



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

---

# MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

---

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA IMPRESIÓN  
3D COMO ALTERNATIVA DE PRODUCCIÓN DE  
SISTEMAS DIELECTRICOS DE ENCHUFES MINEROS  
DE MEDIA TENSION CLASE 8kV

**Profesores guías:**

Roger Schurch

Johny Montaña

**Correferentes:**

Claudio Castro

Patricio García

**Integrante:**

Bryan Morales Pérez

10 de noviembre de 2024  
Casa Central

## Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, mi hermana, mi abuela y mi tío por todo su cariño y contención durante estos largos años de carrera.

A Carla, por todo el apoyo, soporte y motivación.

Al Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE), en especial a los profesores Roger Schurch y Johny Montaña, por su paciencia y consejos. También a Cristián Andrades, Cristián Videla y Claudio Ramos, apoyos académicos que siempre tuvieron la mejor disposición para ayudarme en lo que necesitara.

A Claudio Castro (3M) y Patricio García (ATA), por todo el tiempo dedicado a responder mis dudas y ayudarme en la gestión del trabajo.

Por último, a todos mis compañeros con quienes colaboramos en tardes de estudios y trabajos.

Muchas gracias.

## Resumen ejecutivo

El presente trabajo responde a la búsqueda de 3M de nuevas alternativas de fabricación para sus sistemas aislantes. En este contexto, se explora la viabilidad de utilizar la tecnología de impresión 3D como método alternativo para la producción de sistemas dieléctricos de enchufes mineros clase 8 kV. Los métodos tradicionales, como el mecanizado de poliamida 6, generan desperdicios de material, mientras que la impresión 3D elimina estas pérdidas y ofrece mayor flexibilidad en el diseño. El estudio analiza tres tecnologías de impresión 3D: Fused Deposition Modeling (FDM), Liquid Crystal Display (LCD) y Estereolitografía (SLA), aplicando la normativa IEC, utilizada también en el data sheet del fabricante de la poliamida para medir sus características eléctricas, lo que permite un análisis comparativo más preciso. Se llevaron a cabo ensayos de resistividad volumétrica y superficial, rigidez dieléctrica, factor de disipación, permitividad relativa y resistencia al tracking. Los resultados mostraron que las propiedades eléctricas de los materiales están dentro del rango de los polímeros sintéticos, presentando similares propiedades dieléctricas que la poliamida, y que no existen diferencias significativas entre las tecnologías evaluadas. La tecnología LCD fue seleccionada por su rentabilidad y por una potencial menor probabilidad de generar vacuolas de aire en el aislante debido a que trabaja con resinas.

La viabilidad del uso del aislante impreso con tecnología LCD en enchufes mineros fue evaluada siguiendo la norma IEEE 386, la misma utilizada por 3M. Para ello, se realizaron pruebas de descargas parciales, sobretensión en corriente alterna, impulso y resistencia térmica. Los resultados indican que el uso de técnicas de impresión 3D para la fabricación de sistemas aislantes en enchufes mineros de 8 kV es técnicamente viable, ofreciendo una alternativa prometedora que supera las limitaciones de los métodos convencionales y contribuye a la innovación en sistemas dieléctricos para la industria minera.

## Abstract

This work addresses 3M search for new manufacturing alternatives for its insulating systems. In this context, the feasibility of using 3D printing technology as an alternative method for producing dielectric systems in separable insulated connector systems for power distribution rated 8 kV is explored. Traditional methods, such as polyamide 6 machining, generate material waste, while 3D printing eliminates these losses and offers greater design flexibility. The study analyzes three 3D printing technologies: Fused Deposition Modeling (FDM), Liquid Crystal Display (LCD), and Stereolithography (SLA), applying the IEC standard, which is also used in the polyamide manufacturer's data sheet to measure its electrical characteristics, allowing for a more precise comparative analysis. Tests were carried out on volume and surface resistivity, dielectric strength, dissipation factor, relative permittivity, and tracking resistance. The results showed that the electrical properties of the materials are within the range of synthetic polymers and that there are no significant differences between the evaluated technologies. The LCD technology was selected for its cost-effectiveness and lower probability of generating air voids in the insulator due to the resin used.

The feasibility of using the insulator printed with LCD technology in separable insulated connector systems was evaluated following the IEEE 386 standard, the same one used by 3M. For this purpose, partial discharge, AC overvoltage, impulse, and thermal resistance tests were conducted. The findings indicate that the use of 3D printing techniques for manufacturing insulating systems in 8 kV separable insulated connector systems is technically viable, offering a promising alternative that overcomes the limitations of conventional methods and contributes to innovation in dielectric systems for the mining industry.

## Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>9</b>
1.1	Motivación . . . . .	9
1.2	Objetivos . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Aspectos generales</b>	<b>11</b>
2.1	Enchufe minero . . . . .	11
2.2	Materiales dieléctricos . . . . .	12
2.2.1	Poliamida . . . . .	12
2.3	Impresión 3D . . . . .	13
2.3.1	Tipos de tecnologías . . . . .	13
2.3.2	Tipos de materiales . . . . .	19
2.3.3	Consideraciones económicas . . . . .	21
2.4	Normativa . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Caracterización dieléctrica de los materiales</b>	<b>24</b>
3.1	Resistividad volumétrica . . . . .	24
3.1.1	Teoría . . . . .	24
3.1.2	Aspectos relevantes . . . . .	25
3.1.3	Equipo de medición . . . . .	27
3.1.4	Procedimientos . . . . .	27
3.1.5	Resultados . . . . .	27
3.1.6	Comentarios . . . . .	28
3.2	Resistividad superficial . . . . .	28
3.2.1	Teoría . . . . .	28
3.2.2	Aspectos relevantes . . . . .	28
3.2.3	Equipo utilizado . . . . .	30
3.2.4	Procedimientos . . . . .	30
3.2.5	Resultados . . . . .	30
3.2.6	Comentarios . . . . .	30
3.3	Resistencia al tracking . . . . .	31
3.3.1	Teoría . . . . .	31
3.3.2	Aspectos relevantes . . . . .	31
3.3.3	Equipo de medición . . . . .	33
3.3.4	Procedimientos . . . . .	34
3.3.5	Resultados . . . . .	34
3.3.6	Comentarios . . . . .	34
3.4	Rigidez dieléctrica . . . . .	35
3.4.1	Teoría . . . . .	35
3.4.2	Aspectos relevantes . . . . .	35
3.4.3	Equipo de medición . . . . .	37
3.4.4	Procedimientos . . . . .	37
3.4.5	Resultados . . . . .	38
3.4.6	Comentarios . . . . .	38

---

3.5	Permitividad relativa y factor de disipación . . . . .	38
3.5.1	Teoría . . . . .	38
3.5.2	Aspectos relevantes . . . . .	40
3.5.3	Equipo de medición . . . . .	41
3.5.4	Procedimientos . . . . .	42
3.5.5	Resultados . . . . .	42
3.5.6	Comentarios . . . . .	43
3.6	Conclusiones . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Evaluación eléctrica del SDEM</b>	<b>45</b>
4.1	Descargas parciales . . . . .	47
4.1.1	Procedimiento . . . . .	48
4.1.2	Resultados . . . . .	48
4.2	Tensión aplicada . . . . .	50
4.2.1	Procedimientos . . . . .	51
4.2.2	Resultados . . . . .	51
4.3	Tensión impulso . . . . .	52
4.3.1	Procedimientos . . . . .	53
4.3.2	Resultados . . . . .	53
4.4	Ensayo de temperatura . . . . .	55
4.4.1	Teoría . . . . .	55
4.4.2	Procedimientos . . . . .	55
4.4.3	Resultados . . . . .	55
4.5	Conclusión . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Trabajos futuros</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Anexos</b>	<b>59</b>

## Índice de Figuras

1	Esquema ilustrativo del uso del enchufe minero dentro del proceso de extracción de mineral. [1] . . . . .	11
2	Modelo 3D del aislante macho volante clase 8 [kV]. . . . .	11
3	Enchufe hembra volante clase 8 [kV] fabricado por 3M. . . . .	11
4	Clasificación de tecnologías de impresión con respecto al tipo de material utilizado. . . . .	14
5	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología FDM. [2] . . . . .	15
6	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SDL. [2] . . . . .	16
7	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLA. [2] . . . . .	16
8	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología DLP. [2] . . . . .	17
9	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología Material Jetting. [2] . . . . .	17
10	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLM. [2] . . . . .	18
11	Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología EBM. [2] . . . . .	18
12	Electrodos utilizados en ensayo de resistividad volumétrica y superficial. Disposición de electrodos Tipo C: electrodos anulares. Según Norma IEC 62631-3-1. [3] . . . . .	26
13	Esquema del circuito de pruebas para el ensayo de resistividad volumétrica. Electrodo anulares. Norma IEC 62631-3-1. [3] . . . . .	26
14	Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayos de resistividad superficial y volumétrica. . . . .	26
15	Imagen del equipo 8009 Resistivity Test Fixture y el electrómetro 6517A de KEITHLEY. . . . .	27
16	Esquema del circuito de pruebas para el ensayo de resistividad superficial. Electrodo anulares. Norma IEC 62631-3-2. [4] . . . . .	29
17	Electrodo utilizados en ensayo de resistencia al tracking según Norma IEC 60587. [5] . . . . .	33
18	Esquema del circuito de pruebas para el ensayo de resistencia al tracking. Norma IEC 60587. [5] . . . . .	33
19	Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayo de resistencia al tracking. . . . .	33
20	Amperímetros y sistema de soportes utilizados en ensayo de resistencia al tracking. . . . .	34
21	Electrodos esféricos utilizados en ensayo de rigidez dieléctrica según Norma IEC 60243-1. [6] . . . . .	36
22	Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayo de rigidez dieléctrica. . . . .	37
23	Equipo Baur para el ensayo de rigidez dieléctrica. . . . .	37
24	Factor de disipación dieléctrica. . . . .	38
25	Circuito eléctrico equivalente de un material aislante. [7] . . . . .	40
26	Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayo de permitividad relativa y factor de disipación. . . . .	41
27	Analizador de impedancia marca HIOKI utilizado para mediciones de permitividad relativa y factor de disipación . . . . .	42
28	Modelo circuital para el ensayo de descargas parciales. . . . .	47
29	Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de descargas parciales. . . . .	48
30	Esquema de conexión de un transformador de AT a la muestra para ensayo de tensión aplicada. [7] . . . . .	50
31	Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de tensión aplicada. . . . .	51
32	Modelo circuital del generador de impulsos. . . . .	52

33	Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de impulso. . .	53
34	Equipo inyector de corriente PHOENIX HC75 utilizado para ensayo de temperatura.	55
35	Ficha técnica del enchufe minero clase 8 kV por 3M . . . . .	59
36	Ficha técnica del enchufe minero clase 8 kV por 3M . . . . .	60
37	Datasheet PLA6 utilizado como aislante del enchufe minero clase 8 kV por 3M . . .	61
38	Aislantes y pines de contacto . . . . .	62
39	Enchufe hembra volante clase 8 [kV] con aisladores . . . . .	62
40	Secuencia de pruebas según normativa IEEE386-2016. . . . .	64
41	Valores característicos de materiales dieléctricos. [8] . . . . .	65
42	Valores característicos de materiales dieléctricos. [8] . . . . .	66
43	Señales de impulso positivo aplicadas al enchufe con el aislante 1 en tres condiciones diferentes. . . . .	67
44	Señales de impulso negativo aplicadas al enchufe con el aislante 1 en tres condiciones diferentes. . . . .	67
45	Señales de impulso positivo aplicadas al enchufe con el aislante 2 en tres condiciones diferentes. . . . .	67
46	Señales de impulso negativo aplicadas al enchufe con el aislante 2 en tres condiciones diferentes. . . . .	68
47	Tensión aplicada y niveles de carga aparente en mediciones de descargas parciales realizadas a los aislante 1 y 2, respectivamente. . . . .	68

## Índice de Tablas

1	Clasificación de materiales dieléctricos. . . . .	12
2	Propiedades eléctricas del Ertalon 6 [9] . . . . .	13
3	Tipos de materiales según tecnologías de impresión 3D. . . . .	20
4	Tecnologías, Impresoras y Materiales de Impresión Utilizados . . . . .	21
5	Normativa asociada a la caracterización dieléctrica de los materiales y evaluación dieléctrica del SDEM . . . . .	23
6	Propiedades eléctricas presentadas en la hoja de datos del Ertalon 6. [9] . . . . .	24
7	Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad volumétrica de materiales aislantes eléctricos. . . . .	25
8	Datos resultantes de ensayo de resistencia y resistividad volumétrica de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D . . . . .	27
9	Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad superficial de materiales aislantes eléctricos. . . . .	29
10	Datos resultantes de ensayo de resistencia y resistividad superficial de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D . . . . .	30
11	Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia al tracking de materiales aislantes. . . . .	32
12	Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de rigidez dieléctrica de materiales aislantes. . . . .	36
13	Datos resultantes de ensayo de rigidez dieléctrica de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D . . . . .	38

---

14	Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de permitividad relativa y factor de disipación de materiales aislantes solidos. . . . .	41
15	Resultados del ensayo para determinar los factores de disipación y la permitividad relativa de las probetas impresas. . . . .	43
16	Resumen de propiedades dieléctricas de los materiales. . . . .	43
17	Impresoras y materiales utilizados para la impresión de aislantes mediante tecnología LCD . . . . .	45
18	Ensayos realizado por 3M al enchufe minero clase 8 [kV] con Ertalon 6. [10] . . . . .	45
19	Resultados de pruebas de impulso en enchufes clase 8 kV con aislante 1 y aislante 2.	53
20	Voltage ratings and characteristics for loadbreak connectors . . . . .	63

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En el ámbito de los sistemas dieléctricos de enchufes mineros, el presente tema de investigación se enmarca en la continuación de trabajos y memorias realizadas por el área de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) en colaboración con la empresa 3M. El estudiante Jonathan González realizó un estudio del diseño óptimo de enchufes acopladores tripolares de 8 y 15 kV para tendidos móviles en minería [11], conocidos como Mining Couplers. Posteriormente, el estudiante William Yévenes realizó un análisis del deterioro causado por solicitaciones de tensión y corriente al sistema dieléctrico de los enchufes mineros de 3M de clase 25 kV y 500 A [1]. De este último, los resultados indicaron que el deterioro se produce principalmente por desgaste mecánico y no por factores eléctricos.

En la industria minera, los enchufes tripolares para cables mineros móviles de media tensión desempeñan un papel fundamental en las operaciones de extracción del mineral, permitiendo energizar las diversas maquinarias involucradas en el proceso. A su vez, el sistema dieléctrico de los enchufes mineros es un componente crítico que proporciona aislamiento eléctrico y protección contra descargas, asegurando la seguridad de las personas y la integridad del sistema eléctrico.

Los métodos tradicionales utilizados para la fabricación de los aislantes de enchufes mineros consisten en mecanizar un bloque macizo de algún material con propiedades mecánicas y eléctricas deseables, o en la inyección a altas temperaturas del material dieléctrico en moldes con la geometría requerida. Estos métodos presentan ciertas limitaciones relacionadas con los elevados tiempos de producción debido a los procesos existentes para su confección, y la poca flexibilidad debido a moldes únicos y costosos que no permiten la personalización en geometrías no estándar. Por su parte, para confeccionar sus aislantes, 3M utiliza el método del mecanizado usando poliamida 6.

En este contexto, la implementación de la tecnología de impresión 3D, como se describe en [12], brinda nuevas oportunidades de producción, ya que permite la creación de aislantes con geometrías complejas, elimina las pérdidas producidas en el mecanizado del aislante y ofrece una amplia gama de materiales dieléctricos a utilizar. Cabe destacar que, dadas las variadas tecnologías y materiales existentes en la industria, se debe realizar una selección cuidadosa de estos de acuerdo a los propósitos del trabajo a realizar.

Considerando las recientes innovaciones en el estudio de materiales dieléctricos impresos en tecnologías 3D, se puede mencionar el desarrollo de un híbrido de resina epoxi y resina de impresión 3D mediante polimerización dual [13], demostrando un alto rendimiento y precisión, así como propiedades eléctricas y mecánicas superiores en comparación con las resinas de impresión 3D DLP tradicionales. Otro estudio relacionado evalúa la rigidez dieléctrica de diversas probetas impresas a través de diferentes tecnologías de impresión 3D, como Polyjet, SLA, FDM y SLS [14]. Como observación, los resultados del último estudio indican que las muestras de Polyjet presentaron mayores valores de resistividad y que la rigidez dieléctrica de los materiales impresos fue inferior a la mayoría de los plásticos no impresos en al menos un 15 %.

El tiempo de fabricación del método utilizado por 3M para la confección de sus aislantes es del mismo orden que el requerido por la impresión 3D. Sin embargo, debido a las amplias cualidades positivas que ofrece esta tecnología, resulta indispensable realizar un estudio eléctrico que avale su potencial uso en la fabricación del aislante del enchufe minero. Esto se justifica por el avance constante de estas tecnologías, que podría generar un escenario en el cual los tiempos de impresión se reduzcan significativamente, la

posibilidad de utilizar materiales híbridos con propiedades eléctricas, mecánicas y químicas deseables, o la capacidad de imprimir objetos con mayor densidad. Por consiguiente, resulta esencial evaluar la calidad dieléctrica de los aislantes producidos mediante impresión 3D desde una perspectiva técnica y normativa, con el objetivo de determinar su idoneidad en la industria minera.

Para evaluar la viabilidad desde una perspectiva técnica se utilizan normas y estándares, los cuales definen condiciones de servicio, valores nominales o pruebas eléctricas que definen los parámetros relevantes. Estas pueden ser la IEEE-386-2016 [15], que establece definiciones, condiciones de servicio, valores nominales y pruebas eléctricas para sistemas de conectores aislados separables para sistemas de distribución de energía con capacidad nominal de 2.5 kV a 35 kV; La IEC 60243 [6], que menciona los métodos de ensayo para determinar la rigidez eléctrica de materiales aislantes; la IEC 62631-3-1 [3] y la IEC 62631-3-2 [4], que detalla los procedimientos para determinar la resistividad volumétrica y superficial, respectivamente; la IEC 62631-2-1 [16], que determina la permitividad relativa y factor de disipación de materiales aislantes sólidos; la IEC 60587 [5], que entrega el procedimiento para determinar la resistencia al tracking; y la IEC 60212 [17] que presenta las condiciones estándar de pruebas para ensayos de materiales aislantes.

En definitiva, el presente estudio busca mejorar la fabricación de los sistemas dieléctricos de los enchufes mineros, aportando soluciones innovadoras que superen las limitaciones de los métodos de fabricación tradicionales.

## 1.2. Objetivos

### Objetivo general

- Evaluar la viabilidad de implementar la impresión 3D para la creación de sistemas dieléctricos de enchufes mineros (SDEM) de media tensión clase 8kV, considerando la normativa aplicable, las tecnologías y materiales de impresión disponibles, con el propósito de establecer su potencial uso en la industria minera.

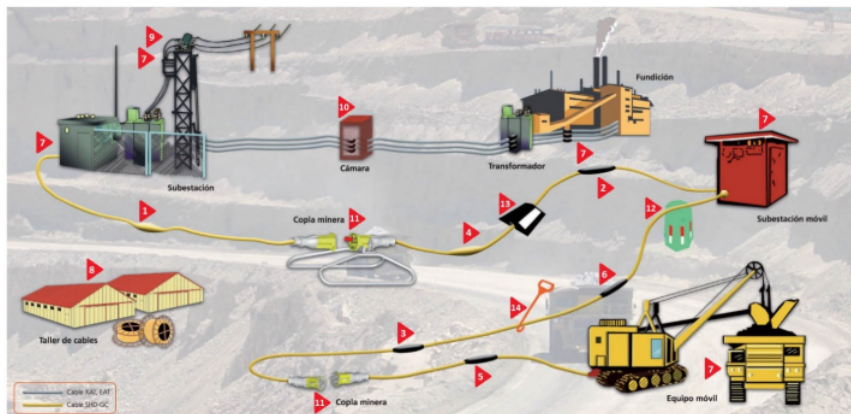
### Objetivos específicos

- Determinar la normativa aplicable para la obtención de las propiedades dieléctricas de materiales para impresión 3D y las pruebas eléctricas para evaluar la viabilidad de los SDEM como solución en aplicaciones mineras.
- Seleccionar dos tecnologías de impresión 3D y un material de impresión apropiado para cada una de ellas, para la creación de probetas de alta densidad para aplicaciones dieléctricas.
- Realizar los ensayos, según las normativas analizadas, para determinar las propiedades dieléctricas del material producido por el método convencional de 3M y de los materiales impresos, con el objetivo de comparar dichas propiedades.
- Realizar los ensayos eléctricos seleccionados y la evaluación dieléctrica del SDEM producido por el método convencional de 3M y del SDEM fabricado mediante impresión 3D, utilizando el material que presente la mejor respuesta dieléctrica entre los dos preseleccionados, con el objetivo de evaluar su potencialidad en aplicaciones mineras.

## 2. Aspectos generales

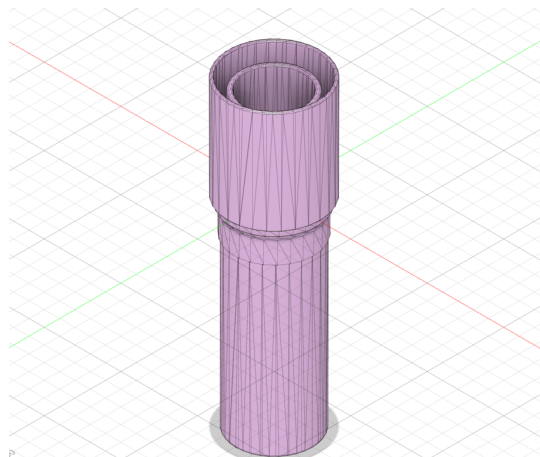
### 2.1. Enchufe minero

El enchufe minero es una estructura compuesta por varios componentes diseñados para interconectar equipamiento eléctrico móvil en el ámbito de la minería. Sus aplicaciones principales incluyen la conexión de cables alimentadores de palas y perforadoras de media tensión a la red, así como la interconexión de cables de media tensión para aumentar la sección de éste y así energizar equipos o maquinaria a distancia, tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Esquema ilustrativo del uso del enchufe minero dentro del proceso de extracción de mineral. [1]

En específico, 3M produce enchufes tripolares macho y hembra de clase 8 [kV] [10], 15 [kV] [18], y 25 [kV] [19] tipo SHD-GC. Estos enchufes están fabricados con aluminio fundido (ver Figura 3) y los aisladores de fases están hechos de poliamida 6 (ver Figura 2). A su vez, los pines de conexión, fabricados en cobre plateado, ofrecen una conexión con bajo nivel de calentamiento y corrosión.



**Figura 2:** Modelo 3D del aislante macho volante clase 8 [kV].



**Figura 3:** Enchufe hembra volante clase 8 [kV] fabricado por 3M.

Para evaluar el correcto funcionamiento del enchufe, 3M realizó ensayos eléctricos según la norma IEEE386 [15], los cuales se presentan resumidos en su hoja de datos [10]. En específico, los ensayos realizados por 3M son: solicitud alterna o tensión aplicada, solicitud continua, impulso, descargas

parciales y corriente permanente o ensayo de temperatura.

El método convencional que utiliza 3M para la fabricación de sus aislantes consiste en el mecanizado de bloques macizos de poliamida 6 hasta lograr la geometría requerida. Este proceso genera pérdidas de material y dificulta la personalización a geometrías complejas.

## 2.2. Materiales dieléctricos

El fundamento teóricos del comportamiento de los materiales dieléctricos y sus propiedades se basan en su estructura atómica y molecular. Los dieléctricos cuentan con una estructura cristalina, amorfa, o semi cristalina, que mantiene una distribución de carga neta positiva igual a la negativa. Se caracteriza por no contar con una banda de electrones libres en su estructura debido a una brecha de energía significativa entre la banda de valencia y la banda de conducción. Esta amplia separación impide el movimiento libre de electrones, indicando una alta resistividad. De esta forma, la propiedad más relevante para determinar la viabilidad de un material como dieléctrico es su elevado valor de resistividad.

Los materiales dieléctricos se pueden clasificar según tres categorías: orgánicos, inorgánicos y polímeros sintéticos, como se muestra en la Tabla 1.

Orgánicos	Inorgánicos	Polímeros Sintéticos	
		Termoplásticos	Termoestables
Ámbar	Cerámicas	Perspex (PMMA)	Resinas epóxicas (EP)
Papel	Vidrio	Polietileno (PE)	Fenólicos
Cartón prensado	Mica	Polipropileno (PP)	Melamina
Caucho	Fibra de vidrio	Poliestireno (PS)	Urea-formaldehído
Madera	Esmalte	Cloruro de polivinilo (PVC)	Polietileno reticulado (XLPE)
Resinas		Poliamida (PA)	Elastómeros
		Policarbonato (PC)	Resinas acrílicas

**Tabla 1:** Clasificación de materiales dieléctricos.

Existen varios parámetros que definen las características dieléctricas de un material. Los principales son la permitividad, resistividad, rigidez dieléctrica, factor de disipación y resistencia al tracking. Generalmente, se espera que un dieléctrico tenga una elevada resistividad, una alta rigidez dieléctrica, un bajo factor de disipación y una permitividad relativa lo más cercana posible a uno.

En el Anexo (ver Figura 41) se presentan algunos valores característicos de ciertos materiales aislantes comúnmente utilizados en ingeniería.

Estos parámetros se determinan mediante ensayos eléctricos, los cuales están estandarizados por organismos normativos.

### 2.2.1. Poliamida

La poliamida, como se muestra en la Tabla 1, es un polímero termoplástico que contiene grupos amida en su estructura molecular. Es utilizado en diversas aplicaciones industriales debido a sus excelentes pro-

propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas.

A su vez, la poliamida 6 es un tipo específico de poliamida sintética. Se produce mediante la polimerización del caprolactama, un monómero de 6 carbonos.

En particular, para la confección del sistema dieléctrico del enchufe minero, 3M utiliza el ERTALON 6, una poliamida 6 fabricada por MITSUBISHI. Las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas de este material se detallan en la hoja de datos del fabricante [9] (Ver anexo 37). En específico, sus propiedades eléctricas se presentan en la Tabla 2.

Propiedades	Norma	Valor	Unidad
Resistividad Superficial	ANSI/ESD STM 11.11	$> 10^{13}$	$\Omega/sq$
Resistividad Volumétrica	IEC 60093	$> 10^{14}$	$\Omega \cdot cm$
Rigidez Dieléctrica	IEC 60243-1	25	kV/mm
Permitividad Relativa	IEC 60250	3.20	
Factor de disipación	IEC 60250	0.016	

**Tabla 2:** Propiedades eléctricas del Ertalon 6 [9]

### 2.3. Impresión 3D

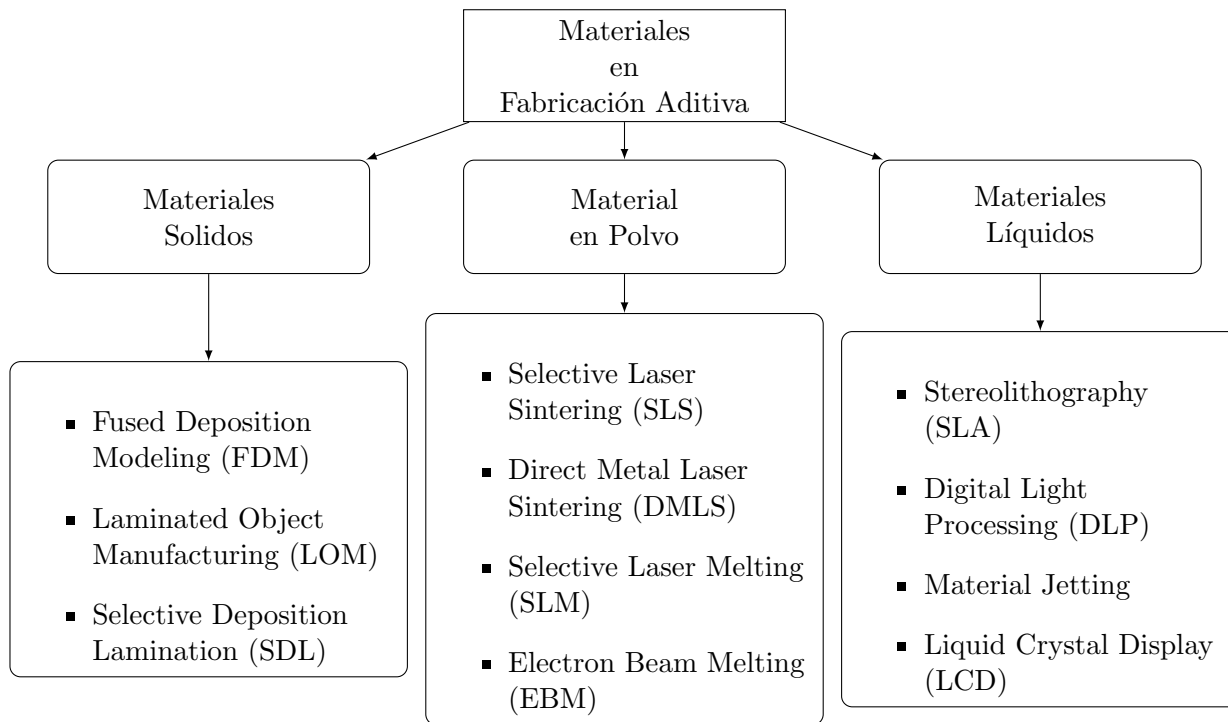
La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un proceso que permite la creación de un objeto tridimensional a partir de un diseño digital. Esta tecnología utiliza diversos materiales, como plásticos, resinas, metales e incluso compuestos biológicos, depositándolos de manera sucesiva y controlada para conformar el objeto deseado, minimizando el desperdicio y permitiendo la confección de cuerpos con geometrías complejas.

La impresión 3D ha encontrado grandes aplicaciones en diversos campos, destacando especialmente el de la salud, donde ha permitido la creación de implantes y prótesis, así como modelos anatómicos precisos para preparación quirúrgica, mejorando los resultados y reduciendo los tiempos de recuperación. En la industria aeroespacial, esta tecnología facilita la fabricación de componentes ligeros y resistentes, cruciales para la eficiencia y seguridad de las aeronaves. En el sector de la construcción, posibilita el desarrollo de estructuras complejas con una reducción significativa de residuos y costes. En el ámbito eléctrico, esta tecnología abre nuevas posibilidades para la fabricación de componentes eléctricos personalizados, como carcasas para dispositivos electrónicos, aisladores y dieléctricos, entre otros.

#### 2.3.1. Tipos de tecnologías

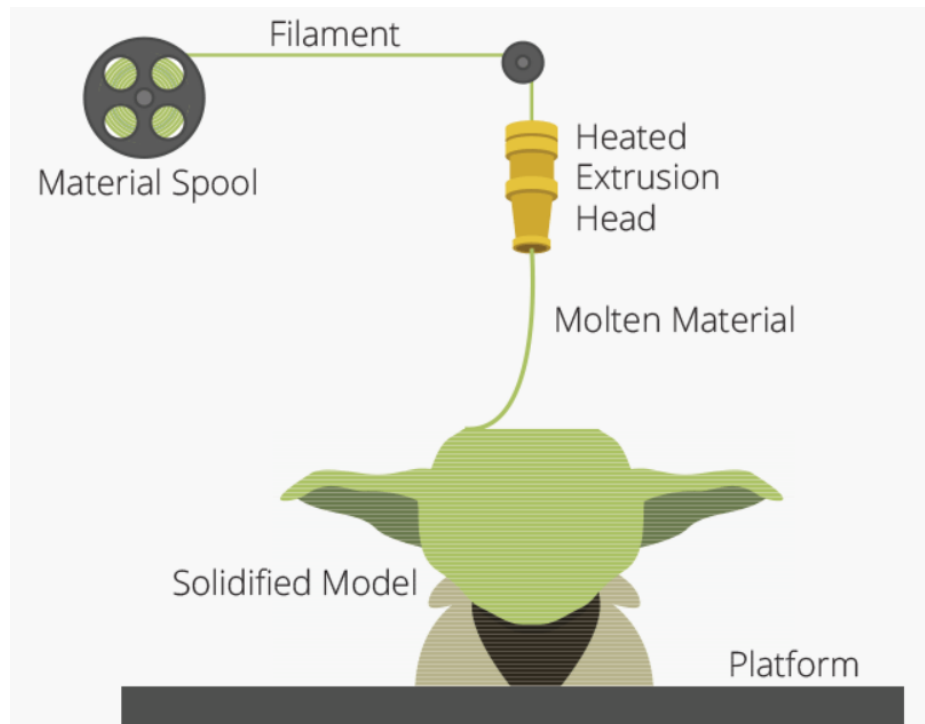
La fabricación aditiva cuenta con una variedad de métodos, cada uno con sus formas y materiales específicos, diseñados para satisfacer las distintas necesidades de fabricación. Entre las tecnologías más comunes se encuentran: el modelado por deposición fundida (FDM), la estereolitografía (SLA), el procesamiento de luz digital (DLP), la sinterización selectiva por láser (SLS), y más. Estas tecnologías varían significativamente en términos de precisión, resistencia de los materiales, y complejidad del diseño que pueden manejar. Algunas se centran en plásticos y polímeros, mientras que otras trabajan con metales, cerámicas, o incluso compuestos biológicos.

En la Figura 4 se presenta un diagrama que clasifica las tecnologías de fabricación aditiva según el tipo de material utilizado: polvo, líquido y sólido.



**Figura 4:** Clasificación de tecnologías de impresión con respecto al tipo de material utilizado.

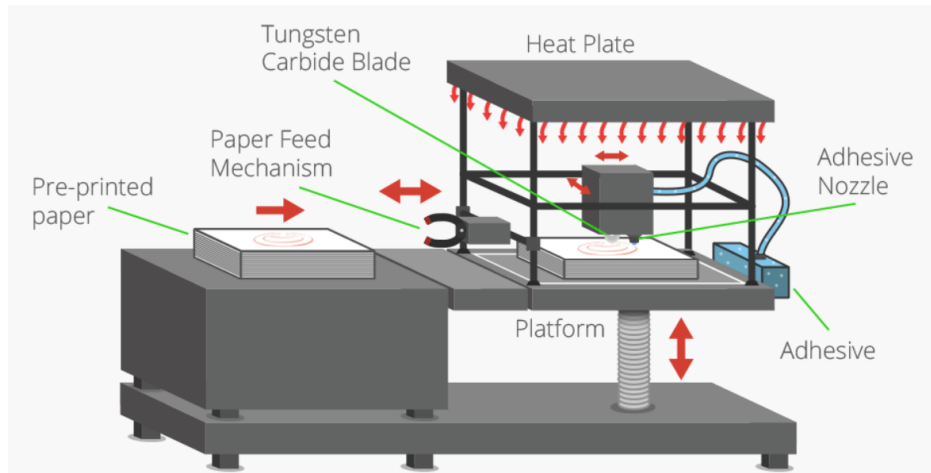
1. **Material sólido:** Entre las tecnologías que utilizan material sólido están el modelado por deposición fundida (FDM), la fabricación de objetos por laminación (LOM) y la laminación por deposición selectiva (SDL). La FDM es una de las tecnologías de impresión 3D más extendidas y accesibles en el mercado. Este método se basa en la extrusión de materiales termoplásticos, los cuales son calentados hasta alcanzar un estado fundido y luego depositados capa a capa para construir el objeto deseado. La plataforma sobre la cual se imprime el objeto se mueve verticalmente para permitir la adición de nuevas capas, y el diseño del objeto proviene de archivos CAD que dirigen la trayectoria del extrusor. Las impresoras FDM pueden tener múltiples extrusores que permiten la utilización de distintos materiales simultáneamente, ya sea para crear estructuras complejas con soportes solubles o para construir piezas con diferentes propiedades. El postprocesado en FDM puede requerir la eliminación de soportes y el alisado de la superficie para obtener un mejor acabado.



**Figura 5:** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología FDM. [2]

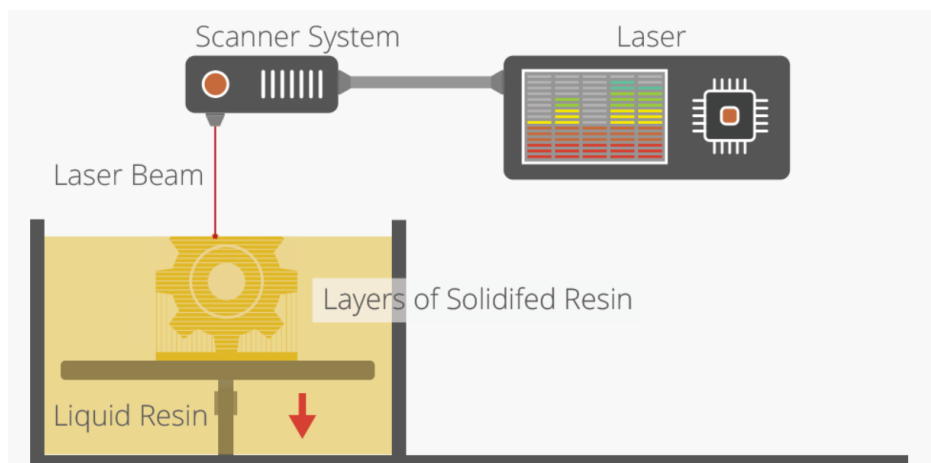
Por otro lado, la fabricación de objetos por laminación (LOM) se aleja del uso de filamentos y se centra en la construcción a partir de láminas de material sólido, como papel, cartón, madera o plásticos. Este proceso implica cortar las láminas en la forma deseada y luego unir las capas con adhesivo, capa a capa, aplicando presión y calor para asegurar la adhesión. Este método es distinto a las técnicas de impresión 3D más comunes, ya que trabaja con materiales en su estado sólido en lugar de fundirlos o polimerizarlos, lo que puede ser ventajoso para ciertas aplicaciones específicas.

La laminación por deposición selectiva (SDL) es un método de impresión 3D único que utiliza papel de oficina y adhesivo para construir objetos capa por capa. A diferencia del proceso de fabricación de objetos laminados, SDL aplica adhesivo de manera selectiva, lo que facilita la eliminación de material sobrante. Después de adherir cada nueva hoja de papel, se corta siguiendo el contorno del diseño 3D, y este proceso se repite hasta completar el objeto, resultando en una unión sólida y precisa de las capas.



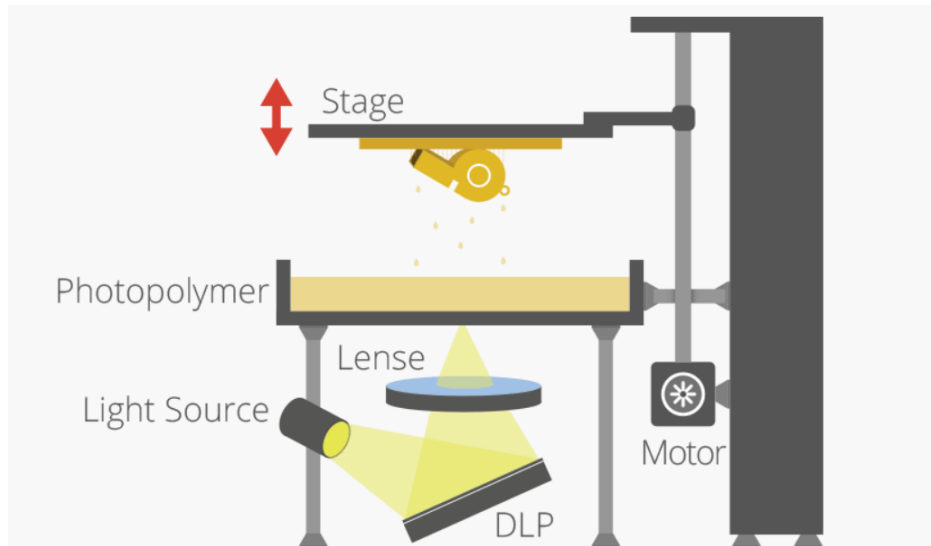
**Figura 6:** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SDL. [2]

2. **Material líquido:** La estereolitografía (SLA) es la primera tecnología de este tipo en ser desarrollada y comercializada. Utiliza fotopolímeros líquidos que se endurecen bajo la exposición a un láser ultravioleta para construir objetos capa por capa. Este proceso requiere un postprocesamiento, que incluye la eliminación de soportes y un curado adicional bajo luz UV para mejorar la dureza y estabilidad del objeto. A pesar de que los objetos producidos con SLA tienen un acabado superficial de alta calidad, la fragilidad del material pueden limitar su aplicaciones. Sin embargo, los avances en materiales más resistentes y con buenas propiedades mecánicas, químicas y eléctricas, abren nuevas posibilidades.



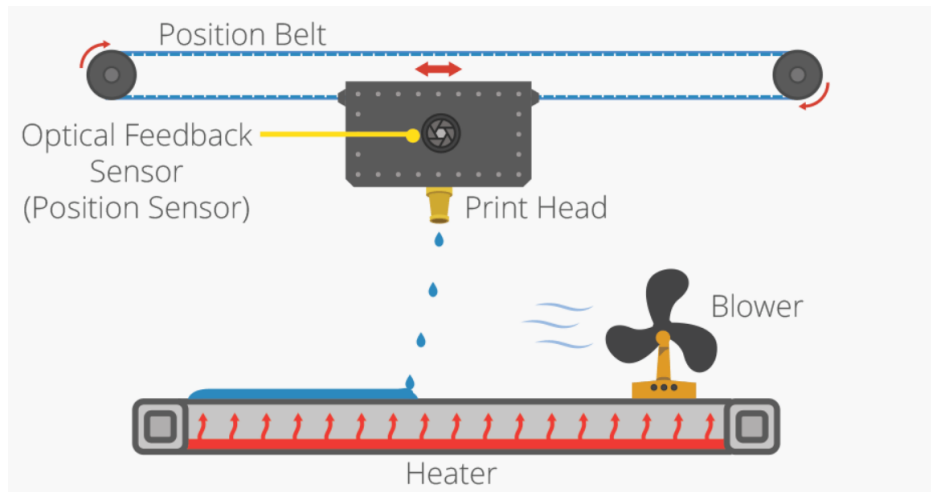
**Figura 7:** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLA. [2]

Por otra parte, el procesamiento de luz digital (DLP) comparte similitudes con la SLA, pero difiere en la fuente de luz utilizada, reemplazando el láser por una fuente de luz más convencional que proyecta imágenes sobre la resina líquida para solidificarla. Este cambio permite que la impresión sea más rápida, disminuyendo los costes operativos. Similar a la DLP, la impresión LCD también utiliza luz para polimerizar resinas fotosensibles. Sin embargo, en lugar de utilizar un proyector, esta tecnología emplea una pantalla LCD que permite curar capas enteras de resina simultáneamente.



**Figura 8:** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología DLP. [2]

Finalmente, el Material Jetting funciona de manera análoga a las impresoras de inyección de tinta, depositando gotas de material líquido, fotopolimerizando con luz ultravioleta. Este método alcanza una alta precisión y acabado de superficie, similar a la estereolitografía. Los materiales solubles pueden utilizarse para soportes, simplificando el postprocesamiento y facilitando la eliminación completa de dichos soportes con poca intervención manual.



**Figura 9:** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología Material Jetting. [2]

- Material en polvo:** Las tecnologías de impresión 3D que utilizan polvo como material se dividen principalmente en dos categorías: las basadas en láser y las que utilizan un haz de electrones. Las tecnologías láser, como la sinterización selectiva por láser (SLS), la sinterización directa por láser de metal (DMLS) o la fusión selectiva por láser (SLM), funcionan calentando y fusionando el polvo para crear la pieza capa por capa. SLS utiliza materiales plásticos, cerámicos o vidrios, en cambio DMLS y SLM utilizan aleaciones metálicas. En contraste, las tecnologías de haz de electrones, como la fabricación por haz de electrones (EBM), requieren trabajar en un vacío para fundir polvos

metálicos mediante el impacto de electrones en su estructura, lo que resulta ventajoso para crear componentes de alta densidad y precisión, comúnmente utilizados en medicina para implantes y en la industria aeroespacial. Ambas tecnologías ofrecen la ventaja de eliminar la necesidad de soportes adicionales, ya que el polvo no fusionado actúa como soporte durante el proceso de impresión, y el material sobrante puede ser reutilizado, maximizando la eficiencia del material y reduciendo los residuos.

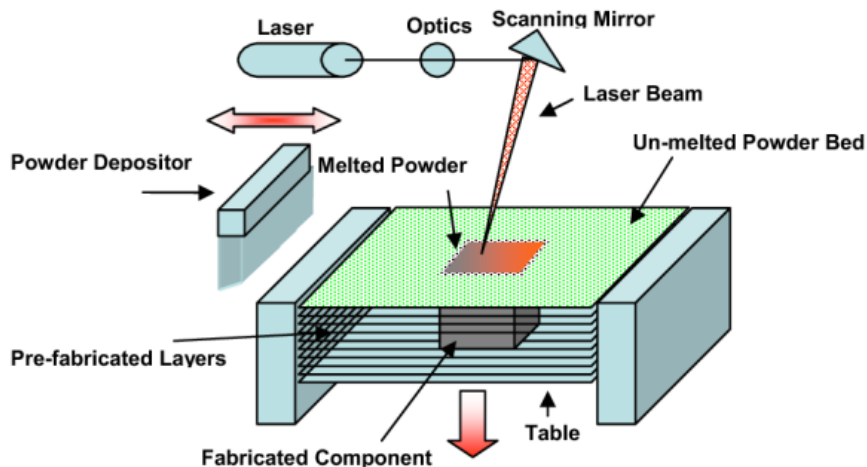


Figura 10: Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLM. [2]



Figura 11: Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología EBM. [2]

### 2.3.2. Tipos de materiales

En cuanto a los materiales disponibles para la impresión 3D, estos van desde termoplásticos y metales hasta resinas biocompatibles y fotosensibles. Estos pueden ser seleccionados junto al método de impresión para garantizar los requisitos del diseño y la funcionalidad prevista. A continuación, se presentan algunos materiales de impresión por tecnología:

1. **Material sólido:** El Modelado por Deposición Fundida (FDM/FFF) Principalmente se limita a polímeros sintéticos termoplásticos y a materiales poliméricos compuestos, sin embargo, su uso puede ampliarse a la utilización de una amplia gama de sustancias, como alimentos y ceras, demostrando su versatilidad.

Los principales materiales utilizados son: el Ácido Poliláctico (PLA), que se distingue por su origen biodegradable y su estructura semicristalina derivada de fuentes naturales, que por su absorción de humedad y baja resistencia térmica limitan sus aplicaciones en condiciones ambientales exigentes. El Polietileno Tereftalato Glicol (PET-G), que ofrece una mejor resistencia química y al impacto, siendo óptimo para contenedores de alimentos debido a su baja absorción de humedad y propiedades de biocompatibilidad. El Alcohol de Polivinilo (PVA), que se utiliza principalmente como material de soporte soluble en agua para geometrías complejas, facilitando el postprocesado. La poliamida, que exhibe una alta resistencia y flexibilidad, adecuado para componentes duraderos, aunque requiere precauciones contra la absorción de humedad. El Poliuretano Termoplástico (TPU), que proporciona propiedades elásticas y de resistencia a la abrasión, ideal para piezas flexibles. El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), que se caracteriza por su resistencia a temperaturas extremas y durabilidad, aunque su impresión demanda condiciones controladas debido a la emisión de vapores tóxicos. Adicionalmente, la innovación en materiales compuestos, incorporando rellenos como fibras de carbono, kevlar o vidrio a matrices poliméricas como la poliamida, ha permitido superar las limitaciones mecánicas de los polímeros convencionales, ofreciendo una mejora sustancial en propiedades como la resistencia a la tracción y la rigidez.

Por otro lado, los materiales utilizados en el método de laminación (LOM) son papel, cartón o madera.

2. **Material líquido:**

Las resinas estándar predominantes en el mercado, también llamadas precursores, son el acrilato y la epoxi. Estas resinas son preparadas para que puedan ser utilizadas en impresión 3D, contando con diferentes componentes. Los fotoiniciadores, responsables de iniciar el proceso de curado bajo exposición lumínica, se eligen de acuerdo al precursor empleado, influyendo en la velocidad de reacción y las características mecánicas del objeto impreso. Los absorbentes limitan la penetración de la luz durante el curado para prevenir defectos por excesiva polimerización. Adicionalmente, los aditivos y estabilizadores se incorporan para ajustar la viscosidad del material, facilitando la impresión y mejorando la adhesión entre capas, siendo los tensioactivos oligoméricos y el ácido oleico ejemplos de sustancias empleadas para este fin. Esta integración de componentes químicos permite afinar las propiedades del material impreso, asegurando la precisión y la calidad en la fabricación aditiva.

Para la fabricación de piezas con características metálicas o cerámicas mediante estereolitografía, se emplean resinas que incorporan polvos de estos materiales. Estos polvos, dimensionados cuidadosamente para no exceder la altura de capa ni ser demasiado finos, se mezclan con la resina antes de

la impresión. Posteriormente, las piezas impresas requieren la eliminación de la resina, típicamente mediante pirólisis, seguido de un proceso de sinterización y tratamiento térmico. La proporción y tamaño del polvo son cruciales para evitar defectos como grietas, y un tamaño inadecuado puede interferir con el proceso de curado debido a la absorción de la luz.

En cuanto a Material Jetting, si bien comparte similitudes con SLA y DLP en términos de precursores y fotopolimerización, existe variaciones en la viscosidad, necesarias para adaptarse a las peculiaridades del método.

### 3. Material en polvo:

En teoría, cualquier material que pueda ser fundido o solidificado es candidato a ser usado en uno de estos procesos, pero por lo general se usan polímeros, metales, materiales cerámicos y los composites formados a partir de estos.

Los polímeros termoplásticos destacan por su idoneidad gracias a su baja temperatura de fusión y conductividad térmica reducida, siendo la poliamida el material predilecto debido a su naturaleza semicristalina que facilita un enfriamiento rápido tras el aporte energético del láser. Además, se utilizan mezclas de poliamida reforzada con partículas de cristal o combinaciones de policaprolactona con cerámicas para aplicaciones específicas, como implantes óseos. En cuanto a los metales, la tecnología permite emplear desde aceros hasta metales preciosos, siempre que sean soldables, aunque se requiere controlar la temperatura y atmósfera para evitar defectos y asegurar la correcta estructura cristalina para tratamientos térmicos posteriores. Los materiales cerámicos, formados por óxidos metálicos y carburos, también son factibles, aunque se debe prestar atención a la atmósfera durante el proceso para evitar precipitados que comprometan la biocompatibilidad de los compuestos resultantes.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los materiales disponibles para cada tecnología de impresión.

Tecnología	Tipo de Materiales	Ejemplos de Materiales
FDM	Polímeros Sintéticos Termoplásticos	PE, PP, PS, PVC, PA, PC, ABS, PLA.
SLA	Resinas poliméricas Termoestables	Resinas epoxi, Resinas acrílicas, Resinas poliuretano.
LCD	Resinas poliméricas Termoestables	Resinas epoxi, Resinas acrílicas, Resinas poliuretano.
DLP	Resinas poliméricas Termoestables	Resinas epoxi, Resinas acrílicas, Resinas poliuretano.
SLS	Polvos poliméricos Termoplásticos	PA, TPU, PEEK, compuestos cerámicos, entre otros.
DMLS	Polvos metálicos	Aleación de aluminio, acero inoxidable, titanio, cobalto-cromo, entre otros.
SLM	Polvos metálicos	Acero inoxidable, aluminio, titanio, cobalto-cromo, entre otros.
EMB	Polvos metálicos	Titanio, cobalto-cromo y otras aleaciones.

**Tabla 3:** Tipos de materiales según tecnologías de impresión 3D.

### 2.3.3. Consideraciones económicas

Los costos de impresión son elevados, las tecnologías de impresión no están suficientemente masificadas y no siempre están disponibles de forma accesible. En este contexto, es necesario trabajar con los recursos que se encuentren a disposición. Tras un análisis, se determina que la tecnología de impresión más económica es la FDM, seguida por las impresoras de resina, como las LCD, SLA y DLP. Finalmente, se encuentran las impresoras que utilizan láseres o haces de electrones para procesar polvos metálicos, como SLS, DMLS, SLM y EBM, que suelen ser más costosas.

Además, los materiales óptimos para el desarrollo del trabajo, tales como resinas dieléctricas compuestas con cerámicos, fibra de carbono o polvo de poliamida, tienen un alto costo. En consecuencia, el alcance del presente trabajo está restringido por limitaciones económicas. Por lo tanto, se seleccionarán tecnologías y materiales que se ajusten al presupuesto disponible, priorizando la viabilidad económica sin comprometer la calidad del trabajo.

En definitiva, considerando aspectos económicos y técnicos, se seleccionan las tecnologías, impresoras y materiales a utilizar en la Tabla 4.

Tecnología	Impresora	Material de Impresión	Observación
FDM	Trimarker Nebula Plus	PLA	Impreso en el DIE UTFSM casa central
SLA	Form4 de FormLab	Resina acrílica (Tough 1500 FormLab)	Impreso en FabLab UV, Valparaíso
LCD	Anycubic Photon Mono M55	Resina acrílica (Estándar Anycubic)	Impreso en el DIE UTFSM San Joaquín

**Tabla 4:** Tecnologías, Impresoras y Materiales de Impresión Utilizados

## 2.4. Normativa

En el contexto del desarrollo y evaluación de sistemas dieléctricos avanzados, incluidos los aislantes sólidos, la aplicación de normas internacionales reconocidas juega un papel fundamental. La caracterización precisa de estos materiales y sistemas no solo exige un profundo entendimiento de sus propiedades eléctricas fundamentales, sino también un enfoque metodológico riguroso y estandarizado para asegurar la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Los principales organismos nacionales e internacionales encargados del establecimiento de estándares y normativas en el sector eléctrico son IEC, IEEE, ASTM International, ISO, BSI, CENELEC Y SEC.

Uno de los objetivos de este documento es determinar la normativa aplicable para obtener los parámetros dieléctricos de los materiales y para las pruebas eléctricas necesarias para evaluar la viabilidad de los SDEM. En este contexto, dado que se dispone de los valores correspondientes de las propiedades eléctricas del Ertalon 6 y su norma asociada (ver Tabla 6), se ha decidido utilizar la misma normativa para los materiales impresos, lo que permitirá comparar los resultados de manera consistente. Además, se incluye el ensayo de resistencia al tracking de acuerdo con la norma IEC. Las normas empleadas para

la caracterización de los materiales son:

1. **IEC 60243-1:2013 - Rigidez dieléctrica:** Resistencia eléctrica de materiales aislantes. Métodos de prueba. Pruebas a frecuencias de potencia.
2. **IEC 60587:2022 - Resistencia al tracking:** Cambios rastreados. Materiales aislantes eléctricos utilizados en condiciones ambientales severas. Métodos de prueba para evaluar la resistencia al rastreo y la erosión.
3. **IEC 62631-2-1:2018 - Permitividad relativa y Factor de disipación:** Propiedades dieléctricas y resistivas de materiales aislantes sólidos. Permitividad relativa y factor de disipación. Frecuencias técnicas (0,1 Hz a 10 MHz). Métodos de CA
4. **IEC 62631-3-1:2023- Resistividad volumétrica:** Propiedades dieléctricas y resistivas de materiales aislantes sólidos. Determinación de propiedades resistivas (métodos DC). Resistencia de volumen y resistividad de volumen. método general.
5. **IEC 62631-3-2:2023 - Resistividad superficial:** Propiedades dieléctricas y resistivas de materiales aislantes sólidos. Determinación de propiedades resistivas (métodos DC). Resistencia superficial y resistividad superficial.
6. **IEC 60212:2011 - Condiciones estandar:** Condiciones estándar de uso antes y durante las pruebas de materiales aislantes eléctricos sólidos.

A su vez, como se dispone de los ensayos realizados por 3M al enchufe minero clase 8 kV con el aislante confeccionado de poliamida 6 [10], basta con utilizar la misma normativa para los ensayos a realizar en el SDEM. De esta forma, la norma utilizada para determinar la viabilidad del sistema dieléctrico del enchufe minero es:

1. **IEEE 386:2016** Establece definiciones, condiciones de servicio, clasificaciones, características de construcción intercambiables y pruebas para sistemas de conectores aislados separables con rotura de carga y de ruptura con capacidad de 900A o menos para uso en sistemas de distribución de energía blindados con capacidad 2.5 KV a 35KV.

En definitiva, la elección de la normativa en su versión actualizada se presenta de mejor forma en la Tabla 5.

### Caracterización Dieléctrica de los Materiales

Ensayo	Norma
Resistencia superficial	IEC 62631-3-2:2023
Resistencia volumétrica	IEC 62631-3-1:2023
Rigidez dieléctrica	IEC 60243-1:2013
Permitividad relativa	IEC 62631-2-1:2018
Factor de disipación	IEC 62631-2-1:2018
Resistencia al tracking	IEC 60587:2022

### Evaluación Dieléctrica del SDEM

Ensayo	Norma
Descargas parciales	IEEE 386:2016
Tensión aplicada	
Tensión impulso	
Temperatura	

**Tabla 5:** Normativa asociada a la caracterización dieléctrica de los materiales y evaluación dieléctrica del SDEM

Es importante destacar que la norma IEEE 386, utilizada por 3M para evaluar sus enchufes, se emplea debido a la falta de una norma específica para las coplas mineras tripolares. La IEEE 386 se refiere a conectores separables, que son similares pero presentan diferencias notables. Por esta razón, no se considera una guía exacta en cuanto a los valores propuestos, especialmente en lo que respecta a las mediciones de descargas parciales, que serán significativamente mayores a las establecidas por la norma (aproximadamente 20.000-50.000 pC) debido a sus diferencias constructivas. No obstante, las pruebas de impulso, tensión aplicada y temperatura son buenos indicadores de la calidad del sistema aislante.

### 3. Caracterización dieléctrica de los materiales

A partir de la caracterización, se busca definir la tecnología y el material más apropiados para la confección del sistema dieléctrico y realizar una comparativa entre estos y el ERTALON 6, cuyas características se especifican en su hoja de datos [9]. En la Tabla 6 se presentan las propiedades eléctricas del Ertalon 6, sus valores y normas asociadas:

Propiedad	Valor	Norma
Rigidez eléctrica	25 [kV/mm]	IEC 60243-1
Resistividad volumétrica	>10E14 [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	IEC 60093
Resistividad superficial	>10E13 [ $\Omega/\text{sq}$ ]	ANSI/ESD STM 11.11
Permitividad relativa (1MHz)	3,20	IEC 60250
Factor de disipación (1MHz)	0,016	IEC 60250

**Tabla 6:** Propiedades eléctricas presentadas en la hoja de datos del Ertalon 6. [9]

#### 3.1. Resistividad volumétrica

##### 3.1.1. Teoría

La resistividad volumétrica, es un parámetro fundamental en la caracterización de materiales, especialmente cuando se trata de evaluar sus capacidades aislantes. Este concepto describe la oposición que un material ofrece al flujo de corriente eléctrica a través de su volumen, siendo una propiedad intrínseca que refleja cómo el material responde a un campo eléctrico aplicado en su interior.

La resistencia volumétrica ( $R_v$ ), en Ohmios ( $\Omega$ ), se calcula dividiendo el voltaje de prueba ( $V$ ) por la corriente entre electrodos ( $A$ ).

La resistividad volumétrica ( $\rho$ ) se calculará a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho = R_v \frac{A}{h}$$

donde

$R_v$  : es la resistencia del volumen en  $\Omega$ .

$A$  : es el área efectiva del electrodo.

$h$  : es el espesor promedio de la muestra en centímetros.

Para el equipo 8009, que utiliza electrodos anulares,  $A$  se calcula de la siguiente manera:

$$A = \frac{D_0^2}{t} \pi$$

Donde  $D_0$  es el diámetro efectivo del electrodo protegido, que es 5.40 [cm].

De esta forma, la resistividad volumétrica queda definida como:

$$\rho = \frac{22.9}{h} R_v \quad (3.1)$$

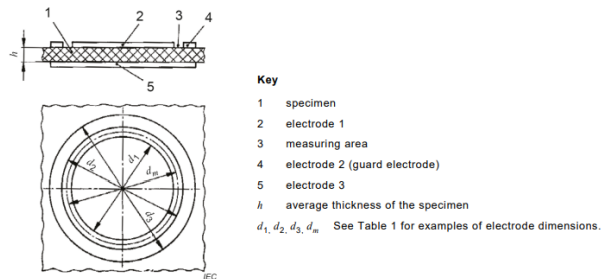
### 3.1.2. Aspectos relevantes

Los aspectos relevantes sobre las condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad volumétrica de los materiales se presenta en la Tabla 7.

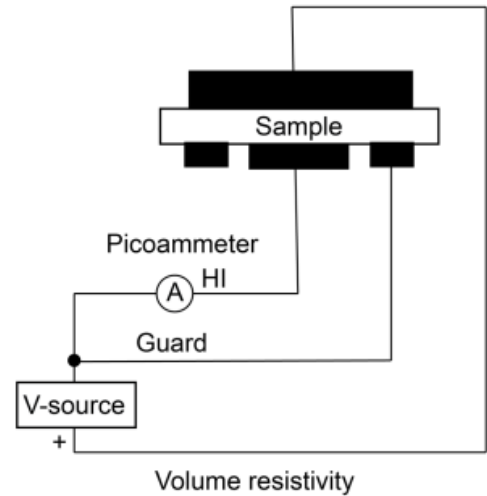
Nombre	Detalle Exacto	Comentarios
Norma utilizada	IEC 62631-3-1	El ensayo se realizará conforme a la norma del año 2023 [3], para determinar la resistencia y resistividad volumétrica de materiales aislantes eléctricos mediante tensión continua.
Tensión utilizada	100 V	Aplicada en continua mediante el electrómetro de KEITHLEY 6517A.
Electrodos utilizados	Tipo C	Se utilizan electrodos anulares propios del equipo Resistivity Test Fixture 8009 [20]. Véase Figura ??.
Circuito de pruebas	Sistema de tres terminales	Presentado en la Figura ??, el electrodo protector es el anular exterior.
Probeta	Placas de 100 mm x 100 mm x 1 mm	Se usarán tres probetas como las mostradas en la Figura 14. La medición del espesor se corroboró por medio de un pie de metro digital.
Acondicionamiento	20°C y 64% HR por 1 días	Norma IEC 60212 [17] (clima estándar B) recomienda 23°C y 50% HR por 4 días.

**Tabla 7:** Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad volumétrica de materiales aislantes eléctricos.

En las Figuras 12 y 13 se presenta la disposición de los electrodos y el circuito de pruebas utilizado, respectivamente.



**Figura 12:** Electrodo utilizado en ensayo de resistividad volumétrica y superficial. Disposición de electrodos Tipo C: electrodos anulares. Según Norma IEC 62631-3-1. [3]

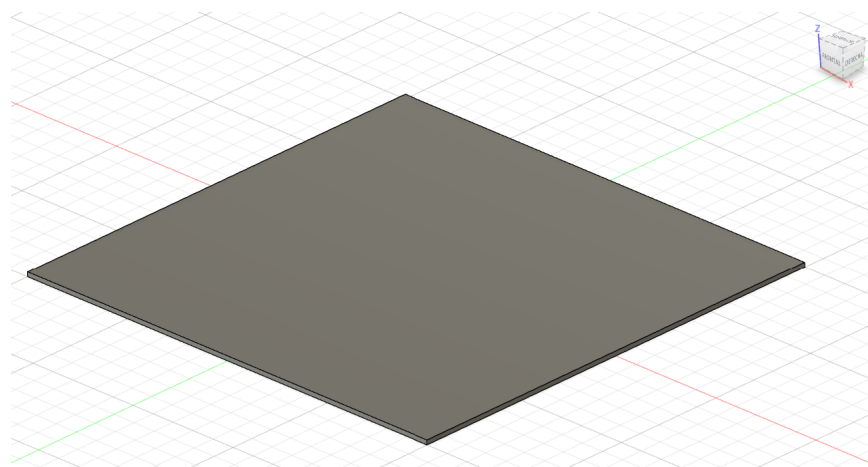


**Figura 13:** Esquema del circuito de pruebas para el ensayo de resistividad volumétrica. Electrodo anular. Norma IEC 62631-3-1. [3]

Las dimensiones de los electrodos utilizados son:

- $d_1$  : 5.241 cm
- $d_2$  : 5.558 cm
- $d_3$  : 9.900 cm
- $d_m$  : 5.400 cm

Por normativa, se usarán 3 probetas en forma de placas cuadradas, como las mostrada en la Figura 14, cuyas dimensiones son 100 mm x 100 mm x 1 mm.



**Figura 14:** Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayos de resistividad superficial y volumétrica.

El espesor de la muestra se midió en 5 puntos diferentes por medio de un pie de metro digital. El resultado arroja que se cuenta con un espesor de 1 mm  $\pm$ 0.2 mm de espesor.

### 3.1.3. Equipo de medición

Los equipos utilizados para esta medición son: el Model 8009 Resistivity Test Fixture y el electrómetro 6517A de KEITHLEY. La conexión de ambos equipos se presenta a detalle en el manual del equipo [20].

En la Figura 15 se presenta una imagen de los equipos utilizados para el ensayo de resistividad volumétrica.



Figura 15: Imagen del equipo 8009 Resistivity Test Fixture y el electrómetro 6517A de KEITHLEY.

### 3.1.4. Procedimientos

Luego de acondicionar la muestra adecuadamente, se posicionará la probeta entre los electrodos del equipo 8009, los cuales serán conectados al electrómetro 6517A. A continuación, y sin exceder los 2 minutos posteriores al acondicionamiento o pretratamiento, se aplicará una tensión continua. La resistencia volumétrica se calculará 1 minuto después de haber aplicado dicha tensión.

Este procedimiento se deberá repetir para tres probetas distintas.

Respecto al manejo del equipos, se debe seleccionar la medida de resistencia volumétrica mediante un interruptor específico en el 8009. Para el 6517A, será necesario ajustar el nivel de tensión aplicada y los rangos de tensión y corriente que mejor se adapten a la medición. Por último, se debe registrar la resistencia indicada por el equipo y, mediante la relación indicada en la teoría, determinar la resistividad volumétrica.

### 3.1.5. Resultados

La Tabla 8 se presentan los datos resultantes de las mediciones de resistencia y resistividad volumétrica.

-	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Promedio
	$R_v [T\Omega]$	$\rho [T\Omega \cdot cm]$	$R_v [T\Omega]$	$\rho [T\Omega \cdot cm]$	$R_v [T\Omega]$	$\rho [T\Omega \cdot cm]$	$\rho [\Omega \cdot cm] \cdot 10^{14}$
<b>LCD</b>	70,2	16.082,6	5,1	1.163,3	56,5	12.938,5	100,6
<b>SLA</b>	1,3	304,5	4,9	1.142,7	3,4	780,9	7,4
<b>FDM</b>	190,4	43.601,6	105,0	24.045,0	87,5	20.037,5	292,2

Tabla 8: Datos resultantes de ensayo de resistencia y resistividad volumétrica de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D

### 3.1.6. Comentarios

Los resultados obtenidos de las tres tecnologías proporcionan datos consistentes y adecuados en términos de resistencia y resistividad volumétrica para aislantes sólidos (polímeros termoplásticos). Estos resultados presentan un orden de magnitud similar al de la poliamida ( $> 10^{14}[\Omega \cdot cm]$ ). La tecnología FDM muestra la resistividad volumétrica más alta, seguida por la LCD y luego la SLA.

Los instrumentos de medición registraron corrientes en la escala de pico-amperios; por tanto, cualquier variación en las condiciones ambientales, la polarización del material, entre otros factores, podía influir en los valores de resistencia registrados. Sin embargo, estas variaciones no modificaron de manera considerable el orden de magnitud de las mediciones.

## 3.2. Resistividad superficial

### 3.2.1. Teoría

La resistencia superficial es una medida de cuan bien un material puede resistir el flujo de corriente eléctrica a lo largo de su superficie. Si bien, el valor de resistencia tiene relación con las propiedades físicas y químicas de la superficie del material, en su mayor parte esta relacionada con factores ambientales, como la presencia de contaminantes, humedad en el ambiente o variaciones de temperatura, los cuales pueden afectar la movilidad de los portadores de carga de la superficie del material.

La resistencia superficial ( $R_s$ ), en ohmios ( $\Omega$ ), se calcula dividiendo el voltaje de prueba ( $V$ ) por la corriente entre electrodos ( $A$ ).

La resistividad superficial ( $\sigma$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{g} R_s$$

donde

- $R_s$  : es la resistencia superficial en  $\Omega$ .
- $g$  : es la distancia entre el electrodo protegido y anular, que es 0.125 pulgadas.
- $P$  : es el perímetro efectivo del electrodo protegido.

Para el equipo 8009, que utiliza electrodos anulares,  $P$  se calcula de la siguiente manera:

$$P = D_0 \pi$$

donde  $D_0$  es el diámetro efectivo del electrodo protegido, cuyo valor es 5.40 [cm].

Por lo tanto, al sustituir los valores de  $g$  y  $P$ , la ecuación para definir la resistividad superficial queda de la forma:

$$\sigma = \frac{2.125\pi}{0.125} R = 53.4 R_s \quad (3.2)$$

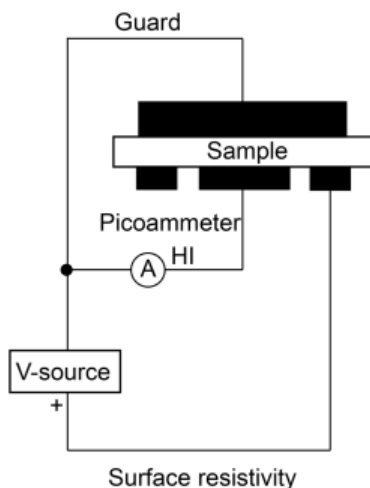
### 3.2.2. Aspectos relevantes

Los aspectos relevantes sobre las condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad superficial de los materiales se presentan en la Tabla 9.

Nombre	Detalle Exacto	Comentarios
Norma utilizada	IEC 62631-3-2	El ensayo se realizará conforme a la norma del año 2015 [4], para determinar la resistencia y resistividad superficial de materiales aislantes eléctricos mediante tensión continua.
Tensión utilizada	100 V	Aplicada en continua mediante el electrómetro de KEITHLEY 6517A.
Electrodos utilizados	Tipo C	Se utilizan electrodos anulares propios del equipo Resistivity Test Fixture 8009 [20]. Véase Figura ??.
Circuito de pruebas	Sistema de tres terminales	Presentado en la Figura 16, el electrodo protector es el anular exterior.
Probeta	Placas de 100 mm x 100 mm x 1 mm	Se usarán 3 probetas como las mostradas en la Figura 14. La medición del espesor se corroboró por medio de un pie de metro digital.
Acondicionamiento	20°C y 64% HR por 1 días	Norma IEC 60212 [17](clima estándar B) recomienda 23°C y 50% HR por 4 días.

**Tabla 9:** Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia y resistividad superficial de materiales aislantes eléctricos.

En la Figura 16 se presenta el circuito de pruebas utilizado. La disposición de los electrodos es idéntica a la presentada en la Figura 12



**Figura 16:** Esquema del circuito de pruebas para el ensayo de resistividad superficial. Electrodo anulares. Norma IEC 62631-3-2. [4]

Las dimensiones de los electrodos utilizados son:

$d_1$	:	5.241 cm
$d_2$	:	5.558 cm
$d_3$	:	9.900 cm
$d_m$	:	5.400 cm

Por normativa, se usarán 3 probetas en forma de placas cuadradas, como las mostrada en la Figura 14, cuyas dimensiones son 100 mm x 100 mm x 1 mm.

El espesor de la muestra se midió en 5 puntos diferentes por medio de un pie de metro digital. El resultado arroja que se cuenta con un espesor de 1 mm  $\pm$ 0.2 mm de espesor.

### 3.2.3. Equipo utilizado

Al igual que en la medicion de resistividad volumétrica, los equipos utilizados son el Model 8009 Resistivity Test Fixture y el electrómetro 6517A de KEITHLEY [20].

### 3.2.4. Procedimientos

El procedimiento para determinar la resistividad superficial es idéntico al utilizado para determinar la resistividad volumétrica. La principal diferencia se basa en seleccionar la medida de resistencia superficial por medio de un interruptor específico en el 8009.

### 3.2.5. Resultados

La Tabla 10 se presentan los datos obtenidos de las mediciones de resistencia y resistividad superficial.

-	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Promedio
	$R_s[T\Omega]$	$\sigma[T\Omega/sq]$	$R_s[T\Omega]$	$\sigma[T\Omega/sq]$	$R_s[T\Omega]$	$\sigma[T\Omega/sq]$	$\sigma[\Omega/sq] \cdot 10^{14}$
<b>LCD</b>	27,3	1.460,5	20,6	1.098,4	2,7	141,5	9,0
<b>SLA</b>	1,6	83,3	115,0	6.141,0	2,6	138,3	21,2
<b>FDM</b>	30,3	1.619,9	7,4	396,7	9,3	495,5	8,37

**Tabla 10:** Datos resultantes de ensayo de resistencia y resistividad superficial de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D

### 3.2.6. Comentarios

Los resultados obtenidos de las tres tecnologías proporcionan datos consistentes y adecuados en términos de resistencia y resistividad superficial para aislantes sólidos (polímeros sintéticos termoplásticos). Estos resultados presentan un orden de magnitud similar al de la poliamida ( $> 10^{13}[\Omega \cdot cm]$ ). La tecnología SLA muestra la resistividad superficial más alta, seguida por la LCD y luego la FDM. No obstante, las diferencias presentadas son mínimas.

Los instrumentos de medición registraron corrientes en la escala de picoamperios; por tanto, cualquier variación en las condiciones ambientales, la polarización del material, entre otros factores, podía influir en los valores de resistencia registrados. Sin embargo, estas variaciones no modificaron de manera considerable el orden de magnitud de las mediciones.

### **3.3. Resistencia al tracking**

#### **3.3.1. Teoría**

El ensayo de resistencia al tracking en la caracterización de materiales es una evaluación crítica diseñada para medir la capacidad de un material aislante para resistir la formación de caminos conductivos bajo la influencia de tensión eléctrica superficial y condiciones de alta humedad y contaminación. Este fenómeno, conocido como tracking, es una forma de deterioro que puede ocurrir en los materiales aislantes expuestos a condiciones de alta humedad y contaminación, conduciendo eventualmente al fallo eléctrico por cortocircuito, carbonizando el material aislante y formando un camino conductivo permanente.

El ensayo de resistencia al tracking se realiza aplicando una tensión eléctrica específica a través de dos electrodos situados en la superficie del material bajo prueba en presencia de un contaminante conductivo líquido. La resistencia al tracking se evalúa según la duración que el material puede soportar esta condición antes de que se desarrolle un camino conductivo que resulte en un cortocircuito. Los resultados de estos ensayos se utilizan para clasificar los materiales según su resistencia al tracking, lo que es fundamental para la selección de materiales en aplicaciones donde la confiabilidad eléctrica es crucial.

#### **3.3.2. Aspectos relevantes**

Los aspectos relevantes sobre las condiciones establecidas para el ensayo de resistencia al tracking de los materiales se presentan en la Tabla [11](#).

Nombre	Detalle Exacto	Comentarios
Norma utilizada	IEC 60587	El ensayo se realizará conforme a la norma del año 2022 [5], que proporciona métodos para la evaluación de materiales aislantes eléctricos para uso en condiciones ambientales severas a frecuencias entre 45 [Hz] y 65 [Hz] mediante la evaluación de la resistencia al tracking utilizando un contaminante líquido y muestras planas inclinadas
Tensión utilizada	4,5 [kV ]	se regula desde cero hasta el valor de tensión necesario a través de un autotransformador variable.
Electrodos utilizados	Electrodo superior e inferior por normativa	los electrodos superior e inferior se presentan en la Figura ?? y ??, respectivamente.
Circuito de pruebas	Presentado en la Figura 18	El sistema real fue confeccionado en LAT UTFSM y se presenta en las Figuras ??, 20 y ??.
Probeta	Placas de 120 mm x 50 mm x 3 mm	Se usarán cinco probetas, como las mostradas en la Figura 19. La medición del espesor se corroboró por medio de un pie de metro digital.
Contaminante	Agua destilada y NH <sub>4</sub> Cl (cloruro de amonio)	El sistema debe hacer gotear el contaminante a un caudal de 0,6 [ml/min]
Acondicionamiento	20°C y 64% HR por 5 días	Norma IEC 60212 [17] (clima estándar B) recomienda 23±2°C y 50±5% HR por 4 días.

**Tabla 11:** Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de resistencia al tracking de materiales aislantes.

En las Figuras 17 y 18 se presenta la geometría de electrodos y el circuito de prueba utilizado, respectivamente.



separados por  $50 \text{ [mm]} \pm 0,5 \text{ [mm]}$ .

En la Figura 20 se presentan los amperímetros, el sistema de soportes, el sistema de goteo y el auto-transformador utilizado para el ensayo. Para más detalle consultar Anexo.



**Figura 20:** Amperímetros y sistema de soportes utilizados en ensayo de resistencia al tracking.

### 3.3.4. Procedimientos

Una vez montado el sistema de medición, se inicia con el bombeo del líquido contaminante. Luego, se energiza el sistema mediante el auto transformador hasta lograr la tensión requerida por norma ( $4,5 \text{ [kV]}$ ) en no más de diez segundos y se comienza a registrar el tiempo para medir la duración del ensayo.

La tensión se mantiene constante hasta que se cumpla el criterio de término para este ensayo, no excediendo las 6 horas. Una vez cumpliéndose el criterio de término se evalúa y clasifica el material en función de la respuesta observada.

Los criterios de término son que ocurra una perforación en alguna de las placas, que se incendie o que la corriente permanente supere los  $60 \text{ [mA]}$ .

### 3.3.5. Resultados

Previo a la realización del ensayo, el contaminante cuenta con una conductividad de  $2,34 \text{ [mS/cm]}$ .

El criterio de termino utilizado en la práctica fue la inflamación de una de las probetas ensayadas. En este sentido, al menos una de las cinco probetas de cada tecnología presentó inflamación. Sin embargo, las otras probetas solo mostraron una ligera carbonización y ninguna superó los  $60 \text{ mA}$ .

La tecnología que mayor tiempo resistió antes de que la probeta se inflamara fue la impresa con tecnología FDM con 30 minutos, seguida de la impresa con LCD con 28 minutos, la ultima fue la impresa con tecnología SLA, la cual resistió 7 minutos.

### 3.3.6. Comentarios

Dado los resultados, se puede concluir que la probeta que presentó mejor respuesta fue la FDM, seguida de la LCD y, finalmente, la SLA.

Esto indica que las probetas impresas con FDM y LCD resisten mejor la creación de caminos conductivos en situaciones de alta contaminación y humedad.

### 3.4. Rigidez dieléctrica

#### 3.4.1. Teoría

La rigidez dieléctrica se define como el máximo campo eléctrico que un material puede soportar sin que ocurra una falla eléctrica, y se mide en voltios por unidad de longitud. La falla ocurre cuando el campo eléctrico aplicado es lo suficientemente fuerte como para desencadenar una descarga eléctrica a través del material. Si el campo alcanza un valor crítico, los electrones pueden ganar la suficiente energía para liberarse de sus átomos y chocar con otros átomos, liberando más electrones. Este proceso se conoce como ionización y puede ocurrir una cascada que resulta en una ruptura dieléctrica, creando caminos conductores a través del material.

La relación entre la intensidad de campo eléctrico y la tensión eléctrica es:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (3.3)$$

donde:

- $\Delta V$  : es la tensión eléctrica en [V].
- $d$  : es distancia en [m].
- $E$  : es la intensidad de campo eléctrico en [V/m].

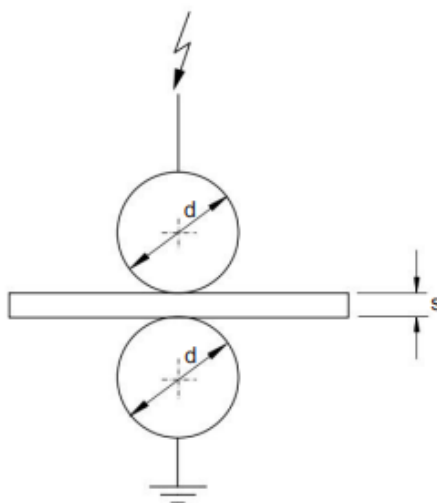
#### 3.4.2. Aspectos relevantes

Los aspectos relevantes sobre las condiciones establecidas para el ensayo de rigidez dieléctrica de los materiales se presentan la Tabla [12](#).

Nombre	Detalle Exacto	Comentarios
Norma utilizada	IEC 60243-1	El ensayo se realizará conforme a la norma del año 2013 [6], que proporciona métodos de prueba para la determinación de la rigidez dieléctrica a corto plazo de materiales aislantes sólidos a frecuencias de potencia entre 48Hz y 62 Hz.
Tensión utilizada	500 V/s	Tensión se elevará desde cero a un ritmo uniforme hasta producir la avería.
Electrodos utilizados	Electrodos esféricos	Se utilizan dos esferas idénticas de 20 mm de diámetro, como se aprecia en la Figura 21.
Circuito de pruebas	equipo BAUR	realizar.
Probeta	Placas de 50 mm x 50 mm x 1 mm	Se usarán 5 probetas, como las mostradas en la Figura 22. La medición del espesor se corroboró por medio de un pie de metro digital.
Medio circundante	aceite vegetal	según IEC 60296. No se realizó ningún tratamiento previo al aceite.
Acondicionamiento	20°C y 64% HR por 5 días	Norma IEC 60212 [17] (clima estándar B) recomienda 23+/-2°C y 50+/-5% HR por 4 días.

**Tabla 12:** Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de rigidez dieléctrica de materiales aislantes.

Los electrodos utilizados son dos esferas idénticas de diámetro  $d=20$  mm. La disposición de electrodos se presenta en la Figura 21.

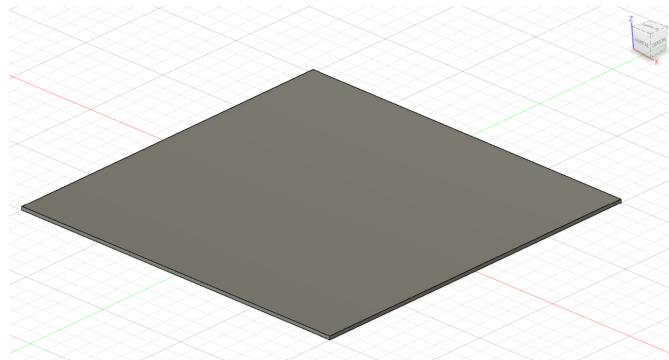


**Figura 21:** Electrodos esféricos utilizados en ensayo de rigidez dieléctrica según Norma IEC 60243-1. [6]

El circuito de prueba del equipo Baur consiste en un transformador elevador alimentado desde una fuente de baja tensión sinusoidal variable. Para proteger la fuente de tensión contra daños, se deberá

contar con un dispositivo que desconecte el suministro de energía dentro de unos pocos ciclos en caso de ruptura de la muestra. También, es deseable incluir una resistencia de un valor adecuado en serie con los electrodos, para así limitar el daño por sobre tensión.

Para el siguiente ensayo se usarán 5 probetas en forma de placas, como las mostrada en la Figura 22, cuyas dimensiones son 50 mm x 50 mm x 1 mm.

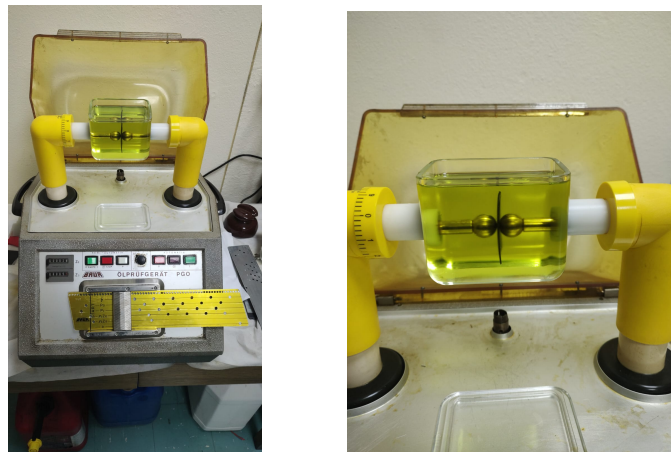


**Figura 22:** Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayo de rigidez dieléctrica.

El espesor de la muestra se midió en 5 puntos diferentes por medio de un pie de metro digital. El resultado arroja que se cuenta con un espesor de 1 mm  $\pm$ 0.2 mm de espesor.

### 3.4.3. Equipo de medición

El equipo utilizado, fabricado por la empresa BAUR, se muestra en la Figura ?? y está ubicado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM.



**Figura 23:** Equipo Baur para el ensayo de rigidez dieléctrica.

### 3.4.4. Procedimientos

En este procedimiento se realiza la prueba de corta duración y, por tanto, de rápido aumento de tensión. El equipo BAUR se debe encender, se debe elegir la tasa de aumento y, por medio de una placa agujereada, se da inicio al aumento de tensión. La tensión se elevará desde cero con una tasa de aumento de 500 V/s hasta producir la ruptura, registrándose el tiempo requerido y la tensión alcanzada.

### 3.4.5. Resultados

En la Tabla 13 se presentan los datos resultantes de la medición de rigidez dieléctrica.

-	Probeta 1 [kV/mm]	Probeta 2 [kV/mm]	Probeta 3 [kV/mm]	Probeta 4 [kV/mm]	Probeta 5 [kV/mm]	promedio [kV/mm]
LCD	37	36	38	38	35	36.8
SLA	30	28	31	32	30	30.2
FDM	31	33	31	31	31	31.4

**Tabla 13:** Datos resultantes de ensayo de rigidez dieléctrica de los materiales impresos para las diferentes tecnologías de impresión 3D

### 3.4.6. Comentarios

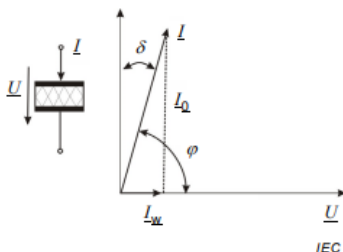
La tecnología LCD fue la que presentó mejor respuesta, con un valor promedio de 36.8 [kV/mm]. La siguiente tecnología con mejor respuesta fue FDM, con un valor promedio de 31.4 [kV/mm]. Por último, el valor promedio de la tecnología SLA es de 30.2 [kV/mm].

Por otro lado, según la hoja de datos del material 18, la poliamida presentó un valor de rigidez dieléctrica de 25 [kV/mm].

## 3.5. Permittividad relativa y factor de disipación

### 3.5.1. Teoría

El factor de disipación, también llamado tangente de pérdidas o  $\text{Tan}(\delta)$ , es un parámetro básico para definir el estado de pérdidas energéticas de un materiales dieléctrico cuando se somete a un campo eléctrico alterno. Este se define como la relación entre la potencia perdida en forma de calor y la potencia almacenada. Matemáticamente, se expresa como el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión aplicada a un material (Figura 24). Otra forma de expresar al factor de disipación es en términos de la permitividad compleja, tal como lo indica la ecuación (3.5).



**Figura 24:** Factor de disipación dieléctrica.

La permitividad  $\epsilon$  de un material aislante es una medida fundamental en electromagnetismo que describe la capacidad de un dieléctrico para almacenar energía electrostática en presencia de un campo eléctrico. Matemáticamente, se expresa como la relación entre la densidad de flujo eléctrico ( $D$ ) y la intensidad del campo eléctrico ( $E$ ) en el material:

$$\epsilon = \frac{D}{E}$$

donde:

- $D$  : es la densidad de flujo eléctrico en coulombs por metro cuadrado [ $C/m^2$ ].
- $E$  : es la intensidad del campo eléctrico en voltios por metro [ $V/m$ ].
- $\epsilon$  : es la permitividad de un material en faradios por metro [ $F/m$ ].

La permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) tiene un valor aproximado de  $8,854187817 \times 10^{-12} [\frac{F}{m}]$ .

La permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) es la razón entre la permitividad del material ( $\epsilon$ ) y la permitividad de vacío ( $\epsilon_0$ ).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

La permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) es una medida adimensional que indica cuantas veces el material puede almacenar energía eléctrica en comparación con el vacío. También, puede definirse como la razón entre la capacitancia del material ( $C_m$ ) con la capacitancia de un condensador equivalente en vacío ( $C_0$ ).

$$\epsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} \quad (3.4)$$

donde:

- $C_m$  : es la capacitancia del material en faradios [F]. En la práctica, se usa  $C_p$  del modelo paralelo.
- $C_0$  : es la capacitancia del vacío, la cual se define como  $C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ , donde  $A$  es el área del electrodo y  $d$  la separación.

La permitividad relativa compleja es una representación en números complejos, y es principalmente útil en condiciones de campos eléctricos sinusoidales.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = |\epsilon_r| \cdot e^{-j\delta}$$

donde:

- $\epsilon_r'$  : es la permitividad relativa real, que representa la capacidad del material para almacenar energía eléctrica.
- $\epsilon_r''$  : es la permitividad relativa imaginaria, que representa las pérdidas energéticas en el material.

La permitividad real puede definirse de la misma forma que se presenta en la ecuación (3.4).

La permitividad relativa imaginaria puede definirse como la razón entre la conductancia del material ( $G_m$ ) con la capacitancia de un condensador equivalente en vacío ( $C_0$ ) y la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi f$ ).

$$\epsilon_r'' = \frac{G_p}{\omega C_0}$$

donde:

- $G_m$  : es la conductancia del material en siemens [S].
- $\omega$  : es la frecuencia angular de la señal aplicada  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia en [Hz].

El factor de disipación puede quedar definido mediante la descomposición de la permitividad relativa compleja de la siguiente forma:

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \tag{3.5}$$

Producto de que los materiales dieléctricos pueden ser modelados por circuitos serie o paralelo con elementos resistivos y capacitivos (ver Figura 25), el factor de disipación, el cual se define como el desfase entre la corriente y la tensión aplicada, puede quedar representado mediante estos parámetros de la siguiente forma:

$$\tan(\delta) = \omega R_s \cdot C_s = \frac{1}{\omega C_p \cdot R_p} \tag{3.6}$$

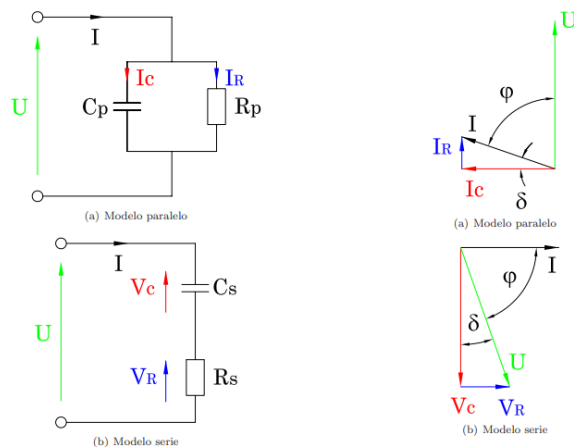


Figura 25: Circuito eléctrico equivalente de un material aislante. [7]

### 3.5.2. Aspectos relevantes

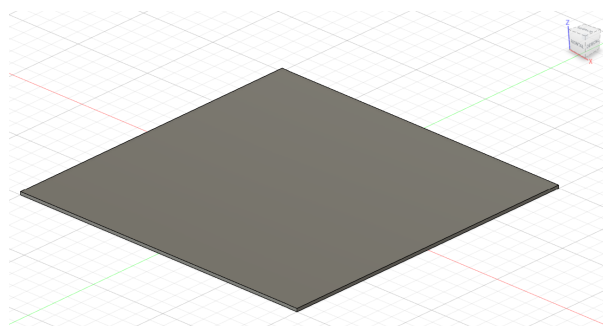
Los aspectos relevantes sobre las condiciones establecidas para el ensayo de permitividad relativa y factor de disipación se presentan en la Tabla 14.

Nombre	Detalle Exacto	Comentarios
Norma utilizada	IEC 62631-2-1	El ensayo se realizará conforme a la norma del año 2018 [16], que proporciona métodos de prueba para la determinación de las propiedades de permitividad y factor de disipación de materiales aislantes sólidos (método CA desde 0,1 [Hz] a 10 [MHz])
Frecuencia utilizada	Barridos desde 5 [Hz] hasta 5 [MHz]	Se determinaron valores para 1 [MHz]
Electrodos utilizados	Placas paralelas	Ver figura 27
Probeta	Placas de 10 mm x 10 mm x 1 mm	Se usarán 5 probetas, como las mostradas en la Figura 26. La medición del espesor se corroboró por medio de un pie de metro digital.
Tensión aplicada	Tensión alterna	1 [V].
Acondicionamiento	20°C y 64% HR por 5 días	Norma IEC 60212 [17] (clima estándar B) recomienda 23±2°C y 50±5% HR por 4 días.

**Tabla 14:** Resumen de los parámetros y condiciones establecidas para el ensayo de permitividad relativa y factor de disipación de materiales aislantes sólidos.

Los electrodos utilizados son placas paralelas creados en el Laboratorio de Física de la Universidad de Santiago de Chile (ver Figura 27).

Por normativa, se requieren 5 probetas en forma de placas cuadradas de dimensiones 10 mm x 10 mm x 1 mm, como se muestra en la Figura 22



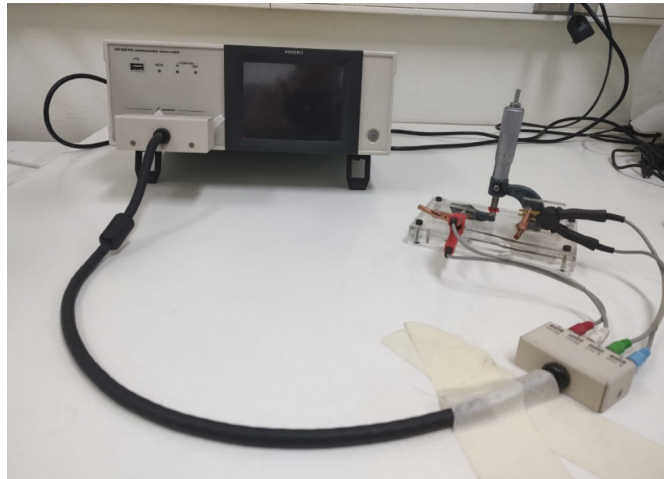
**Figura 26:** Modelo 3D de la probeta utilizada en ensayo de permitividad relativa y factor de disipación.

El espesor de la muestra se midió en 5 puntos diferentes por medio de un pie de metro digital. El resultado arroja que se cuenta con un espesor de 1 mm ±0.2 mm de espesor.

### 3.5.3. Equipo de medición

El equipo utilizado es un analizador de impedancia marca HIOKI que, mediante espectroscopia dieléctrica, determina los valores relevantes de capacitancia y resistencia de los modelos serie y paralelo del dieléctrico. Los electrodos, como ya se indicó, son placas paralelas creados en el departamento de física

de la USACH. Estos se presentan en la Figura 27.



**Figura 27:** Analizador de impedancia marca HIOKI utilizado para mediciones de permitividad relativa y factor de disipación

#### 3.5.4. Procedimientos

Primeramente, se debe posicionar la probeta entre los electrodos, luego se enciende el equipo y se configura para que entregue los datos de capacitancia y resistencia del modelo paralelo, los cuales son necesarios y suficientes para determinar la permitividad relativa y factor de disipación. Se posiciona el marcador del equipo para que entregue en pantalla los valores  $C_p$  y  $R_p$  a la frecuencia de 1 [MHz]. También, se deben configurar una serie de parámetros que van desde la tensión aplicada (1 [V]), los límites del espectro de frecuencia a analizar (5 [Hz] - 5 [MHz]), la cantidad de datos a medir (800 pts), entre otros.

Con los datos de  $C_p$  y conociendo  $C_0$  se puede determinar la permitividad relativa real mediante la ecuación (3.4). Luego, conociendo  $C_p$ ,  $R_p$  y  $f$ , se puede determinar el factor de disipación mediante la ecuación (3.6). Finalmente, mediante la relación (3.5), se obtiene la permitividad relativa imaginaria y, por tanto, el modulo de la permitividad relativa compleja.

#### 3.5.5. Resultados

En la Tabla 15 se presentan los datos resultantes de la medición de permitividad relativa y factor de disipación para una frecuencia de 1 [MHz].

Factor de Disipación	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	Promedio
LCD	0.0345	0.0338	0.0339	0.0347	0.0342	0.0342
SLA	0.0398	0.0263	0.0399	0.0301	0.0345	0.0341
FDM	0.0310	0.0340	0.0320	0.0330	0.0330	0.0326
Permitividad Relativa	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	Promedio
LCD	1.66	1.68	1.65	1.64	1.71	1.67
SLA	3.45	2.20	2.95	2.42	3.25	2.85
FDM	1.83	1.16	1.40	1.39	1.70	1.50

**Tabla 15:** Resultados del ensayo para determinar los factores de disipación y la permitividad relativa de las probetas impresas.

### 3.5.6. Comentarios

En cuanto al factor de disipación o tangente delta, se esperan valores pequeños (menores a 0.1), los resultados son prácticamente el doble de los presentados por el Ertalon 6, sin embargo, está dentro de los parámetros aceptables para un aislante. Entre las impresiones, la tecnología con menor factor de disipación es la FDM, seguida por la SLA y la LCD.

Con respecto a la permitividad relativa, se espera que cuente con valores intermedios entre 1 y 10. La tecnología con mayor permitividad relativa es la SLA, seguida por LCD y FDM. La permitividad del Ertalon 6 es practicamente el doble de las presentadas en LCD Y FDM.

### 3.6. Conclusiones

En la Tabla 16 se presentan los resultados de los ensayos realizados a las probetas impresas y al Ertalon 6.

Resumen	LCD	SLA	FDM	ERTALON 6
Resistividad Volumétrica [ $\Omega \cdot cm$ ]	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$
Resistividad Superficial [ $\Omega/sq$ ]	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	$> 10^{13}$
Resistencia al Tracking	27 [min]	7 [min]	30 [min]	-
Rigidez Dieléctrica [kV/mm]	36.8	30.2	31.4	25
Permitividad Relativa (1MHz)	1.67	2.83	1.50	3.20
Factor de Disipación (1 MHz)	0.0342	0.0341	0.0326	0.016

**Tabla 16:** Resumen de propiedades dieléctricas de los materiales.

- En cuanto a la resistividad volumétrica, las probetas presentaron resultados en el rango de  $10^{14} - 10^{16}[\Omega \cdot cm]$ , similar al Ertalon 6 ( $> 10^{14}$ ). Esto indica que, para este parámetro, todas las probetas son apropiadas.
- Respecto a la resistividad superficial, todas las probetas presentaron respuestas del orden de  $10^{14}[\Omega/sq]$ , superiores al Ertalon 6 ( $> 10^{13}$ ). Esto sugiere que, en función de este parámetro, todas las probetas son adecuadas.
- La rigidez dieléctrica de todas las muestras fue superior a la del Ertalon 6 ( $25[kV/mm]$ ), destacando la tecnología LCD con un promedio de  $36,8[kV/mm]$ , seguida de FDM con  $31,4[kV/mm]$  y SLA con  $30,2[kV/mm]$ . Esto indica que, según este parámetro, la tecnología LCD es la más adecuada,

seguida de FDM y SLA. Los resultados presentan similitudes con los valores estándar de materiales como la porcelana, algunos cerámicos, el poliestireno, el PTFE y el vidrio.

- La permitividad relativa del Ertalon 6 (3,20) fue mayor que la de todas las muestras, siendo la diferencia más notable en FDM y LCD, cuyos valores son 1,50 y 1,67, respectivamente. La tecnología con mayor permitividad relativa fue SLA con 2,83. Esto indica que, según este parámetro, las tecnologías más adecuadas son FDM y LCD, ya que un valor cercano a uno permite una menor reducción del campo eléctrico en las fronteras de material/aire, lo que es beneficioso para el propósito.
- El factor de disipación del Ertalon 6 (0,016) fue menor al de todas las muestras impresas, siendo aproximadamente la mitad de estos valores. Las diferencias entre los valores resultantes de las impresiones son pequeñas, presentando respuestas similares: LCD con 0,0342, SLA con 0,0341 y FDM con 0,0326. Esto indica que, en función de este parámetro, todas las tecnologías presentan pérdidas similares. Además, estos valores coinciden con los valores estándar del PVC y de la resina epoxi ( $30-100 \cdot 10^{-3}$ ).
- El ensayo de resistencia al tracking indicó que los aislantes impresos con FDM y LCD son más apropiados para evitar la formación de caminos conductivos en superficies con alta humedad y/o contaminación.

Según el análisis comparativo anterior, Las tecnologías y materiales de impresión estandar utilizados presentan una respuesta dieléctrica aceptable y comparable con la del Ertalon, existiendo una amplia gamma de materiales con propiedades eléctricas y mecánicas con más potencial. ciertas tecnologías resultan superiores a otras dependiendo del ensayo realizado. En cuanto a la resistividad volumétrica y superficial, todas las tecnologías presentan respuestas similares. En el ensayo de rigidez dieléctrica, la tecnología LCD demostró ser superior, mientras que en el ensayo de factor de disipación, aunque todas ofrecieron respuestas prácticamente iguales, la tecnología LCD entregó el valor más bajo, lo cual es deseable. Por otro lado, en el ensayo de permitividad relativa, tanto la FDM como la LCD mostraron los resultados más favorables. Finalmente, el ensayo de resistencia al tracking concluyó que las tecnologías LCD y FDM presentan el mejor desempeño.

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta el aspecto económico, donde las tecnologías FDM y LCD resultan menos costosas que la SLA (ya que son impresoras disponibles en la universidad), se descarta la opción de SLA. De igual forma, se puede descartar la tecnología FDM debido a la posible formación de cavidades de aire, independientemente de la densidad seleccionada. Estas cavidades afectan negativamente el rendimiento frente a descargas parciales, comprometiendo la integridad del material. Esto se debe a las limitaciones inherentes al funcionamiento de la FDM, como las temperaturas de extrusión y la sensibilidad en la deposición del material sólido.

La tecnología de impresión elegida para la confección del sistema dieléctrico es LCD, sin embargo, tanto FDM como SLA presentaron respuestas dieléctricas igualmente aceptables para su potencial uso en aislantes.

Los materiales de impresión estandar utilizados presentan respuestas dieléctricas aceptables y comparables con el Ertalon, existiendo una amplia gamma de materiales con propiedades eléctricas y mecánicas más favorables.

## 4. Evaluación eléctrica del SDEM

En esta sección se evalúa el correcto funcionamiento del enchufe minero con el aislante impreso mediante la tecnología 3D que mejor respuesta dieléctrica presentó previamente: LCD, considerando como guía lo indicado por la norma IEEE 386 del 2016. Este procedimiento es similar al utilizado por 3M para evaluar sus enchufes con aislante de Ertalon 6 [10].

Las probetas confeccionadas para la caracterización de la sección anterior fueron impresas con el material: resina estandar Anycubic. Pero dada su fragilidad, es que se generaron fisuras en los aislantes impresos. Por esta razón, y a modo de contraste, se utilizará otro par de aislantes impresos con resina ABS like Anycubic. Cabe mencionar que este último material no fue caracterizado dieléctricamente, pero se supone una mejor respuesta que la dada por la resina estandar, sumando la mejora en las propiedades mecánicas de la resina ABS. En la Tabla 17 se presentan las características de los aislantes denotados como 1 y 2, respectivamente.

Aislante	Impresora	Material
Aislante 1	Anycubic Photon Mono M55	Resina estándar de Anycubic
Aislante 2	Inspire II de Zortrax	Resina ABS like de Anycubic

**Tabla 17:** Impresoras y materiales utilizados para la impresión de aislantes mediante tecnología LCD

En la Tabla 18 se presentan las exigencias de ensayos en el estudio realizado por 3M para evaluar sus coplas tripolares móviles tipo SHD-GC clase 8 [kV], con capacidades de 250 y 400 [A], y aislantes de poliamida.

Propiedad	Método	Valor	Unidad
Descargas Parciales ( $< 3pC$ )	IEEE-386-1995	10	[kV]
Tensión aplicada (AC) por 1 min	IEEE-386-1995	25	[kV]
Tensión Continua por 15 min	IEEE-386-1995	50	[kV]
Tensión Impulso 1,7/45us	IEEE-386-1995	+65	[kV]
Tensión Impulso 1,6/45us	IEEE-386-1995	-75	[kV]
Sobre Temperatura	IEEE-386-1995	410	[A]

**Tabla 18:** Ensayos realizado por 3M al enchufe minero clase 8 [kV] con Ertalon 6. [10]

Con respecto a la normativa IEEE386-1995 y su actualización en 2016, se realizaron las siguientes consideraciones:

1. El ensayo de tensión continua no fue considerado como esencial por la norma IEEE386-2016.
2. Para el ensayo de descargas parciales, se modificó el requerimiento de  $<3$  [pC] a  $<5$  [pC] durante 60 [s].
3. La clase 8 [kV] no está especificada por IEEE386: Estándar para sistema separables de conectores de sistemas de distribución de energía de 2,5 [kV] a 35 [kV], siendo la primera clase definida 15 [kV] (Tabla 1-Columna 1).
4. Se propone una extrapolación de la Tabla 1 para especificar las exigencias de ensayo de la clase 8 [kV].

5. En consecuencia de lo anterior, se postulan las siguientes exigencias:

- Tensión mínima de extinción de descarga parcial para umbral de 5 [pC]  $\geq 7,5$  [kV]
- Tensión aplicada de 50 [Hz] durante 1 minuto,  $V_{ef} = 25$  [kV]
- Tensión de impulso, polaridad positiva: BIL(+)=65 [kV]
- Solicitación de corriente: 400 [A] por 15 minutos

Como se mencionó previamente, la norma IEEE 386 se utiliza a falta de una norma específica para coplas mineras tripolares. Al referirse a conectores separables, no es una guía exacta, especialmente en las mediciones de descargas parciales, que serán mayores (aprox. 20.000-50.000 [pC]) debido a diferencias constructivas. Sin embargo, las pruebas de impulso, tensión aplicada y temperatura son buenos indicadores de la calidad del sistema aislante.

#### 4.1. Descargas parciales

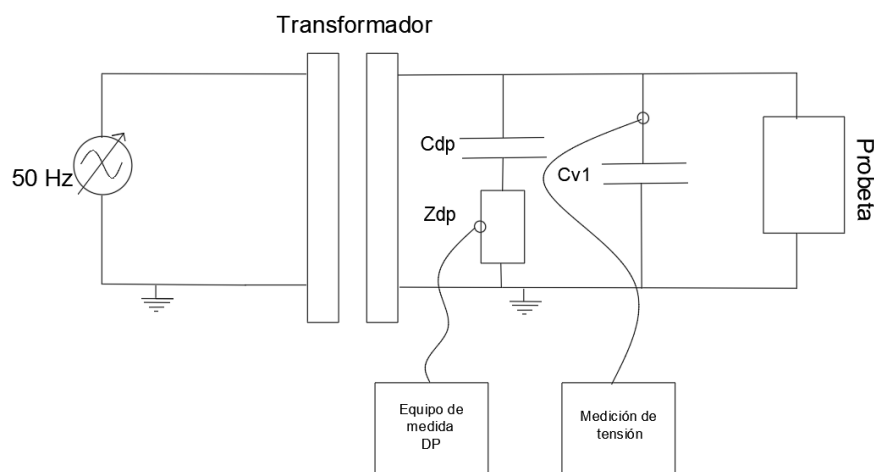
Las descargas parciales (DP) son fenómenos eléctricos de baja energía que ocurren en cavidades de aire presentes dentro de materiales aislantes. Estas descargas provocan la degradación del material, carbonizando el medio circundante y creando caminos conductivos que pueden afectar el rendimiento del sistema de aislamiento.

El objetivo de esta prueba, según lo establecido por la norma IEEE 386, es verificar que las lecturas de descargas parciales registradas durante el intervalo de tiempo entre los 3 y 60 segundos de aplicación de una excitación alterna, cuyo valor es superior en un 20 % a la tensión mínima de extinción especificada (7.5 [kV]), no excedan los 5 pC.

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 SA. En este documento se menciona que los valores promedios de descargas parciales en las coplas mineras son del orden de 20.000 [pC].

En base a esto, se tiene que para la medición de descargas parciales, según los procedimientos descritos, se espera registrar un valor de carga aparente mayor a 5 [pC], teniendo como límite superior una magnitud en torno a los 20.000 [pC].

El esquema circuital de medición utilizado para estas pruebas se presenta en la Figura 28.



**Figura 28:** Modelo circuital para el ensayo de descargas parciales.

La distribución de los equipos en el laboratorio de alta tensión de la universidad se muestra en la Figura 29.



**Figura 29:** Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de descargas parciales.

Los equipos empleados para esta prueba son:

- Transformador de tensión monofásico AMERICAN
- Control de tensión MULTI TEST SET CONTROL MODULE TYPE 273 HAEFELY
- Condensador  $C_{DP}$
- Cuadripolo
- Equipo de medida de Descargas Parciales (DP) OMICRON MCU 502 y calibrador de DP Presco AG
- Voltímetro y Divisor de tensión capacitivo CV1 HIPOTRONICS

#### 4.1.1. Procedimiento

El procedimiento de prueba comienza con la calibración del sistema utilizando el calibrador de DP Presco AG. Posteriormente, se incrementa la tensión hasta 10 kV, manteniéndola constante durante 1 minuto, mientras se monitorean los niveles de DP a través del software OMICRON.

#### 4.1.2. Resultados

##### Aislante 1

Solicitud : 10 [kV] - 50 [Hz] - 60 [s]

Descarga peak : 3.9 [nC]

La condición ambiental es: T=22°C, P=1006mbar, HR=59%.

##### Aislante 2

Solicitud : 10 [kV] - 50 [Hz] - 60 [s]

Descarga peak : 3 [nC]

La condición ambiental es: T=17°C, P=1015 mbar, HR=65 %.

Ruido base circuital y radiado de la cabina de ensayos. Resultado:  $< 1,5[pC]$ .

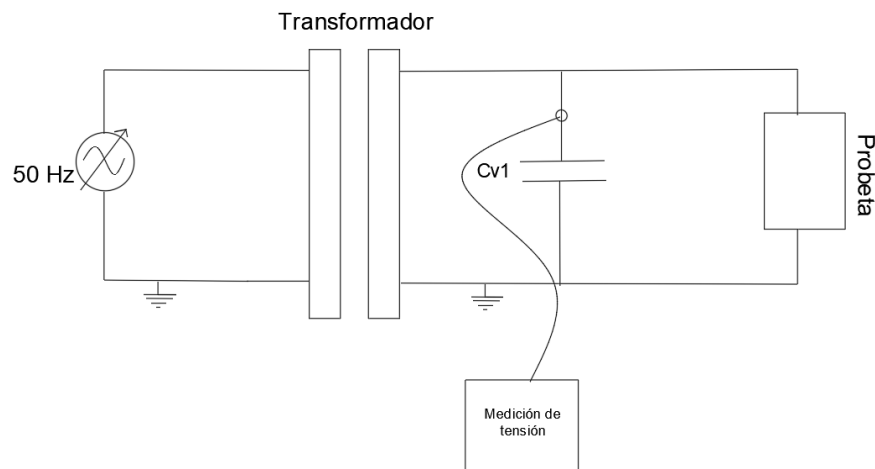
Según la información entregada por la industria y de la experiencia de 3M, ambos niveles de descargas parciales son aceptables en coplas mineras. El sistema aislante 1 presenta una fisura en uno de sus aisladores, lo que explica mayores niveles de descargas.

## 4.2. Tensión aplicada

El ensayo de tensión aplicada implica aplicar una tensión eléctrica alterna significativamente mayor a la tensión de operación nominal del sistema.

Según normativa, el objetivo de esta prueba es evaluar la integridad y el rendimiento del material aislante bajo condiciones de operación extremas. Esto es soportar 25 [kV] durante 60 segundos sin presentar daño visible de aislación.

El esquema circuital de medición utilizado para estas pruebas se presenta en la Figura 30.



**Figura 30:** Esquema de conexión de un transformador de AT a la muestra para ensayo de tensión aplicada. [7]

La distribución de los equipos en el laboratorio de alta tensión de la universidad se muestra en la Figura 31.



**Figura 31:** Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de tensión aplicada.

Los equipos empleados para esta prueba son:

- Transformador de tensión monofásico AMERICAN
- Control de tensión MULTI TEST SET CONTROL MODULE TYPE 273 HAEFELY
- Voltímetro y Divisor de tensión capacitivo CV1 HIPOTRONICS

#### 4.2.1. Procedimientos

En no más de 30 segundos, se debe elevar la tensión alterna (50 Hz) a 25 kV y mantenerla constante durante 1 minuto. Posteriormente, se inspecciona visualmente la muestra para asegurar la ausencia de caminos conductivos o cualquier indicio de deterioro en el aislante.

#### 4.2.2. Resultados

##### **Aislante 1**

Solicitud : 25 [kV] - 50 [Hz] - 60 [s]

Resultado : **LOGRADO**

El aislante no presenta daño visible luego de la excitación.

La condición ambiental es: T=22°C, P=1006mbar, HR=59 %.

##### **Aislante 2**

Solicitud : 25 [kV] - 50 [Hz] - 60 [s]

Resultado : **LOGRADO**

El aislante no presenta daño visible luego de la excitación.

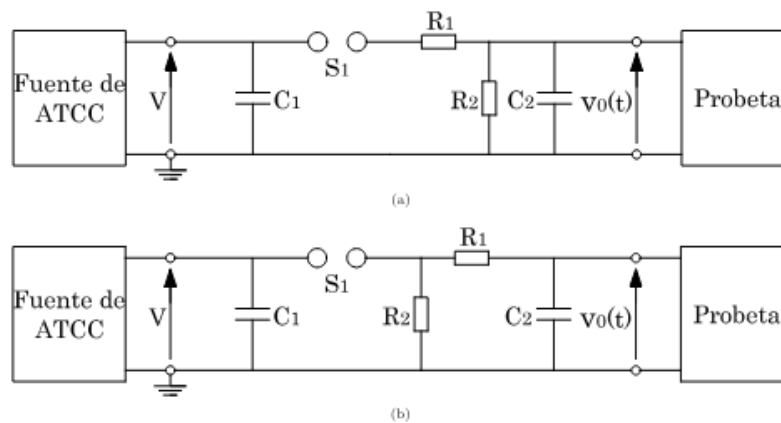
La condición ambiental es: T=17°C, P=1015 mbar, HR=65 %.

### 4.3. Tensión impulso

El objetivo de esta prueba es evaluar la integridad y rendimiento del material aislante bajo condiciones severas, como un intenso campo eléctrico transitorio producto de acciones similares a maniobras o rayos.

El ensayo de tensión impulso consta de aplicar una impulso de onda completa 1.2/50  $\mu$ s con el valor de cresta (BIL: +65 [kV]) especificado en la extrapolación de la Tabla 1 de la normativa [15] y considerando las tolerancias respectivas.

El esquema circuital de medición utilizado para estas pruebas se presenta en la Figura 32.



**Figura 32:** Modelo circuital del generador de impulsos.

donde:

- $C_1$  : Condensador de impulso
- $C_2$  : Condensador de carga
- $R_1$  : Resistencia de frente
- $R_2$  : Resistencia de cola
- $S$  : Espinterómetro de disparo

La distribución de los equipos en el laboratorio de alta tensión de la universidad se muestra en la Figura 33.



**Figura 33:** Distribución de equipos en laboratorio de alta tensión para el ensayo de impulso.

**4.3.1. Procedimientos**

Una vez conectados todos los elementos del sistema, se debe corroborar que estos generen un impulso dentro de los límites permitidos por norma para el tiempo de levantamiento, de descenso y BIL. Luego, conectando el enchufe al sistema, se eleva la tensión hasta producir el impulso, observando la forma de onda mediante un osciloscopio.

**4.3.2. Resultados**

Aislante 1		
Parámetro	Impulso positivo	Impulso negativo
Forma de onda	1.38/45 [ $\mu s$ ]	1.45/48 [ $\mu s$ ]
Cantidad de impulsos	3	3
BIL	+63 [kV]	-69 [kV]
Resultado	<b>Logrado</b>	<b>No logrado</b>
Aislante 2		
Parámetro	Impulso positivo	Impulso negativo
Forma de onda	1.51/47 [ $\mu s$ ]	1.45/48 [ $\mu s$ ]
Cantidad de impulsos	3	3
BIL	+64 [kV]	-74 [kV]
Resultado	<b>Logrado</b>	<b>Logrado</b>

**Tabla 19:** Resultados de pruebas de impulso en enchufes clase 8 kV con aislante 1 y aislante 2.

En el impulso negativo realizado al aislante 1, se aprecia que existe ruptura a través del aislante desde los 70 [kV]. Uno de los factores a tomar en cuenta es la fisura presente en uno de los aislantes, lo que reduciría la capacidad de resistir rupturas internas.

Las condiciones ambientales presentes en las mediciones al aislante 1 son: T=21°C, P=1003mbar, HR=60 %.

Las condiciones ambientales presentes en las mediciones al aislante 2 son:  $T=17^{\circ}\text{C}$ ,  $P=1015\text{ mbar}$ ,  $\text{HR}=65\%$ .

## 4.4. Ensayo de temperatura

### 4.4.1. Teoría

El ensayo de ampacidad, corriente sostenida, o ensayo de temperatura, consiste en determinar la capacidad de un conductor o elemento eléctrico para transportar corriente de manera confiable sin sobrecalentarse. En el caso particular de la copla tripolar, la circulación de corriente comienza en el cable, pasa por los pines macho/hembra de la copla, y continúa su camino a través del conductor hacia la máquina o extensión de cable. Debido al efecto Joule, los conductores y los pines de contacto se calientan, lo que puede afectar la capacidad del aislante. Esta prueba busca determinar la capacidad del aislante para soportar los aumentos de temperatura.

El equipo utilizado es un inyector de corriente PHOENIX HC75 ubicado en el laboratorio de alta tensión de la universidad, tal como se muestra en la Figura 34.



**Figura 34:** Equipo inyector de corriente PHOENIX HC75 utilizado para ensayo de temperatura.

### 4.4.2. Procedimientos

A través del software del equipo, se inyecta una corriente de 400 A durante 15 minutos. Simultáneamente, se utiliza una cámara termográfica para medir la temperatura del cable y del aislante.

### 4.4.3. Resultados

#### Aislante 1

Durante los 15 minutos se presentó un aumento de temperatura de 2°C en el aislante y no presentó daño aparente, siendo una respuesta aceptable.

#### Aislante 2

Durante los 15 minutos se presentó un aumento de temperatura de 1°C en el aislante y no presentó daño aparente, siendo una respuesta aceptable.

#### 4.5. Conclusión

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado, se concluye que los aislantes para enchufes mineros de clase 8 kV, fabricados mediante tecnología de impresión 3D, son viables desde el punto de vista dieléctrico utilizando resinas tanto estándar como ABS en tecnología LCD. Es especialmente destacable que el aislante fabricado con resina ABS presenta una mayor resistencia mecánica que el fabricado con resina estándar, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones exigentes como las del sector minero.

Los ensayos realizados demostraron que los aislantes cumplen satisfactoriamente con los requisitos de la norma IEEE 386-2016 en las pruebas de tensión aplicada, impulso y temperatura. Sin embargo, en el ensayo de descargas parciales, no se alcanzó el límite de 5 pC establecido por la normativa, debido a las diferencias constructivas entre las coplas y los conectores separables. A pesar de esto, los valores obtenidos, que oscilan entre 20.000 pC y 50.000 pC, son generalmente aceptados en la industria.

Cabe señalar que existen otros materiales de impresión con propiedades mecánicas y dieléctricas superiores, como las resinas compuestas con materiales cerámicos, y tecnologías de impresión más avanzadas como la sinterización selectiva por láser (SLS) con polvo de poliamida, que podrían mejorar significativamente los resultados obtenidos. Sin embargo, la implementación de estas alternativas implica un costo elevado. A medida que la tecnología evolucione y estas opciones sean más accesibles, podrían ofrecer un rendimiento superior al de los sistemas presentados en este trabajo.

## 5. Trabajos futuros

El uso de tecnologías de impresión 3D para aplicaciones dieléctricas es un campo no del todo explorado. Considerando esto, existen muchos potenciales trabajos que podrían resultar interesantes en el ámbito de la ingeniería eléctrica. Algunos de estos podrían ser:

- Caracterización dieléctrica de una amplia gamma de materiales en tecnologías de impresión 3D definidas, pudiendo considerar a los materiales compuestos o tecnologías más costosas.
- Análisis comparativo de las propiedades dieléctricas ante diferentes densidades de impresión.
- Realizar una evaluación dieléctrica del SDEM impreso en tecnología FDM (tecnología más económica) u otra.
- Evaluar la implementación de tecnologías de impresión 3D para la creación de SDEM de enchufes mineros de clase 15 y 25 [kV].
- Pruebas de envejecimiento acelerado a SDEM impresos mediante tecnologías de impresión 3D: resina ABS like en LCD u otras definidas.
- Evaluar la viabilidad dieléctrica de las tecnologías de impresión 3D en otro sistema/ configuración, variando geometrías.

## Referencias

- [1] W. Yévenes, “Análisis del deterioro causado por solicitaciones de tensión y corriente al sistema dieléctrico de los enchufes mineros 3m de clase 25 kv y 500 a,” pp. 1–124, 2022.
- [2] D. P. Industry. Guía gratuita para principiantes de impresión 3d. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [3] I. 62631-3-1, “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials. part 3-1: Determination of resistive properties (dc methods) — volume resistance and volume resistivity — general method,” 2023.
- [4] I. 62631-3-2, “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials. part 3-2: Determination of resistive properties (dc methods) — surface resistance and surface resistivity,” 2015.
- [5] I. 60587, “Electrical insulating materials used under severe ambient conditions — test methods for evaluating resistance to tracking and erosion,” 2022.
- [6] I. 60243-1, “Electric strength of insulating materials — test methods — part 1: Tests at power frequencies,” 2013.
- [7] J. L. Dinamarca, *Técnicas de Alta Tensión: Teoría y aplicaciones*, 2010.
- [8] R. S. Brandt, “Dieléctricos sólidos.”
- [9] M. C. A. M. E. 6, “Data sheet - ertalon 6 pla,” 2019.
- [10] 3M, “Ficha técnica del enchufe minero clase 8 kv 250 a y 400 a,” 2021.
- [11] J. Gonzalez, “Smart coupler - diseño óptimo de enchufes acopladores tripolares de 8 y 15 kv para tendidos móviles en minería,” 2016.
- [12] L. Zepeng, “Stories from china,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 39, pp. 43–46, 2023.
- [13] H. Wang, Z. Huang, J. Li, and L. Li, “Dlp 3d printing of high-performance epoxy resin via dual curing,” 2021, pp. 1172–1176.
- [14] W. J. Monzel, B. W. Hoff, S. S. Maestas, D. M. French, and S. C. Hayden, “Dielectric breakdown of additively manufactured polymeric materials,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, 2015.
- [15] IEEE-386, “Ieee standard for separable insulated connector systems for power distribution systems rated 2.5 kv through 35 kv,” 2016.
- [16] I. 62631-2-1, “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials. part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor - technical frequencies (0,1 hz to 10 mhz) - ac methods,” 2018.
- [17] I. 60212, “Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials,” 2011.
- [18] 3M, “Ficha técnica del enchufe minero clase 15 kv 500 a,” 2022.
- [19] —, “Ficha técnica del enchufe minero clase 25 kv 530 a,” 2021.
- [20] K. M. 8009, “Instruction manual. model 8009 resistivity test fixture. keithley instruments,” 2019.

## 6. Anexos

### Ficha técnica del enchufe minero clase 8kV 3M

Ciencia.  
Aplicada a la Vida.™

# Enchufes Mineros

## Clase 8kV 250 y 400A

Abril 2021

**Descripción:**  
 Enchufes tripolares para cables mineros móviles de Media Tensión tipo SHD-GC. Diseñados para interconectar equipamiento eléctrico móvil en minería a rajo abierto. Fabricados en aluminio fundido, poseen una alta resistencia mecánica y al impacto. Sus aisladores de fases están hechos en Poliamida ignífuga, clase 8kV, de elevada resistencia mecánica y eléctrica, de una alta durabilidad y resistencia al tracking superficial. Pines de conexión fabricados en cobre plateado y terminales a cables mediante soldadura o perno prisionero, ofrecen una duradera conexión, bajo nivel de calentamiento y corrosión. Empaquetaduras y sellos de caucho le permiten ser instalados en todo tipo de superficies, incluyendo aquellas con elevada humedad ambiental.

Características	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fabricados 100% en Chile, con stock permanente de repuestos y entregas en menos de 30 días.</li> <li>Diseños flexibles y a la medida de cada cliente.</li> <li>Mantenimiento fácil y económica, pues todas las piezas son fáciles de remover y pueden venderse por separado.</li> <li>Aisladores de Fase fabricados en Poliamida ignífuga de alta resistencia eléctrica y mecánica.</li> <li>Cuerpo fabricado en Aluminio fundido, de elevada resistencia mecánica a golpes y arrastre.</li> <li>Pines de Contacto de Fase fabricados en Cobre Plateado, ofrecen mayor conductividad, menor desgaste y máxima confiabilidad en la conexión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ideales para realizar la interconexión de cables mineros flexibles tipo SHD-GC.</li> <li>Conexión de cables alimentadores de Palas y Perforadoras en media tensión hasta 8kV, calibres de conductor desde 2AWG hasta 4/0AWG.</li> <li>Capacidad de 250 y 400A de corriente permanente.</li> <li>100% compatibles con otros enchufes existentes en el mercado.</li> </ul>

Propiedades	Método	Valor	Unidad
Material Carcasa	ASTM-B-26	Aleación de Aluminio A356	-
Material Aislación	-	Poliamida Ignífuga	-
Ampacidad Permanente	-	250 400	[A]
Rango de Calibres de Conductor	-	2 a 4/0	[AWG]
Peso Aproximado	-	12	[kg]
Longitud	Hembra	600	[mm]
	Macho	552	
Diámetro	-	254	[mm]

Figura 35: Ficha técnica del enchufe minero clase 8 kV por 3M



Ciencia.  
Aplicada a la Vida.™

## Enchufes Mineros

### Clase 8kV 250 y 400A

Propiedades	Método	Valor	Unidad
<b>Ensayos Eléctricos (*)</b>			
• Voltaje AC por 1 min	IEEE-48-1996	17	[kV]
• Voltaje DC por 15 min		26,5	[kV]
• Descargas Parciales (<3pC)	IEEE-386-1995	10	[kV]
• Voltaje AC por 1 min		25	[kV]
• Voltaje DC por 15 min		50	[kV]
• Voltaje Impulso 1,7/45us		+65	[kV]
• Voltaje Impulso 1,6/45us		-75	[kV]
• Ampacidad		410	[A]
<b>Indice de Protección (**) (hermeticidad)</b>			
	IEC-60529	IP-66	-



(\*) Laboratorio de Alta Tensión  
Universidad Técnica Federico Santa María

(\*\*) DICTUC, Santiago de Chile

Código de Producto			Código de Accesorios Complementarios		
SKU	Nombre Corto	Descripción	SKU	Nombre Corto	Descripción
XE00244211	EMVP-8-250	Enchufe Macho Volante, clase 8kV, 250A	XE00249900	7621-T-95	Kit Terminación 8kV, 4-2/0AWG
			8061144083	7622-T-95	Kit Terminación 8kV, 3/0-300MCM
XE00244212	EMVP-8-400	Enchufe Macho Volante, clase 8kV, 400A		Scotchcast 2123	Resina Re-entrable 2.2 Gallon
XE00244204	EHVP-8-250	Enchufe Hembra Volante, clase 8kV, 250A	XE00285051	IPV-2.0 8/15kV	Indicador de Presencia de Voltaje
XE00244205	EHVP-8-400	Enchufe Hembra Volante, clase 8kV, 400A			








Figura 36: Ficha técnica del enchufe minero clase 8 kV por 3M

Datasheet del aislante eléctrico de poliamida Ertalon® 6 PLA del enchufe minero clase 8 kV 3M

Polyamide

**Ertalon® 6 PLA**



**MITSUBISHI CHEMICAL  
ADVANCED MATERIALS**

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.

PRODUCT DATA SHEET

**Physical properties (indicative values \*)**

PROPERTIES			
Colour	-	-	White, Black, Blue, Yellow
Density	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	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
<b>Thermal Properties (2)</b>			
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 <sup>-6</sup>
- average value between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	90 x 10 <sup>-6</sup>
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
<b>Mechanical Properties at 23 °C (7)</b>			
<b>Tension test (8):</b>			
- 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
<b>Compression test (11):</b>			
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (10)	ISO 604	MPa	34 / 64 / 93
<b>Flexural test (12):</b>			
- flexural strength	ISO 178	MPa	121
- flexural modulus of elasticity	ISO 178	MPa	3280
<b>Charpy impact strength - unnotched (13):</b>			
	ISO 179-1/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	no break
<b>Charpy impact strength - notched</b>			
	ISO 179-1/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	3
<b>Rockwell M-hardness (14)</b>			
	ISO 2039-2	-	88
<b>Dynamic Coefficient of Friction (c)</b>			
	ISO 7148-2 (15)	-	0.4-0.6
<b>Wear rate</b>			
	ISO 7148-2 (15)	µm <sup>3</sup> /km	12
<b>Electrical Properties at 23 °C</b>			
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.	>10E 13
Relative permittivity ε <sub>r</sub> - at 1 MHz	IEC 60250	-	3.20
Dielectric dissipation factor tan δ - at 1 MHz	IEC 60250	-	0.016

Note: 1 g/cm<sup>3</sup> = 1,000 kg/m<sup>3</sup>; 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>; 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 R<sub>a</sub>= 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).

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.

Figura 37: Datasheet PLA6 utilizado como aislante del enchufe minero clase 8 kV por 3M

**Aislantes impresos y enchufe minero clase 8 [kV]****Figura 38:** Aislantes y pines de contacto**Figura 39:** Enchufe hembra volante clase 8 [kV] con aisladores

## pruebas y requisitos para conectores separables según IEEE

**Tabla 20:** Voltage ratings and characteristics for loadbreak connectors

Voltage class	Maximum voltage rating (kV rms) <sup>a</sup>	Withstand voltages		Partial discharge minimum extinction voltage (kV rms) <sup>b</sup>
		BIL and full wave (kV crest)	AC 60 Hz for 1 min (kV rms)	
15 kV	8.3 <sup>c</sup>	95	34	11
15 kV	8.3/14.4 <sup>d</sup>	95	34	11
25 kV	15.2 <sup>c</sup>	125	40	19
25 kV	15.2/26.3 <sup>d</sup>	125	40	19
28 kV	16.2/28.0 <sup>d</sup>	150	45	21.5
35 kV	21.1 <sup>c</sup>	150	50	26
35 kV	21.1/36.6 <sup>d</sup>	150	50	26

<sup>a</sup> The highest steady-state voltage across the open contacts that a loadbreak connector is rated to switch is the maximum phase-to-ground rms voltage for phase-to-ground rated devices or the maximum phase-to-phase rms voltage for phase-to-ground/phase-to-phase rated devices.

<sup>b</sup> Based on a sensitivity of 5 pC (see 7.4).

<sup>c</sup> Phase-to-ground.

<sup>d</sup> Phase-to-ground/phase-to-phase.

Secuencia de pruebas según normativa IEEE

**Table 8—Design tests**

Design test	No. samples	Test sequence <sup>a</sup>			Individual tests	
		A	B	C	4 each <sup>c</sup>	12 each
		10	4	30 <sup>b</sup>		
	Reference					
Thermal cycle withstand	7.20	X <sup>d</sup>		–	–	–
Partial discharge test	7.4	X	X	–	–	–
AC withstand voltage	7.5.1	X	X <sup>e</sup>	–	–	–
Operating interface ac withstand	7.5.2	–	–	–	–	X
Impulse withstand voltage	7.5.3	X	X <sup>e</sup>	–	–	–
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 <sup>e</sup>	X <sup>e</sup>	–	–	–
Shielding	7.18	–	–	–	X	–
Bushing well stud torque	7.19	–	–	–	X	–
Impulse withstand voltage	7.5.3	–	X	–	–	–

<sup>a</sup>Sequence A = dielectric tests sequence.  
 Sequence B = accelerated life tests sequence.  
 Sequence C = switching tests sequence.  
<sup>b</sup>No 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.  
<sup>c</sup>Where applicable.  
<sup>d</sup>Applicable to non-elastomeric components.  
<sup>e</sup>May substitute impulse withstand voltage (7.5.3) for ac withstand voltage (7.5.1).

**Figura 40:** Secuencia de pruebas según normativa IEEE386-2016.

Valores dieléctricos característicos de ciertos materiales.

**TABLE 7.1 Standard values of electrical properties of some solid insulating materials**

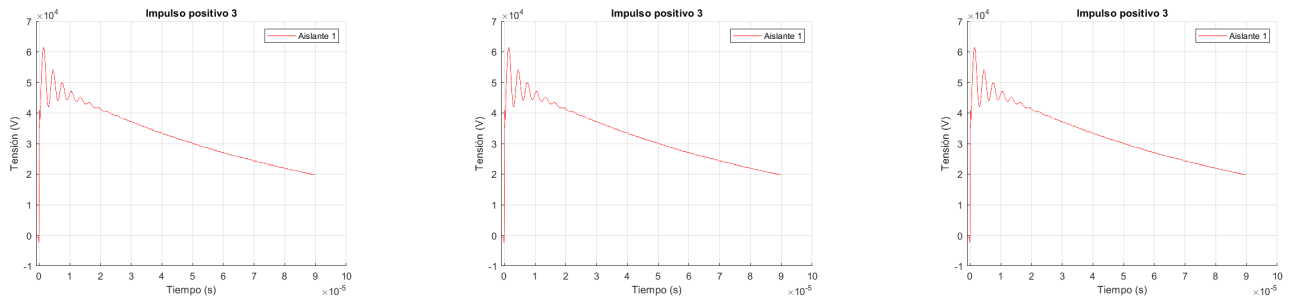
Materials and their Classification		Relative Permittivity	Loss tangent	Specific Insulation Resistance	Specific Thermal Resistance*
		$\epsilon_r$ (50 Hz, 20°C)	$\tan \delta$ (50 Hz, 20°C)	$\rho$ $\Omega \cdot \text{cm}$ (20°C)	$\sigma$ $^{\circ}\text{C cm/W}$
Ceramics	Porcelain	5–6.5	$20 \cdot 10^{-3}$	$10^{11}$ – $10^{12}$	70–125
	Steatite		$2 \cdot 10^{-3}$		40–50
Glass	Nonalkaline and E-Glass	3.8–10	$<1 \cdot 10^{-3}$	$10^{13}$	85–135
Thermoplastic Polymers	Polyvinyl-Chloride (PVC) (Cable insulation compound)	5.0–5.3	$30$ – $100 \cdot 10^{-3}$	$10^{16}$	600–700
	Polyethylene (PE)	2.3	$0.1$ – $0.2 \cdot 10^{-3}$	$10^{17}$	350
Thermoset Polymers	Bisphenol-A	Pure 3.5	$5.5 \cdot 10^{-3}$	$>>10^{17}$	—
	Epoxyresin	with filler 5.8	$33 \cdot 10^{-3}$	—	—
	Silicon Rubber (SiR)	2.8–6.0	$5$ – $10 \cdot 10^{-3}$	$10^{13}$ – $10^{15}$	500
Composite Dielectrics	Oil impregnated Cable paper	3.5–3.9	$(2.6$ – $3.0) \cdot 10^{-3}$	$10^{15}$	550

Figura 41: Valores característicos de materiales dieléctricos. [8]

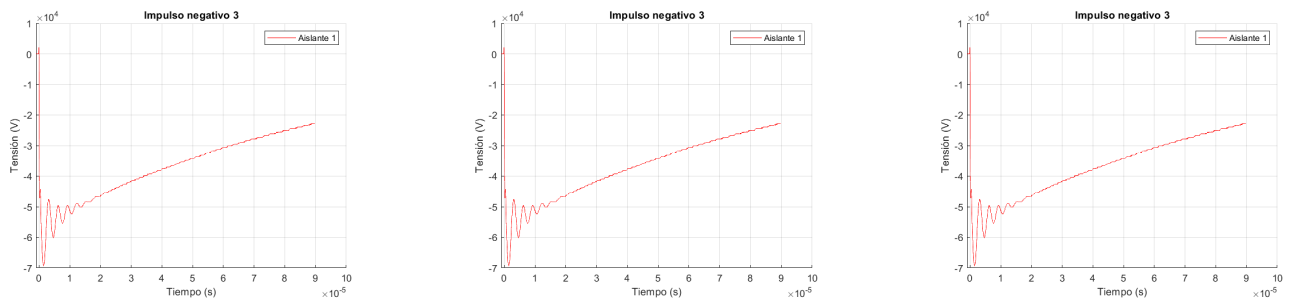
Material	$\epsilon_r$	$\tan\delta$ at 25°C, 1 MHz (average)	$\rho_v$ at 25°C ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Breakdown stress (kV/mm)
Quartz glass	3.8	$5 \times 10^{-4}$	$10^{17}$	
Lead glass	9			
Soda-lime glass	7	0.01		10–40
Glass ceramic	5–7	0.001–0.1	$10^{12}$ – $10^{14}$	20–80
Porcelain	5	0.04	$10^{12}$ – $10^{15}$	20–30
Zirconium ceramic	7–12	0.003		20–30
Alumina ceramic	10	0.0005		
Barium titanate ceramic	2000–8000	0.1		
Micanite	5–11	0.003	$10^{14}$ – $10^{16}$	50 (for 1 mm specimen) 100–200 (for 0.1 mm specimen)
PVC	6	0.1		
PE	2.3	0.0001	$10^{15}$ – $10^{18}$	40
Polystyrene	2.6	0.0001	$10^{16}$ – $10^{18}$	30–40
PTFE	2	0.0002	$10^{16}$ – $10^{18}$	25
Bakelite	4.5	0.1	$10^{13}$	
Vulcanized natural rubber	3.5	0.05		
Methyl methacrylate	3.6	0.01		

Figura 42: Valores característicos de materiales dieléctricos. [8]

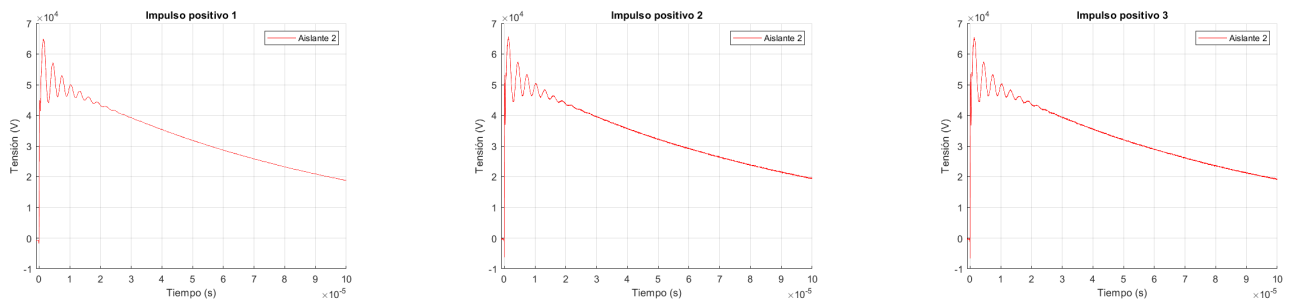
**Gráficos: señal impulso**



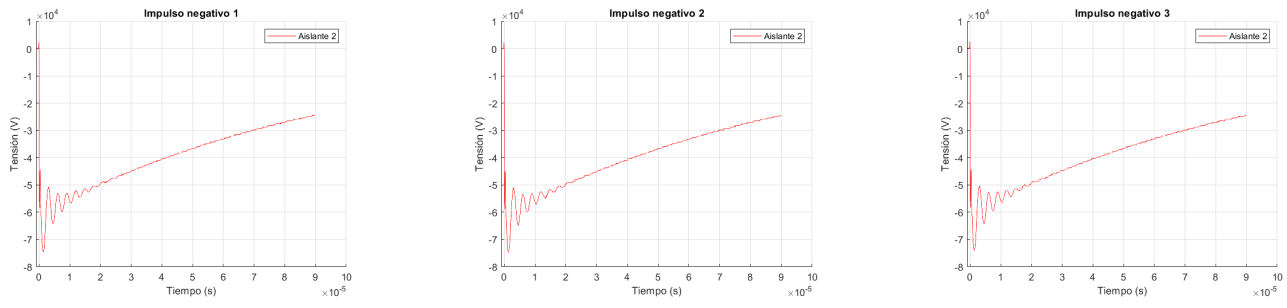
**Figura 43:** Señales de impulso positivo aplicadas al enchufe con el aislante 1 en tres condiciones diferentes.



**Figura 44:** Señales de impulso negativo aplicadas al enchufe con el aislante 1 en tres condiciones diferentes.

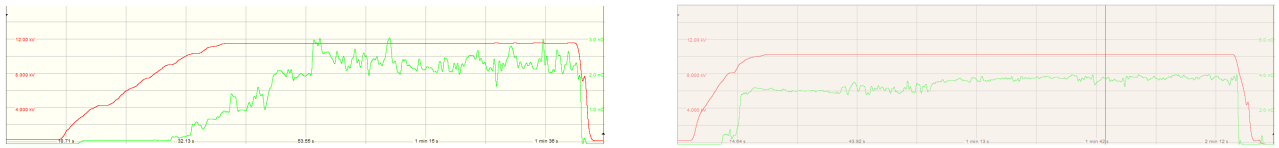


**Figura 45:** Señales de impulso positivo aplicadas al enchufe con el aislante 2 en tres condiciones diferentes.



**Figura 46:** Señales de impulso negativo aplicadas al enchufe con el aislante 2 en tres condiciones diferentes.

**Gráficos: Descargas parciales**



**Figura 47:** Tensión aplicada y niveles de carga aparente en mediciones de descargas parciales realizadas a los aislante 1 y 2, respectivamente.