sistemas dieléctricos heterogéneos que estén conformados por una mezcla de dos o más materiales de diferentes índices de permitividad (ϵ) y conductividad (σ). Se manifiesta en una acumulación temporal de carga en la frontera entre los diferentes materiales aislantes. La polarización interfacial se establece en periodos exageradamente altos en comparación a los tres casos anteriores, se consideran tiempos de varios segundos, minutos hasta incluso horas.

Ya explicado qué es un aislante eléctrico y cómo funciona, a continuación se presentan las bases teóricas sobre diagnóstico dieléctrico en base a los parámetros: *resistencia de aislamiento, índice de polarización, descargas parciales, capacitancia, factor de disipación y la respuesta en frecuencia*.

Sección 4.1

Parámetros DC

Cuando a un material aislante se le aplica un voltaje continuo $U(t)$ se origina una corriente eléctrica $i(t)$ del orden de 10^{-9} que fluye a través del dieléctrico, ver Figura 4-4(a), el aislante puede ser modelado como un condensador homogéneo no ideal donde la corriente $i(t)$ puede ser dividida en tres subcorrientes: $i(t) = i_R + i_c + i_p$, ver Figura 4-4(b).

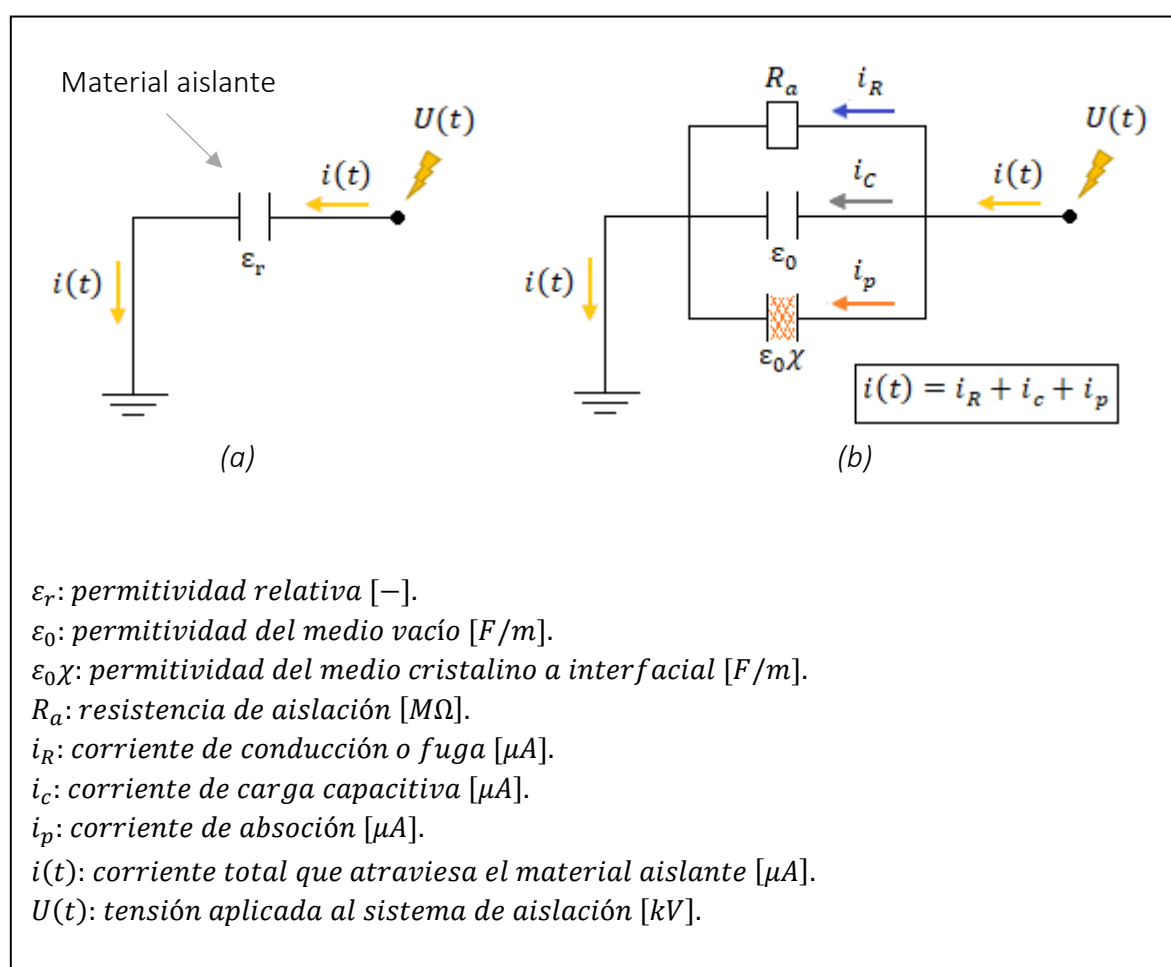


Figura 4-4: Modelo fundamental del condensador con dieléctrico homogéneo no ideal [16].

La suma de la corriente de conducción (i_R), de carga capacitiva (i_c) y de absorción (i_p) da como resultado la corriente total $i(t)$ la que es posible registrar con instrumentos de medición.

En la Figura 4-5 se muestra la respuesta de la corriente $i(t)$ de un condensador inicialmente descargado al ser sometido a sollicitación de tensión continua en sus terminales en $t = 0$. Nótese que la corriente total $i(t)$ (amarillo) comienza con gran magnitud y decae exponencialmente hasta lograr estabilizar en un valor asintótico de magnitud i_R (azul).

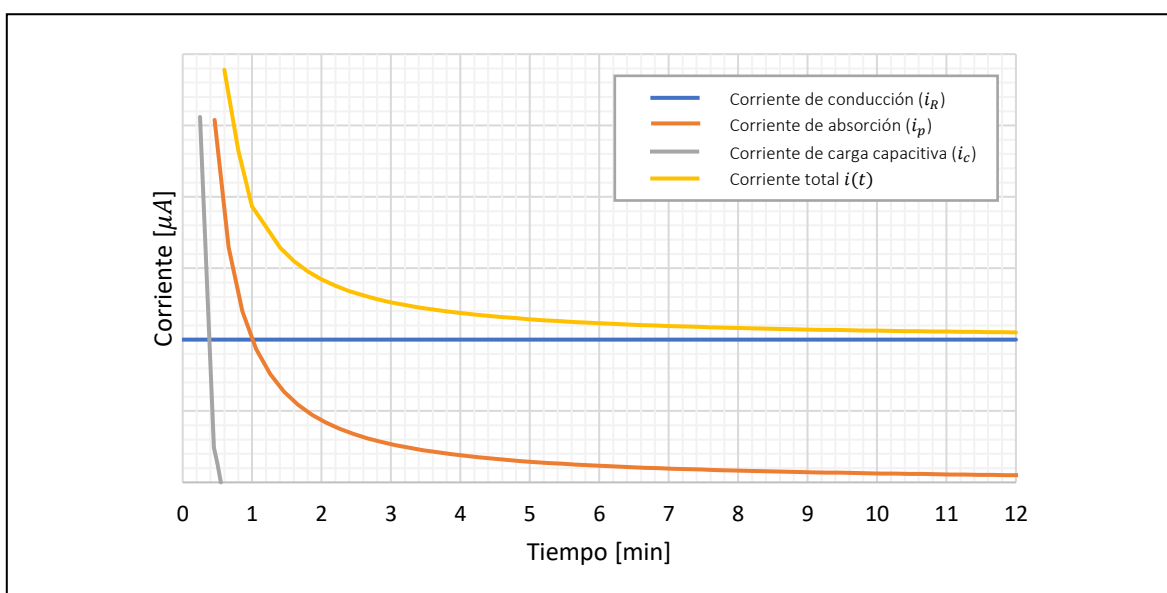


Figura 4-5: Componentes de la corriente total de un material aislante ante sollicitación de tensión continua [19].

- a) Corriente de carga capacitiva (i_c): Corriente transitoria requerida para cargar la capacitancia geométrica con medio vacío del aislamiento que se está probando [19] [22], “representa una energía almacenada reversible en la aislación (...) es la misma corriente que se descarga inicialmente al cortocircuitar la aislación después de finalizar un ensayo de voltaje aplicado”, es una función de tipo exponencial de la forma:

$$i_c = \frac{U}{R_{eq}} e^{-\frac{t}{R_{eq} \cdot C_0}} \quad (4.1)$$

U: tensión fuente DC en circuito abierto con la probeta.

R_{eq}: resistencia equivalente del sistema fuente DC – probeta. Se incluye toda resistencia serie que pueda existir en el circuito de ensayo hasta la probeta.

C₀: capacitancia geométrica con medio vacío, depende del área, forma y separación entre electrodos con medio vacío.

La corriente de carga capacitiva presenta una constante de tiempo (τ_c) del orden de los segundos, empieza alta y decae exponencialmente a un valor cercano a cero aproximadamente en 1 minuto (curva de color gris de la Figura 4-5), generalmente la corriente i_c suele ser despreciada al momento de evaluar el estado de una aislación por su rápida atenuación. Sin embargo, se debe tener precaución en circuitos que presenten una constante de tiempo alta, como el caso de cables aislados de gran longitud, ya que i_c podría ser no despreciable por su corta vida, provocando errores significativos en las mediciones de corriente o de resistencia de aislamiento.

- b) Corriente de absorción (i_p): Corriente transitoria producida por los efectos de *polarización* con tiempos de relajación (τ_p) lenta, a diferencia de la corriente de carga capacitiva (i_c), que considera el medio vacío; i_p depende de la geometría del dieléctrico y del tipo de material utilizado. La corriente de absorción es provocada principalmente por la *polarización interfacial* y los tiempos de relajación en los equipos de alta tensión son del orden de los minutos hasta incluso horas, i_p es una función de tipo exponencial de la forma:

$$i_p = K \cdot t^{-n}, \quad \text{con } K = \Delta V \cdot C \cdot D \quad (4.2)$$

K: constante.

t: tiempo de sollicitación de tensión [min].

n: factor de decaimiento.

ΔV : incremento de voltaje aplicado [V].

C: Capacidad de aislación [F].

D: factor de proporcionalidad entre 0 y 1 del voltaje aplicado y de la capacidad.

NOTA: Desde un punto de vista práctico, es posible medir la capacitancia C del aislante mediante sollicitación CA en un rango de 50 a 1000 [Hz] [19].

La corriente de absorción (i_p), al igual que la corriente de carga capacitiva (i_c), empieza alta y decae exponencialmente a un valor asintótico cero, pero tarda minutos y en algunos casos horas, en ser atenuada completamente. La corriente de absorción, al igual que la corriente de carga capacitiva, representa una energía almacenada reversible que puede ser liberada si se retira la tensión aplicada en el aislante. Esta energía es la causa de que el voltaje en los electrodos o placas de un dieléctrico reaparezca después de haber descargado el sistema con un cortocircuito [19], ya que i_p posee un tiempo de atenuación considerablemente más lento que i_c . Por este motivo, en [23] se indica que esta energía debe ser liberada, manteniendo la probeta en cortocircuito y aterrizada al final de cada prueba de diagnóstico dieléctrico DC, con un tiempo sugerido de al menos cuatro veces el tiempo del cual estuvo bajo ensayo de tensión.

- c) Corriente de conducción (i_R): Es una corriente sostenida y estable en el tiempo que circula a través del volumen de aislación y/o por la superficie de este. Se representa por un resistor de gran valor en paralelo con la capacitancia del aislamiento. A la corriente de conducción se le asocian las pérdidas (energía no reversible) del sistema de aislación, provoca aumento de temperatura y es la responsable del deterioro progresivo del material aislante. Es el parámetro más importante cuando se trata de evaluar el estado de una aislación empleando métodos de sollicitación de tensión continua [19]. Esta corriente se puede medir cuando el aislamiento está totalmente cargado, es decir, cuando se ha atenuado completamente las corrientes de absorción (i_p) y de carga capacitiva (i_c).

$$i_R = \frac{U_{DC}(t \rightarrow \infty)}{R_a} \quad (4.3)$$

U_{DC} : tensión DC aplicada al aislante.

R_a : resistencia de aislación.

i_R : corriente de conducción.

4.1.1 Resistencia de aislamiento

Según [16] y en base al modelo fundamental del condensador con dieléctrico homogéneo no ideal de la Figura 4-4, la resistencia de aislamiento (R_a) se define algebraicamente como:

$$R_a = \frac{U(t)}{i_R(t)} , \quad \text{evaluado en } t = 1[\text{min}] \quad (4.4)$$

La medición de la resistencia de aislamiento es la prueba más sencilla de todas las pruebas de aislamiento, R_a es uno de los parámetros más utilizados para determinar el estado de un aislamiento sólido, sin embargo, este valor por sí solo no es de gran utilidad, lo verdaderamente relevante es llevar un seguimiento histórico de este valor a lo largo de los años de vida del equipo eléctrico.

Es una prueba de carácter no-destructiva, si las magnitudes de R_a se mantienen constantes es sinónimo de que el aislamiento se encuentra en buen estado. En cambio, si el registro histórico muestra una tendencia sostenida a la baja, aun cuando las mediciones sean más altas que los valores mínimos de seguridad sugeridos, entonces la calidad del aislamiento está empeorando y generalmente es una advertencia de problemas futuros. Un buen aislamiento se ve reflejado en un valor sostenido de R_a . Un registro de ejemplo de este parámetro es mostrado en la Figura C-1 (pág. 94), en la sección de Anexos.

La medición de R_a es sensible a la temperatura, un aumento de esta en sistemas de aislación provoca una disminución en la magnitud de R_a , en [24] se indica que “en aislaciones, un aumento en la temperatura proporciona energía térmica, la cual adiciona cargas libres y reduce la resistividad”. Por este motivo, la normativa IEEE-43 [24] recomienda idealmente realizar las mediciones de la resistencia R_a siempre a la misma temperatura. En caso de no poder controlar la temperatura en la probeta al momento de realizar la lectura, se recomienda corregir el valor de R_a por un factor K_T . En la sección Anexo A, pág. 95, se detalla el proceso de la corrección por temperatura de la lectura de R_a .

La medición de R_a también es sensible a la presencia de humedad y suciedad superficial en la probeta, disminuyendo su valor. Sin embargo, no se realizan correcciones de estos factores por lo que [24] recomienda realizar lecturas de R_a siempre en condiciones similares de humedad en la probeta y del ambiente como también en la limpieza de partículas contaminantes en la superficie de la probeta.

4.1.2 Índice de polarización

En [16] se define el índice de polarización (IP) tradicionalmente como el cociente entre la resistencia de aislamiento (R_a) medida a los 10 minutos sobre la lectura de 1 minuto, esto es:

$$IP = \frac{R_a(t=10)}{R_a(t=1)} \quad , \quad \text{con } t \text{ en minutos} \quad (4.5)$$

La normativa internacional IEEE-43 [24] señala que el índice de polarización es un indicador de la pendiente de la curva característica de la respuesta de un sistema aislante ante una sollicitación de tensión (ver Figura 4-5, imagínese la pendiente a lo largo de la curva de color amarillo) y este parámetro puede ser utilizado para evaluar el estado de un dieléctrico. Otra manera adicional de interpretar este parámetro es entender que el IP es un indicador de estabilización de un sistema aislante ante sollicitación de tensión.

La prueba de IP es una extensión de la prueba de resistencia de aislamiento y generalmente se emplea para verificar problemas específicos en motores eléctricos, como la presencia de humedad, contaminación, el correcto funcionamiento y el deterioro gradual del aislamiento de la maquinaria [25].

A la fecha de este informe no se han encontrado valores de IP específicamente para sistemas de aislaciones de enchufes de media tensión, por lo que se utilizarán los valores de IP recomendados por [22] mediante la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Intervalo de valores recomendados de índice de polarización para el aislamiento eléctrico [22].

Índice de polarización de la condición del aislamiento	
< 1	Pobre
1 – 2	Cuestionable
2 – 4	OK
> 4	Bueno

Nota: La información de la Tabla 4-1 corresponde a recomendaciones por la empresa Megger para materiales aislantes en general, tanto para motores o cables, no se especifica un aparato en concreto.

En la *Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento* de Megger® [22], se señala que:

Los valores arriba de 4 indican equipo excelente para el que probablemente no sea necesaria ninguna acción dentro del programa de mantenimiento inmediato. Sin embargo, el operador puede ser llamado para hacer juicios críticos. Algunos valores de *IP* (arriba de 5) podrían indicar aislamiento quebradizo o agrietado; esto podría ser casi obvio. Un aumento súbito de *IP* mayor de 20%, sin haber realizado mantenimiento alguno, debe servir como una advertencia; el aislamiento puede mantener su valor por periodos largos, pero no es probable que los mejore espontáneamente de por sí.

En el subcapítulo anterior, 4.1.1 Resistencia de aislamiento, se ha mencionado que la medición de R_a es sensible a la presencia de humedad y suciedad superficial en la probeta y, por lo tanto, el *IP* no queda exento de este aspecto. La contaminación en un aislante se ve reflejado en un valor bajo y sostenido de *IP*, si se llegase a obtener un *IP* igual o inferior a 2, en base a la Tabla 4-1, en un aislante que se pensaba que se encontraba en buen estado, con alta probabilidad es causado por la presencia de humedad y/o contaminación superficial en el aislante, en tal caso, se recomienda secar y/o limpiar la probeta. Una aislación en buen estado que se encuentre limpia y seca, la resistencia de aislamiento no decrecerá con el tiempo, más bien, seguirá una tendencia de aumento hasta estabilizar su valor.

Finalmente, cabe destacar que el diagnóstico dieléctrico de un equipo en base al índice de polarización es aplicable sólo a circuitos aislantes sólidos y no se recomienda para otras configuraciones como el caso de transformadores en aceite, donde el *IP* arrojaría magnitudes pobres a pesar de contar con buenas condiciones de aislamiento [26].

Sección 4.2

Parámetros AC



Cabe recordar que no existen los materiales aislantes ideales, sin importar el material que se utilice ni el tipo de sollicitación eléctrica al cual sea sometido un sistema de aislación: siempre un sistema dieléctrico presentará pérdidas ante sollicitación de tensión. El conocimiento de estas inevitables pérdidas, que generalmente se reflejan en corrientes de fuga e incrementos de temperatura del sistema, son altamente importantes para el diseño y la operación de los equipos de potencia con el permanente objetivo de ser disminuidas al máximo.

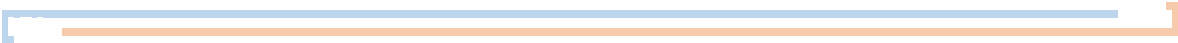
La medición periódica de las pérdidas de un sistema de aislación a lo largo de su vida útil es la principal herramienta que se utiliza para detectar el deterioro del aislamiento debido al envejecimiento, contaminación y otros fenómenos [27].

Cuando un aislante es sometido ante una sollicitación de tensión eléctrica de cualquier naturaleza, ya sea DC o AC, aparece una corriente de fuga que da lugar a pérdidas de energía.

En [21] se mencionan 4 mecanismos que representan las pérdidas en un dieléctrico:

- Con sollicitación continua (DC), principalmente: *pérdidas por polarización y pérdidas por absorción*.
- Con sollicitación alterna (AC), principalmente: *pérdidas por histéresis dieléctrica y pérdidas por descargas parciales*.

En [21] también se menciona que los átomos o moléculas de los materiales dieléctricos tienen un comportamiento diferente si el aislante es sometido a sollicitación de tensión AC o DC. Ante tensión alterna sinusoidal de frecuencia industrial (50 – 60 Hz) es razonable afirmar que son despreciables las *pérdidas por absorción*, pues la magnitud y el sentido de la tensión eléctrica varían “tan rápido” que el mecanismo de *polarización interfacial* no tiene tiempo de desarrollarse. Por otro lado, los mecanismos de polarización más rápidos dejan de ser despreciables y comienzan a ganar protagonismo a medida que entra en juego la sollicitación de tensión AC, de aquí surge el concepto de *pérdidas por histéresis dieléctrica* y las *descargas parciales*.



Un aislante ante sollicitación de tensión AC siempre va acompañado de pérdidas por histéresis dieléctrica, la experiencia ha demostrado que el efecto de polarización no es instantáneo y requiere de un tiempo para desarrollarse y también para volver al estado original en reposo, originándose un desfase entre el fenómeno de polarización y el campo eléctrico externo que lo produce. Las pérdidas por histéresis son pérdidas asociadas a los átomos o moléculas que componen la estructura cristalina de los materiales aislantes que no son capaces de seguir la velocidad de un campo eléctrico externo que es variante en el tiempo. “El desfaseamiento entre el efecto de polarización y la causa que lo produce (campo eléctrico) constituye la *histéresis dieléctrica*” [28]. Como resultado se tienen pérdidas de energía que aumentan en función de la frecuencia de la señal del voltaje aplicado.

Las *descargas parciales* son descargas eléctricas de baja energía que se producen en microburbujas de gas que quedan confinadas en el interior del material aislante durante su proceso de manufactura [16]. Estas descargas ocurren en los micro volúmenes gaseosos dado que, generalmente, el gas tiene una menor permitividad (ϵ) respecto del resto del material aislante que lo envuelve, provocándose una concentración de intensidad de campo en este pequeño espacio donde la ruptura dieléctrica tendrá lugar si se supera el límite de rigidez dieléctrica (E_D) del gas. Su efecto es un deterioro progresivo, que tarde o temprano termina en una ruptura dieléctrica total del material.

La teoría, valores de referencia y algunos criterios generales que sugiere la literatura para realizar el diagnóstico dieléctrico de la probeta, en base a las pérdidas por histéresis y descargas parciales, se presentan a continuación en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.

4.2.1 Descargas parciales

Las descargas parciales son descargas eléctricas de baja energía que se llevan a cabo en micro volúmenes de material y no se compromete el espacio dieléctrico total que existe entre electrodos cuando éstos se someten a una sollicitación de tensión [16]. En palabras simples, imagine que se cuenta con un aislante sólido similar a un delicioso queso con hoyos. A modo de exageración, los orificios del queso representan los micro volúmenes de gas que se encuentran confinados en el interior del aislante sólido. Las descargas parciales ocurren en estas cavidades de aire.

Cuando se aplica un campo eléctrico a un dieléctrico sólido, las moléculas que constituyen el material, mediante el mecanismo de polarización, consiguen formar un campo eléctrico interno que se opone al campo externo, atenuando la intensidad de campo entre electrodos, logrando así el objetivo de aislar el terminal energizado. Sin embargo, las pequeñas burbujas de aire confinadas en el interior del dieléctrico en general poseen una permitividad (ϵ) menor que la del medio material aislante que las envuelve y por lo tanto las moléculas que constituyen el micro volumen de aire se polarizan en menor grado, atenuando en forma más débil el campo externo y como consecuencia de ello se consigue una mayor concentración de intensidad de campo al interior de la microburbuja. Para la tensión de servicio del equipo, el voltaje en la pequeña cavidad puede superar el valor de tensión disruptiva y dar origen a una micro descarga eléctrica en su interior (una pequeña chispa o un “mini rayo”, o bien, dicho de manera formal: una *descarga parcial*).

En la práctica, el deterioro de los sistemas de aislación, por efecto de las descargas parciales, es inevitable en los equipos de media y alta tensión. En [29] se menciona que “según Paschen, si existe un defecto aireado incluido en el medio aislante en condiciones de presión y temperatura normalizadas, sea cavidad o burbuja, la DP será inevitable cuando la tensión aplicada esté por encima de 320 V”.

El efecto de las descargas parciales, en materiales sólidos, es un deterioro progresivo, que tarde o temprano termina con la vida del sistema de aislación mediante una ruptura total del material, éstas al ocurrir en el interior del aislante suelen ser denominadas *descargas parciales internas*. Sin embargo, las DP también ocurren en aislantes líquidos cuando hay presencia de burbujas en el medio acuoso e incluso en aislantes puramente gaseosos, como por ejemplo, la superficie de un cable desnudo de alta tensión y el aire que lo envuelve.

Dependiendo de dónde se localicen las DP y el tipo del material aislante, se suelen caracterizar distintas variaciones de *descargas parciales* (internas, externa, superficiales, corona, etc.), no obstante, independiente del nombre que se utilice, el fenómeno en cuestión es el mismo en todos los casos: la ruptura dieléctrica de masa gaseosa debido a las diferencias de permitividades (ϵ) entre el gas y el resto del sistema de aislación. Como información adicional, el fenómeno de DP en el aire u otros gases que rodean a los conductores se denomina *efecto corona* y se caracteriza por llegar a ser ¡visible al ojo humano!, además de poder ser percibido por nuestro oído.

Las descargas parciales localizadas en las microburbujas del material sólido producen cambios físicos y químicos dentro de la cavidad que atacan activamente el material sano, provocando una carbonización paulatina en el contorno de la cavidad y rompiendo enlaces moleculares de la masa gaseosa que generan sustancias químicas agresivas. El cambio constante de las propiedades físicas y químicas en el interior de las microburbujas producto de las DP dan lugar a cambios en el comportamiento de las descargas futuras, debido a esto es que el fenómeno de las descargas parciales es intrínsecamente aleatorio [30] [31].

Los pulsos de descargas parciales tienen típicamente una duración de 3 a 300 [ns]. Debido a su corta duración, la masa gaseosa tiene pocas oportunidades de calentarse. La tensión de iniciación de descargas parciales (U_i) depende principalmente de: la presión en la cavidad, la temperatura, la polaridad de la DP, el tipo de gas y, en menor medida, de la humedad [30].

Cabe destacar que, particularmente en aislantes de estado sólido, la presencia de una fase gaseosa es imprescindible para que ocurra el fenómeno de *descarga parcial* [30] y que es imposible la existencia de un aislante sólido sin micro cavidades gaseosas, por lo que siempre se desarrollará un deterioro en este tipo de aislantes a causa de las *descargas parciales*.

Muchas veces, las micro cavidades gaseosas tienen su origen en inclusiones de partículas extrañas, tales como polvo, partículas metálicas, fibra, etc., que se introducen durante el proceso de manufactura. En estos casos, se provoca una concentración del campo eléctrico en la zona de la inclusión, que provoca una descarga localizada. De ella se desprenden gases que a la larga conducen al modelo anterior [16].

¿Cómo se miden las descargas parciales para hacer el diagnóstico de un aislante? Las DP no se pueden medir localmente en el sitio donde ocurre la descarga de manera directa [32], en la práctica, lo que se hace es detectar los efectos secundarios provocados por las DP en todo el material. Existe un abanico de opciones en cuanto a métodos de detección de DP se refiere, algunos emplean instrumentos de detección acústica (uso de micrófonos), detección visual (ensayar en una pieza oscura y observar la probeta con los ojos o con ayuda de cámaras especiales), detección química (técnica utilizada principalmente en aislantes líquidos, se analizan las concentraciones de las sustancias químicas que producen las DP en el medio acuoso), entre otros. El método más tradicional, ampliamente estudiado y normalizado sobre la detección de descargas parciales es a través de la medición de la *carga aparente* (q). Cuando ocurre la ruptura dieléctrica dentro de un micro volumen de gas en el interior del aislante (descarga parcial interna) se genera un pequeño pulso de corriente que es posible registrar tanto de manera analógica como digital, el área bajo la curva de este pulso de corriente (integral del pulso) es denominado *carga aparente* (q) y se expresa en pico-Coulomb (pC)

Los aspectos generales de la medición de descargas parciales se encuentran en la normativa internacional IEC 60270 (2000): “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements” [32]. Esto es, circuitos de medida, anchos de banda, calibración de equipos y aspectos constructivos. El circuito y procedimiento de laboratorio que se utiliza para realizar la medición de DP en la probeta se muestra en detalle en *Anexo D.3* (pág 107).

En cuanto a valores de referencia para tener en cuenta sobre el diagnóstico de la probeta (sistema de aislación del enchufe minero clase 25 kV), se considera en primera instancia a la normativa internacional IEEE Std 386 (2016): “IEEE Standard for Separable Insulated Connector Systems for Power Distribution Systems Rated 2.5 kV through 35 kV” [33]. En aspectos generales, la normativa IEEE Std 386 establece definiciones, condiciones de servicio, características de construcción y ensayos para los sistemas de conectores aislados separables para la distribución de energía eléctrica.

La normativa IEEE Std 386 (2016), en la sección “7.4 *Partial discharge test*” (pág. 49), establece para las pruebas **de diseño** de conectores que:

El propósito de la prueba es que el voltaje de extinción mínima de descarga parcial de la muestra no sea menor que el valor dado en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2: Tensión nominal y características de los conectores tipo deadbreak [33].

Voltage class	Maximum voltage rating (kV rms) ^a	Withstand voltages		
		BIL and full wave (kV crest)	AC 60 Hz for 1 min (kV rms)	Partial discharge minimum extinction voltage (kV rms) ^b
15 kV	8.3	95	34	11
25 kV	15.2	125	40	19
28 kV	16.2	125	45	21.5
35 kV	21.1	150	50	26

^aPhase-to-ground.

^bBased on a sensitivity of 5 pC (see 7.4).

Además, el voltaje de prueba se debe elevar al 20% por encima del voltaje de extinción mínimo de descarga parcial especificado en la Tabla 4-2. Si el valor peak de descarga parcial excede los 5 [pC], el voltaje de prueba se reducirá al voltaje de extinción mínimo de descarga parcial especificado en la Tabla 4-2 y deberá mantenerse en este nivel durante al menos 3 [s] pero no más de 60 [s]. Las lecturas de descarga parcial tomadas durante el intervalo de 3 [s] a 60 [s] no deben exceder el peak de 5 [pC].

En conformidad con lo anterior, se espera registrar valores de carga aparente de las DP no superior a 5 [pC] dentro de un intervalo de 60 segundos a una tensión aplicada de 19kV de línea como se sugiere en [33]. Cabe destacar que las recomendaciones de [33] son para enchufes en etapa de diseño y no es una guía para el análisis del aislamiento eléctrico de los enchufes.

Por otro lado, también se ha considerado información por parte de la industria, específicamente del catálogo “Soluciones para la minería” de la empresa: Comercial Larraín S.A. [2]. En este documento se menciona que los valores promedios de DP en las coplas mineras son del orden de 20.000 [pC].

En base a los textos [33] [2], se tiene que: para la primera medición de descargas parciales en la probeta (condición nueva), según el procedimiento descrito en [33], se espera registrar un valor de carga aparente idealmente menor a 5 [pC], o bien, relativamente cercano a este, teniendo como límite superior una magnitud en torno a los 20.000 [pC]. El primer valor de carga aparente que se registre indicará el punto de partida del envejecimiento artificial acelerado por lo que se espera que esta medida tienda al incremento, reflejando el deterioro por efecto de las descargas parciales.

Sin menoscabar lo dicho en el párrafo anterior, independiente del valor de carga aparente que se registre y a pesar de las técnicas de medición que se utilicen, un registro individual por sí solo no proporciona información fiable sobre el estado del aislamiento, lo verdaderamente importante para un diagnóstico de calidad es su evolución temporal (al igual que el índice de *Resistencia de Aislamiento*, R_a).

El diagnóstico en base a DP puede ser enriquecido fuertemente si se consideran dos parámetros adicionales: la *Capacitancia* y el *Factor de disipación*. El significado de estos últimos dos parámetros y como se relacionan con el registro de la carga aparente q , dando origen a la famosa “carta de vida de un aislamiento”, se presenta a continuación en la sección 4.2.2.

4.2.2 Capacitancia y factor de disipación

La *capacitancia* (C) es la propiedad de un sistema de conductores y dieléctricos que permite la **acumulación de carga eléctrica**. También se suele asociar este concepto como una medida de la cantidad de **energía eléctrica almacenada** para una diferencia de potencial dada. La razón entre la carga (Q) en coulomb y la diferencia de potencial (V) en voltios, se denomina *capacitancia* (C) de un condensador [20].

$$C = \frac{Q}{V} [F] \quad (4.6)$$

Cuanto mayor es la *capacitancia* de un condensador, mayor será la magnitud Q de la carga en el conductor ante una misma diferencia de potencial dada, por lo tanto, mayor será la cantidad de energía almacenada. Su unidad de medida en el sistema internacional es el farad (F). En la práctica, 1 [F] resulta ser un valor demasiado alto por lo que es común encontrar este parámetro dentro del rango de los mili, micro, nano y hasta pico faradios. El valor de este parámetro C depende de las propiedades dieléctricas únicas que caracteriza cada material aislante mediante su permitividad (ϵ) y de la geometría del arreglo de conductores y el sistema de aislación. Por ejemplo, para el clásico condensador de placas paralelas, la *capacitancia* C de este arreglo depende de la permitividad del medio dieléctrico (ϵ), del área de las placas (A) y de la separación entre dichas placas (d), para un arreglo cilíndrico tipo coaxial (como la probeta), C depende de la permitividad (ϵ) del material involucrado, del largo (L) del cilindro y de la razón entre el radio exterior (R_b) e interior (R_a).

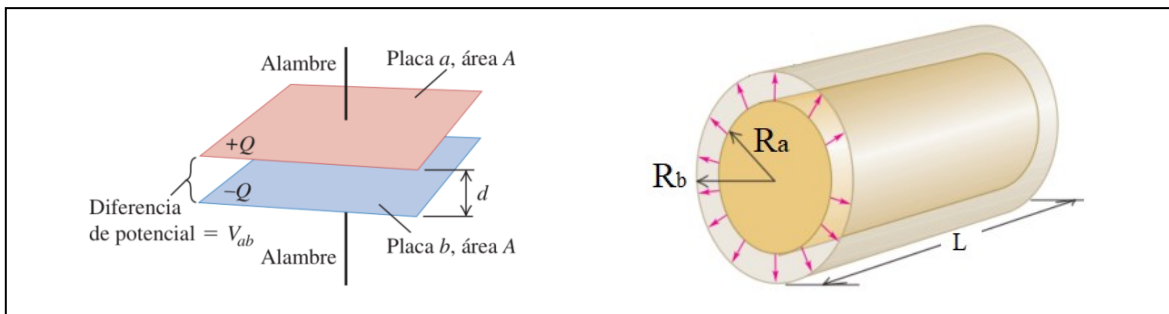


Figura 4-6: Arreglo de condensador de placas paralelas (izquierda) y cilíndrico (derecha) [20].

$$\begin{aligned} C &= \epsilon \cdot \frac{A}{d} && \text{capacitancia de un condensador de placas paralelas} \\ C &= \epsilon \cdot \frac{2\pi \cdot L}{\ln(R_b/R_a)} && \text{capacitancia de un condensador tipo coaxial} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Los sistemas aislantes pueden llegar a ser bastante complejos, pero en esencia pueden ser representados en base a dos modelos de circuitos ante sollicitación alterna para una frecuencia y rango de tensión específico. En la Figura 4-7 se muestran los modelos de un sistema de aislación con sus respectivos diagramas fasoriales. El *circuito equivalente paralelo* resulta más representativo que el *circuito serie* para estudios de aislamientos, dado que la tensión aplicada es el dato de trabajo nominal y es usual referirse directamente a ese modelo cuando se trata de los procesos de diagnóstico [34].

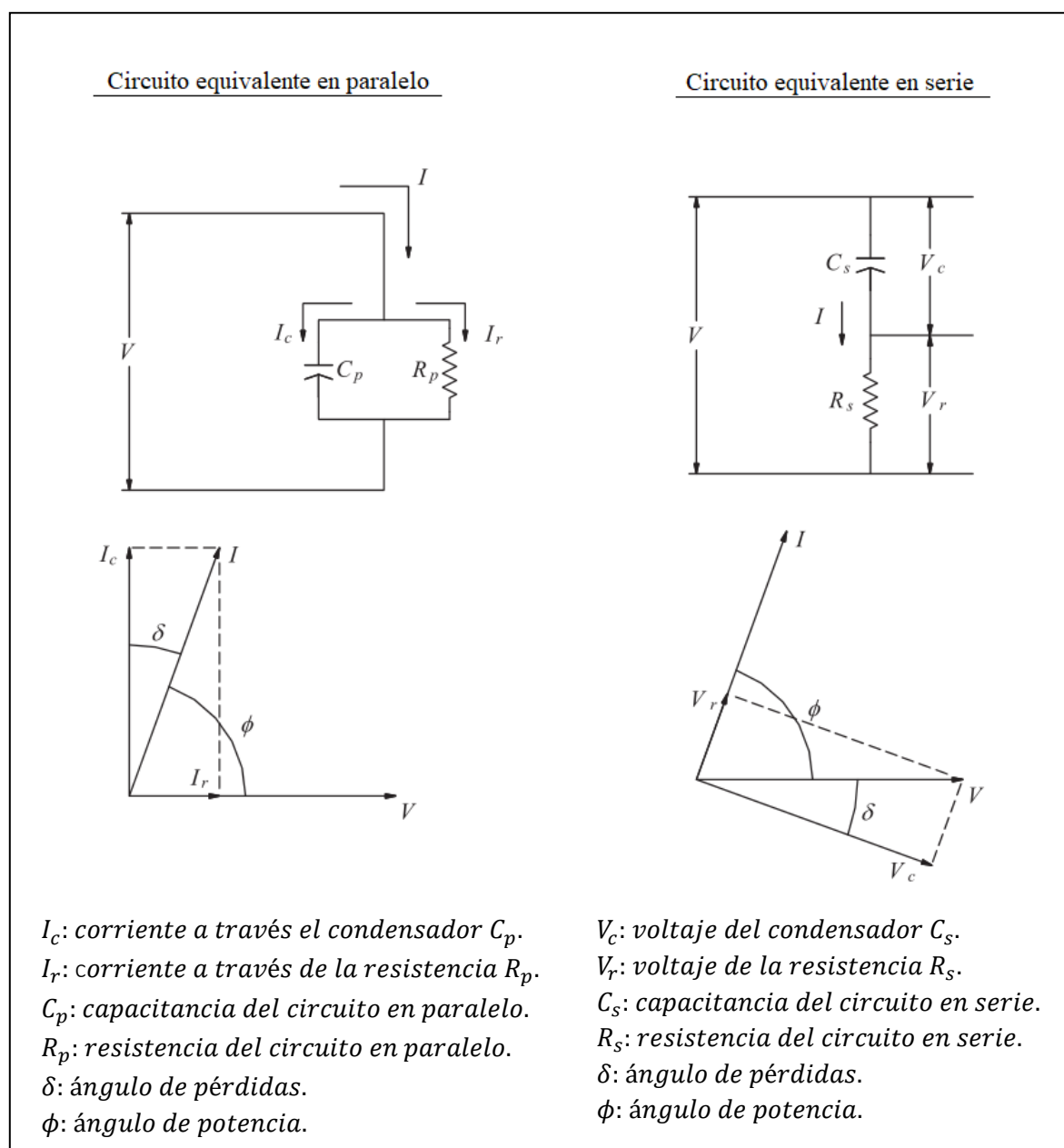


Figura 4-7: Circuitos equivalentes para la medición de pérdidas dieléctricas [27].

Cuando se aplica un voltaje alterno (V) a un material aislante no ideal, aparece una corriente eléctrica alterna (I) que fluye a través del dieléctrico. De los diagramas fasoriales de la Figura 4-7, resulta interesante destacar el ángulo ϕ (fi), es el desfase entre la tensión aplicada (V) al dieléctrico y la corriente eléctrica (I) que fluye a través del material aislante, ϕ es bien conocido dentro del mundo de la ingeniería eléctrica cuando se habla de máquinas eléctricas, ya que con él se puede cuantificar la eficiencia de una máquina con el clásico *factor de potencia* ($\cos \phi$). Para nuestro interés respecto al diagnóstico, se presenta el complemento del ángulo fi, este es el ángulo delta “ δ ”, llamado *ángulo de pérdidas*, en base a este se define el *factor de disipación* o *factor de pérdidas* o *tangente delta* ($\tan \delta$).

Según [34], el *factor de disipación* simboliza “el porcentaje de la potencia dieléctrica que representa la **disipación interna de energía** en el aislamiento, determinado como la razón entre la *potencia activa* P y la *potencia reactiva* Q del material”. Además, el mismo autor afirma que:

En los aislamientos sólidos, la $\tan \delta$ tiene una relación directa con: la *fuga permanente de corriente transversa* (corriente que atraviesa el material aislante), que a su vez se relaciona con la *resistencia de aislamiento*, midiéndose tradicionalmente con campo estático, con el *volumen total de microburbujas* en el aislamiento atribuibles a la actividad pulsatoria de las *descargas parciales* (DP) que se puede traducir en términos de una corriente media de pérdidas; y con las *pérdidas dipolares* por su orientación en el sentido del campo alterno.

En conformidad con lo anterior, según se indica en [16], el *factor de disipación* puede ser descompuesto de la siguiente manera:

$$\tan \delta = \tan \delta_C + \tan \delta_P + \tan \delta_{DP} = \frac{P}{|Q|} = \frac{I_r}{I_c} [-] \quad (4.8)$$

Donde:

- ❖ $\tan \delta_C$: *pérdidas de conducción* (o fuga) en el aislamiento debido a la carga libre.
- ❖ $\tan \delta_{DP}$: *pérdidas de descargas parciales* que pueden ser en el interior (descargas en micro cavidades) o exterior (actividad corona) del aislamiento.
- ❖ $\tan \delta_P$: *pérdidas por polarización*

El *factor de disipación* es de carácter adimensional y a la vez general, pudiendo representar casi cualquier sistema de aislación sin importar su tamaño. Esta característica convierte al *factor de disipación* en un excelente parámetro de comparación con otros objetos de prueba, sin importar su tamaño relativo del aislamiento, resultando así; que este indicador sea un parámetro estándar de medición y diagnóstico [34]. El factor de disipación es sensible a la humedad, temperatura del aislante, nivel de tensión y a la frecuencia del voltaje aplicado, por lo que se recomienda realizar las lecturas en condiciones similares al registro anterior. Según [16], en las aislaciones de buena calidad, δ toma valores menores a 1° .

En base a [34] [35] [36], una sola medida de $\tan \delta$ a un cierto nivel de tensión tiene uso limitado, para juzgar la calidad de un aislamiento debe obtenerse la *curva de variación en función de la tensión*, y más aún, el diagnóstico puede ser fuertemente enriquecido si se cuenta con las lecturas anteriores para observar la tendencia de la condición del aislamiento.

La forma más simple de *curva de variación de tangente delta* puede ser realizada como se muestra en la Figura 4-8, esto es, llevar registro de la magnitud de $\tan \delta$ a intervalos de 0.2 [pu] en tensión aplicada desde 0.2 hasta 1.2 [pu], en referencia de la tensión nominal del equipo.

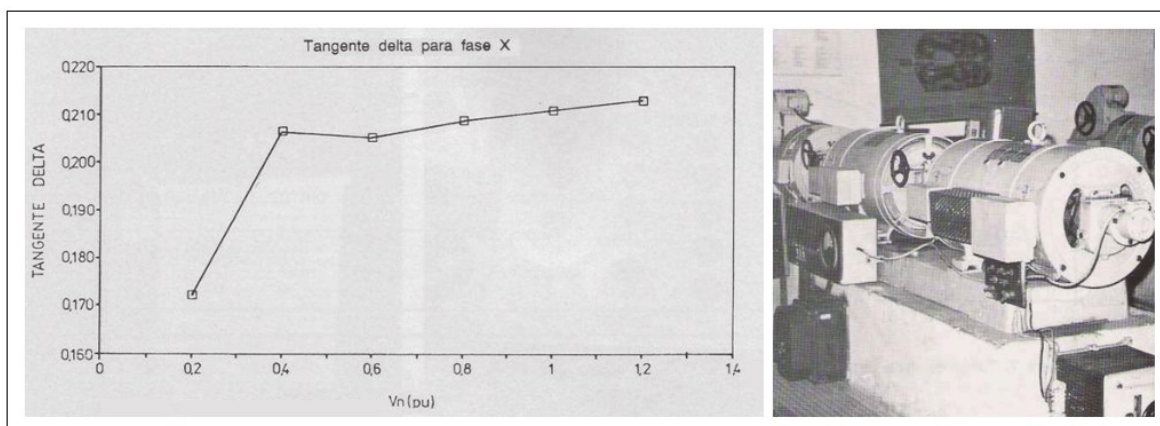


Figura 4-8: Curva de variación de tangente delta (izquierda), pruebas realizadas a un generador OERLINKON del laboratorio de la Universidad del Valle (derecha) [35].

Por otro lado, con la finalidad de conseguir un diagnóstico de mayor calidad, resulta conveniente realizar una *curva de variación* en consideración de un perfil de “subida” y “bajada”, es decir, para realizar el ensayo de $\tan \delta$, se debe aplicar una sollicitación de tensión como se muestra en la Figura 4-9(a), donde la primera mitad del gráfico es el perfil de subida (incremento de tensión) y la segunda mitad corresponde al perfil de bajada (volver

al reposo), manteniendo en estrés eléctrico a la probeta durante un tiempo entre 10 a 60 minutos para atenuar efectos transitorios y para que se elimine la humedad en la probeta.

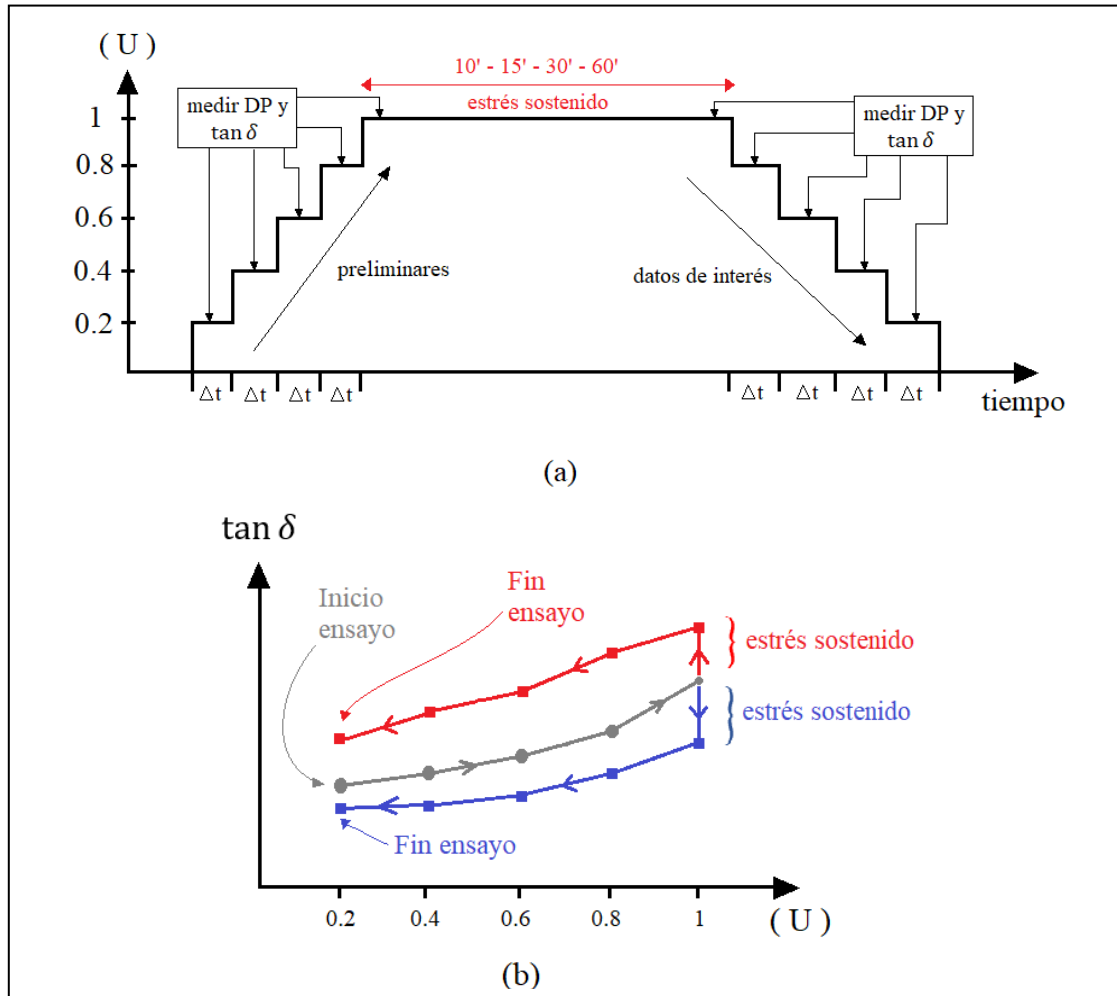


Figura 4-9: Perfil de tensión sugerido para realizar la medición de la tangente delta y descargas parciales.

La *curva de variación* que se genera a partir del perfil de tensión de la Figura 4-9(a) se muestra en la Figura 4-9(b), allí se observa que como punto inicial se tiene la lectura de tangente delta ante una tensión de 0.2 [pu] (punto gris), consecutivamente se incrementa el voltaje en la probeta a $0.4 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.8 \rightarrow 1$ [pu] dando origen al perfil de subida (Figura 4-9(b) - curva gris). Luego se mantiene a la probeta bajo estrés durante un tiempo acotado entre 15 a 60 minutos, finalizado ese momento de espera en 1 [pu], la magnitud de la $\tan \delta$ tiene 2 opciones: puede incrementar o decaer. Si una vez culminado el tiempo de estrés sostenido en 1 [pu] la $\tan \delta$ aumenta, entonces se genera un perfil de bajada como se indica en la curva de color rojo de la Figura 4-9(b). Por otro lado, si disminuye el valor de la $\tan \delta$, entonces se registra un perfil de bajada como la curva de color azul.

La curva de variación obtenida puede ser interpretada de la siguiente manera: si hay un decaimiento en la magnitud de la tangente delta al observar el perfil de bajada respecto con el perfil de subida, entonces se dice que se ha secado la humedad presente en la probeta producto del estrés eléctrico sostenido en la probeta y esto no es indicativo de deterioro. Por otro lado, si se observa incremento en la magnitud de la tangente delta, esto es indicativo de un deterioro en el sistema de aislación, pues, han aumentado las pérdidas dieléctricas.

Es importante destacar que el desgaste del sistema de aislación es un proceso inevitable y a la vez natural, por lo que se espera que la magnitud de *tangente delta* con el paso del tiempo tienda al alza.

Una forma para evitar ambigüedades y afinar aún más la calidad del diagnóstico, es mediante la medición e interpretación simultánea de los parámetros de *tangente delta* y *descargas parciales*. Esta opción es la que se adopta para realizar el diagnóstico en la probeta ya que se disponen de todos los equipos necesarios para realizar este tipo de prueba.

Las mediciones simultáneas de $\tan \delta$ y DP se realizan con el perfil de tensión mostrado en la Figura 4-9(a). Una vez concluido el tiempo ante sollicitación a estrés en la probeta y se comience el perfil de bajada de tensión, ambos parámetros mostrarán un incremento o un descenso respecto la lectura anterior, dando origen a una *curva de variación* para cada parámetro, es decir, un gráfico como el de la Figura 4-9(b) para la lectura de *tangente delta* y otro para el de *descargas parciales*. Ejemplos reales de *curvas de variaciones* de estos parámetros se muestran en **Anexo**, en la Figura C-3 (pág. 99).

En base a [34], el diagnóstico al observar *las curvas de variaciones* de los parámetros a igual tensión permite establecer las siguientes causas:

- ❖ Incremento de $\tan \delta$: El alza de este indicador por si solo es alarmante, consigo trae el aumento de las pérdidas y a la vez refleja que se han dañado las propiedades dieléctricas del aislante. Se recomienda observar paralelamente la curva de variación de las DP, donde si estas han disminuido, entonces se confirma el deterioro en el aislante, implicando la carbonización de las paredes internas de las micro cavidades donde se desarrolla este fenómeno. El aumento de la $\tan \delta$ también puede estar influenciado por la contaminación y/o humedad superficial, esto se puede corroborar al observar cambios en los índices de R_a e IP.

- ❖ Disminución de $\tan \delta$: El descenso de la $\tan \delta$ no es un comportamiento natural por parte de un sistema de aislación, no se debe olvidar que el deterioro es un proceso normal e irremediable. De todas formas, si se está en frente de una disminución en este parámetro, se atribuye a mantenimientos realizados al aparato o equipo eléctrico donde se haya limpiado la contaminación superficial y secado la humedad presente o bien se han hecho mejoras sustanciales en el aislamiento, con esto se eliminan las fugas de corrientes y se reducen las pérdidas dieléctricas.

- ❖ Incremento de **DP**: Su aumento es progresivo y natural de todo sistema de aislación, sin embargo, se debe llevar registro de este índice para adelantarse a una posible falla cuando hay evidencia de variaciones bruscas. El aumento de DP es causa de la apertura de las micro cavidades gaseosas, esta acción produce nuevas cavidades en zonas que antes no había, aumentando la actividad de DP en el material aislante. En este caso la $\tan \delta$ se mantiene estable, mientras que se presentan variaciones en la magnitud de C .

- ❖ Disminución de **DP**: Fenómeno deseado, pero a la vez de doble filo, el descenso de las DP es un reflejo del buen estado del aislamiento solo si se observa un registro de la $\tan \delta$ con tendencia a la baja o estable en el tiempo. La baja en DP se explica porque este fenómeno se desarrolla en incrustaciones de micro cavidades gaseosas herméticas, la descomposición de los gases producto de la actividad de DP provoca un aumento de la presión en la micro cavidad y por lo tanto, por Ley de Pashen, aumenta también el nivel de tensión de ruptura del gas y así disminuye la actividad por DP. Por otro lado, si se observa un incremento notable de $\tan \delta$ a través de los años, esto será un indicador de que el aislamiento se encuentra en su última etapa de vida, ya que, el descenso de DP se explica con la carbonización de las paredes internas de las micro cavidades dando origen a pequeños cortocircuitos pulsantes a través del medio material que termina provocando un aumento en la magnitud de corriente que atraviesa el aislante y reflejándose en un aumento de las pérdidas dieléctricas (mayor $\tan \delta$).

Las variaciones en la capacitancia (C) están en estrecha relación con cambios en la geometría y/o en cambios en su composición química que afecte a la permitividad (ϵ) del material aislante, en general, por parte de la experiencia práctica, las variaciones de C no superan el 10% [34]. Un incremento en la magnitud de este parámetro indica una conexión mediante pequeños cortocircuitos entre las capas o estratos de un sistema de aislación, esto ocurre cuando se tiene una actividad de DP sostenida durante mucho tiempo lo que termina carbonizando internamente al aislante, dando origen a pequeños caminos conductivos y aumentando las pérdidas por conducción (aumento de la $\tan \delta$). Por otro lado, un descenso de C se asocia a un mal contacto del sistema de aislación y el material que lo envuelve, ya que se incorporan espacios de aire y sus respectivas capacitancias serie. Estos espacios dan lugar a que se desarrollen descargas parciales y con el paso del tiempo termina afectando al aislamiento principal.

El gráfico que describe el deterioro progresivo que sufre un sistema de aislación hasta su deceso se muestra en la Figura 4-10. Esta curva que considera los parámetros $C - \tan \delta - DP$ se denomina *Carta de vida* de un aislamiento y representa el ritmo de envejecimiento que lleva en el transcurso de los años.

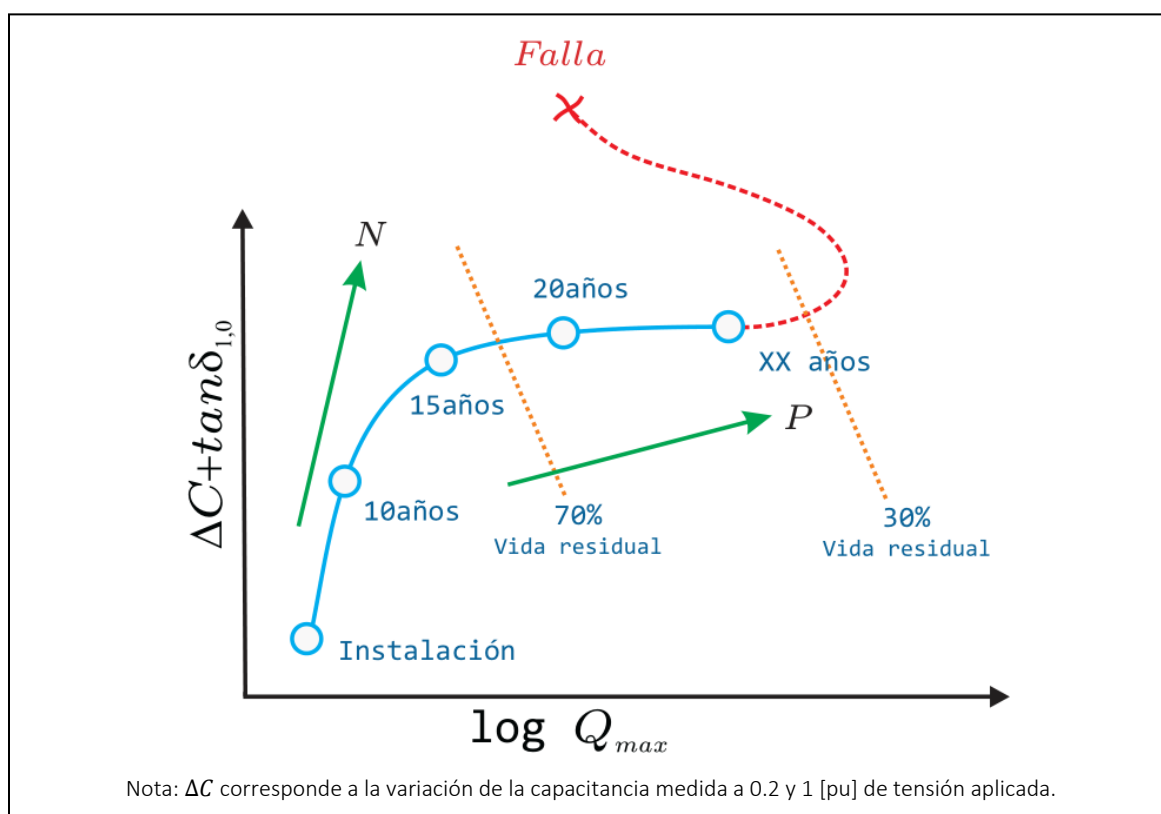


Figura 4-10: Ejemplo carta de vida de un aislamiento [34].

De la Figura 4-10, se observa una primera porción creciente en la dirección del vector N donde indica una tendencia de envejecimiento normal producto de procesos térmicos, mecánicos y eléctricos cuando el aislamiento se encuentra dentro de sus primeros 10 a 15 años de vida. Luego entre los 15 a 20 años de vida, el aislante presenta un crecimiento inevitable y continuo de la actividad de DP, siendo observable el daño localizado por DP. Cuando al aislamiento le queda el 30% de su vida residual (porción punteada en color rojo) la actividad de DP comienza drásticamente a carbonizar las paredes internas, generando caminos conductivos, disminuyendo así la actividad de DP y siendo reemplazados por pequeños cortocircuitos pulsantes en el interior del material aislante, reflejando un aumento de las pérdidas dieléctricas (aumento considerable de la $\tan \delta$). En este punto la *carta de vida* pierde validez y no se sabe con certeza cuándo finalmente culminará la vida útil del sistema de aislación, sin embargo, se puede conocer cuando éste se encuentre en su fase terminal al observar el cambio de tendencia o pendiente una vez que el aislamiento se encuentre en la dirección del vector P.

A la fecha de este documento no se ha encontrado alguna normativa con un rango de valores de $C - \tan \delta - DP$ que indiquen un estado aproximado en el envejecimiento en la probeta en estudio. Las normativas señaladas con anterioridad sólo exponen valores que deben soportar los accesorios de cables de media tensión en su etapa de diseño. En base a lo anterior, por parte de este trabajo de título, se pretende otorgar valores de referencia registrando los parámetros propuestos en la Sección 4.1 y la Sección 4.2, con el fin de tener el comportamiento de su deterioro y de otorgar a 3M un método que permita predecir el tiempo de vida residual que les queda a los enchufes mineros que se encuentren en faena.

Sección 4.3

Frequency Response Analysis

Hasta el momento se ha mencionado que para realizar el diagnóstico dieléctrico de la probeta y el seguimiento de su envejecimiento artificial en laboratorio, se medirán los siguientes parámetros: Resistencia de aislamiento, Índice de polarización, Descargas Parciales, Factor de Disipación y Capacitancia.

Para salir de los métodos clásicos de diagnóstico y probar un camino diferente, se utilizará el análisis de la *Respuesta en Frecuencia*, conocido también como **FRA**, de su sigla en inglés Frequency Response Analysis. Los parámetros clásicos ya mencionados, servirán como herramientas sólidas de contraste, ya que, la técnica FRA no se ha utilizado para cuantificar y evaluar el estado del aislamiento de un enchufe minero, más bien, es frecuentemente utilizada para el diagnóstico de transformadores de poder, principalmente por daño mecánico. Por ejemplo, es posible detectar con un ensayo FRA una deformación radial y axial del devanado, cortocircuitos entre espiras del devanado, defectos en el núcleo, entre otros.

La novedad de usar esta herramienta de evaluación en la probeta bajo estudio, un sistema predominantemente RC, trae como contraparte el desconocimiento si dará o no un resultado realmente útil del cual se puedan sacar conclusiones, ya que no existe o es escasa la documentación en este tipo de aplicación. Sin embargo, de haber un resultado favorable, esta técnica sería una buena candidata para evaluar en terreno el estado de los enchufes mineros y dispositivos de características similares y tal vez permita determinar la vida residual o un patrón de comportamiento que genere un estado de alarma crítica y atención inmediata del dispositivo, evitando así, interrupciones sorpresivas del suministro eléctrico hacia la maquinaria de extracción minera.

¿En qué se basa y en qué consiste la técnica FRA? **Los métodos FRA consideran que la respuesta a una perturbación eléctrica de un material es función de las propiedades intrínsecas del aislamiento eléctrico** [37]. El método sugiere aplicar una señal de voltaje o corriente al objeto de interés mientras se registra de manera simultánea tanto la señal de entrada como la respuesta del sistema ante la señal aplicada (salida). La relación entre estas dos señales de salida/entrada se denomina *función de transferencia (TF)*.

El principio del método FRA consiste en medir y graficar la *función de transferencia* en un amplio ancho de bandas de frecuencias, en rangos que van desde los mili hasta los mega Hertz.

Existen diferentes tipos de funciones de transferencias por lo que existen diferentes formas de analizar un material, dependiendo de los parámetros que se registren. Las TF más comunes son las de impedancia, admitancia y voltajes. Por ejemplo, si a un aislante eléctrico se lleva registro del voltaje aplicado como entrada y la corriente de fuga como salida, entonces se está midiendo la admitancia (Y) del sistema, es decir, $Y(f) = I_{out}/V_{in}$. Otra TF típica es el cociente entre el voltaje de entrada y salida, de la forma V_{out}/V_{in} , en este caso el gráfico resulta adimensional y no representa directamente la impedancia o admitancia del sistema.

A modo de ejemplo, en la Figura 4-11 se muestra una gráfica obtenida mediante un ensayo FRA a un transformador.

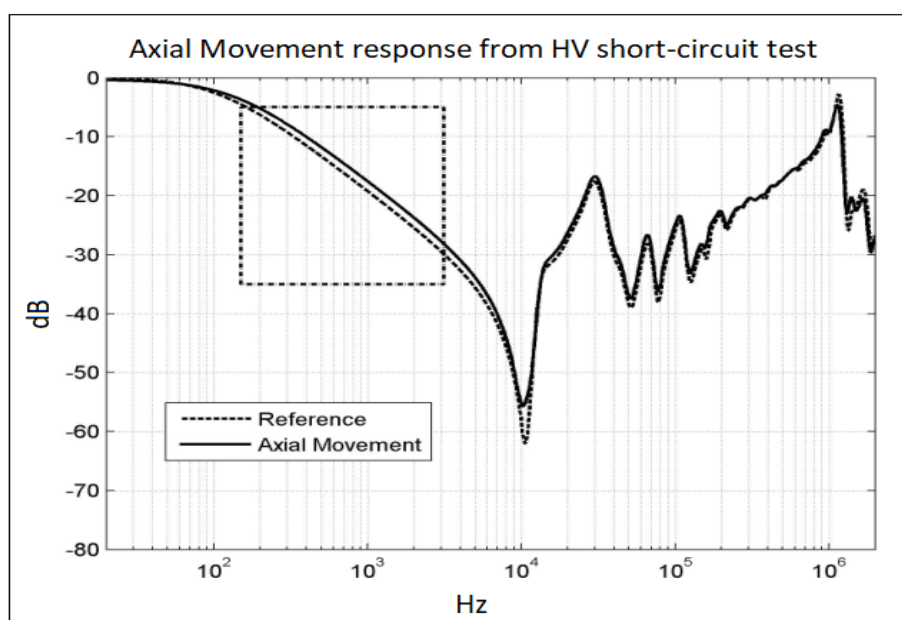


Figura 4-11: Gráfico FRA a modo de ejemplo – Deformación axial de devanado de un transformador [38].

Según la normativa internacional IEEE Std C57.149 – 2012 [38], el patrón de cambio que se observa en la Figura 4-11, es decir, la diferencia que se observa en las curvas “Reference” y “Axial Movement” dentro de la región demarcada; es síntoma de que el transformador ha sufrido de una deformación axial en el devanado. Por algún motivo ha ocurrido una deformación en el devanado del transformador, ya sea por una falla eléctrica del equipo o la red o por un golpe durante su transporte, ha cambiado el circuito RLC que lo representaba y

dicha variación se puede observar mediante el método FRA. De este ejemplo es posible afirmar que “la respuesta obtenida es una especie de huella digital del material que cambia conforme sus propiedades físicas lo hacen” [39].

Según se indica en [37] [40], existen dos procedimientos principales del método FRA, estos son IFRA y SFRA:

- ❖ IFRA (impulse frequency-response analysis): Los métodos IFRA utilizan impulsos de bajo voltaje como señal de entrada, sin embargo, existe literatura donde se ha demostrado que se puede utilizar la misma técnica y análisis mediante la aplicación de altos voltajes. Un gráfico de ejemplo del método IFRA se muestra en la Figura 4-12(a), de la imagen no es posible obtener conclusiones ya que se encuentran las señales de entrada y salida en función del tiempo, por lo que, los métodos IFRA requieren de un procesamiento de datos, donde generalmente se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para así obtener los datos en el dominio de la frecuencia.

Tras aplicar la FFT a la información mostrada en la Figura 4-12(a), es posible obtener la Figura 4-12(b) donde se muestran dos curvas IFRA para un aislador tipo pin ANSI C55-5. De la imagen, es posible observar variaciones de magnitud de las curvas *funciones de transferencia* para el aislante cuando se encuentra seco y mojado. La técnica FRA ha logrado detectar y evidenciar un cambio del estado inicial del aislante ANSI C55-5.

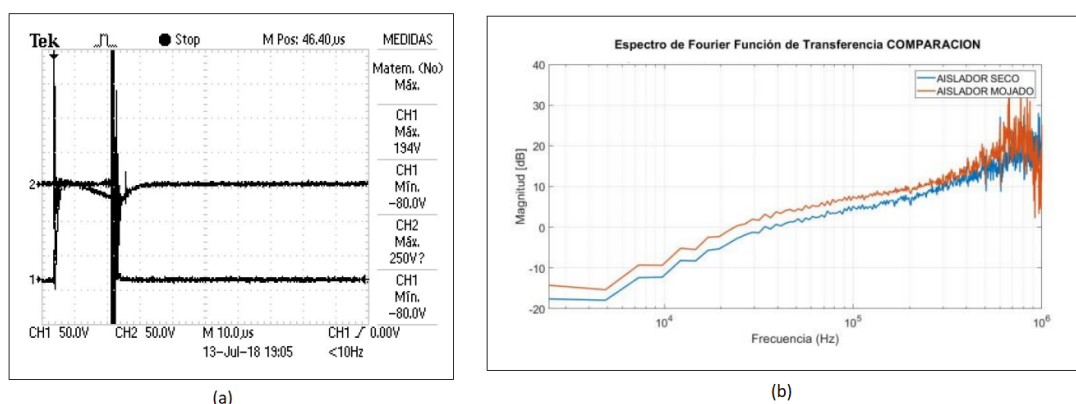


Figura 4-12: Gráficos IFRA a modo de ejemplo [40].

(a) Impulso de voltaje de 79.1 kV (CH1) aplicado a un aislador ANSI C55-5 en estado contaminado, CH2 corresponde a la corriente de fuga (respuesta del sistema).

(b) Comparación de respuestas IFRA del aislador ANSI C55-5 en estados seco (azul) y mojado (rojo).

- ❖ SFRA (sweep frequency-response analysis): Los métodos SFRA, a diferencia del IFRA, no utilizan impulsos como señal de entrada, sino que utilizan una señal de entrada de tipo sinusoidal de bajo voltaje (normalmente en el rango de 1-20 V) y frecuencia variable. Una vez más, la función de transferencia (TF) se obtiene a partir de la relación salida/entrada para un espectro de frecuencias que van desde los mili hasta los mega Hertz. El método SFRA es el que se pretende utilizar para realizar el seguimiento del envejecimiento dieléctrico de la probeta. Un gráfico TF típico del método SFRA es el que se ha mostrado en la Figura 4-11.

Como información general, independiente del método FRA que se utilice (IFRA o SFRA), no tiene sentido un gráfico único de TF por sí solo. El principio de análisis del método es la comparación visual de las curvas TF, por lo que indispensablemente se requiere de un registro inicial como referencia para cuantificar el deterioro mecánico y/o dieléctrico del equipo. Lo ideal es realizar un test FRA cuando se tiene un equipo nuevo para fijar dicho momento como referencia. Una aplicación común de FRA, es verificar si un transformador de potencia se ha dañado internamente durante el transporte. Sin embargo, también se ha confirmado que la técnica FRA también es sensible a parámetros no mecánicos, como lo es la temperatura y la contaminación de un aislamiento. En [41], el autor mediante la Figura 4-13, muestra un aumento en la capacitancia del aislamiento de un transformador monofásico de 5 [kVA] (con papel impregnado en aceite como sistema de aislación), que ha sido envejecido en laboratorio durante 28 días.

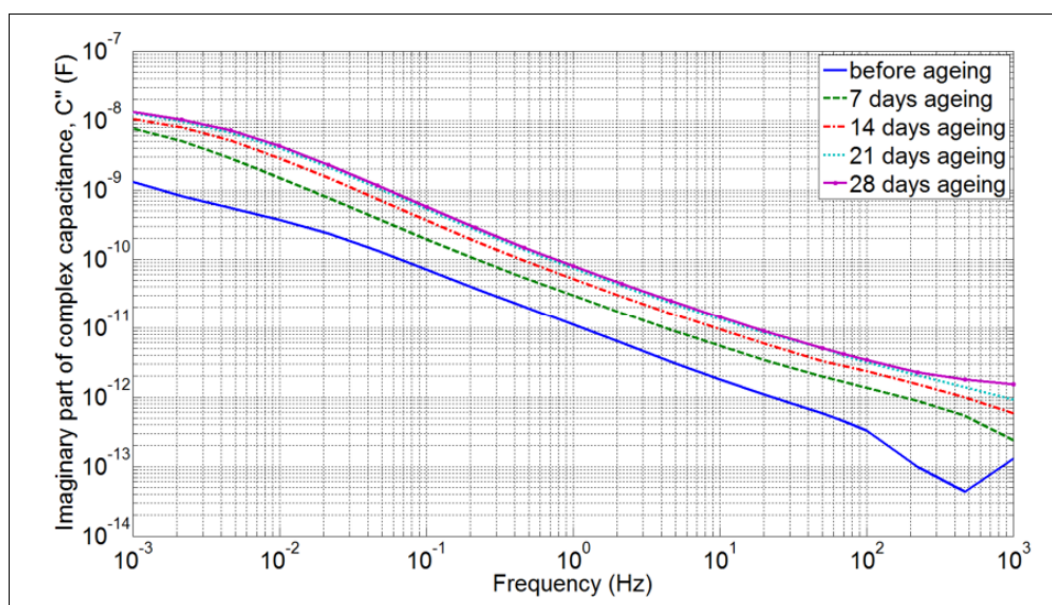


Figura 4-13: Capacitancia del aislamiento de un transformador monofásico de 5 kVA envejecido durante 28 días [41].

Con la metodología FRA se obtienen gráficas que se relacionan exclusivamente de cómo se han realizado las mediciones de las señales de entrada y salida. Es decir, para comparar dos funciones de transferencia con la metodología FRA, las dos TF deben haber sido registradas bajo el mismo esquema de medición, es decir, si el fabricante de un transformador entrega un test FRA de su equipo para ser utilizado como referencia, entonces todos los test FRA posteriores para el diagnóstico del mismo transformador deben realizarse de la misma manera que la empleada por el fabricante. No se pueden comparar funciones de transferencias de admitancia (I_{out}/V_{in}) y de voltajes (V_{out}/V_{in}), son gráficas distintas. Tampoco se puede realizar la prueba FRA con los devanados en cortocircuito si el primer registro considera un procedimiento en circuito abierto.

A la fecha de este documento, existe bastante literatura respecto al diagnóstico de transformadores de potencia utilizando el método FRA. La normativa internacional IEEE Std C57.149-2012 [38] se puede utilizar como texto guía para la interpretación del FRA en transformadores inmersos en aceites, allí se exponen las fallas típicas que ocurren dentro de intervalos de frecuencia definidos, junto a gráficos de ejemplo. Por otro lado, no se ha encontrado documentación sobre la aplicación del método FRA en el aislamiento de los enchufes mineros (la probeta), por lo que, estamos frente a un mundo desconocido.

En el presente capítulo se han explicado los conceptos generales sobre el diagnóstico del aislamiento eléctrico sólido, desde la estructura molecular de cómo están conformados los materiales aislantes, cómo estos materiales logran atenuar el campo eléctrico, los mecanismos de pérdida dieléctrica y las técnicas más utilizadas en la Alta Tensión para conocer el estado del aislamiento.

Toda la información sobre la medición de los parámetros de diagnóstico, donde se muestran los esquemas de medición junto a los equipos utilizados, se encuentra en la sección de *Anexo D – Metodología de las pruebas de envejecimiento acelerado y medición de los parámetros de diagnóstico*, en la página 104.

A continuación, se da inicio a los resultados obtenidos sobre la calidad del aislamiento de la probeta a medida que se va envejeciendo artificialmente en el laboratorio.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En el presente capítulo se desarrolla el análisis de las propiedades dieléctricas del aislamiento eléctrico de los enchufes mineros 3M de clase 25kV (la probeta) después de haber sido sometido a las pruebas de envejecimiento acelerado en base a esfuerzo térmico y eléctrico.

El análisis se realiza en función de los siguientes parámetros de diagnóstico: Resistencia de aislamiento (R_a), Índice de polarización (IP), Descargas parciales (DP), Factor de pérdidas ($\tan \delta$), Capacitancia (C) y curva de Respuesta en Frecuencia (FRA).

Por experiencia de 3M, se conoce que la duración media de un enchufe minero es de 2 a 3 años y que la principal razón de su corta vida útil es causa de su manipulación (golpes y arrastre), sin embargo, no se tiene certeza si los efectos de la corriente y tensión de operación contribuyen en la corta vida útil del enchufe. El objetivo de este capítulo es conocer cuánto afectan estos factores a la probeta.

En general, se ha intentado reproducir en laboratorio una probeta que haya estado en operación a 90°C durante 20.000 horas continuas (2 años y 100 días) sometiéndola a 136°C durante 4 ciclos de 100 horas dentro de un horno y se han aplicado trenes de impulsos tipo maniobra de 75kV después de cada ciclo de 100 horas, acumulándose 400 horas totales de horneado. En la Figura 5-1 se muestran las 4 probetas (A1, A2, B1 y B2) en condiciones nuevas, antes de ser sometidas a ensayos de envejecimiento.

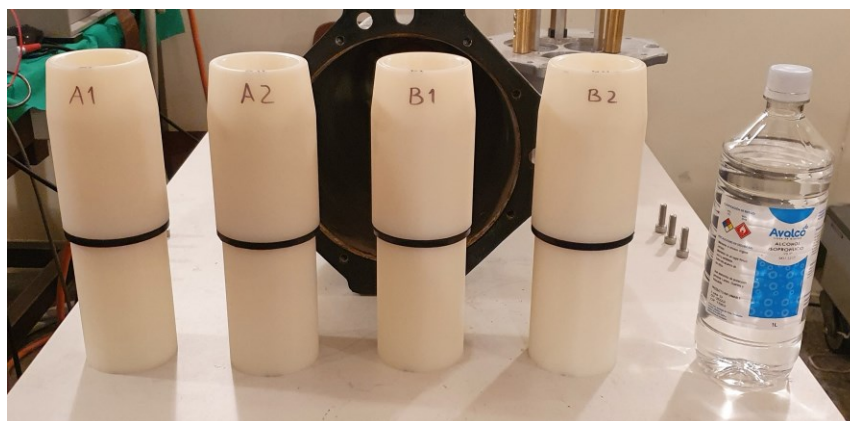


Figura 5-1: Fotografía con las probetas A1, A2, B1 y B2 en condiciones nuevas.

Las pruebas de envejecimiento fueron las siguientes:

Probeta **A1** y Probeta **A2**: grupo sometido a **90°C** durante 4 ciclos de 100 horas (temperatura de operación normal de servicio, no se espera obtener deterioro).

Probeta **B1** y Probeta **B2**: grupo sometido a **136°C** durante 4 ciclos de 100 horas (temperatura de envejecimiento acelerado, se busca comparar deterioro con las probetas del grupo A).

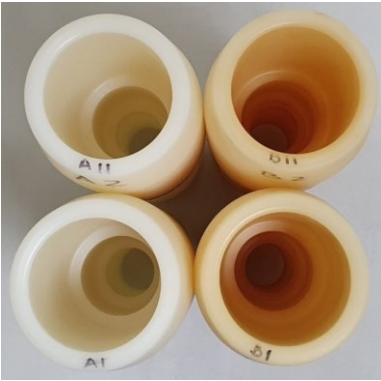
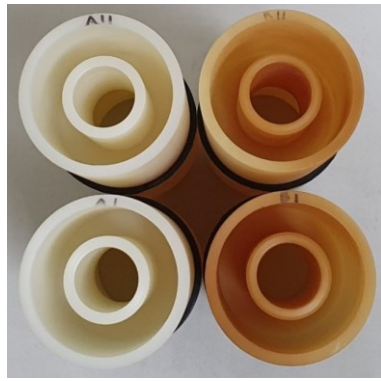
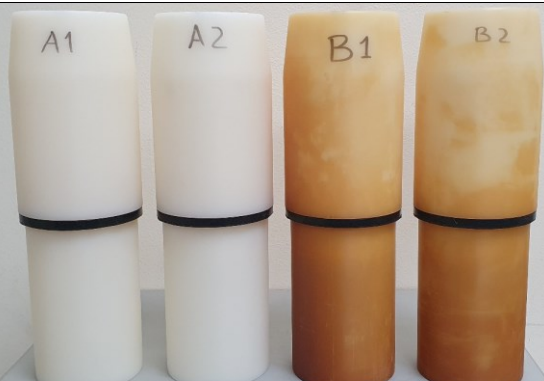
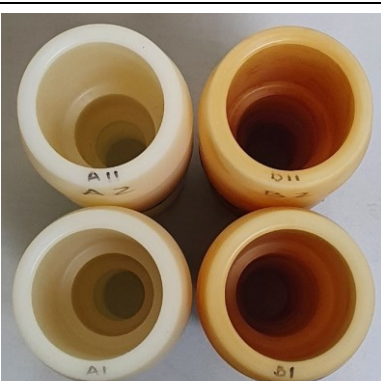
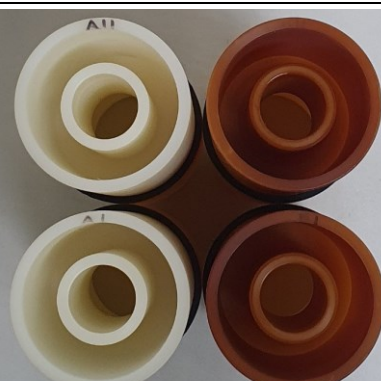
Adicionalmente, después de cada ciclo de 100 horas de horno, las probetas A2 y B2 fueron sometidas a un ensayo de impulso tipo maniobra, de amplitud 75kV, polaridad negativa, cada 5 minutos durante 3 horas, acumulándose un total de 12 horas de impulsos.

En la Figura 5-2 se muestra la progresión visual de la decoloración original de la probeta en función de los ciclos de horneado, las probetas de color café (B1 y B2) son resultado del estrés térmico a 136°C, también es posible apreciar que después de cada ciclo de 100 horas las probetas se vuelven de un color tostado cada vez más oscuro. Las probetas sometidas a 90°C (A1 y A2) mantienen su color original.

A continuación, se muestra la información que arroja cada parámetro de diagnóstico respecto a la calidad del aislamiento de la probeta.

Nota: Las mediciones de los parámetros de diagnóstico fueron realizadas en la cabina blindada del laboratorio de la universidad con una temperatura ambiente entre 17°C y 20°C, humedad relativa entre 60% y 67%, presión atmosférica entre 759mbar y 761mbar. Adicionalmente, antes de realizar cada lectura, se han limpiado las probetas con alcohol isopropílico 99,9° (botella transparente ubicada a la derecha de la Figura 5-1) para eliminar cualquier contaminación superficial. Las tablas con los datos se encuentran en Anexos E.

Figura 5-2: Progresión visual de las probetas A1, A2, B1 y B2 en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura.

	Vista frontal	Vista superior	Vista inferior
100 horas acumuladas			
200 horas acumuladas			
300 horas acumuladas			
400 horas acumuladas			

Sección 5.1

Parámetros DC

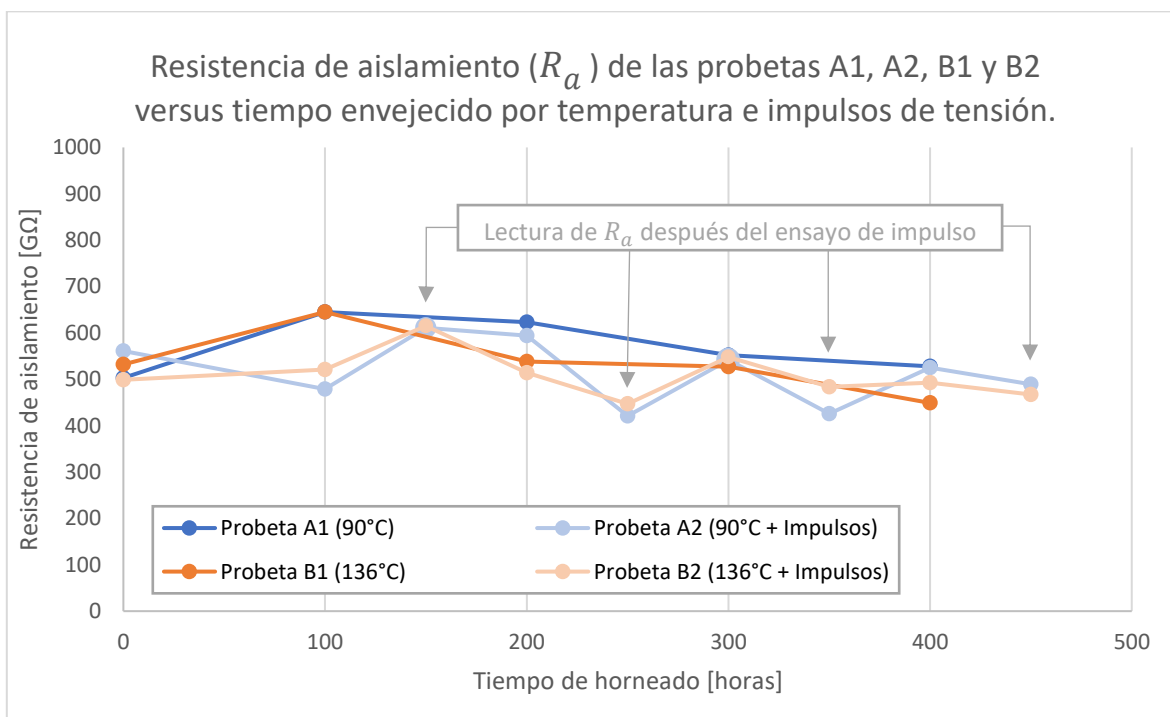


Figura 5-3: Gráfico de la resistencia de aislamiento de las probetas en función de los ciclos de envejecimiento acelerado.

En la Figura 5-3 se muestra el comportamiento de la resistencia de aislamiento en función de los ciclos de temperatura y ensayo de impulsos de tensión para las probetas A1, A2, B1 y B2.

Para todas las probetas, los valores iniciales de R_a fueron alrededor de 515 [$G\Omega$] y finalizaron en torno a 480 [$G\Omega$]. De la Figura 5-3 se observa que el valor de R_a se mantiene a través de cada ciclo y no se evidencia una tendencia fuerte a la baja para afirmar que se ha perdido calidad en el aislamiento, los valores de R_a de las probetas B1 y B2 son similares a los valores de A1 y A2.

Un ejemplo de un aislamiento con síntomas de envejecimiento se muestra en la Figura C-1 (pág. 94).

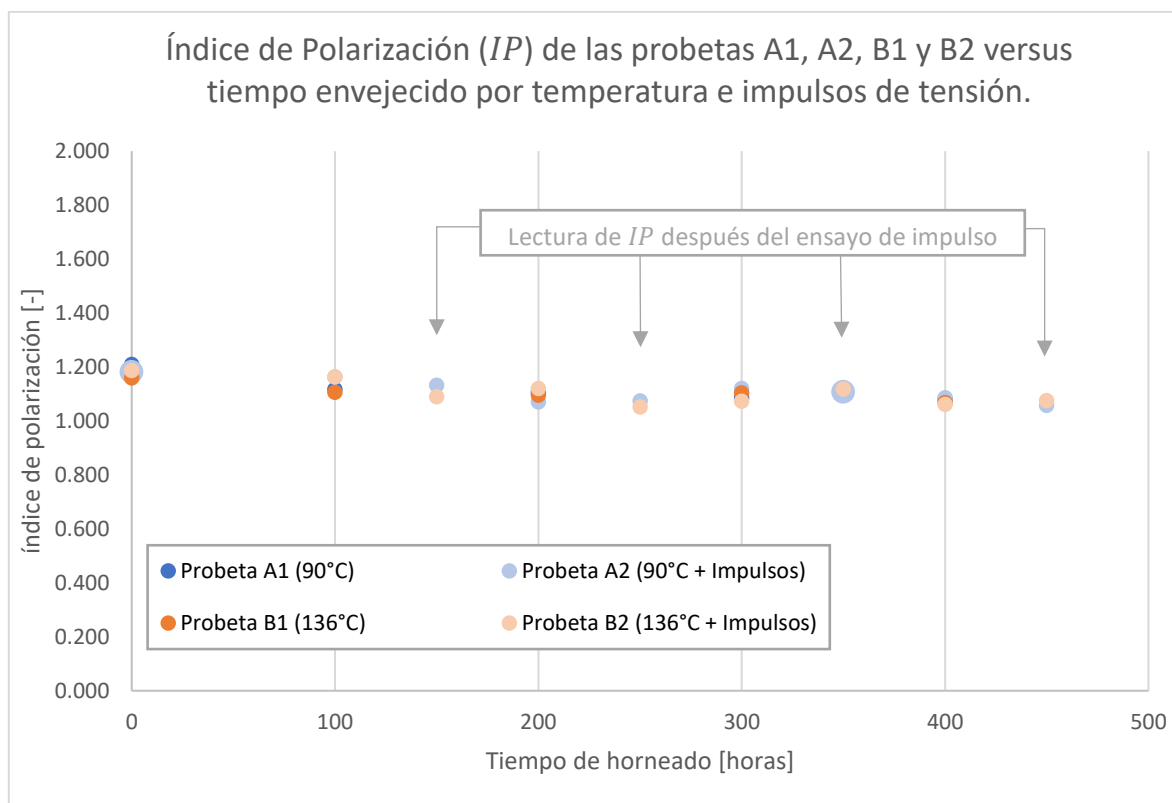


Figura 5-4: Gráfico del índice de polarización de las probetas en función de los ciclos de envejecimiento acelerado.

En la Figura 5-4 se muestra el comportamiento del índice de polarización en función de los ciclos de envejecimiento, inicialmente se tienen valores de IP en torno a 1.18 cayendo hasta los 1.07 al final de la prueba de envejecimiento, si bien se aprecia una ligera reducción de este parámetro revelando pérdida en calidad de aislación, no es un cambio importante para afirmar que la vida útil de la probeta está por terminar, por el contrario, no es posible conocer cuánto tiempo de vida le queda por delante dado que los valores de IP de las probetas B1 y B2 son similares a los de A1 y A2, es decir, las probetas envejecidas a 136°C presentan una calidad de aislación similar que las probetas sometidas a la temperatura de operación nominal de 90°C.

Durante el transcurso del laboratorio se ha notado que el IP no es un parámetro representativo para notar variaciones en la calidad del aislamiento en la probeta porque la corriente de absorción disminuye rápidamente. Por lo que es necesario aclarar que no es posible realizar conclusiones del estado de la probeta en base al IP , por lo que el análisis del párrafo anterior no tiene validez para conocer el estado dieléctrico de la probeta.

Podría resultar favorable reemplazar el diagnóstico en base a *IP* por el parámetro *DAR* (Relación de Absorción Dieléctrica) el cual se define como el cociente entre la resistencia de aislamiento (R_a) medida a los 60 segundos sobre la lectura de 30 segundos, esto es:

$$DAR = \frac{R_a(t=60)}{R_a(t=30)} , \quad \text{con } t \text{ en segundos} \quad (5.1)$$

Para dieléctricos en los cuales la corriente de absorción disminuye rápidamente, como el caso de la probeta en estudio, [26] recomienda utilizar la Tabla 5-1 para interpretar la calidad del aislamiento.

Valor del DAR	Condición del aislamiento
Menor a 1.25	Insuficiente
Entre 1.25 y 1.6	OK
Mayor a 1.6	Excelente

Tabla 5-1: Interpretación de la aislación eléctrica según el parámetro DAR [26].

Sección 5.2

Parámetros AC

Los gráficos mostrados en esta sección están confeccionados en base al perfil de tensión que se muestra en la Figura D-10 (ver Anexos, pág. 107) y se muestran los datos registrados durante el perfil de tensión en descenso.

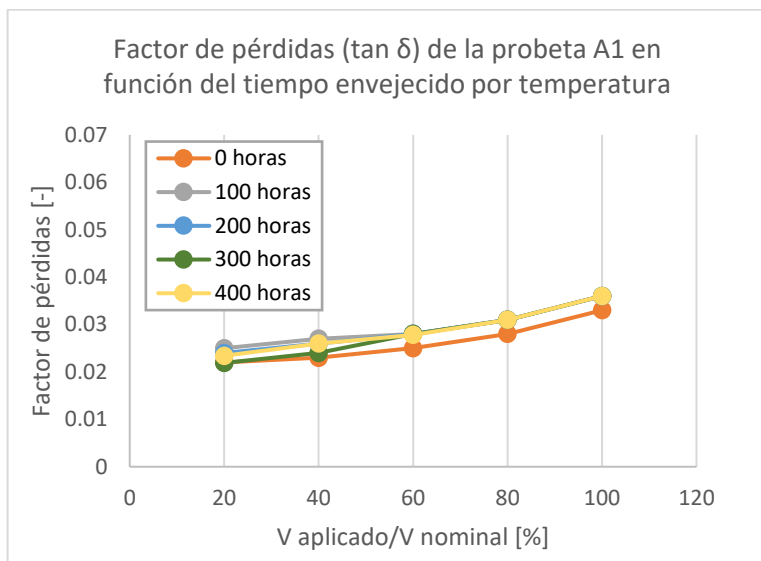
Las magnitudes del *factor de pérdidas* ($\tan \delta$), *descargas parciales* (DP) y *capacitancia* (C) revelan el mismo resultado que se obtuvo mediante los parámetros de R_a e IP : no se observan variaciones importantes de los parámetros para afirmar que se ha perdido calidad en el aislamiento, los valores de $\tan \delta$, DP y C de las probetas B1 y B2 son similares a los valores de A1 y A2.

En el set de gráficos de la Figura 5-5 se muestra el comportamiento del factor de pérdidas y de las descargas parciales en función de los ciclos de envejecimiento para las probetas A1 y A2, las que fueron sometidas a 90°C hasta acumular 400 horas.

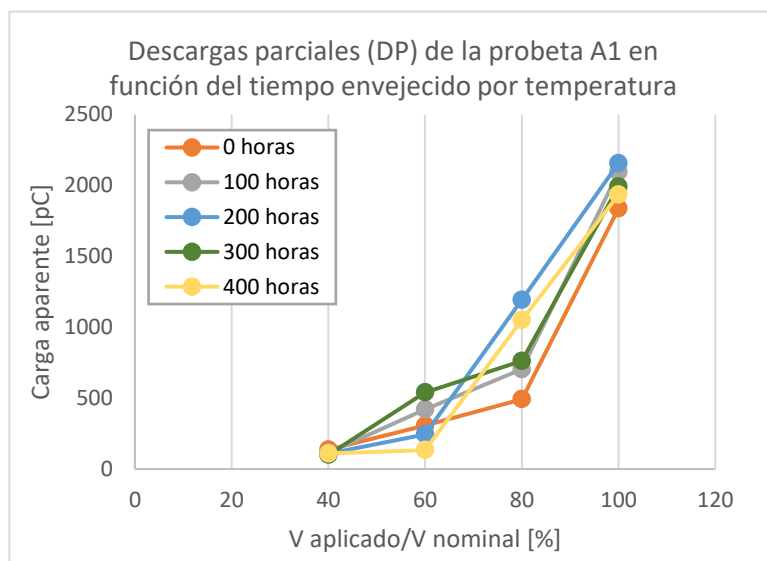
La Figura 5-5 (a) y (c) muestran un valor inicial de $\tan \delta$ igual a 0.033 para la probeta A1 y un 0.035 para la probeta A2 a tensión nominal (14.4 kV fase neutro), ambas con 0 horas de horneado. Después de 400 horas de horneado a 90°C, el factor de pérdidas aumenta a un 0.036 y un 0.038 para las probetas A1 y A2 respectivamente. De antemano se esperaba que las probetas sometidas a 90°C no sufrieran deterioro, o bien sea mínimo, dado que 90°C es la temperatura de operación y fueron diseñadas para trabajar a esa temperatura, los gráficos de $\tan \delta$ confirman un nulo deterioro evidenciando un incremento de un 0.3% en las pérdidas de las probetas, concluyéndose que no se han deteriorado.

Nótese de la Figura 5-5 (a) y (c) que las curvas de $\tan \delta$ de las probetas A1 y A2 presentan el mismo patrón de comportamiento y están todas solapadas entre sí, sin diferencia entre cada ciclo de horneado. Por otro lado, la probeta A2 fue sometida adicionalmente a impulsos de tensión y no muestran signos de envejecimiento adicional a causa de la sobretensión, por lo que las probetas del grupo A han resistido el estrés térmico y eléctrico aplicado.

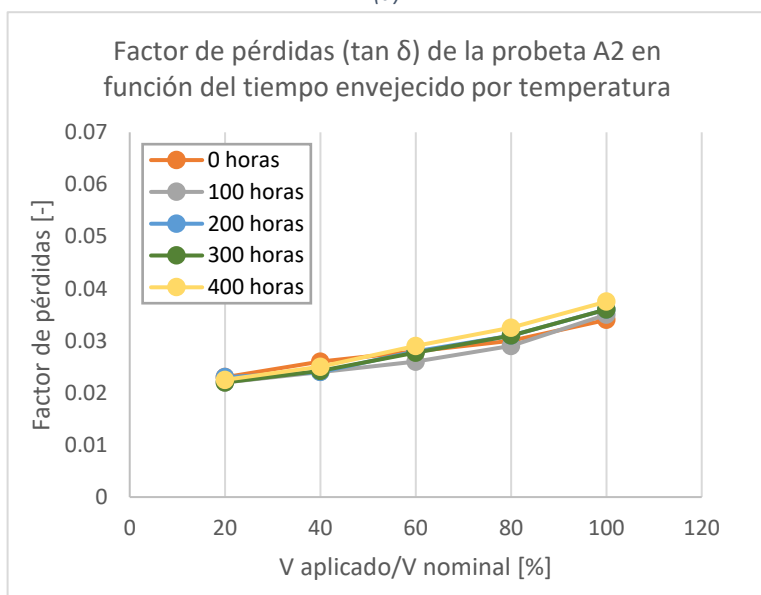
En base a la Figura 5-5 (b) y (d) El comportamiento de las descargas parciales de las probetas A1 y A2 muestran magnitudes de carga aparente en torno a los 2100 [pC] a tensión nominal, no se observa una tendencia al alza con más horas de envejecimiento, por lo que este parámetro no evidencia un deterioro progresivo en las probetas a causa de la temperatura y la sobretensión.



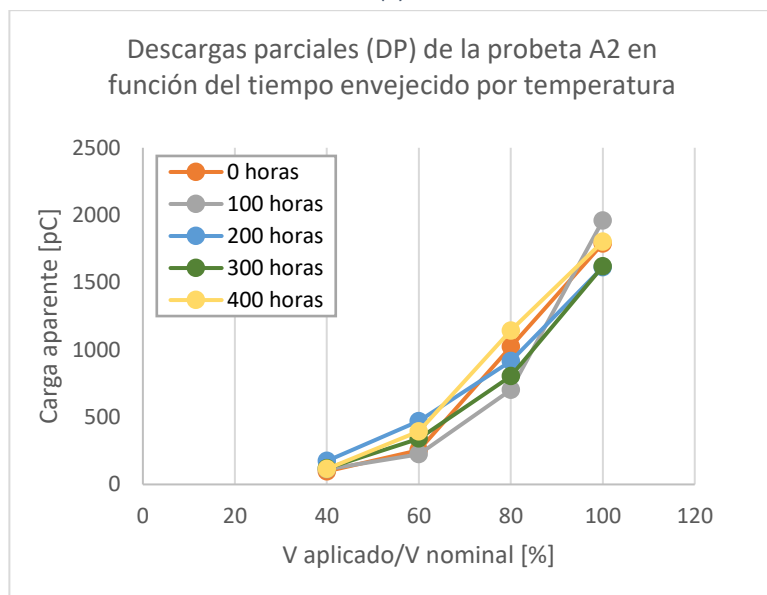
(a)



(b)



(c)



(d)

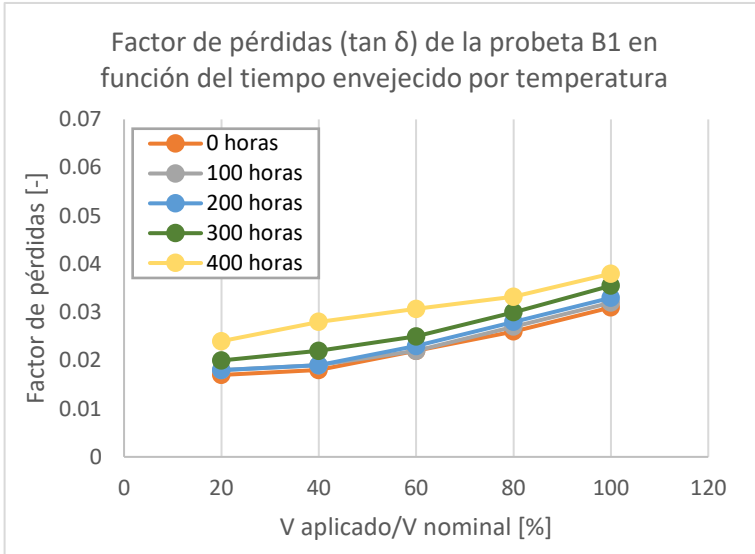
Figura 5-5: Set de gráficos del factor de pérdidas y descargas parciales de las probetas A1 y A2 en función de los ciclos de temperatura.

En el set de gráficos de la Figura 5-6 se muestra el comportamiento del factor de pérdidas y de las descargas parciales en función de los ciclos de envejecimiento para las probetas B1 y B2, las que fueron sometidas a 136°C hasta acumular 400 horas.

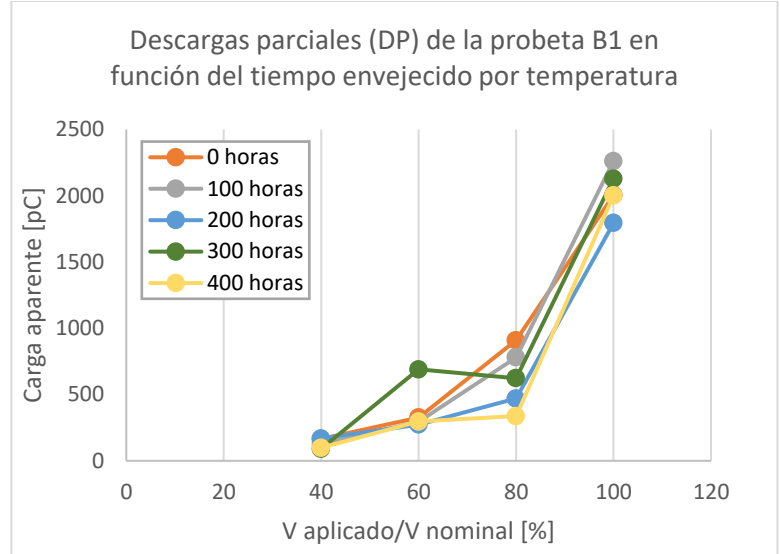
En base a la Figura 5-6 (a) y (c), las curvas de $\tan \delta$ de las probetas B1 y B2 no están solapadas una sobre otra como el caso de las probetas A1 y A2, más bien es posible observar una ligera tendencia de aumento en las pérdidas de las probetas a medida que transcurren los ciclos de horneado. Las probetas con 0 horas y después de acumular 400 horas a 136°C reflejan que las pérdidas a tensión nominal de los ejemplares B1 y B2 van de un $0.033 \rightarrow 0.038$ y $0.033 \rightarrow 0.039$, respectivamente, registrando un aumento de hasta un 0.6%.

Al observar el comportamiento de las descargas parciales de las probetas B1 y B2, en base a la Figura 5-6 (b) y (d), se tienen las magnitudes de carga aparente en torno a los 2200 [pC] a tensión nominal ya sea con 0 o 400 horas de horneado a 136°C, es decir, no se observa una tendencia al alza con más horas de envejecimiento, por lo que al igual que el caso anterior con las probetas A1 y A2, las DP no evidencia un deterioro progresivo en la probeta a causa de la temperatura y la sobretensión.

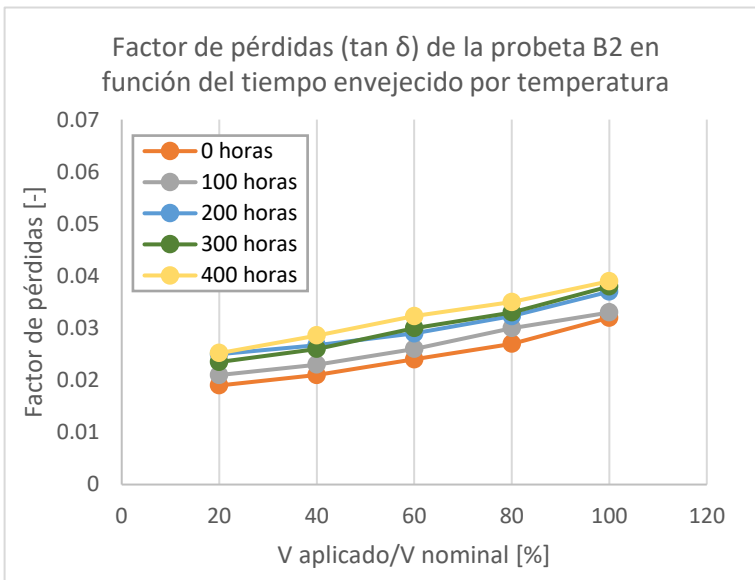
La probeta B2 fue sometida adicionalmente a impulsos de tensión y no muestra signos de envejecimiento adicional a causa de la sobretensión respecto la probeta B1, resultando que los impulsos de tipo maniobra no aportan a un deterioro acelerado de la probeta a pesar de haber sido calentada en ciclos de 136°C.



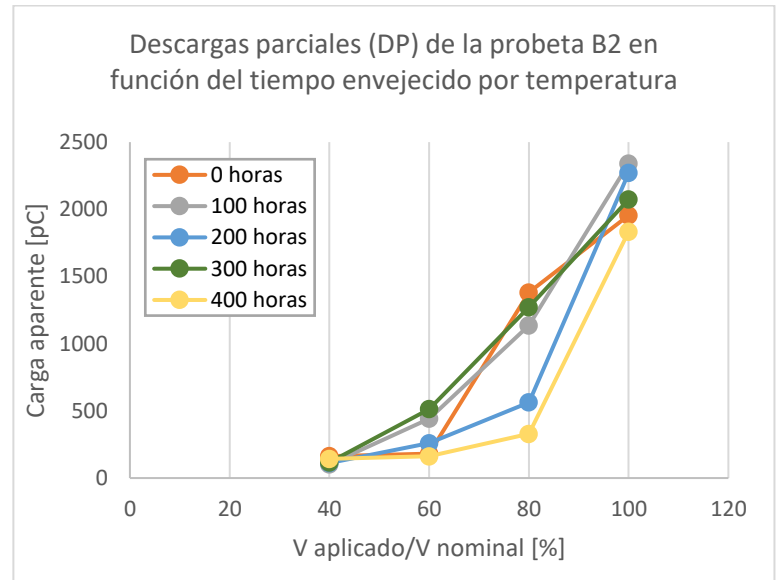
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5-6: Set de gráficos del factor de pérdidas y descargas parciales de las probetas B1 y B2 en función de los ciclos de temperatura.

En la gráfica mostrada en la Figura 5-7 se tiene la comparación del factor de pérdidas de las probetas A1, A2, B1 y B2 a tensión nominal durante el perfil de tensión en descenso.

De la Figura 5-7 se aprecia que las probetas del grupo B tienen pérdidas similares a las probetas del grupo A, pese de haber estado sometidas a 136°C, además el ensayo de impulso **no** revela haber provocado un aumento extra en la $\tan \delta$ para las probetas A2 y B2 respecto los ejemplares que no fueron sometidos a impulsos. Las probetas A2 y B2 soportaron los trenes de impulso maniobra y no presentaron signos de ruptura eléctrica.

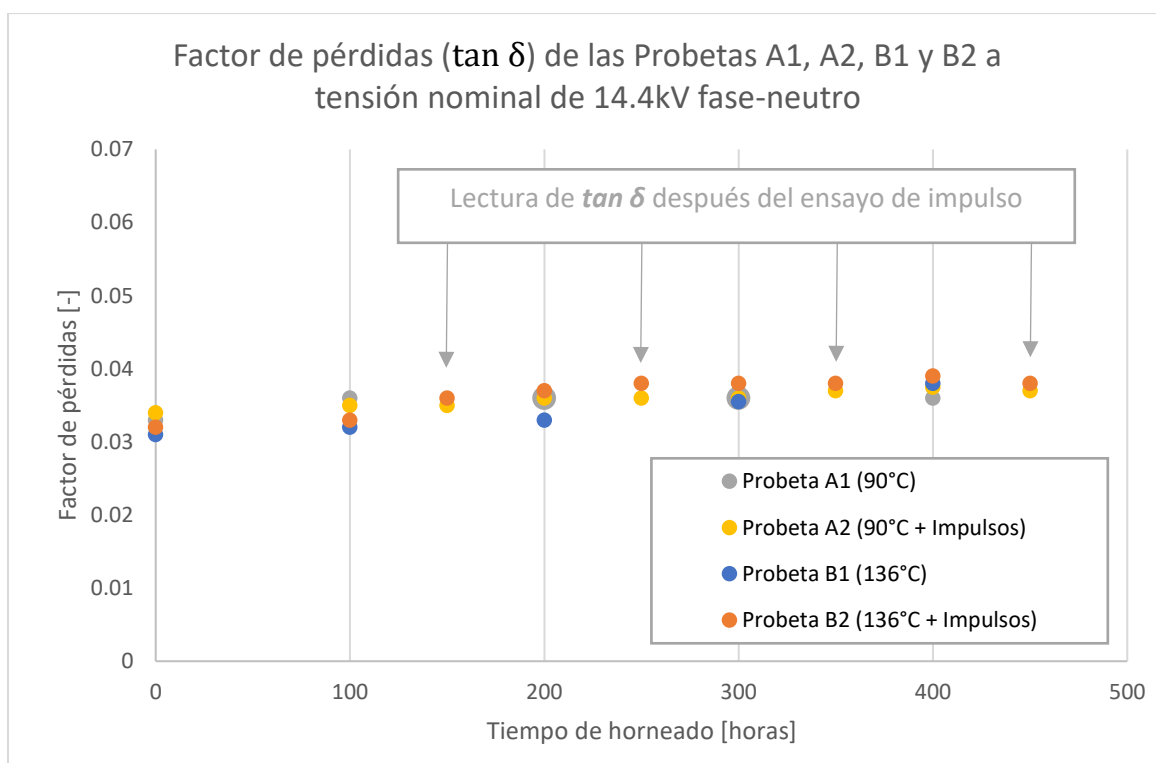


Figura 5-7: Gráfico del factor de pérdidas de las probetas en función de los ciclos de envejecimiento acelerado.

Al observar la carga aparente de las probetas A1, A2, B1 y B2 producto de las descargas parciales, se tiene la Figura 5-8 donde este parámetro tuvo un comportamiento con valores entre 1500 y 2300 [pC] en todo momento, sin importar el progreso de la prueba de envejecimiento, el no aumento progresivo de las DP es un indicio que no se ha detectado envejecimiento en la probeta. En la Figura 5-9 se muestra la forma de la actividad DP registrada por el equipo de medición.

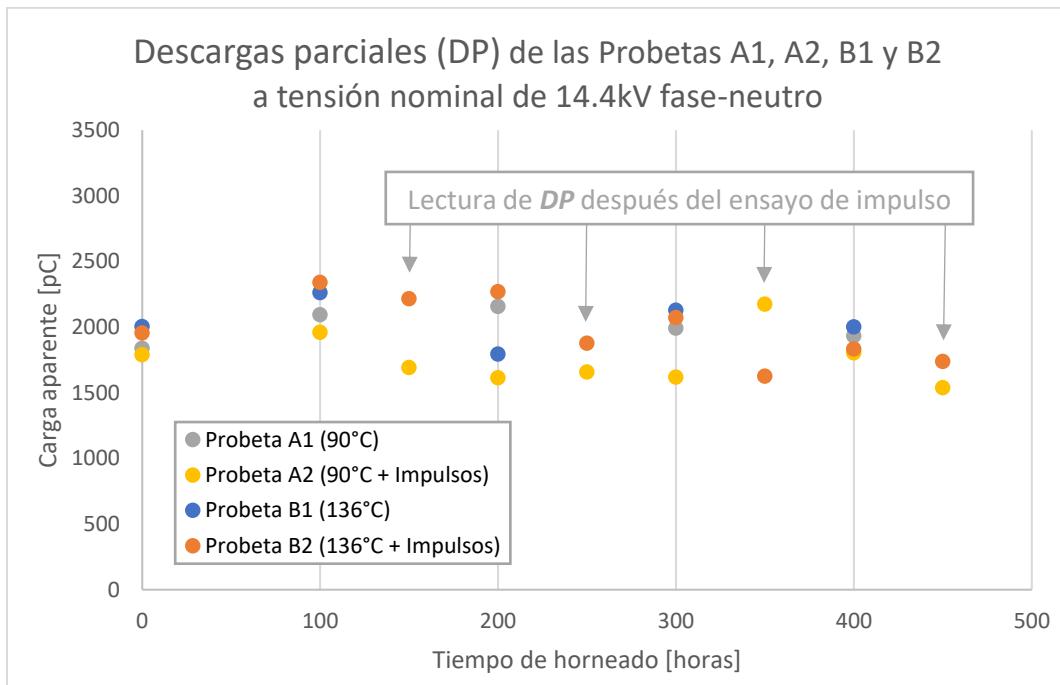


Figura 5-8: Gráfico de las descargas parciales de las probetas en función de los ciclos de envejecimiento acelerado.

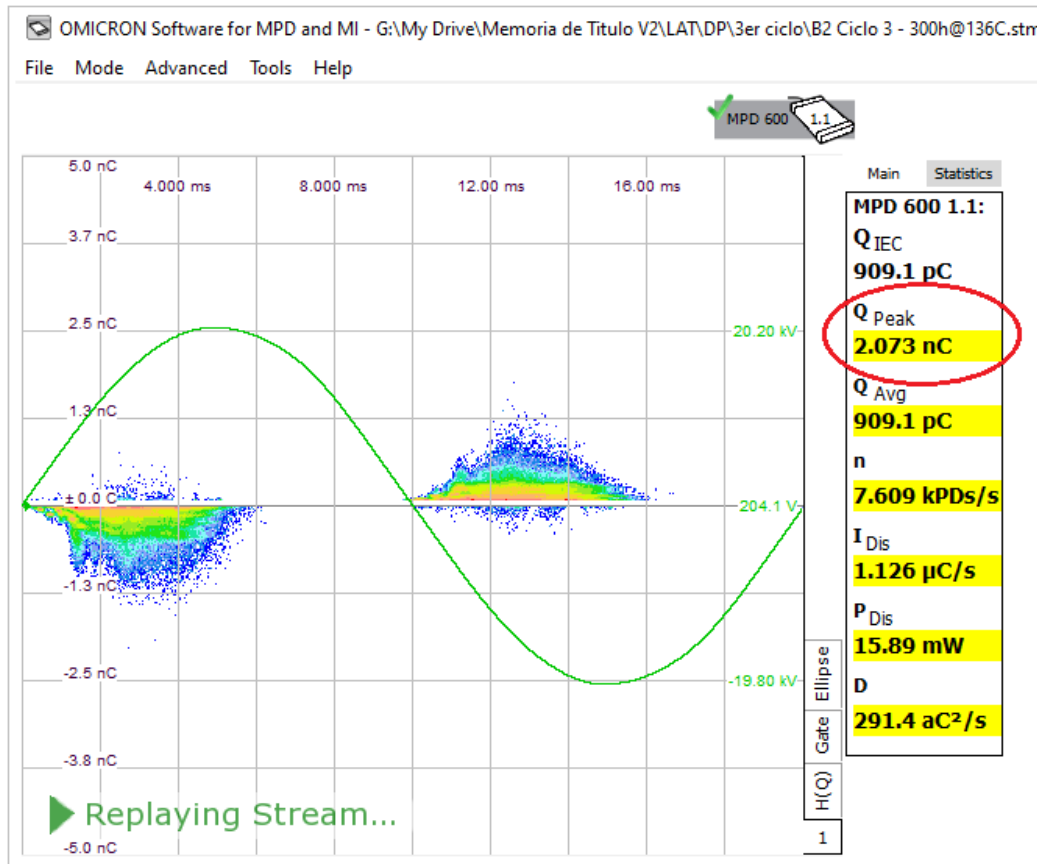


Figura 5-9: Descargas parciales de la probeta B2 con 300 horas acumuladas a 136°C.

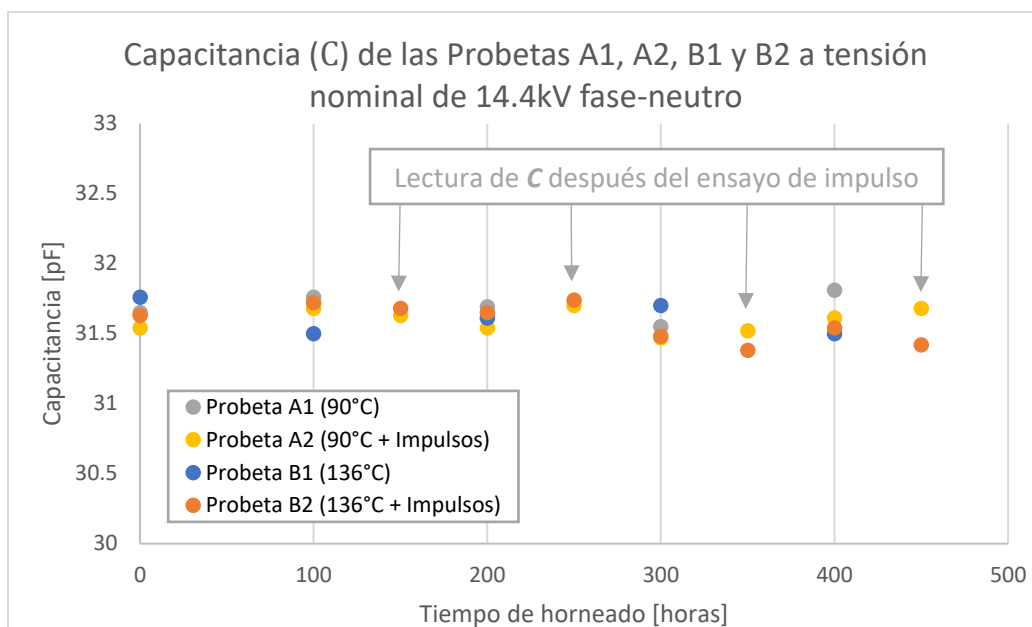


Figura 5-10: Gráfico de la capacitancia de las probetas en función de los ciclos de envejecimiento acelerado.

La variación del parámetro *capacitancia* (C) de las probetas A1, A2, B1 y B2 en función de la prueba de envejecimiento se muestra en la Figura 5-10, el parámetro C se mantiene estable en todo momento sin importar el avance de la prueba de envejecimiento, los valores se mantienen dentro del rango entre 31.38 y 31.81 [pF], este parámetro muestra que la calidad del aislamiento de las probetas no ha cambiado, independiente de los ciclos de temperatura e impulsos aplicados.

Finalmente, en base al análisis de los parámetros de diagnóstico en R_a , IP , $\tan \delta$, DP y C , se observa que las probetas sometidas a 136°C mantienen su calidad de aislamiento y no han sufrido deterioro suficiente para afirmar que su vida útil está por terminar.

Si bien la vida media de los enchufes mineros es de 2 a 3 años, los resultados expuestos en este capítulo revelan que ni la temperatura ni los impulsos de tensión son responsables de la corta vida útil de estos dispositivos, lo que confirma la hipótesis que el responsable de su rápido deterioro es por su manipulación y no por los fenómenos de corriente y transitorios de tensión de su operación. Del Capítulo 2, la Figura 2-6 también evidencia que el gran responsable del deterioro del cable/enchufe es por su manipulación (impacto y tracción).

Los ensayos propuestos de envejecimiento acelerado en el laboratorio no consideran el efecto que puede tener la humedad y otros factores ambientales o químicos, por lo que no se descarta que estos agentes, por si solos o en conjunto con la temperatura o tensión eléctrica, tengan participación en la precoz vida útil del enchufe.

Sección 5.3

Frequency Response Analysis

La Figura 5-11 muestra la respuesta en frecuencia de la probeta B1 en función de cada ciclo de 100 horas de horneado, de esta figura se observan curvas con un comportamiento aleatorio y sin tendencia. Las diferencias de las curvas podrían ser señal de cambios en la probeta, pero esto es falso ya que durante el transcurso de los ensayos se ha notado que al momento de generar una curva de respuesta en frecuencia, la forma de la gráfica depende exclusivamente de agentes externos al sistema bajo estudio como puede ser el contacto entre el equipo de medida y la probeta, además, las curvas FRA cambian si se realizan con el cable del equipo enrollado o desenrollado, por lo que posiblemente se esté midiendo los parámetros del cable del equipo, generando error en las mediciones. Evidencia de lo mencionado se muestra en la Figura 5-12 y la Figura 5-13 donde se observan diferentes curvas de respuesta en frecuencia según la disposición del cable del equipo.

Dado que no se ha obtenido un resultado favorable para realizar el diagnóstico a la calidad de aislamiento de la probeta, no se recomienda el uso de la respuesta en frecuencia para el diagnóstico del aislamiento de los enchufes mineros estudiados.

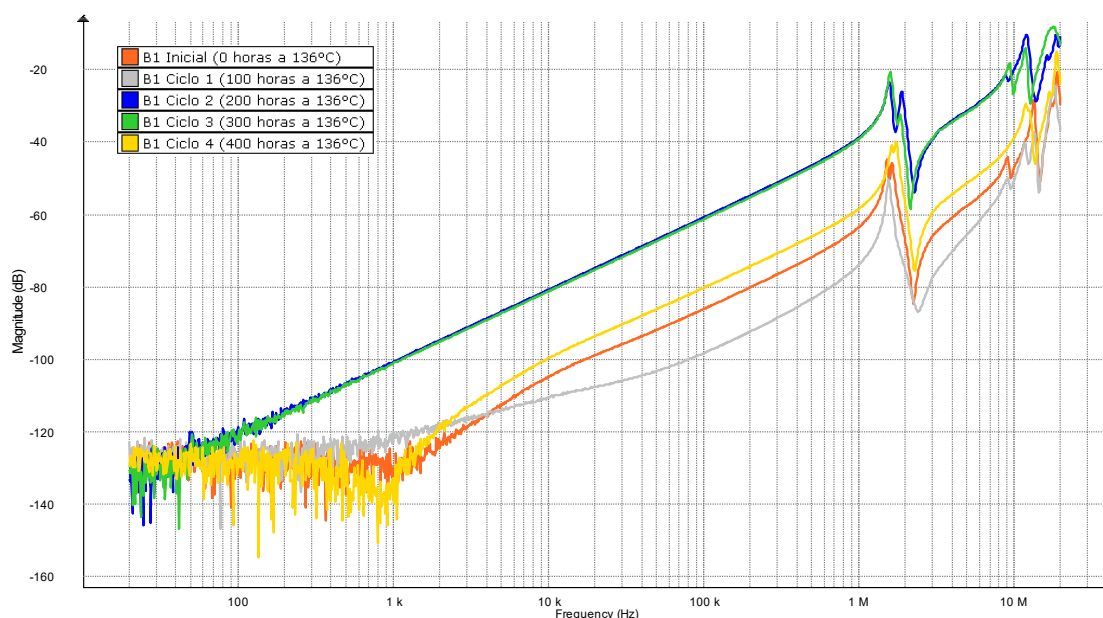


Figura 5-11: Gráfico de respuesta en frecuencia de la probeta B1 en función de los ciclos de temperatura.

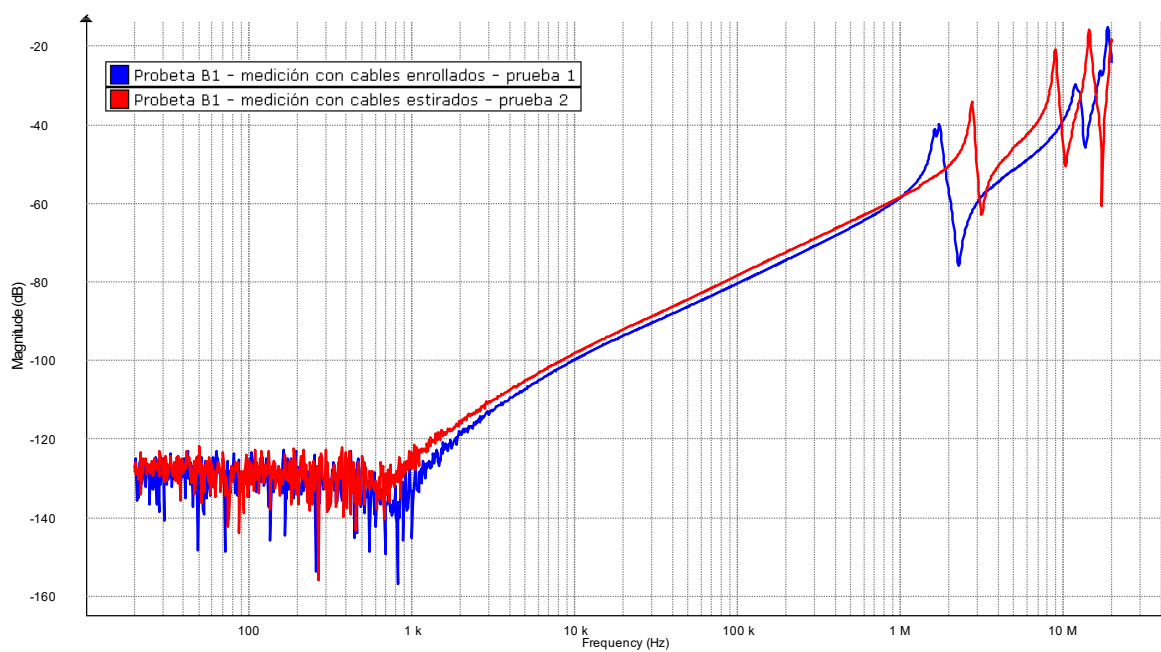
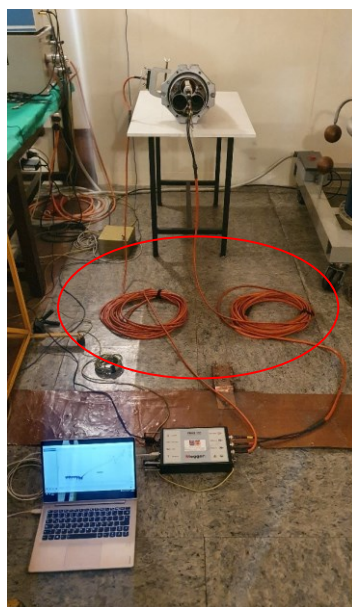


Figura 5-12: Gráfico de la respuesta en frecuencia de la probeta B1 utilizando los cables enrollados y desenrollados para realizar las curvas FRA.



(a)



(b)

Figura 5-13: Fotografías de la medición de la respuesta en frecuencia de la probeta utilizando el equipo FRAX.
(a) medición la de curva FRA con los cables del equipo enrollados.
(b) medición de la curva FRA con los cables del equipo estirados.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo ha consistido en simular el daño que sufriría el sistema de aislación eléctrico de un enchufe minero de clase 25kV de marca 3M ante el esfuerzo térmico y eléctrico, efectos producidos por la corriente y la tensión eléctrica.

En general, se ha intentado reproducir en laboratorio una probeta que haya estado en operación estacionaria a 90°C durante 2 años y 100 días, sometiéndola a 136°C durante 400 horas y aplicando trenes de impulsos tipo maniobra de 75kV. Adicionalmente, se han horneado un par de probetas a 90°C durante 400 horas para poder comparar el deterioro versus las probetas sometidas a 136°C.

Una vez completados los ensayos de envejecimiento acelerado en las probetas, los parámetros de diagnóstico no presentan variaciones importantes para afirmar que se ha perdido la calidad del aislante, más bien, se observa que las probetas sometidas a 136°C mantienen su calidad de aislamiento y no han sufrido deterioro suficiente para señalar que su vida útil se ha acabado o que esté por terminar. En base a las pruebas de envejecimiento y procedimientos de medición de los parámetros de diagnóstico adoptados en el presente documento, se concluye que: **el estrés térmico provocado por la corriente eléctrica y el estrés eléctrico por causa de los transitorios de tensión (debido a la operación nominal del enchufe minero 3M) no reflejan ser la causa de la corta vida útil del enchufe, por lo que se mantiene y se reafirma la sospecha que la vida útil de 2 a 3 años del dispositivo es causa de golpes, impacto y arrastre por causa de su manipulación en la faena minera.**

Los parámetros que tuvieron el mejor desempeño para el diagnóstico fueron la resistencia de aislamiento (R_a) y el factor de pérdidas ($\tan \delta$). Los parámetros menos representativos fueron el índice de polarización (IP) que presentaba mínúsculas variaciones debido a que la corriente de absorción disminuye rápidamente y las descargas parciales (DP) que son excesivamente sensibles a la calidad del contacto entre la probeta con el equipo de medida. La capacitancia (C) se mantuvo siempre constante independiente del avance de la prueba de envejecimiento.

Para todas las probetas, los valores iniciales de resistencia de aislamiento fueron alrededor de 515 [$G\Omega$] y finalizaron en torno a 480 [$G\Omega$]. No se evidencia una tendencia fuerte a la baja para afirmar que se ha perdido calidad en el aislamiento, los valores de R_a de las probetas sometidas a 136°C son similares que las probetas horneadas a 90°C.

La media de los valores del factor de pérdidas a tensión nominal para las probetas sometidas a 90°C fue inicialmente de un 3.4% llegando hasta un 3.7% al finalizar la prueba de envejecimiento. Por otro lado, la media de $\tan \delta$ de las probetas horneadas a 136°C fueron inicialmente de un 3.3% llegando hasta un 3.9%. Dada la pequeña diferencia en ambos casos, se afirma que las probetas sometidas a 136°C soportaron el estrés térmico y tienen una calidad de aislamiento similar que las probetas horneadas a 90°C.

Para todas las probetas, independiente de la temperatura y las horas acumuladas de horneado, las descargas parciales presentaron magnitudes de carga aparente en torno a los 2200 [pC] a tensión nominal. No se evidencia ningún tipo de tendencia por lo que no es posible afirmar o negar deterioro.

La capacitancia se mantiene estable en todo momento sin importar el avance de la prueba de envejecimiento, los valores se mantienen dentro del rango entre 31.38 y 31.81 [pF], este parámetro muestra que la calidad del aislamiento de las probetas no ha cambiado, independiente de los ciclos de temperatura e impulsos aplicados.

Si bien los valores de índice de polarización (IP) se encuentran inicialmente en torno a 1.18 disminuyendo hasta los 1.07 al final de la prueba de envejecimiento, se podría afirmar a priori que las probetas envejecidas a 136°C mantienen su calidad de aislamiento dado que los valores de IP son similares que las probetas sometidas a la temperatura de operación nominal de 90°C. Sin embargo, durante el transcurso del laboratorio se ha notado que el IP no es un parámetro representativo para notar variaciones en la calidad del aislamiento de la probeta porque la corriente de absorción disminuye rápidamente. Por lo que es necesario aclarar que no es posible realizar conclusiones del estado de la probeta en base al IP y la conclusión anterior no tiene validez para conocer el estado dieléctrico de la probeta.

Si a futuro se desea hacer un diagnóstico sobre la calidad del aislamiento del enchufe minero en terreno, se recomienda utilizar los siguientes parámetros de diagnóstico: *resistencia de aislamiento* y la *relación de absorción dieléctrica (DAR)*. Opcionalmente también se recomienda el *factor de pérdidas*.

El *DAR* es un buen indicador cuando la corriente de absorción decae rápidamente y se puede obtener en la misma prueba al medir la resistencia de aislamiento ya que se define como el cociente entre la resistencia de aislamiento (R_a) medida a los 60 segundos sobre la lectura de 30 segundos.

Se sugiere fabricar un terminal de contacto exclusivo para la medición de los parámetros de diagnóstico, para asegurar siempre un contacto firme y que sea el mismo en cada medición ya que se ha observado que un mal contacto afecta a la precisión de las mediciones.

Para la prueba de respuesta en frecuencia no se ha obtenido un resultado favorable para el diagnóstico de la calidad de aislamiento de la probeta. La forma de la gráfica depende exclusivamente de agentes externos al sistema bajo estudio como puede ser el contacto entre el equipo de medida y la probeta, además, las curvas de respuesta en frecuencia varían si se realizan con el cable del equipo enrollado o estirado, por lo que posiblemente se esté midiendo adicionalmente los parámetros del cable del equipo de medida y no exclusivamente el sistema en estudio, generando error en las mediciones.

Dado que el análisis de la respuesta en frecuencia es visual y las curvas cambian por agentes externos al sistema en estudio: no se recomienda el uso de la respuesta en frecuencia para el diagnóstico del aislamiento de los enchufes mineros estudiados.

Los ensayos propuestos de envejecimiento acelerado en el laboratorio no consideran el efecto que puede tener la humedad y otros factores ambientales o químicos, por lo que no se descarta que estos agentes, por si solos o en conjunto con la temperatura y/o tensión eléctrica, tengan participación en la vida útil del enchufe.

Referencias

- [1] Caterpillar, "Specalog for 7495 Electric Rope Shovel AEHQ6959-01," 2016. [Online]. Available: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C811260>. [Accessed 17 abril 2022].
- [2] Comercial Larrain S. A., "Catálogo: Soluciones para la minería," [Online]. Available: https://www.comlarrain.cl/dinamicos/catalogos/Soluciones_paralamineria.pdf. [Accessed 17 abril 2022].
- [3] *IEEE Recommended Practice - General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation*, IEEE Std 1, 2000 (R2005).
- [4] Portal Minero, "La mejor solución para equipamiento eléctrico en minería," [Online]. Available: <https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=112920814>. [Accessed 17 abril 2022].
- [5] MTM Ingeniería, "Catálogo general de equipos para manejo de cable eléctrico minero," [Online]. Available: http://mtmingeneria.cl/espanol/EC%20C_GRAL.pdf. [Accessed 17 abril 2022].
- [6] 3M, "Ficha técnica de enchufes mineros clase 25kV 530A," Chile, 2021.
- [7] A. Labeaga Viteri, "Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones," trabajo de fin de máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España, 2018.
- [8] Todo en polimeros, "Degradación y despolimerización," noviembre 2016. [Online]. Available: <https://todoenpolimeros.com/2016/11/23/degradacion-y-despolimerizacion/>. [Accessed 17 abril 2022].
- [9] J. Calle Montoya, "Materiales poliméricos. Procesamiento y degradación," 29 Marzo 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=tvvj7ypM-j4>. [Accessed 17 abril 2022].
- [10] *IEEE Standard for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials*, IEEE Std 98, 2016.

- [11] J. Xu and C. Kaminski, "Temperature Index of Electrical Insulations by mTGA," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 42, no. 6, pp. 1366-1376, 2014.
- [12] A. Motori, G. Montanari and S. Giannoni, "Oxidative stability for short-term thermal endurance characterization of poly(butylene terephthalate)," in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.
- [13] G. C. Montanari and G. Pattini, "Thermal endurance evaluation of insulating materials: a theoretical and experimental analysis," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vols. EI-21, no. 1, pp. 69-77, Feb. 1986.
- [14] Lloyd A. Morley, *Mine Power Systems*, Washington DC, USA: United States Department of the Interior, 1991.
- [15] *Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules*, IEC 60071-1, 1993.
- [16] J. L. Dinamarca, *Técnicas de Alta Tensión Teoría y aplicaciones*, Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2007.
- [17] F. Rivas, "Química general: Cristales," Diapositivas de la asignatura: Química General, Facultad de Ingeniería BUAP, [Online]. Available: <https://slidetodoc.com/quimica-general-m-i-frida-karem-rivas-moreno/>. [Accessed 18 abril 2022].
- [18] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy y M. I. Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*, New York: Marcel Dekker Inc, 1998.
- [19] C. Garay Bravo, "Razón de absorción dieléctrica para diagnosticar el estado de una aislación," trabajo de fin de grado, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [20] H. D. Young y R. A. Freedman, *Física Universitaria*, 12 ed., vol. 2, México: Pearson Educación, 2009.
- [21] C. R. Rojo, "Pérdidas dieléctricas en materiales aislantes," trabajo presentado como requisito parcial para la promoción a profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, Noviembre, 1994.
- [22] D. O. Jones, J. R. Jowerr, S. Graeme Thomson and D. S. Danner, "Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento," 2 ed., Megger®, 2002.
- [23] Megger®, "Más vale prevenir..." La guía completa para pruebas de aislamiento eléctrico, Dallas, Texas: AVO INTERNATIONAL, 2000.
- [24] *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, IEEE Std 43, 2013.
- [25] D. Manney, "Polarization index testing benefits," *Plant Engineering*, 10 July 2017. [Online]. Available: <https://www.plantengineering.com/articles/polarization-index-testing-benefits/>. [Accessed 18 abril 2022].

- [26] Chauvin Arnoux Ibérica, «Guía de la medición de aislamiento,» Ed. 1, Barcelona, España, 2010.
- [27] *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques*, IEEE Std 4, 2013.
- [28] A. Fouillé, Compendio de electrotecnia, España: Marcombo Boixareu Editores, 1979.
- [29] J. Espina A., "Teoría de las descargas parciales internas," Apuntes de Ingeniería de Alta Tensión, Universidad del Zulia, Venezuela, 2009.
- [30] J. M. Martínez, "Descargas parciales," Apuntes de Ingeniería de Alta Tensión, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2012.
- [31] R. J. Van Brunt, "Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona. Recent Advances and Future Challenges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 5, pp. 761-784, 1994.
- [32] *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, IEC 60270, 2000.
- [33] *IEEE Standard for Separable Insulated Connector Systems for Power Distribution Systems Rated 2.5 kV through 35 kV*, IEEE Std 386, 2016.
- [34] J. I. Ríos Vielma, "Utilización de redes neuronales para el reconocimiento de patrones en el diagnóstico dieléctrico de máquinas rotantes," trabajo de fin de máster, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2012.
- [35] H. Cadavid, B. Pabón, G. Aponte and E. Perea, "Determinación de la calidad del aislamiento mediante la medición del factor de pérdidas," Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- [36] F. Villada, G. Moreno and J. Valencia, "El mantenimiento predictivo y su efecto en la optimización de costos de mantenimiento," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 25, pp. 95-105, 2002.
- [37] S. Alsuhaibani, Y. Khan, A. Beroual and N. Malik, "A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics," *Energies*, vol. 9, no. 11, p. 879, 2016.
- [38] *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*, IEEE Std C57.149, 2012.
- [39] R. Nikjoo, "Dielectric Response and Partial Discharge Diagnostics of Insulation Systems by Utilizing High Voltage Impulses," Doctoral Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Suecia, 2016.

- [40] J. Ramírez, V. Tibanlombo, M. Trujillo, E. Novoa and M. Argoti, "Evaluación del aislamiento eléctrico mediante análisis de la respuesta en frecuencia con la aplicación de impulsos de alto voltaje," Conferencia Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 28 sep. 2018.
- [41] M. F. M. Yousof, C. Ekanayake and T.K. Saha, "Examining the Ageing of Transformer Insulation Using FRA and FDS Techniques," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 2, pp. 1258-1265, April, 2015.
- [42] *High-Voltage Test Techniques Part 1: General definitions and test requirements*, IEC 60060-1, 2021.

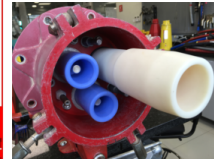
Anexos

Anexo A – Capítulo 2

A.1 Ficha técnica oficial del aislador hembra y macho del enchufe minero clase 25kV 3M

Tabla A-1: Ficha técnica oficial del aislador hembra del enchufe minero clase 25kV y 500A marca 3M.

Aislador Hembra Enchufes Mineros clase 25kV



Ficha Técnica

Descripción

Aislador para Enchufes Mineros Hembra clase 25kV. Fabricados a partir de Poliamida aislante de características ignífugas. Poseen un elevado aislamiento eléctrico para uso en aplicaciones de media tensión para sistemas eléctricos mineros. Diseño compacto de una sola pieza y de alta resistencia al impacto.

Aplicaciones / Usos

Uso como repuesto para Enchufes Hembra clase 25kV. Se debe revisar la compatibilidad antes de instalar.

Certificaciones y Ensayos

- Fabricados en Chile bajo norma ISO-9001.
- Ensayos Eléctricos según IEEE-386-1995, realizados en la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso - Chile.

Resultados de Ensayos Eléctricos

Tipo Ensayo	Solicitado	Resultado
Aplicación de sobretensión alterna	40kV, 50Hz, 60s	Logrado
Aplicación de sobretensión continua	70kV, polaridad negativa, 15min	Logrado
Aplicación de sobretensión de impulso	Impulso positivo y negativo 125kV (1,2/50 us)	95kV
Ensayo de Corriente	600A @ 90°C	500A < 90°C

Códigos de Producto

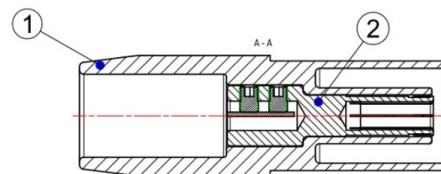
SKU	Descripción
XE00280034-2	AEH25 Aislador para Enchufe Hembra clase 25kV. No incluye pin de contacto

Propiedades del Aislante

Propiedad	Hembra
Material	Poliamida
Elongación Máxima	100%
Tensión Máxima	3.100 Mpa
Retardante a la llama	Si, cumple UL-94
Rango de Temperatura de Operación Nominal	-40 °C hasta +105°C
Constante Dieléctrica	3,4
Rigidez Dieléctrica	50 kV/mm (seco) 20 kV/mm (húmedo)

Diseño

AEH-25 Aislador Hembra clase 25kV



1. Poliamida 2. Pin Contacto y Terminal Hembra

Garantía

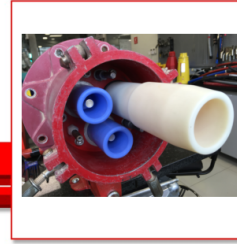
La única responsabilidad del vendedor o fabricante será la de reemplazar la cantidad de este producto que se pruebe ser defectuoso de fábrica.

Ni el vendedor ni el fabricante serán responsables de cualquier lesión personal, pérdida o daños; ya sean directos o consecuentes, que resulten del uso de este producto.

Antes de utilizar el producto, el usuario deberá determinar si éste es apropiado para el uso pretendido. El usuario asume toda responsabilidad y riesgo en conexión con dicho uso.

Tabla A-2: Ficha técnica oficial del aislador macho del enchufe minero clase 25kV y 500A marca 3M.

Aislador Enchufes Macho Coplas Mineras clase 25kV



Ficha Técnica

Descripción

Conjunto Aislador para Enchufes Mineros Macho y Hembra clase 25kV. Fabricados a partir de Caucho de Silicona aislante de características ignífugas. Poseen un elevado aislamiento eléctrico para uso en aplicaciones de media tensión para sistemas eléctricos mineros. Diseño compacto de una sola pieza y de alta flexibilidad.

Aplicaciones / Usos

Uso como repuesto para Enchufes Macho clase 25kV. Se debe revisar la compatibilidad antes de instalar.

Certificaciones y Ensayos

- Fabricados en Chile bajo norma ISO-9001.
- Ensayos Eléctricos según IEEE-386-1995, realizados en la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso - Chile.

Resultados de Ensayos Eléctricos

Tipo Ensayo	Solicitado	Resultado
Aplicación de sobretensión alterna	40kV, 50Hz, 60s	Logrado
Aplicación de sobretensión continua	70kV, polaridad negativa, 15min	Logrado
Aplicación de sobretensión de impulso	Impulso positivo y negativo 125kV (1,2/50 us)	95kV

Códigos de Producto

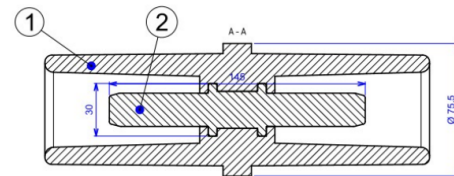
SKU	Descripción
	AEM25 Aislador de Silicona y Pin de Contacto para Enchufe Macho clase 25kV

Propiedades del Material

Propiedad	Macho
Material Aislante	Silicona RTV
Dureza Shore A	50
Temperatura Máxima Permanente	250°C
Temperatura Máxima de Sobre Carga	400°C
Material Conductivo	Cobre ETP
Cubierta Exterior	Plata
Ampacidad	500A

Diseño

CASM-25 Aislador Macho clase 25kV



1. Silicona

2. Pin Contacto Macho

Garantía

La única responsabilidad del vendedor o fabricante será la de reemplazar la cantidad de este producto que se pruebe ser defectuoso de fábrica.

Ni el vendedor ni el fabricante serán responsables de cualquier lesión personal, pérdida o daños; ya sean directos o consecuentes, que resulten del uso de este producto.

Antes de utilizar el producto, el usuario deberá determinar si éste es apropiado para el uso pretendido. El usuario asume toda responsabilidad y riesgo en conexión con dicho uso.

A.2 Datasheet oficial y alternativo del aislante eléctrico de poliamida Ertalon® 6 PLA del enchufe minero clase 25kV 3M

Tabla A-3: Datasheet oficial del dieléctrico poliamida enchufe minero hembra volante clase 25kV 500A marca 3M.

Polyamide

Ertalon® 6 PLA

MITSUBISHI CHEMICAL
ADVANCED MATERIALS

PRODUCT DATA SHEET

Unmodified nylon 6 grade exhibiting characteristics which come very close to those of Ertalon® 66 SA. It combines high strength, stiffness and hardness with good creep and wear resistance, heat aging properties and machinability.

Physical properties (indicative values *)

PROPERTIES				
Colour	-	-	White, Black, Blue, Yellow	
Density	ISO 1183-1	g/cm³	1.15	
Water absorption:				
- after 24 immersion in water of 23 °C (1)	ISO 62	%	0.65	
- at saturation in water of 23 °C	-	%	6.5	
Thermal Properties (2)				
Melting temperature (DSC, 10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	215	
Glass transition temperature (DSC, 20 °C/min) - (3)	ISO 11357-1/-2	°C		
Thermal conductivity at 23 °C	-	W/(K.m)	0.29	
Coefficient of linear thermal expansion:				
- average value between 23 and 60 °C	-	m/(m.K)	80 x 10 ⁻⁶	
- average value between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	90 x 10 ⁻⁶	
Temperature of deflection under load:				
- method A: 1.8 MPa	ISO 75-1/-2	°C	80	
Max. allowable service temperature in air:				
- continuously : for min. 20,000 h (4)	-	°C	90	
Min. service temperature (5)	-	°C	-30	
Flammability (6):				
- according to UL 94 (3 mm thickness)	-	-	HB	
Mechanical Properties at 23 °C (7)				
Tension test (8):				
- tensile strength (9)	ISO 527-1/-2	MPa	88	
- tensile strain at yield (9)	ISO 527-1/-2	%	5	
- tensile strain at break (9)	ISO 527-1/-2	%	25	
- tensile modulus of elasticity (10)	ISO 527-1/-2	MPa	3600	
Compression test (11):				
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (10)	ISO 604	MPa	34 / 64 / 93	
Flexural test (12):				
- flexural strength	ISO 178	MPa	121	
- flexural modulus of elasticity	ISO 178	MPa	3280	
Charpy impact strength - unnotched (13)	ISO 179-1/1eU	kJ/m²	no break	
Charpy impact strength - notched	ISO 179-1/1eA	kJ/m²	3	
Rockwell M-hardness (14)	ISO 2039-2	-	88	
Dynamic Coefficient of Friction (-)				
Wear rate	ISO 7148-2 (15)	µm/km	12	
Electrical Properties at 23 °C				
Electric strength (16)	IEC 60243-1	kV/mm	25	
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	>10E 14	
Surface resistivity	ANSI/ESD STM 11.11	Ohm/sq.	>10E13	
Relative permittivity ε _r : - at 1 MHz	IEC 60250	-	3.20	
Dielectric dissipation factor tan δ : - at 1 MHz	IEC 60250	-	0.016	

Legend:

- 1) According to method 1 of ISO 62 and done on discs Ø 50 mm x 3 mm.
- 2) The figures given for these properties are for the most part derived from raw material supplier data and other publications.
- 3) Values for this property are only given here for amorphous materials and for materials that do not show a melting temperature (PBI, PAI, PI).
- 4) Temperature resistance over a period of min. 20,000 hours. After this period of time, there is a decrease in tensile strength - measured at 23 °C - of about 50 % as compared with the original value. The temperature value given here is thus based on the thermal-oxidative degradation which takes place and causes a reduction in properties. Note, however, that the maximum allowable service temperature depends in many cases essentially on the duration and the magnitude of the mechanical stresses to which the material is subjected.
- 5) Impact strength decreasing with decreasing temperature, the minimum allowable service temperature is practically mainly determined by the extent to which the material is subjected to impact. The value given here is based on unfavourable impact conditions and may consequently not be considered as being the absolute practical limit.
- 6) These estimated ratings, derived from raw material supplier data and other publications, are not intended to reflect hazards presented by the material under actual fire conditions. There is no 'UL File Number' available for these stock shapes.
- 7) Most of the figures given for these mechanical properties of the materials are average values of tests run on dry test specimens machined either out of plate 15-20 mm thick or rod diameter 40-50mm, the test specimens were then taken from the stock shape with their length in longitudinal direction (parallel to the extrusion direction).
- 8) Test specimens: Type 1 B
- 9) Test speed: either 5 or 50 mm/min [chosen acc. to ISO 10350-1 as a function of the ductile behaviour of the material (tough or brittle)]
- 10) Test speed: 1 mm/min.
- 11) Test specimens: cylinders Ø 8 mm x 16 mm
- 12) Test specimens: bars 4 mm (thickness) x 10 mm x 80 mm ; test speed: 2 mm/min ; span: 64 mm.
- 13) Pendulum used: 4 J.
- 14) Measured on 10 mm thick test specimens.
- 15) Test procedure similar to Test Method A: "Pin-on-disk" as described in ISO 7148-2. Load: 30 mN, sliding velocity: 0.33 m/s, mating plate steel Ra= 0.7-0.9 µm, tested at 23°C, 50%RH.
- 16) Electrode configuration: Ø 25 mm / Ø 75 mm coaxial cylinders ; in transformer oil according to IEC 60296 ; 1 mm thick test specimens.

This table is a valuable help in the choice of a material. The data listed here fall within the normal range of product properties of dry material. However, they are not guaranteed and they should not be used to establish material specification limits nor used alone as the basis of design.

It has to be noted that reinforced and filled material shows an anisotropic behaviour (properties differ when measured parallel and perpendicular to the manufacturing direction).

Note: 1 g/cm³ = 1,000 kg/m³ ; 1 MPa = 1 N/mm² ; 1 kV/mm = 1 MV/m.

Note: 1 g/cm³ = 1,000 kg/m³; 1 MPa = 1 N/mm²; 1 kV/mm = 1 MV/m.

Ertalon® is a registered trademark of Mitsubishi Chemical Advanced Materials.

- Legend:
- 1) According to method 1 of ISO 62 and done on discs Ø 50 mm x 3 mm.
 - 2) The figures given for these properties are for the most part derived from raw material supplier data and other publications.
 - 3) Values for this property are only given here for amorphous materials and for materials that do not show a melting temperature (PBI, PAI, PI).
 - 4) Temperature resistance over a period of min. 20,000 hours. After this period of time, there is a decrease in tensile strength - measured at 23 °C - of about 50 % as compared with the original value. The temperature value given here is thus based on the thermal-oxidative degradation which takes place and causes a reduction in properties. Note, however, that the maximum allowable service temperature depends in many cases essentially on the duration and the magnitude of the mechanical stresses to which the material is subjected.
 - 5) Impact strength decreasing with decreasing temperature, the minimum allowable service temperature is practically mainly determined by the extent to which the material is subjected to impact. The value given here is based on unfavourable impact conditions and may consequently not be considered as being the absolute practical limit.
 - 6) These estimated ratings, derived from raw material supplier data and other publications, are not intended to reflect hazards presented by the material under actual fire conditions. There is no 'UL File Number' available for these stock shapes.
 - 7) Most of the figures given for these mechanical properties of the materials are average values of tests run on dry test specimens machined either out of plate 15-20 mm thick or rod diameter 40-50mm, the test specimens were then taken from the stock shape with their length in longitudinal direction (parallel to the extrusion direction).
 - 8) Test specimens: Type 1 B
 - 9) Test speed: either 5 or 50 mm/min [chosen acc. to ISO 10350-1 as a function of the ductile behaviour of the material (tough or brittle)]
 - 10) Test speed: 1 mm/min.
 - 11) Test specimens: cylinders Ø 8 mm x 16 mm
 - 12) Test specimens: bars 4 mm (thickness) x 10 mm x 80 mm; test speed: 2 mm/min; span: 64 mm.
 - 13) Pendulum used: 4 J.
 - 14) Measured on 10 mm thick test specimens.
 - 15) Test procedure similar to Test Method A: "Pin-on-disk" as described in ISO 7148-2. Load 3mPa, sliding velocity= 0.33 m/s, mating plate steel Ra= 0.7-0.9 µm, tested at 23°C, 50%RH.
 - 16) Electrode configuration: Ø 25 mm / Ø 75 mm coaxial cylinders; in transformer oil according to IEC 60296; 1 mm thick test specimens.

This table is a valuable help in the choice of a material. The data listed here fall within the normal range of product properties of dry material. However, they are not guaranteed and they should not be used to establish material specification limits nor used alone as the basis of design.

It has to be noted that reinforced and filled material shows an anisotropic behaviour (properties differ when measured parallel and perpendicular to the manufacturing direction).

Copyright © 2019 The Mitsubishi Chemical Advanced Materials group of companies. All rights reserved. - Date of issue / revision: April 01, 2019

This product data sheet and any data and specifications presented on our website shall provide promotional and general information about the Engineering Plastic Products (the "Products") manufactured and offered by Mitsubishi Chemical Advanced Materials and shall serve as a preliminary guide. All data and descriptions relating to the Products are of an indicative nature only. Neither this data sheet nor any data and specifications presented on our website shall create or be implied to create any legal or contractual obligation.

Any illustration of the possible fields of application of the Products shall merely demonstrate the potential of these Products, but any such description does not constitute any kind of covenant whatsoever. Irrespective of any tests that Mitsubishi Chemical Advanced Materials may have carried out with respect to any Product, Mitsubishi Chemical Advanced Materials does not possess expertise in evaluating the suitability of its materials or Products for use in specific applications or products manufactured or offered by the customer respectively. The choice of the most suitable plastics material depends on available chemical resistance data and practical experience, but often preliminary testing of the finished plastics part under actual service conditions (right chemical, concentration, temperature and contact time, as well as other conditions) is required to assess its final suitability for the given application.

It thus remains the customer's sole responsibility to test and assess the suitability and compatibility of Mitsubishi Chemical Advanced Materials' Products for its intended applications, processes and uses, and to choose those Products which according to its assessment meet the requirements applicable to the specific use of the finished product. The customer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, or any consequence thereof, and shall verify its quality and other properties.

It thus remains the customer's sole responsibility to test and assess the suitability and compatibility of Mitsubishi Chemical Advanced Materials' Products for its intended applications, processes and uses, and to choose those Products which according to its assessment meet the requirements applicable to the specific use of the finished product. The customer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, or any consequence thereof, and shall verify its quality and other properties.

Mitsubishi Chemical Advanced Materials

////////////////////////////////////// **MCAM.COM** //

Tabla A-4: Datasheet alternativo de la poliamida Ertalon® 6 PLA.

>> POLYAMIDE [PA 6]

ERTALON® 6 PLA

PRODUCT DATA SHEET

Unmodified cast nylon 6 grade exhibiting characteristics which come very close to those of Ertalon 66 SA. It combines high strength, stiffness and hardness with good creep and wear resistance, heat aging properties and machinability.

Physical properties (indicative values ■)

PROPERTIES	Test methods	Units	VALUES
Colour	-	-	natural (ivory)/black
Density	ISO 1183-1	g/cm ³	1.15
Water absorption:			
- after 24/96 h immersion in water of 23 °C (1)	ISO 62	mg	44 / 83
	ISO 62	%	0.65 / 1.22
- at saturation in air of 23 °C / 50 % RH	-	%	2.2
- at saturation in water of 23 °C	-	%	6.5
Thermal Properties (2)			
Melting temperature (DSC, 10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	215
Glass transition temperature (DSC, 20 °C/min) - (3)	ISO 11357-1/-2	°C	-
Thermal conductivity at 23 °C	-	W/(K.m)	0.29
Coefficient of linear thermal expansion:			
- average value between 23 and 60 °C	-	m/(m.K)	80 x 10 ⁻⁶
- average value between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	90 x 10 ⁻⁶
Temperature of deflection under load:			
- method A: 1.8 MPa	+ ISO 75-1/-2	°C	80
Max. allowable service temperature in air:			
- for short periods (4)	-	°C	170
- continuously - for 5,000 / 20,000 h (5)	-	°C	105 / 90
Min. service temperature (6)	-	°C	-30
Flammability (7):			
- "Oxygen Index"	ISO 4589-1/-2	%	25
- according to UL 94 (3 / 6 mm thickness)	-	-	HB / HB
Mechanical Properties at 23 °C (8)			
Tension test (9):			
- tensile stress at yield / tensile stress at break (10)	+ ISO 527-1/-2	MPa	86 / -
	++ ISO 527-1/-2	MPa	55 / -
- tensile strength (10)	+ ISO 527-1/-2	MPa	88
- tensile strain at yield (10)	+ ISO 527-1/-2	%	5
- tensile strain at break (10)	+ ISO 527-1/-2	%	25
	++ ISO 527-1/-2	%	> 50
- tensile modulus of elasticity (11)	+ ISO 527-1/-2	MPa	3600
	++ ISO 527-1/-2	MPa	1750
Compression test (12):			
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (11)	+ ISO 604	MPa	34 / 64 / 93
Charpy impact strength - Unnotched (13)	+ ISO 179-1/1eU	kJ/m ²	no break
Charpy impact strength - Notched	+ ISO 179-1/1eA	kJ/m ²	3
Ball indentation hardness (14)	+ ISO 2039-1	N/mm ²	165
Rockwell hardness (14)	+ ISO 2039-2	-	M 88
Electrical Properties at 23 °C			
Electric strength (15)	+ IEC 60243-1	kV/mm	25
	++ IEC 60243-1	kV/mm	17
Volume resistivity	+ IEC 60093	Ohm.cm	> 10 ¹⁴
	++ IEC 60093	Ohm.cm	> 10 ¹²
Surface resistivity	+ IEC 60093	Ohm	> 10 ¹¹
	++ IEC 60093	Ohm	> 10 ¹²
Relative permittivity ϵ_r :- at 100 Hz	+ IEC 60250	-	3.6
	++ IEC 60250	-	6.6
- at 1 MHz	+ IEC 60250	-	3.2
	++ IEC 60250	-	3.7
Dielectric dissipation factor tan δ :- at 100 Hz	+ IEC 60250	-	0.012
	++ IEC 60250	-	0.14
- at 1 MHz	+ IEC 60250	-	0.016
	++ IEC 60250	-	0.05
Comparative tracking index (CTI)	+ IEC 60112	-	600
	++ IEC 60112	-	600

Note: 1 g/cm³ = 1,000 kg/m³; 1 MPa = 1 N/mm²; 1 kV/mm = 1 MV/m.**AVAILABILITY: see "Delivery Programme"**

Ertalon® is a registered trademark of the Quadrant Group.

This product data sheet and any data and specifications presented on our website shall provide promotional and general information about the Engineering Plastic Products (the "Products") manufactured and offered by Quadrant Engineering Plastic Products ("Quadrant") and shall serve as a preliminary guide. All data and descriptions relating to the Products are of an indicative nature only. Neither this data sheet nor any data and specifications presented on our website shall create or be implied to create any legal or contractual obligation. Any illustration of the possible fields of application of the Products shall merely demonstrate the potential of these Products, but any such description does not constitute any kind of covenant whatsoever. Irrespective of any tests that Quadrant may have carried out with respect to any Product, Quadrant does not possess expertise in evaluating the suitability of its materials or Products for use in specific applications or products manufactured or offered by the customer respectively. The choice of the most suitable plastics material depends on available chemical resistance data and practical experience, but often preliminary testing of the finished plastics part under actual service conditions (right chemical, concentration, temperature and contact time, as well as other conditions) is required to assess its final suitability for the given application.

It thus remains the customer's sole responsibility to test and assess the suitability and compatibility of Quadrant's Products for its intended applications, processes and uses, and to choose those Products which according to its assessment meet the requirements applicable to the specific use of the finished product. The customer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, or any consequence thereof, and shall verify its quality and other properties.

Quadrant Engineering Plastic Products**global leader in engineering plastics for machining**www.quadrantplastics.com**Legend:**

+ : values referring to dry material
++ : values referring to material in equilibrium with the standard atmosphere 23 °C / 50 % RH (mostly derived from literature)

- (1) According to method 1 of ISO 62 and done on discs $\varnothing$ 50 mm x 3 mm.
- (2) The figures given for these properties are for the most part derived from raw material supplier data and other publications.
- (3) Values for this property are only given here for amorphous materials and not for semi-crystalline ones.
- (4) Only for short time exposure (a few hours) in applications where no or only a very low load is applied to the material.
- (5) Temperature resistance over a period of 5,000/20,000 hours. After these periods of time, there is a decrease in tensile strength - measured at 23 °C - of about 50 % as compared with the original value. The temperature values given here are thus based on the thermal-oxidative degradation which takes place and causes a reduction in properties. Note, however, that the maximum allowable service temperature depends in many cases essentially on the duration and the magnitude of the mechanical stresses to which the material is subjected.
- (6) Impact strength decreasing with decreasing temperature, the minimum allowable service temperature is practically mainly determined by the extent to which the material is subjected to impact. The value given here is based on unfavourable impact conditions and may consequently not be considered as being the absolute practical limit.
- (7) These estimated ratings, derived from raw material supplier data and other publications, are not intended to reflect hazards presented by the material under actual fire conditions. There is no UL File Number available for Ertalon 6 PLA stock shapes.
- (8) The figures given for the properties of dry material (+) are for the most part average values of tests run on test specimens machined out of rods $\varnothing$ 50 mm. Except for the hardness tests, the test specimens were then taken from an area mid between centre and outside diameter, with their length in longitudinal direction of the rod.
- (9) Test specimens: Type 1 B
- (10) Test speed: 50 mm/min [chosen acc. to ISO 10350-1 as a function of the ductile behaviour of the material (tough or brittle)]
- (11) Test speed: 1 mm/min
- (12) Test specimens: cylinders $\varnothing$ 8 mm x 16 mm
- (13) Pendulum used: 4 J
- (14) Measured on 10 mm thick test specimens (discs), mid between centre and outside diameter.
- (15) Electrode configuration: $\varnothing$ 25 / $\varnothing$ 75 mm coaxial cylinders ; in transformer oil according to IEC 60296 ; 1 mm thick test specimens.

■ This table, mainly to be used for comparison purposes, is a valuable help in the choice of a material. The data listed here fall within the normal range of product properties. However, they are not guaranteed and they should not be used to establish material specification limits nor used alone as the basis of design.

Anexo B – Capítulo 3

B.1 Tabla de propiedades y puntos de fin de prueba recomendados para la obtención del TI.

Tabla B-1: Ejemplos de materiales aislantes con propiedades de prueba recomendados [10] (Table 1, pág. 17).

Insulating materials	Recommended properties	Recommended end points		IEC/ISO test method	ASTM test method
		Preferred	Alternate		
Rigid materials	Flexural strength	50%	25%, 75%	ISO 178	ASTM D790
	Loss of mass – molded, cast	3%	5%, 10%	IEC 60455-2	—
	Loss of mass – laminate, fiber	5%	3%, 10%		
	Tensile strength	50%	25%, 75%	ISO 527-2	ASTM D638
	Charpy impact strength – molded, cast	50%	25%, 75%	ISO 179-1	ASTM D6110
	Tensile impact strength – molded, cast	50%	25%, 75%	ISO 8256	ASTM D1822
Elastomers	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60243-1	ASTM D149
	Tensile Stress at 100% extension	50%	25%, 75%	ISO 37	—
	Elongation at break	50%	25%, 75%	ISO 37	—
Semi-rigid materials	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60243-1	ASTM D149
	Bursting strength	50%	25%, 75%	ISO 2759	—
Paper, paper based or woven materials	Tensile strength	50%	25%, 75%	ISO 1924	—
	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60394	ASTM D882
Pressure sensitive tapes	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60454-2	ASTM D1830
	Loss of mass	10%	5%, 20%	IEC 60454-2	—
Flexible film and film based materials	Tensile strength	30%	10%, 50%	IEC 60454-2	ASTM D149
	Elongation at break	50%	25%, 75%	ISO 527-3	—
	Dielectric breakdown voltage	2.5 kV	1 kV, 4 kV	ISO 527-3	ASTM D882
	Loss of mass	10%	5%, 10%	IEC 60454-2	ASTM D1830

Table continues

(continuación Tabla B-1)

Insulating materials	Recommended properties	Recommended end points		IEC/ISO test method	ASTM test method
		Preferred	Alternate		
Flexible insulating sleeveings	Elongation at break	50%	25%, 75%	IEC 60684-2	—
	Tensile stress at 100% extension	2 times initial	—	IEC 60684-2	—
	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60243-1	—
Flexible material combinations	Tensile strength	50%	25%, 75%	ISO 9124	ASTM D882
	Dielectric breakdown voltage	50%	25%, 75%	IEC 60243-1	ASTM D1830
Resin based reactive compounds	Flexural strength	50%	25%, 75%	ISO 178	ASTM D1932
	Loss of mass – unfilled	5%	3%, 10%	—	—
	Loss of mass - filled	3%	5%, 10%	—	—
Impregnating compounds and varnishes	Bond strength	22N	—	IEC 61033/B	ASTM D2519
	Dielectric breakdown voltage	3kV	—	IEC 60455-2	ASTM D3251
	Loss of mass	10%	—	IEC 60455-2	—
	Flexural strength	50%	25%, 75%	ISO 178	ASTM D1932
Coating compounds	Loss of mass	10%	5%, 10%	IEC 60455-2	—
	Dielectric breakdown voltage	3kV	—	IEC 60455-2	ASTM D3251
Insulation on conductors	Dielectric breakdown voltage	0.3–1.2 kV	—	IEC 60172	ASTM D1676

B.2 Tabla de valores normalizados de impulsos según IEC 60071-1: Insulation co-ordination .

Tabla B-2: Magnitud de impulsos normalizados según IEC 60071-1 [15].

4.7 Lista de tensiones soportadas a los impulsos normalizados							
Los valores de cresta siguientes, expresados en kV, están normalizados:							
20	40	60	75	95	125	145	170
250	325	450	550	650	750	850	950
1 050	1 175	1 300	1 425	1 550	1 675	1 800	1 950
2 100	2 250	2 400					

Anexo C – Capítulo 4

C.1 Ejemplo de registro histórico de la medición de la resistencia de aislamiento (R_a)

De [22] se ha extraído el siguiente ejemplo:

Compárense los dos trazos en la Figura C-1. El aparato A muestra una resistencia de aislamiento alta mientras que el aparato B muestra un valor bajo. Sin embargo, cuando se examina la tendencia, el aparato B muestra pocas causas por qué preocuparse; ha estado alrededor del mismo valor por varios años y muestra todos los prospectos de continuar en las mismas condiciones por muchos años por venir. Por el contrario, la curva del aparato A se está clavando dramáticamente y el aparato fallará, si no se hace nada para evitarlo, en los próximos años.

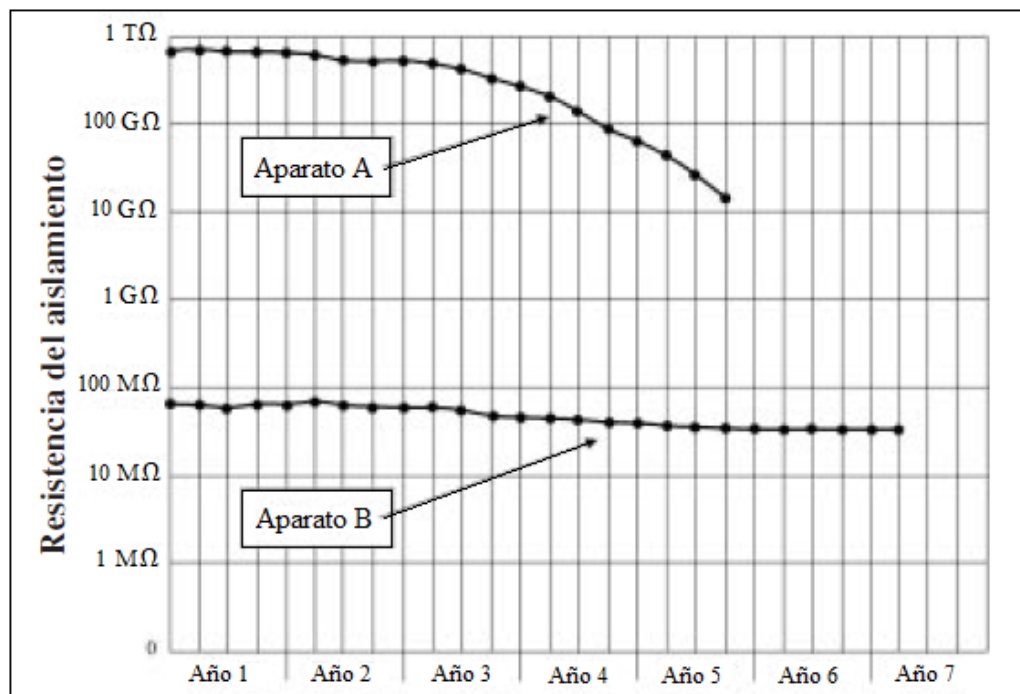


Figura C-1: Comparación de las tendencias del registro histórico de resistencias de aislación [22].

C.2 Corrección por temperatura de la lectura de resistencia de aislamiento (R_a)

La normativa IEEE 43 – 2013 recomienda realizar las mediciones de la resistencia de aislamiento en condiciones de temperatura similares que la lectura anterior, ya que, en este caso, no es necesario realizar correcciones por temperatura. En caso de no poder controlar la temperatura en la probeta al realizar la lectura de R_a , la normativa recomienda corregir la lectura a un valor estándar de R_a a 40 °C, como podría ser el caso de una máquina que ha sido recientemente detenida donde la temperatura de operación se encuentra entre 90 a 100 °C, dependiendo de las condiciones del entorno en que se encuentre la máquina y del tiempo que se disponga para realizar la medición, la temperatura podría disminuir significativamente durante una prueba de 10 minutos; afectando severamente el coeficiente $I.P.$

La corrección por temperatura puede hacerse usando la ecuación (0.1):

$$R_c = K_T \cdot R_T \quad (0.1)$$

R_c : resistencia de aislamiento corregida a 40 °C [$M\Omega$].

R_T : lectura de la resistencia de aislamiento a temperatura T °C [$M\Omega$].

K_T : coeficiente de corrección por temperatura de la resistencia de aislamiento a temperatura T °C.

La corrección del factor K_T está presente en dos diferentes tipos de familias de sistemas aislantes denominados “THERMOPLASTIC”, para sistemas asfálticos y otros sistemas aislantes utilizados antes de 1960, esta es la forma tradicional de corregir R_T . Y “THERMOSETTING” para nuevos sistemas aislantes que han aparecido a principios de la década 1960, esta forma de corrección se muestra por primera vez en la normativa IEEE 43 del año 2013, este último incluye sistemas aislantes basados en epoxi y poliéster. El factor K_T para ambas familias aislantes es presentado en la Figura C-2.

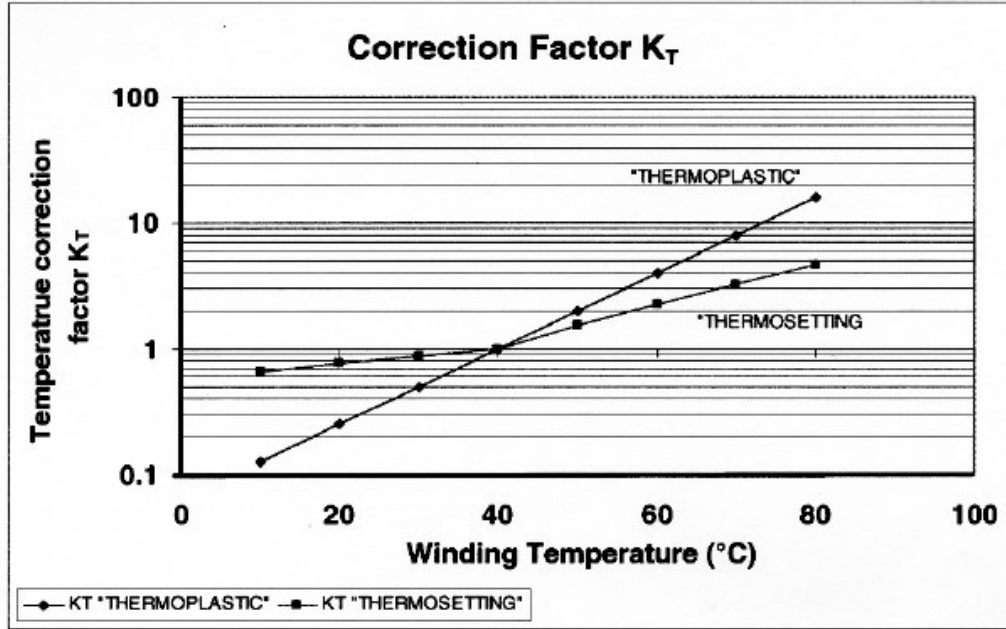


Figura C-2: Factor de corrección por temperatura (K_T) para sistemas aislantes "THERMOPLASTIC" (asfaltos) y "THERMOSETTING" (epoxy o poliéster) [24].

Para los aislantes THERMOPLASTICS, K_T puede ser aproximado usando la ecuación (0.2):

$$K_T(T) = (0.5)^{\frac{40-T}{10}}, \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (0.2)$$

Por ejemplo, si la temperatura en un devanado al momento de realizar la lectura de R_a es de 35 °C, entonces el factor de corrección K_T corresponde a:

$$K_T = (0.5)^{\frac{40-35}{10}} = (0.5)^{0.5} = 0.707$$

Para los aislantes THERMOSETTINGS, K_T puede ser aproximado usando las ecuaciones (0.3) y (0.4):

$$K_T(T) = e^{-4230 \cdot \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{313} \right)}, \quad \text{con } 40^\circ\text{C} < T < 85^\circ\text{C} \quad (0.3)$$

$$K_T(T) = e^{-1215 \cdot \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{313} \right)}, \quad \text{con } 10^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C} \quad (0.4)$$

con T en °C

C.3 Clasificación térmica de un sistema de aislamiento eléctrico según IEEE Std 1 – 2000

Tabla C-1: Clasificación térmica de un sistema de aislamiento eléctrico [3].

Thermal classification	Class temperature, °C
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
S	250
C	>250

C.4 Pruebas y requisitos para conectores separables según las normativas IEEE e IEC.

Tabla C-2: Pruebas de diseño de los conectores separables según norma IEEE 386 [33] (pág. 50, Table 8).

Design tests

Design test		Test sequence ^a			Individual tests	
		A	B	C		
	No. samples	10	4	30 ^b	4 each ^c	12 each
	Reference					
Thermal cycle withstand	7.20	X ^d		–	–	–
Partial discharge test	7.4	X	X	–	–	–
AC withstand voltage	7.5.1	X	X ^e	–	–	–
Operating interface ac withstand	7.5.2	–	–	–	–	X
Impulse withstand voltage	7.5.3	X	X ^e	–	–	–
Short-time current	7.6	–	–	–	X	–
Switching	7.7	–	–	X	–	–
Fault-closure	7.8	–	–	X	–	–
Current cycling	7.9–7.11	–	–	–	X	–
Accelerated sealing life test	7.12	–	X	–	–	–
Cable pull-out (tensile strength)	7.13	–	–	–	X	–
Operating force	7.14	–	–	–	X	–
Operating eye	7.15	–	–	–	X	–
Test point cap	7.16	–	–	–	X	–
Test point	7.17	X ^e	X ^e	–	–	–
Shielding	7.18	–	–	–	X	–
Bushing well stud torque	7.19	–	–	–	X	–
Impulse withstand voltage	7.5.3	–	X	–	–	–

^aSequence A = dielectric tests sequence.

Sequence B = accelerated life tests sequence.

Sequence C = switching tests sequence.

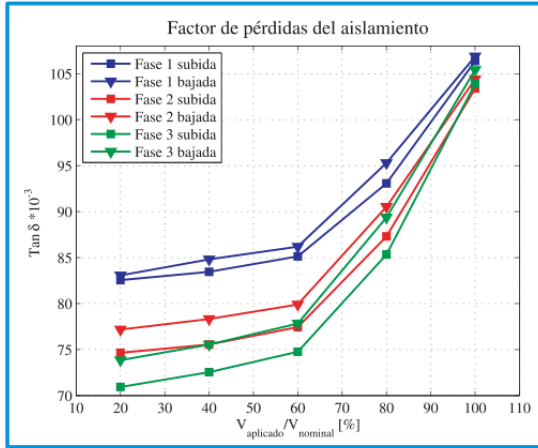
^bNo failures are permitted except for switching and fault-closure tests in which none are permitted in 10 consecutive samples of a maximum lot size of 30.

^cWhere applicable.

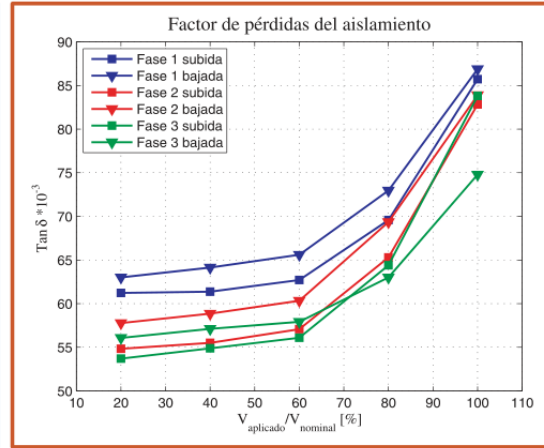
^dApplicable to non-elastomeric components.

^eMay substitute impulse withstand voltage (7.5.3) for ac withstand voltage (7.5.1).

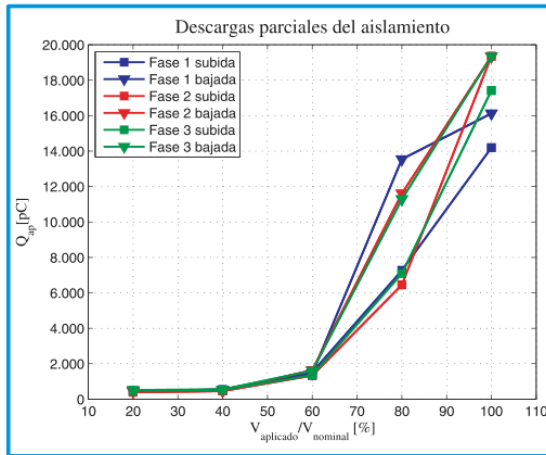
C.5 Ejemplo de registro simultáneo de tangente delta y descargas parciales



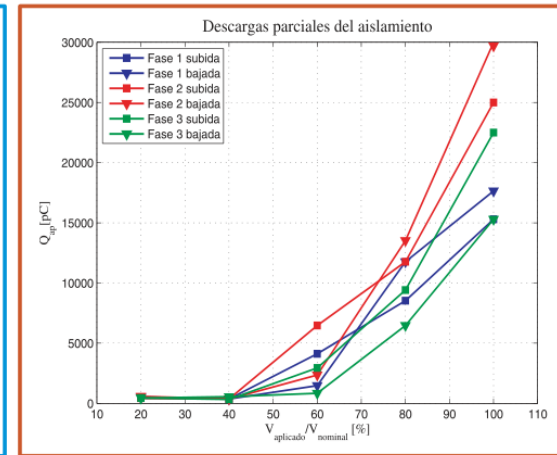
(a) $\tan \delta$ año 2011



(b) $\tan \delta$ año 2010



(c) DP año 2011



(d) DP año 2010

Figura C-3: Comportamiento de parámetros de un generador chileno (caso real) en los años 2010-2011 [34].

Anexo D – Metodología de las pruebas de envejecimiento acelerado y medición de los parámetros de diagnóstico

D.1 Sistema de envejecimiento acelerado

La prueba de envejecimiento acelerado consiste en someter al aislamiento eléctrico de los enchufes hembra de 3M clase 25kV y 500A (la probeta) ante el esfuerzo térmico mediante un horno y ante el esfuerzo eléctrico mediante un generador de impulsos de alta tensión.

El horno utilizado se muestra en la Figura D-1, este se encuentra en el laboratorio de alta tensión, es marca JSR modelo JSVO-60T, cuenta con un rango de temperaturas entre 10 y 250 grados Celsius y puede operar ciclos de hasta 99hrs y 59min continuos.



Figura D-1: Horno utilizado para los ciclos de temperatura de la prueba de envejecimiento acelerado de la probeta.

Los impulsos tipo maniobra son aplicados directamente en los puntos vivos del enchufe minero (en los pines hembra) y la tierra es mediante la masa del enchufe (la carcasa). El esquema que muestra la manera en cómo se aplica el impulso a la probeta se muestra en la Figura D-2.

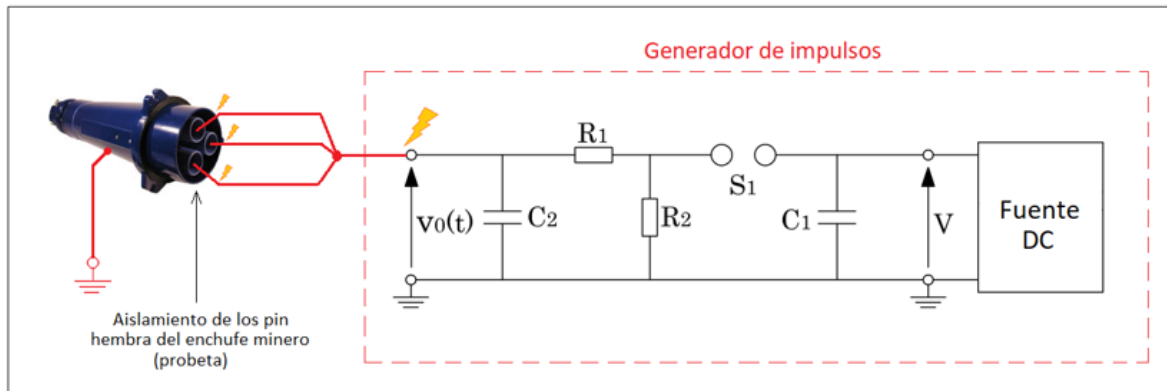


Figura D-2: Esquema básico de un generador de impulsos [16].

Los impulsos de tensión aplicados a la probeta son generados mediante el generador de impulsos HAEFELY ubicado en el laboratorio, en la Figura D-3 se muestra la configuración adoptada en el LAT. El equipo cuenta con resistencias y capacitancias predeterminadas para aplicar impulsos normalizados tipo maniobra y rayo.

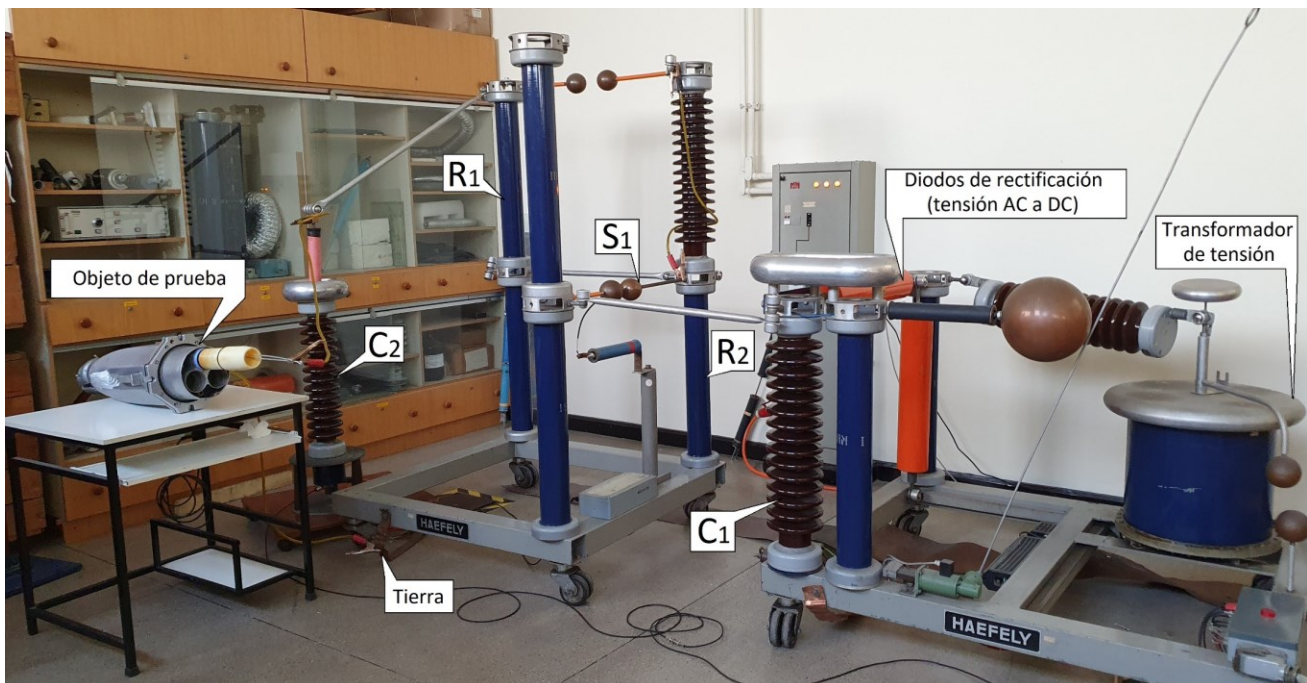


Figura D-3: Fotografía del generador de impulsos de alta tensión del LAT.

En la Figura D-4, se muestra una vista frontal de las probetas A2 y B2 que se encuentran dentro del enchufe minero y listas para ser sometidas a la prueba de impulso. Sin embargo, dada la corta distancia entre el punto vivo y la tierra (2.3 cm), se genera un arco eléctrico al aplicar el impulso maniobra de 75kV por lo que se ha insertado un juego extra de aislación macho/hembra con tal de aumentar la distancia entre fase y tierra. La configuración final del ensayo impulso se muestra en la Figura D-5.

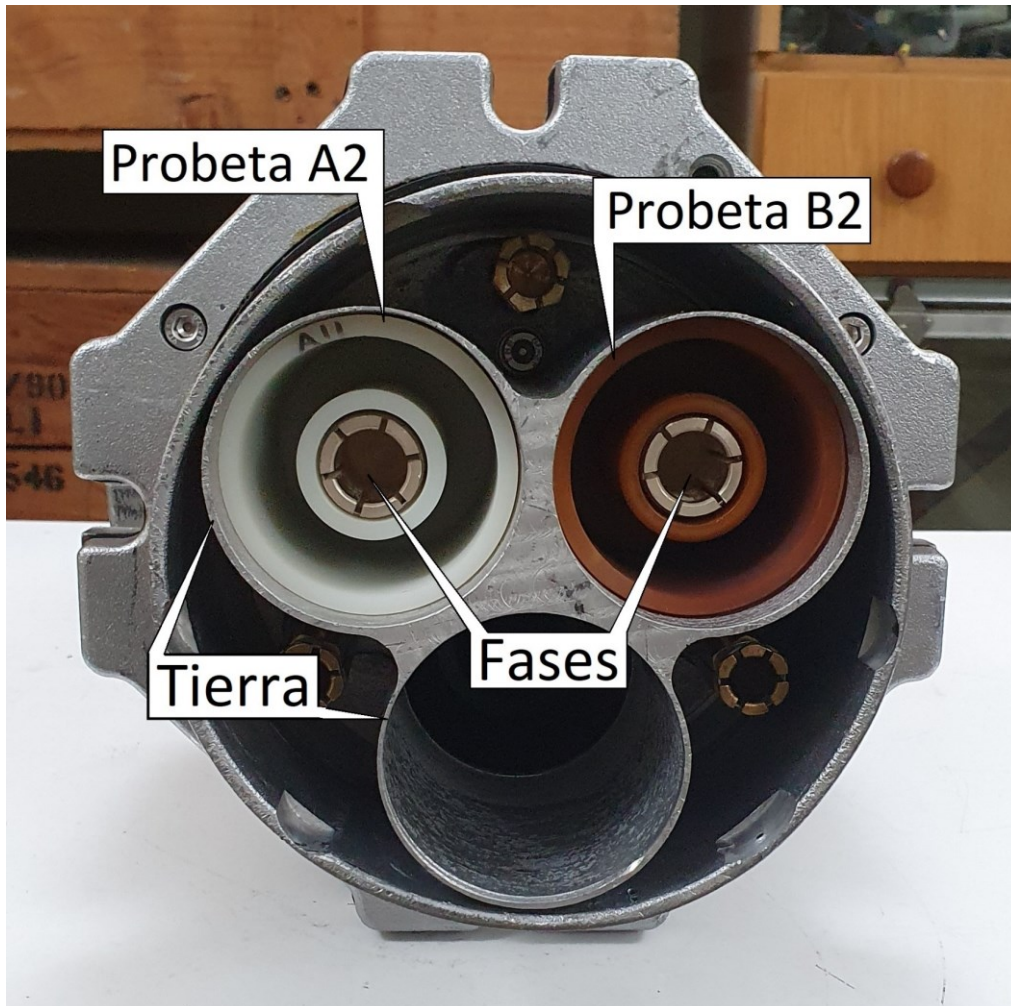


Figura D-4: Vista frontal del enchufe minero con las probetas A2 y B2 insertadas.

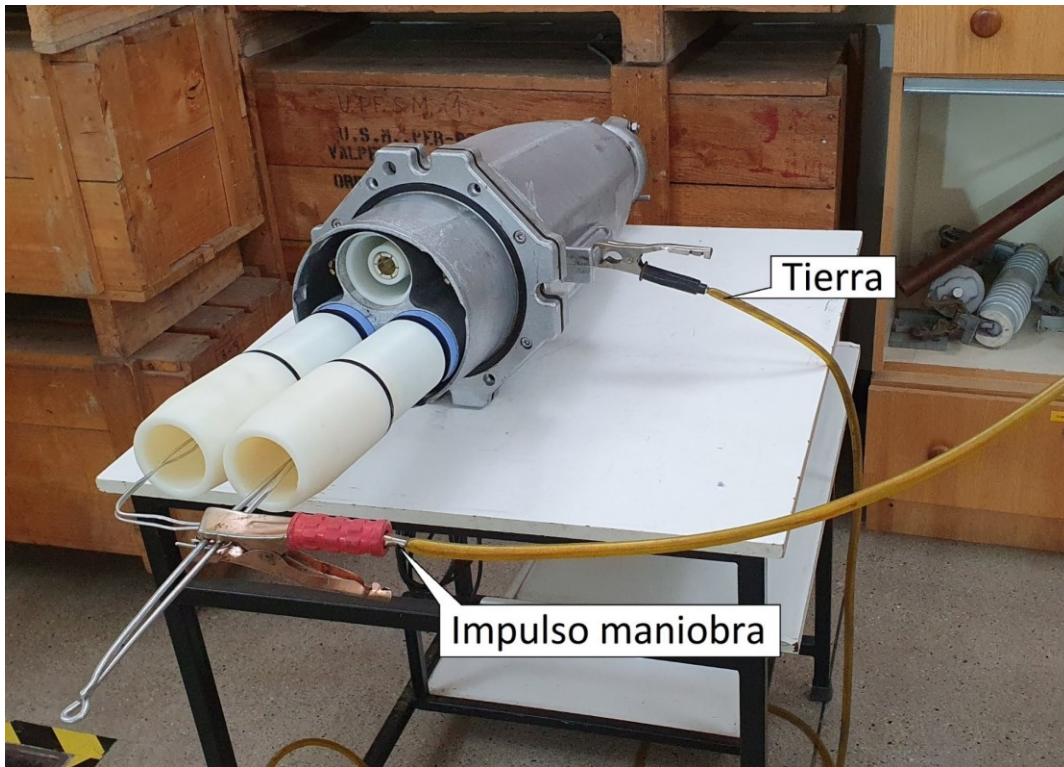
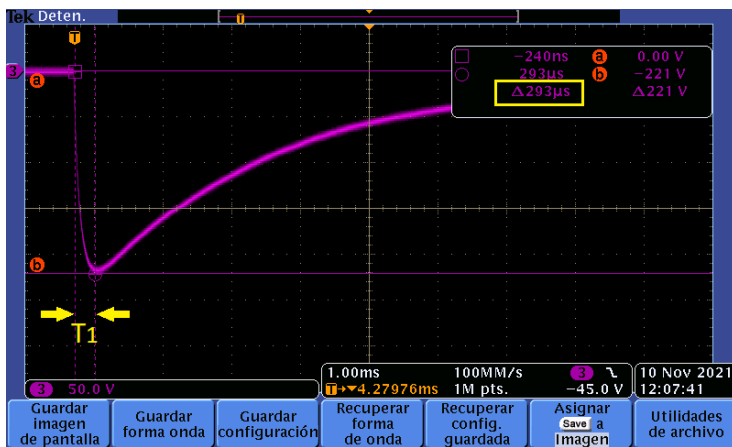
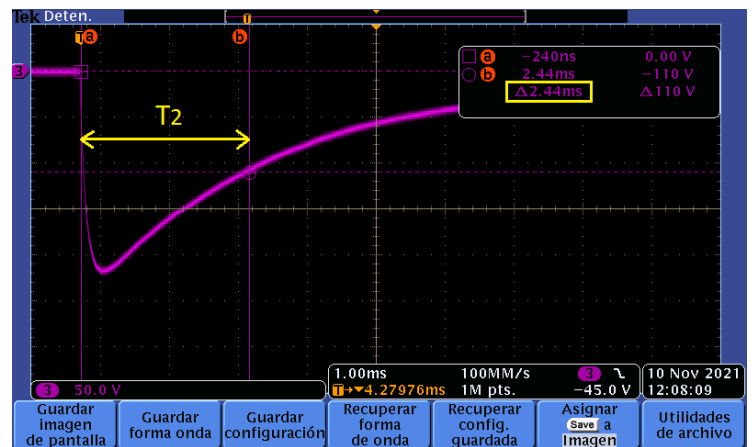


Figura D-5: Configuración de las probetas A2 y B2 para ser sometidas a impulso de tensión tipo maniobra.

La forma de onda de los impulsos maniobra que se aplican a las probetas se muestra en la Figura D-6, de esta imagen es posible observar un tiempo de subida $T_1 = 293 \mu s$ y bajada $T_2 = 2440 \mu s$, impulso válido según la norma IEC 60060-1 [42]. Para obtener el valor de tensión peak aplicado, se debe mutiplicar al valor peak de 221 [V] por la razón del divisor de tensión, lo que resulta en $221[V] \cdot 339,4 = 75007,4[V] \approx 75[kV]$.



(a)

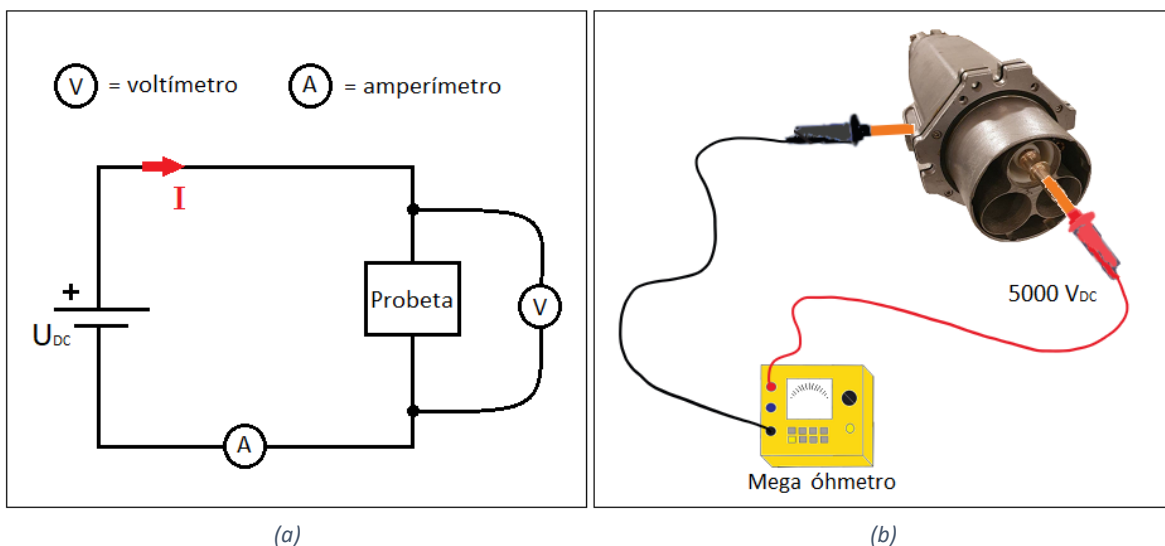


(b)

Figura D-6: Impulso tipo maniobra normalizado visto en un osciloscopio.

D.2 Sistema de medición de los parámetros DC

La medición de la resistencia de aislamiento es uno de los parámetros más clásicos para el diagnóstico de un aislante sólido y muy sencillo de realizar. Basta con aplicar un nivel de tensión continuo y registrar el nivel de corriente que fluye a través del objeto ensayado, luego por ley de ohm ($V = R \cdot I$) es posible obtener la resistencia de aislamiento R_a . Una ilustración teórica de la medición de R_a se muestra en la Figura D-7(a), mientras que la medición adoptada en laboratorio de muestra en la Figura D-7(b). Se ha utilizado un mega óhmetro para realizar el ensayo y se han aplicado 5000 V.



(a) (b)
Figura D-7: Esquema de medición de la Resistencia de Aislamiento.

Cabe recordar que los puntos de interés son la lectura de la resistencia de aislamiento al minuto uno (1') y diez (10'). La *resistencia de aislamiento* (R_a) es directamente la lectura tomada al minuto uno mientras que el *índice de polarización* (IP) es la razón entre la resistencia registrada al minuto diez sobre el minuto uno (ver ecuación (4.5)).

Como información adicional, dado el difícil acceso al pin hembra del enchufe (pin de interés para realizar la medición de R_a), se ha insertado el pin macho con la finalidad de tener un punto donde conectar la tenaza del equipo de medida, esto se muestra en la Figura D-8(a) y (b), en la Figura D-8(c) se muestra cómo se han realizado las mediciones en laboratorio.

Se ha adoptado la configuración mostrada en la Figura D-8(c) dado que se mide directamente la resistencia de aislamiento de la probeta, es decir, la resistencia desde el pin hembra a tierra (la carcasa). Antes de cada medición, ya sea en parámetros DC o AC, se ha limpiado la probeta y la carcasa metálica del enchufe con alcohol isopropílico para eliminar cualquier tipo de contaminación en la superficie.

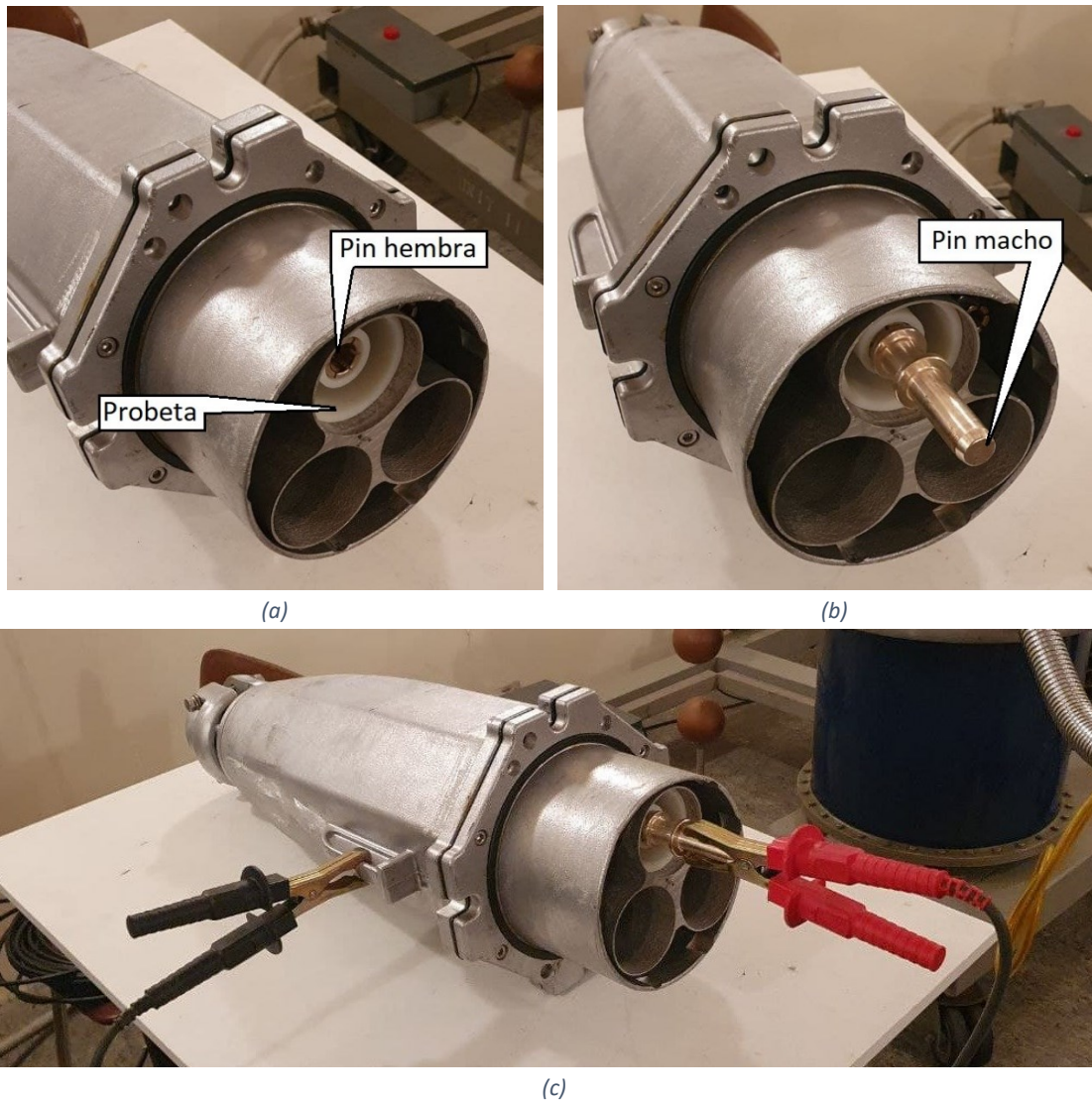


Figura D-8: Pin de acceso para la medición de resistencia de aislamiento en la probeta.

En la Figura D-9 se muestra el equipo utilizado para la medición de la Resistencia de Aislamiento (R_a) junto a la información técnica del equipo.



Figura D-9: Megaóhmetro AEMC® Model 5060, instrumento para la medida de R_a e IP.

D.3 Sistema de medición de los parámetros AC

Para la medición de los parámetros de diagnóstico ante sollicitación de tensión alterna, esto es: descargas parciales (DP), factor de disipación ($\tan \delta$) y capacitancia (C), se utiliza el procedimiento que regularmente se utiliza para la medición de estos parámetros en el laboratorio de alta tensión de la universidad.

La medición se realiza de manera simultánea, es decir, para el mismo instante de tiempo se obtienen todas las lecturas de los tres parámetros en AC. Las lecturas se realizan bajo el perfil de tensión que se muestra en la Figura D-10.

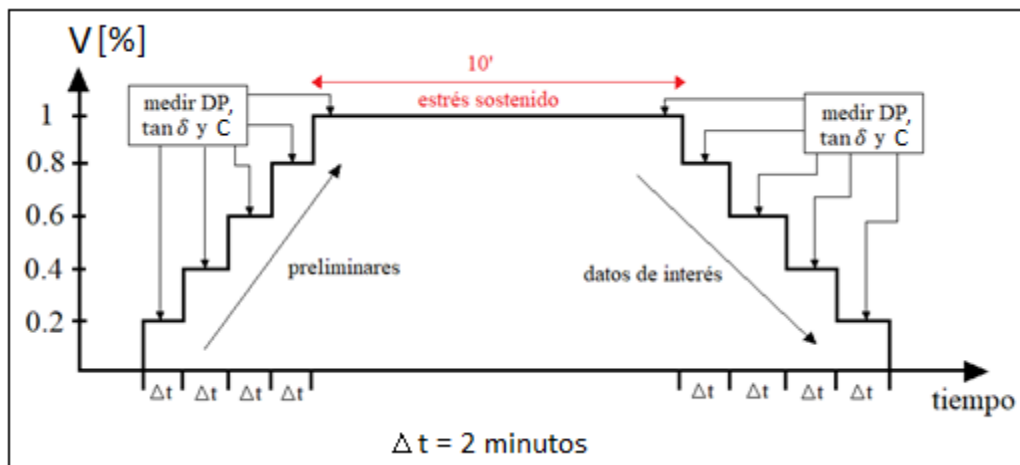


Figura D-10: Perfil de tensión para la medición de parámetros en AC a 50 Hz.

El circuito de medición utilizado, visto con parámetros RLC, se muestra en la Figura D-11, de esta figura es posible observar tres sistemas, donde cada uno tiene la siguiente función:

- ❖ Sistema 1: configuración para la lectura de las descargas parciales.
- ❖ Sistema 2: configuración para registrar el nivel de tensión que se aplica en la probeta.
- ❖ Sistema 3: configuración para la lectura del factor de disipación y capacitancia.

Los sistemas son independientes entre sí, si se desea medir solamente las descargas parciales y no el factor de disipación, es posible retirar sin problema el Sistema 3 y viceversa.

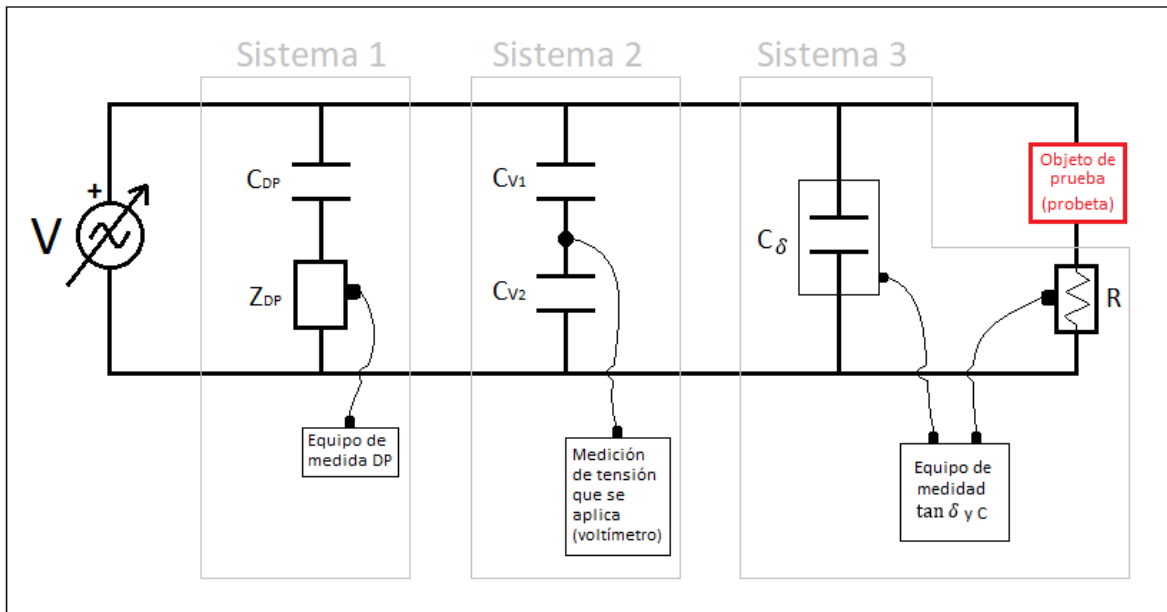


Figura D-11: Circuito de medición de parámetros en AC.

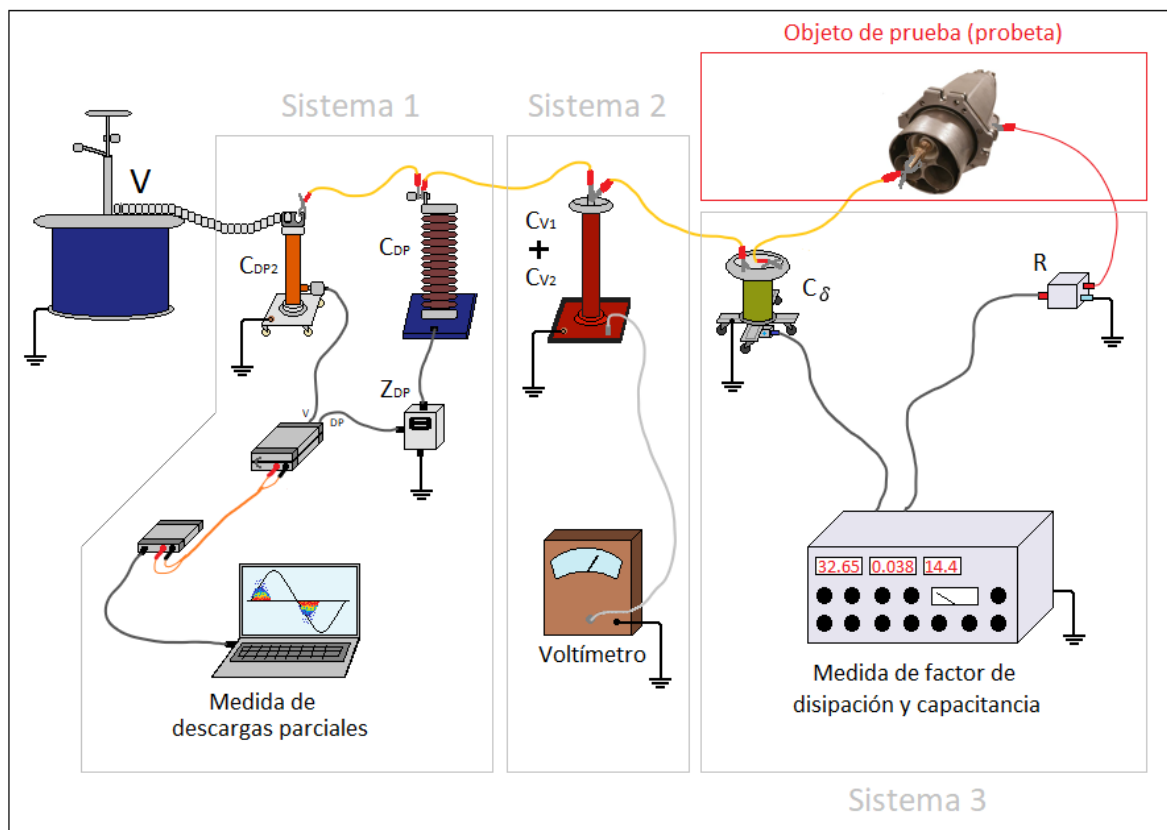


Figura D-12: Esquema ilustrativo del circuito de medición de los parámetros en AC utilizado en laboratorio.

En la práctica, el circuito de medición utilizado es el que se muestra en la Figura D-12, de esta figura se muestra un esquema ilustrado con las conexiones y objetos reales que se emplearon en el laboratorio, la intención de esta figura es asimilar el circuito de medición teórico de la Figura D-11 versus como realmente se observa la conexión en terreno. En la Figura D-13 se tiene una foto del sistema de medida en laboratorio.



Figura D-13: Circuito de medida en laboratorio de los parámetros de diagnóstico en AC a frecuencia industrial.

Para la medición de las descargas parciales es normal utilizar solo un condensador de acoplamiento (C_{DP}), sin embargo, nótese que en la Figura D-12 aparece un condensador adicional (C_{DP2}) respecto al circuito teórico de la Figura D-11. El condensador C_{DP2} se ha utilizado para obtener visualmente la tensión sinusoidal en el computador, ya que empleando únicamente C_{DP} la señal de tensión se mostraba distorsionada y con desfase. Es importante contar con una señal de tensión limpia y en fase con los pulsos de descargas parciales ya que esta información es indispensable para el diagnóstico del objeto ensayado.

Cabe mencionar que siempre antes de realizar la prueba de medición de descargas parciales, es importante realizar la calibración del sistema de medición DP, esto se realiza con un aparato externo que inyecta un tren de pulsos de carga conocida (por ejemplo de 10, 100, 1000 o 10000 pC) y ajustando el factor de escala en el software. De no realizar la calibración previa a la prueba, se tiene una lectura errónea garantizada. Como información adicional, el punto donde se inyectan los pulsos no debe estar aterrizado ya que los pulsos se irán a tierra y el equipo no los detectará, un error común es mantener el circuito aterrizado con una pértiga por motivos de seguridad.

A continuación, en la Figura D-14, se muestran los equipos de medida parámetros AC: Descargas parciales (**DP**), Factor de disipación (**$\tan \delta$**) y capacitancia (**C**).

Figura D-14: Instrumentos utilizados para la medición de los parámetros de diagnóstico en AC (DP – $\tan \delta$ y C).

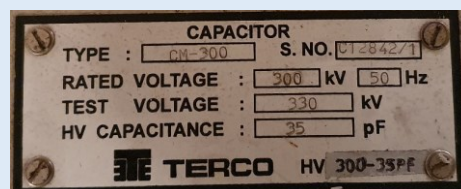
Control de tensión MULTI
TEST SET CONTROL
MODULE TYPE 273
HAEFELY



Transformador de
tensión monofásico
AMERICAN



Condensador C_{DP2} y
Condensador divisor de
tensión TERCO



Condensador C_{DP} HAEFELY



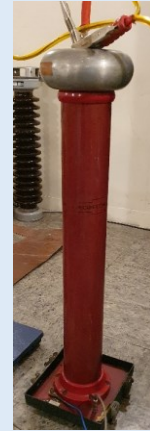
Cuadripolo Z_{DP}
Messwandler-Bau



Equipo de medida de
Descargas Parciales (DP)
OMICRON MCU 502 y
calibrador de DP Presco
AG



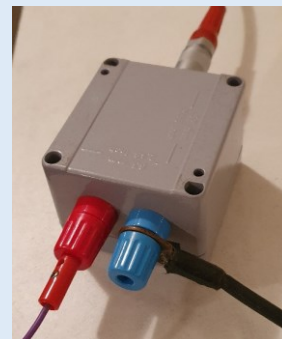
Voltímetro y Divisor de
tensión capacitivo Cv1 y
Cv2 HIPOTRONICS



Equipo de medida del
Factor de Pérdidas ($\tan \delta$)
Presco AG TG-1-07



Condensador Cδ y
resistencia R Presco AG



D.4 Sistema de medición de la prueba FRA

Para realizar la prueba FRA se utiliza el equipo FRAX que se encuentra disponible en el laboratorio, el equipo inyecta una señal de 10V sinusoidal de frecuencia variable desde 20 hasta $2 \cdot 10^7$ Hz. Solamente es necesario configurar el rango de frecuencia del ensayo y la frecuencia de muestreo, luego el equipo realiza la prueba de manera automática. El conexionado adoptado se muestra en la Figura D-15, de la figura es posible observar que se inyecta la señal de entrada en el pin hembra del enchufe y se registra la señal de salida percibida en la carcasa. La prueba tiene una configuración similar a la realizada para medir la resistencia de aislamiento R_a .

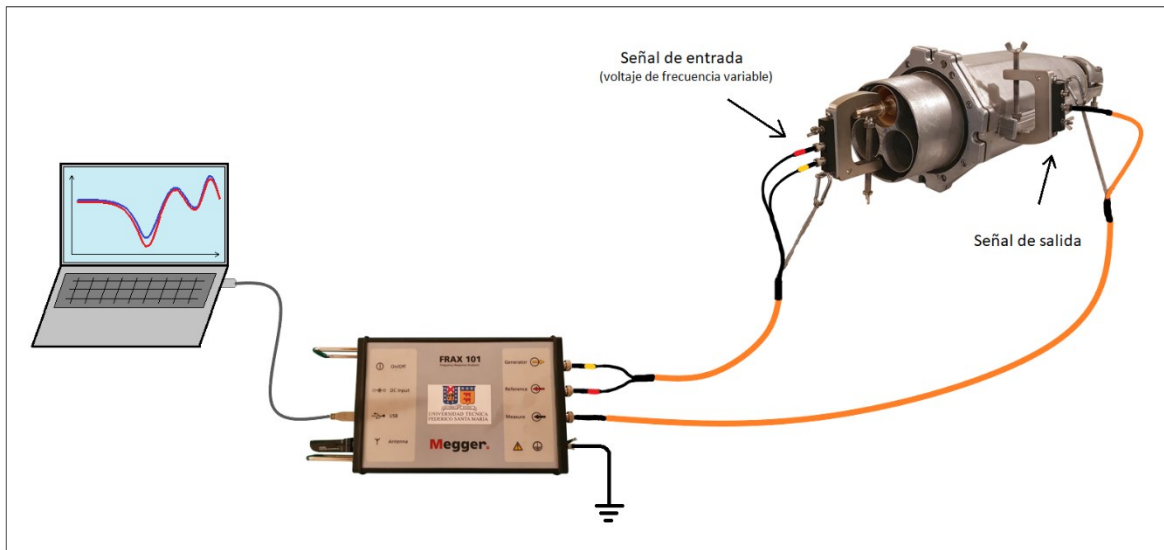


Figura D-15: Sistema de medición de la prueba FRA.

La prueba FRA es un ensayo bastante sencillo y requiere no más de 1 minuto para la confección del gráfico por parte del equipo. El ensayo en transformadores de potencia sigue el mismo procedimiento, pero requiere más tiempo ya que hay que ejecutar la misma prueba para distintas conexiones de sus terminales. Por último, se recomienda realizar esta prueba en similares condiciones que las lecturas anteriores, esto incluye considerar la temperatura del objeto a ensayar, ya que la resistencia eléctrica varía en función de la temperatura.

En la Figura D-16 se muestra una imagen ampliada del equipo FRAX.



Figura D-16: Analizador de respuesta en frecuencia FRAX Model 101, instrumento de medida para la prueba FRA.

Anexo E – Capítulo 5

E.1 Interfaz del software OMICRON, equipo para medir descargas parciales.

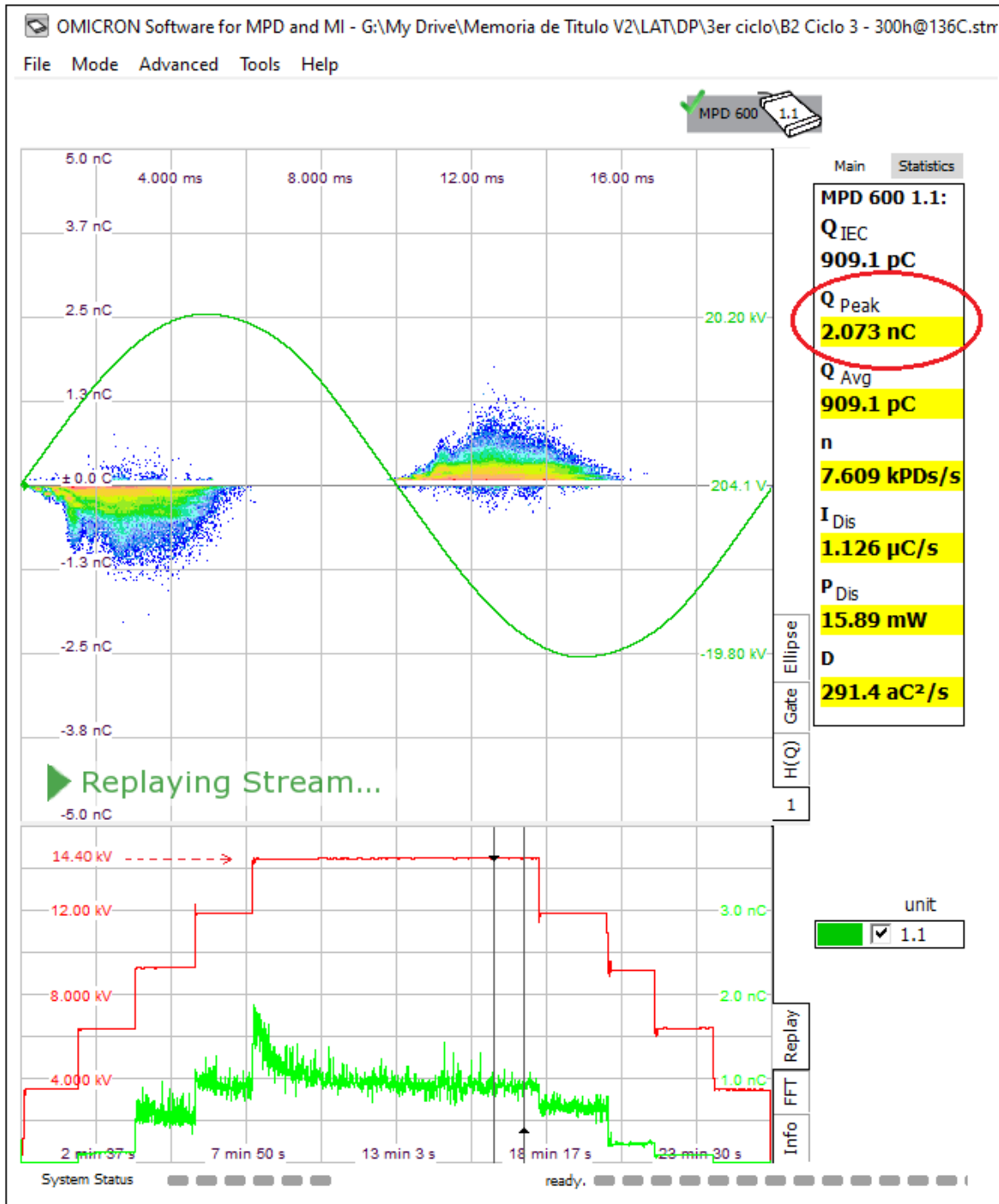


Figura E-1: Screenshot de la interfaz de medición de DP.

E.2 Tablas con los parámetros DC medidos en el laboratorio

Probeta	Horas acumuladas	Fecha	Inicio	Fin	Temp. ambiente [°C]	Humedad relativa [%]	Presión [hPa]	Presión [mm]	Tensión [V]	Ra (1') [GΩ]	Ra (10') [GΩ]	IP
A1	0	10-Sep-21	10:00	10:10	17	64	1012	759	5096	503	608	1.209
	100	20-Sep-21	15:40	15:50	18	62	1012	759	5096	645	720	1.116
	200	26-Oct-21	13:10	13:20	19	62	1015	761	2550	623	689	1.106
	300	09-Nov-21	14:10	14:20	19	63.5	1014	760.5	2550	552	599	1.085
	400	24-Nov-21	11:55	12:05	19	67	1013	760	2550	528	571	1.081
A2	0	10-Sep-21	10:23	10:33	17	64	1012	759	5096	561	663	1.182
	100	22-Sep-21	9:55	10:05	17	65	1012	759	5096	479	557	1.163
	100 + impulsos	08-Oct-21	13:40	13:50	18	61.5	1015	761	5096	611	692	1.133
	200	25-Oct-21	14:25	14:35	19.5	62	1015	761	5096	594	636	1.071
	200 + impulsos	29-Oct-21	13:50	14:00	20	62	1013	760	2550	421	452	1.074
	300	09-Nov-21	14:30	14:40	19	63.5	1014	760.5	2550	542	607	1.120
	300 + impulsos	10-Nov-21	15:10	15:20	19	63	1014	760.5	2550	426	472	1.108
	400	25-Nov-21	13:40	13:50	19.5	65	1013	760	2550	525	570	1.086
	400 + impulsos	26-Nov-21	15:15	15:25	19	67	760	1013	2550	489	517	1.057
B1	0	20-Sep-21	13:55	14:05	18	63	1012	759	5096	532	617	1.160
	100	01-Oct-21	15:40	15:50	19	60	1015	761	5096	645	713	1.105
	200	26-Oct-21	17:00	17:10	20	61	1015	761	2550	538	589	1.095
	300	08-Nov-21	12:05	12:15	18	62	1014	760.5	2550	527	581	1.103
	400	23-Nov-21	14:00	14:10	19	67	1013	760	2550	449	480	1.068
B2	0	20-Sep-21	12:45	12:55	17	64	1012	759	5096	499	592	1.186
	100	01-Oct-21	13:40	13:50	19	60	1015	761	5096	521	606	1.163
	100 + impulsos	08-Oct-21	14:35	14:45	19	61	1015	761	5096	615	670	1.089
	200	26-Oct-21	16:00	16:10	20	62	1015	761	2550	514	576	1.121
	200 + impulsos	29-Oct-21	12:45	12:55	19.5	62	1013	760	2550	447	470	1.051
	300	08-Nov-21	13:30	13:40	19	62	1014	760.5	2550	548	588	1.073
	300 + impulsos	10-Nov-21	14:00	14:10	19	63	1014	760.5	2550	484	541	1.118
	400	23-Nov-21	12:45	12:55	19	67	1013	760	2550	493	523	1.061
	400 + impulsos	26-Nov-21	14:25	14:35	19	67	1013	760	2550	467	502	1.075

Tabla E-1: Registro de la resistencia de aislamiento en función de la prueba de envejecimiento de las probetas A1, A2, B1 y B2.

E.3 Tablas con los parámetros AC medidos en el laboratorio

Probeta A1												
Fecha medición	Tensión RMS [kV fase-neutro]		2.88	5.76	8.64	11.52	14.4	14.4	11.52	8.64	5.76	2.88
	Tensión [%]		20	40	60	80	100	100	80	60	40	20
10-Sep-21	0 horas a 90°C	C [pF]	31.38	31.37	31.43	31.49	31.65	31.65	31.52	31.46	31.42	31.4
		tan d [-]	0.022	0.023	0.025	0.029	0.034	0.033	0.028	0.025	0.023	0.022
		DP [pC]	-	195	537	1088	2165	1837	493	307	137	-
20-Sep-21	100 horas a 90°C	C [pF]	31.43	31.4	31.45	31.58	31.76	31.76	31.56	31.47	31.44	31.45
		tan d [-]	0.025	0.027	0.028	0.032	0.036	0.036	0.031	0.028	0.027	0.025
		DP [pC]	-	144	582	1183	2362	2095	704	420	115	-
26-Oct-21	200 horas a 90°C	C [pF]	31.38	31.38	31.42	31.55	31.72	31.69	31.51	31.43	31.4	31.4
		tan d [-]	0.024	0.026	0.028	0.032	0.036	0.036	0.031	0.028	0.026	0.024
		DP [pC]	22	168	467	1713	3224	2157	1193	244	109	26
19-Nov-21	300 horas a 90°C	C [pF]	31.18	31.17	31.25	31.4	31.6	31.55	31.36	31.257	31.18	31.2
		tan d [-]	0.0216	0.0235	0.0275	0.0315	0.037	0.036	0.031	0.028	0.024	0.022
		DP [pC]	-	137	951	1655	2423	1991	762	540	100	-
26-Nov-21	400 horas a 90°C	C [pF]	31.5	31.5	31.55	31.69	31.86	31.81	31.65	31.56	31.52	31.52
		tan d [-]	0.023	0.026	0.028	0.032	0.036	0.036	0.031	0.0278	0.026	0.023
		DP [pC]	-	151	744	2374	2788	1934	1051	134	110	-

Tabla E-2: Registro de los parámetros en AC en función de la prueba de envejecimiento para la probeta A1.

Probeta A1							
Fecha medición	Inicio	Fin	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Presión [hPa]	Presión [mm]	Ciclo
10-09-21	16:00	16:30	19	64	1012	759	0 horas
20-09-21	16:15	16:45	18.5	62	1012	759	100 horas
26-10-21	13:30	14:00	19	62	1015	761	200 horas
09-11-21	14:10	15:00	19	63.5	1014	760.5	300 horas
26-11-21	11:15	12:25	19	67	1013	760	400 horas

Tabla E-3: Registro de parámetros ambientales durante la lectura de los parámetros en AC de la probeta A1.

Probeta B1												
Fecha medición	Tensión RMS [kV fase-neutro]		2.88	5.76	8.64	11.52	14.4	14.4	11.52	8.64	5.76	2.88
	Tensión [%]		20	40	60	80	100	100	80	60	40	20
20-Sep-21	0 horas a 90°C	C [pF]	31.5	31.48	31.52	31.6	31.77	31.76	31.6	31.53	31.5	31.51
		tan d [-]	0.017	0.018	0.022	0.028	0.032	0.031	0.026	0.022	0.018	0.017
		DP [pC]	-	346	543	1239	2276	2004	910	327	166	-
01-Oct-21	100 horas a 90°C	C [pF]	31.09	31.08	31.15	31.31	31.57	31.5	31.27	31.16	31.09	31.11
		tan d [-]	0.018	0.019	0.022	0.028	0.034	0.032	0.027	0.022	0.019	0.018
		DP [pC]	-	234	466	1895	2797	2262	781	295	126	-
15-Oct-21	200 horas a 90°C	C [pF]	31.24	31.25	31.32	31.45	31.67	31.61	31.45	31.36	31.29	31.28
		tan d [-]	0.018	0.019	0.023	0.029	0.035	0.033	0.028	0.023	0.019	0.018
		DP [pC]	-	175	445	1104	2516	1794	470	273	169	-
08-Nov-21	300 horas a 90°C	C [pF]	31.33	31.31	31.37	31.54	31.75	31.7	31.5	31.37	31.33	31.35
		tan d [-]	0.0195	0.021	0.0255	0.031	0.036	0.036	0.03	0.025	0.022	0.02
		DP [pC]	-	109	756	1191	2315	2129	624	690	91	-
24-Nov-21	400 horas a 90°C	C [pF]	31.16	31.17	31.24	31.38	31.55	31.5	31.36	31.28	31.2	31.19
		tan d [-]	0.024	0.027	0.0295	0.0335	0.039	0.038	0.033	0.0307	0.028	0.024
		DP [pC]	-	114	983	1208	2950	2002	338	296	99	-

Tabla E-4: Registro de los parámetros en AC en función de la prueba de envejecimiento para la probeta B1.

Probeta B1							
Fecha medición	Inicio	Fin	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Presión [hPa]	Presión [mm]	Ciclo
20-09-21	15:05	15:30	18	62	1012	759	0 horas
01-10-21	16:00	16:30	19	60	1015	761	100 horas
15-10-21	16:30	17:00	20	61	1015	761	200 horas
08-11-21	13:00	13:40	19	62	1014	760.5	300 horas
24-11-21	13:55	14:30	19.5	67	1013	760	400 horas

Tabla E-5: Registro de parámetros ambientales durante la lectura de los parámetros en AC de la probeta B1.

Probeta A2												
fecha medición	Tensión RMS [kV fase-neutro]		2.88	5.76	8.64	11.52	14.4	14.4	11.52	8.64	5.76	2.88
	Tensión [%]		20	40	60	80	100	100	80	60	40	20
10-09-21	0	C [pF]	31.32	31.3	31.32	31.39	31.55	31.54	31.42	31.35	31.33	31.35
		tan d [-]	0.023	0.025	0.027	0.03	0.034	0.034	0.03	0.028	0.026	0.023
		DP [pC]	-	109	275	1422	1918	1789	1022	255	97	-
22-09-21	100 horas	C [pF]	31.45	31.43	31.46	31.54	31.72	31.68	31.54	31.49	31.46	31.48
		tan d [-]	0.022	0.024	0.025	0.029	0.035	0.035	0.029	0.026	0.024	0.022
		DP [pC]	-	126	225	1547	2650	1960	702	224	113	-
08-10-21	100 horas + impulsos	C [pF]	31.36	31.36	31.4	31.51	31.65	31.63	31.48	31.42	31.37	31.39
		tan d [-]	0.022	0.023	0.026	0.029	0.035	0.035	0.028	0.026	0.023	0.022
		DP [pC]	-	171	293	1033	2364	1693	709	176	113	-
26-10-21	200 horas	C [pF]	31.18	31.18	31.25	31.38	31.55	31.54	31.38	31.27	31.2	31.21
		tan d [-]	0.023	0.024	0.027	0.031	0.036	0.036	0.031	0.028	0.024	0.023
		DP [pC]	17	248	881	2481	3138	1613	916	470	174	15
29-10-21	200 horas + impulsos	C [pF]	31.35	31.36	31.42	31.54	31.7	31.7	31.54	31.45	31.38	31.39
		tan d [-]	0.023	0.025	0.028	0.032	0.036	0.036	0.032	0.029	0.025	0.023
		DP [pC]	-	364	445	1346	1812	1659	814	285	191	-
09-11-21	300 horas	C [pF]	31.1	31.09	31.19	31.34	31.55	31.47	31.29	31.19	31.1	31.12
		tan d [-]	0.0217	0.0235	0.0275	0.0325	0.0377	0.036	0.031	0.0277	0.0242	0.022
		DP [pC]	-	161	882	1262	2283	1619	804	340	119	-
10-11-21	300 horas + impulsos	C [pF]	31.14	31.14	31.24	31.4	31.55	31.52	31.36	31.26	31.18	31.17
		tan d [-]	0.0237	0.026	0.0285	0.033	0.038	0.037	0.033	0.029	0.0266	0.024
		DP [pC]	-	128	181	1895	2521	2175	1448	140	133	-
24-11-21	400 horas	C [pF]	31.24	31.23	31.31	31.48	31.68	31.61	31.44	31.32	31.26	31.26
		tan d [-]	0.022	0.024	0.028	0.033	0.038	0.0375	0.0325	0.029	0.025	0.0225
		DP [pC]	-	219	376	1562	2374	1803	1143	394	115	-
25-11-21	400 horas + impulsos	C [pF]	31.28	31.28	31.36	31.54	31.72	31.68	31.48	31.36	31.3	31.3
		tan d [-]	0.0217	0.024	0.028	0.033	0.038	0.037	0.0317	0.028	0.0243	0.022
		DP [pC]	-	350	921	1235	2160	1539	517	443	146	-

Tabla E-6: Registro de los parámetros en AC en función de la prueba de envejecimiento para la probeta A2.

Probeta A2							
Fecha medición	Inicio	Fin	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Presión [hPa]	Presión [mm]	Ciclo
10-09-21	14:40	15:05	18.5	64	1012	759	0 horas
22-09-21	10:40	11:10	17	65	1012	759	100 horas
08-10-21	13:40	14:30	19	61	1015	761	100 horas + impulsos
26-10-21	12:50	13:00	19	62	1015	761	200 horas
29-10-21	14:00	14:40	20	62	1013	760	200 horas + impulsos
09-11-21	13:40	14:30	19	63.5	1014	760.5	300 horas
10-11-21	15:10	15:50	19	63	1014	760.5	300 horas + impulsos
24-11-21	12:50	13:25	19.5	67	1013	760	400 horas
25-11-21	15:15	16:00	19	67	760	1013	400 horas + impulsos

Tabla E-7: Registro de parámetros ambientales durante la lectura de los parámetros en AC de la probeta A2.

Probeta B2												
fecha medición	Tensión RMS [kV fase-neutro]		2.88	5.76	8.64	11.52	14.4	14.4	11.52	8.64	5.76	2.88
	Tensión [%]		20	40	60	80	100	100	80	60	40	20
20-09-21	0	C [pF]	31.34	31.33	31.38	31.48	31.64	31.63	31.47	31.4	31.35	31.37
		tan d [-]	0.019	0.021	0.024	0.028	0.034	0.032	0.027	0.024	0.021	0.019
		DP [pC]	-	194	303	1517	2130	1955	1381	181	163	-
01-10-21	100 horas	C [pF]	31.39	31.38	31.43	31.6	31.77	31.72	31.55	31.44	31.4	31.42
		tan d [-]	0.021	0.023	0.025	0.03	0.035	0.033	0.03	0.026	0.023	0.021
		DP [pC]	-	108	329	1429	2308	2340	1136	442	102	-
08-10-21	100 horas + impulsos	C [pF]	31.3	31.3	31.37	31.55	31.76	31.68	31.5	31.38	31.32	31.33
		tan d [-]	0.022	0.024	0.027	0.032	0.037	0.036	0.031	0.027	0.024	0.022
		DP [pC]	-	221	491	2122	2743	2215	964	267	145	-
26-10-21	200 horas	C [pF]	31.31	31.31	31.36	31.5	31.68	31.65	31.49	31.41	31.35	31.36
		tan d [-]	0.024	0.0255	0.028	0.0325	0.037	0.037	0.0323	0.029	0.0267	0.025
		DP [pC]	23	156	296	1522	2865	2270	563	260	112	13
29-10-21	200 horas + impulsos	C [pF]	31.46	31.46	31.5	31.61	31.8	31.74	31.61	31.55	31.51	31.51
		tan d [-]	0.026	0.028	0.03	0.034	0.04	0.038	0.034	0.031	0.029	0.027
		DP [pC]	-	245	241	1307	2235	1876	348	149	120	-
08-11-21	300 horas	C [pF]	31.1	31.09	31.16	31.34	31.55	31.48	31.29	31.19	31.12	31.12
		tan d [-]	0.023	0.025	0.028	0.033	0.039	0.038	0.033	0.03	0.026	0.0235
		DP [pC]	-	171	1238	1838	2353	2073	1271	513	117	-
10-11-21	300 horas + impulsos	C [pF]	31.01	31.01	31.06	31.21	31.46	31.38	31.21	31.12	31.06	31.07
		tan d [-]	0.0224	0.025	0.0275	0.033	0.0385	0.038	0.032	0.0287	0.0255	0.023
		DP [pC]	-	249	495	2093	2419	1626	883	305	133	-
24-11-21	400 horas	C [pF]	31.18	31.18	31.26	31.42	31.58	31.54	31.4	31.3	31.21	31.2
		tan d [-]	0.0245	0.0277	0.031	0.035	0.04	0.039	0.035	0.0323	0.0286	0.0252
		DP [pC]	-	157	252	750	2120	1834	328	162	143	-
26-11-21	400 horas + impulsos	C [pF]	31.3	31.11	31.16	31.32	31.5	31.42	31.29	31.21	31.14	31.13
		tan d [-]	0.0247	0.028	0.0297	0.0345	0.0397	0.038	0.0335	0.0305	0.0282	0.0251
		DP [pC]	-	395	369	1746	2495	1738	945	273	225	-

Tabla E-8: Registro de los parámetros en AC en función de la prueba de envejecimiento para la probeta B2.

Probeta B2							
Fecha medición	Inicio	Fin	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Presión [hPa]	Presión [mm]	Ciclo
20-09-21	13:00	13:30	18	63	1012	759	0 horas
01-10-21	15:00	15:40	19	61	1015	761	100 horas
08-10-21	14:35	15:20	19	61	1015	761	100 horas + impulsos
26-10-21	15:30	16:00	20	62	1015	761	200 horas
29-10-21	13:15	13:55	19.5	62	1013.5	760	200 horas + impulsos
08-11-21	13:30	14:10	19	62	1014	760.5	300 horas
10-11-21	14:00	14:40	19	63	1014	760.5	300 horas + impulsos
24-11-21	13:55	14:30	19.5	67	1013	760	400 horas
26-11-21	14:25	15:15	19	67	1013	760	400 horas + impulsos

Tabla E-9: Registro de parámetros ambientales durante la lectura de los parámetros en AC de la probeta B2.

E.4 Gráficos extra de los parámetros AC de las probetas A1, A2, B1 y B2.

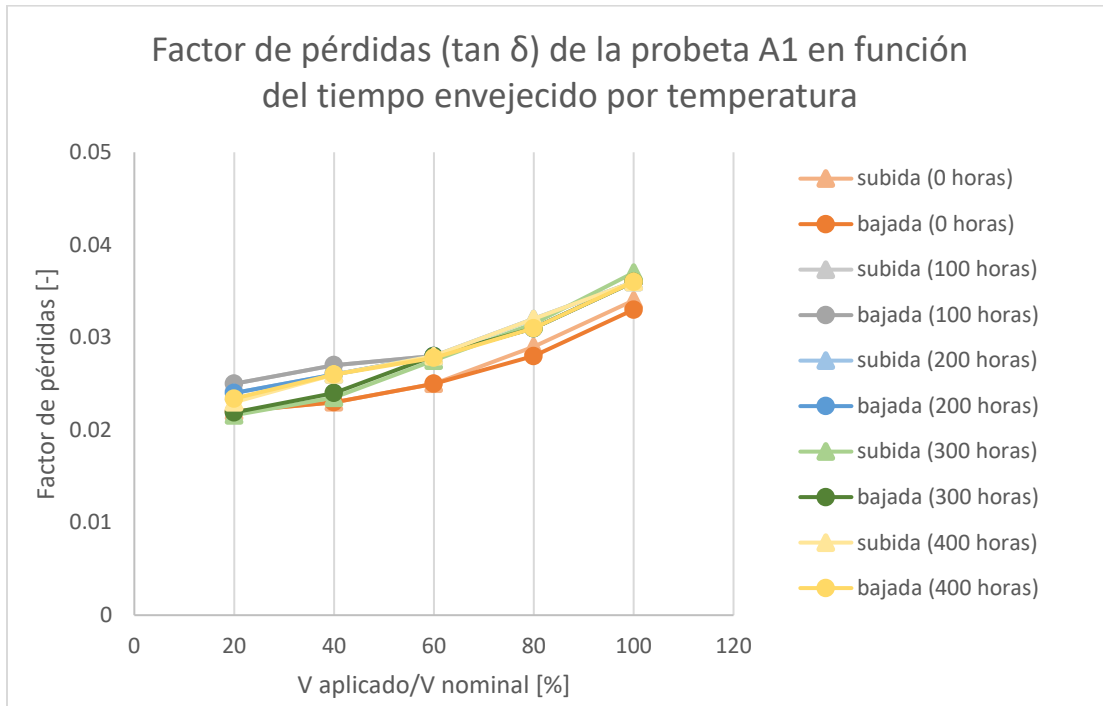


Figura E-2: Gráfica del factor de pérdidas en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta A1.

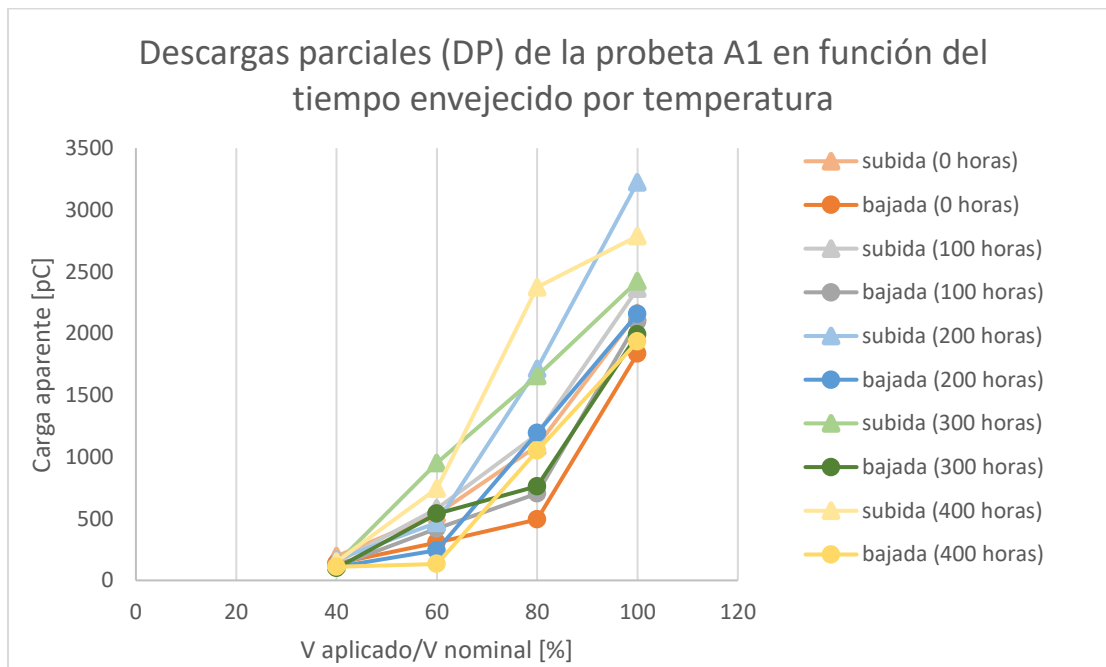


Figura E-3: Gráfica de las DP en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta A1.

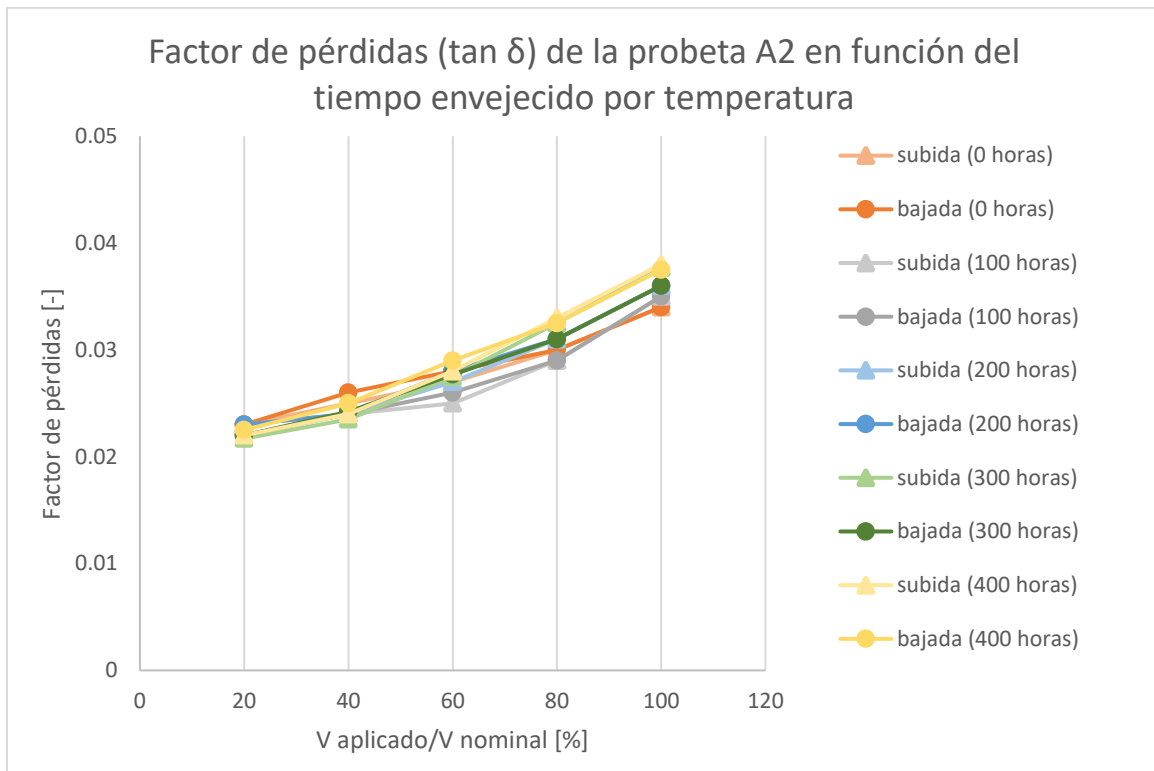


Figura E-4: Gráfica del factor de pérdidas en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta A2.

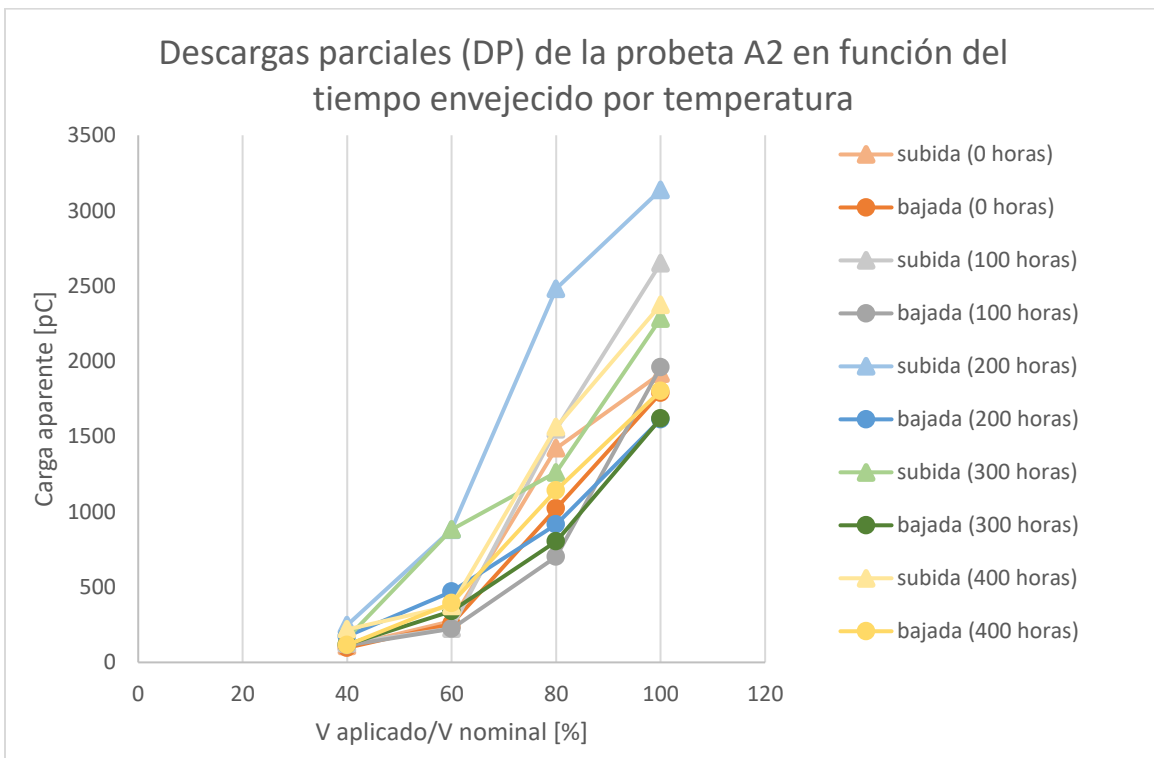


Figura E-5: Gráfica de las DP en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta A2.

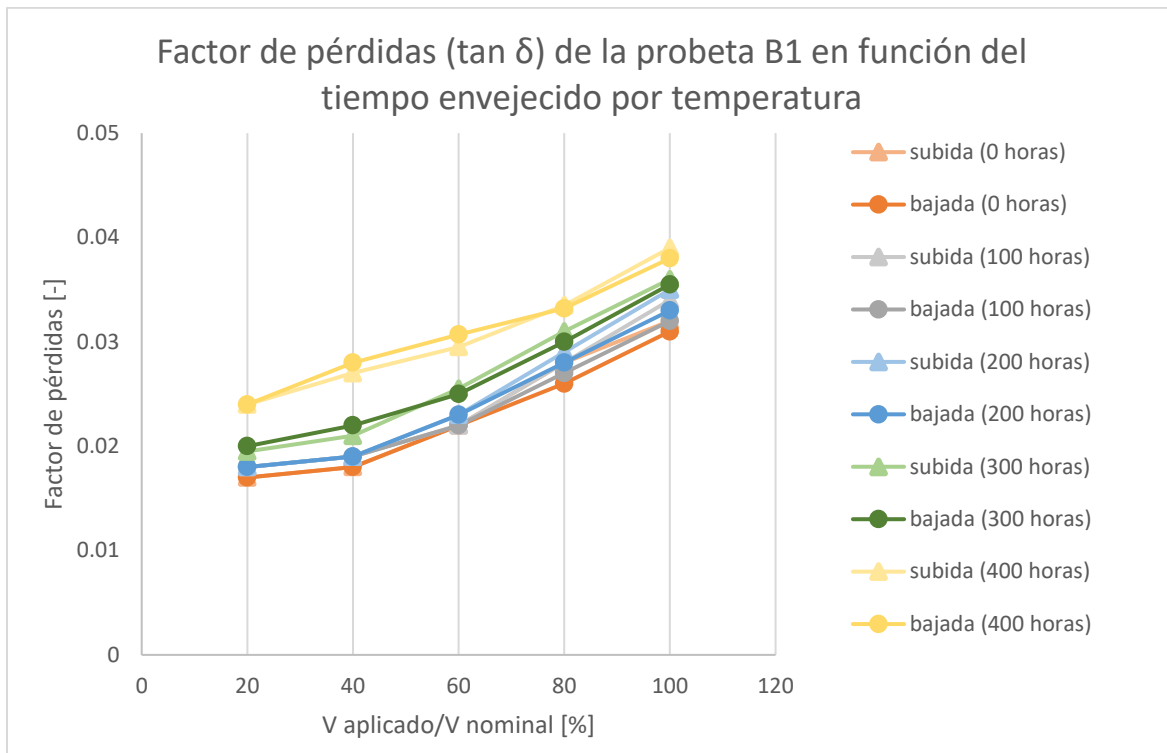


Figura E-6: Gráfica del factor de pérdidas en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta B1.

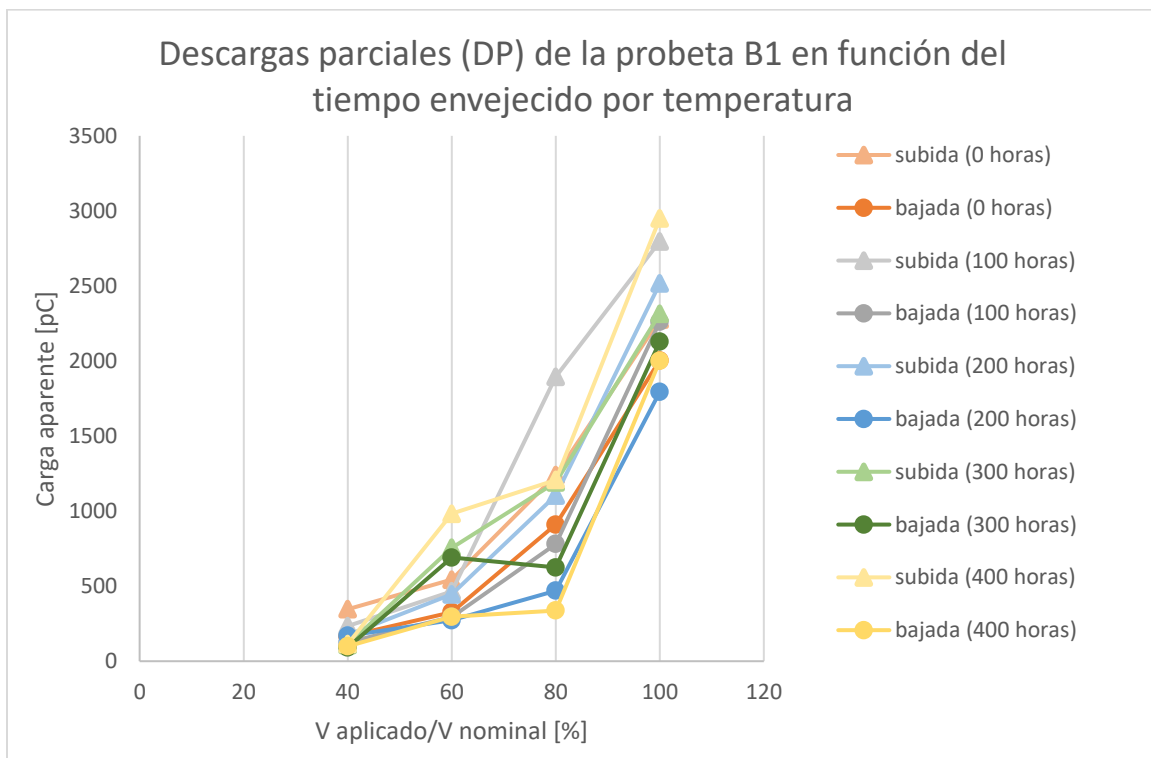


Figura E-7: Gráfica de las DP en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta B1.

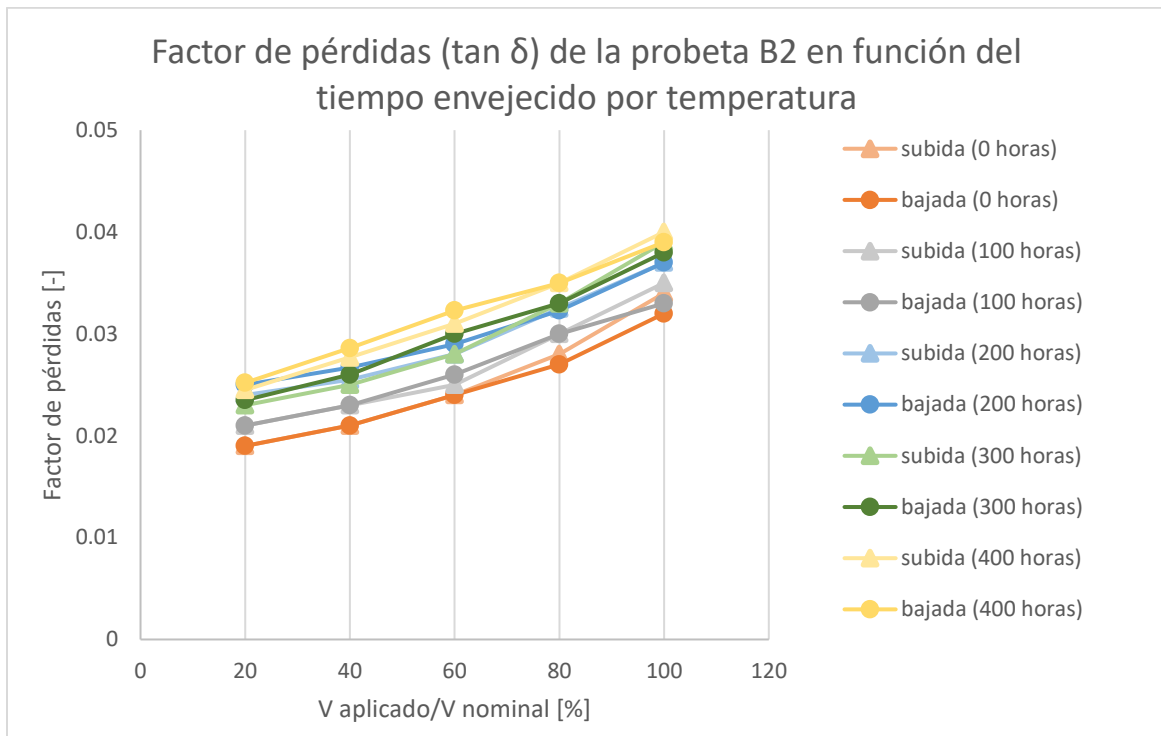


Figura E-8 Gráfica del factor de pérdidas en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta B2.

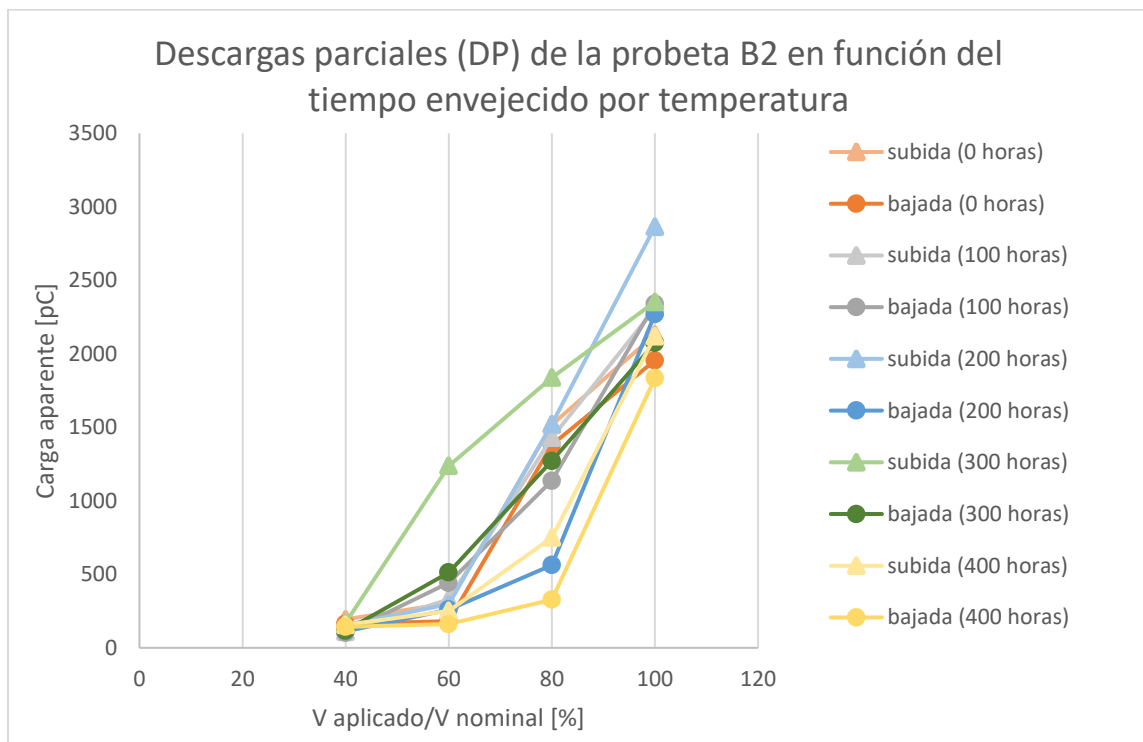


Figura E-9: Gráfica de las DP en función de los ciclos de envejecimiento por temperatura para la probeta B2.