

EVOLUCIÓN INDUSTRIAL DE LOS AISLAMIENTOS EN MEDIA TENSIÓN

La progresiva introducción de nuevos materiales en las celdas de Media Tensión ha aportado mejoras significativas en los diferentes ámbitos de utilización de la Energía, tanto en cuestión de disponibilidad y calidad de servicio, como en otros aspectos: reducción de espacio, impacto medio-ambiental, seguridad de las personas y de las instalaciones, facilidad de gestión y reducción de costes globales. La mejora se ha basado preferentemente en la evolución de los sistemas de aislamiento:

Por un lado, la sustitución de los aislantes sólidos cerámicos, de vidrio o celulosa, por compuestos basados en resinas poliméricas (epoxy, poliéster, poliuretano) o compuestos elastoméricos (silicona, EPDM) y, por otro, la de los aislantes gaseosos como el aire, por otros gases de alta estabilidad y mayores prestaciones dieléctricas como el hexafluoruro de azufre (SF_6).

A esta evolución ha contribuido también la combinación del uso de nuevos conceptos de diseño, apoyados en estudios analíticos de simulación por elementos finitos y el uso de procesos industriales altamente controlados. Dicha sinergia ha proporcionado una importante mejora en las prestaciones de los equipos eléctricos, y en especial, en lo referido a las celdas de M.T. aisladas en SF_6 del tipo sellado, que permiten proteger los aislantes sólidos de la acción negativa derivada de condiciones medioambientales adversas y no estables.

1.- INTRODUCCIÓN

Las celdas de MT utilizadas en la Distribución de energía eléctrica, durante su ciclo de vida, son un eslabón relevante a la hora de asegurar una alta disponibilidad de servicio, y lo son también en la consecución de nuevas prestaciones para satisfacer las crecientes exigencias, tanto de la Administración como de los usuarios.

Iñaki Apraiz
Ingeniero Industrial
Dr. Técnico e I+D, MESA, España

Recibido: 11-7-05

Aceptado: 29-7-05



Exigencias tales como la reducción de espacio, seguridad de las instalaciones y del personal o la reducción del impacto medioambiental, son factores que han conducido a desarrollos cada vez más sofisticados y al empleo de sustancias y materiales aislantes de mejores prestaciones. Esto nos ha permitido tener un mejor conocimiento de algunos fenómenos dieléctricos y sus comportamientos asociados.

El objetivo de este documento es dar a conocer de forma resumida, la capitalización de este conocimiento acerca de las limitaciones de los aislantes, los factores que intervienen en la permanencia dieléctrica, la consecución de nuevas prestaciones, así

como la evolución experimentada por dichos sistemas de aislamiento en las celdas de MT.

2.- CELDAS DE MEDIA TENSIÓN

Bajo este término se enmarcan los equipos eléctricos descritos en la norma UNE-EN 60.298 (futura UNE-EN 62.271-200) "Aparataje bajo envolvente metálica de corriente alterna para tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores o iguales a 52 kV."

Aún variando su diseño, arquitectura y tecnologías utilizadas; los diferentes tipos de celdas comprenden diversidad de componentes pero funcionalidades comunes.

En la figura 1 podemos ver la constitución típica y los componentes básicos utilizados.

El término Sistema de aislamiento de la celda lo conforman el conjunto de aislantes utilizados en los diferentes componentes y el aislamiento general de la misma.

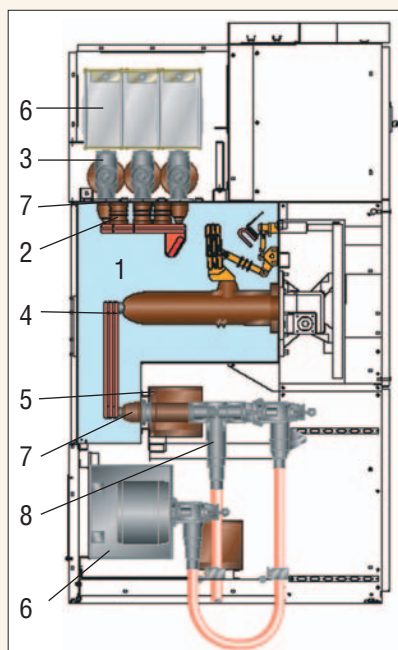


Fig. 1

- 1 - SF_6 (Aislamiento gaseoso)
- 2 - Aisladores (Aislamiento sólido epoxy)
- 3 - Barras (Aislamiento sólido: silicona)
- 4 - Int. Aut. (Aislamiento sólido: epoxy)
- 5 - TI's (Aislamiento sólido: epoxy)
- 6 - TT's (Aislamiento sólido y gas SF_6)
- 7 - Pasatapas (Aislamiento sólido: epoxy)
- 8 - Cables (Aislamiento sólido: EPDM)

3.- IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

La experiencia acumulada en la explotación de subestaciones eléctricas ha demostrado que la calidad de los sistemas de aislamiento empleados es esencial en la consecución de una alta disponibilidad de servicio. Basta tener en cuenta que un simple fallo de un aislante sólido produciría un corte en el servicio eléctrico, cuya magnitud en extensión y tiempo dependería, entre otros, de la propia configuración del circuito eléctrico y de las características del diseño elegido.

A lo largo de su ciclo de vida, los aislamientos están sometidos a variables eléctricas, mecánicas y ambientales que exigen medidas especiales, en cuanto a la selección de los propios materiales, la concepción de los componentes y el diseño de las propias celdas, de forma que se pueda garantizar la estabilidad de los aislantes en el tiempo.

Las posibilidades de diseño que los materiales plásticos ofrecen para la obtención de formas optimizadas es otro factor importante para lograr sistemas más compactos y por tanto de dimensiones más reducidas.

4.- LIMITACIONES DE LOS AISLANTES

Un factor clave en la concepción y dimensionamiento de los materiales de aislamiento eléctrico se encuentra en su capacidad regenerativa, pudiendo ser clasificados como “auto-regenerables” y “no auto-regenerables”.

Los aislamientos “auto-regenerables” (mayoritariamente gases y líquidos) son aquéllos en los que, tras una descarga disruptiva, el aislamiento recupera todas sus prestaciones aislantes.

Son “no auto-regenerables” aquéllos en los que, tras una sola descarga disruptiva o perforación, se produce la destrucción definitiva del aislante. Es el caso de los aislantes sólidos.

Otro factor clave para comprender las limitaciones en el comportamiento de los aislantes es su entorno, pese a que el análisis que nos ocupa se centra en el comportamiento de las

instalaciones de interior; también es preciso tener en cuenta la sensibilidad de los materiales aislantes respecto a los agentes presentes en estos ambientes

Se describen a continuación algunos de dichos agentes y su posible influencia en las limitaciones de funcionamiento de los aislantes.

Humedad

En los gases y líquidos, la presencia de humedad causa una modificación de las prestaciones del aislante.

En el caso de los líquidos, supone siempre una reducción de la prestación.

En el caso de los gases, supone también una merma de las prestaciones. Pero en el caso del aire, las alteraciones comienzan en concentraciones superiores al 70%.

Para el resto de los gases estos porcentajes no son habituales dado que se manipulan con proceso de ciclo cerrado con índices de humedad despreciables.

Condensación

Consiste en la generación de gotas de agua, que pueden situarse sobre las superficies aislantes, reduciendo así de forma local las prestaciones, pudiendo llegar éstas a ser una tercera parte de las iniciales.

Contaminación

Genera partículas conductoras que pueden depositarse en las superficies de un aislante sólido o mezclarse en los gases o líquidos. Su presencia reduce siempre las prestaciones dieléctricas en una proporción que puede llegar hasta el 10%.

Presión

Es conocido que las características dieléctricas de un aislante crecen con la presión. No obstante, en los aparatos con aislamientos expuestos al “aire ambiente” la altitud puede causar una reducción de sus características como consecuencia de la bajada en la presión atmosférica. Esta dependencia es la razón de incluir una clasificación limitada por la altitud en la aplicación de equipos eléctricos de aislamiento aire..

Temperatura

Por norma general, las prestaciones aislantes en un medio gaseoso, líquido o sólido disminuyen en cuanto la temperatura aumenta.

Un punto de especial cuidado es el referido a los cambios bruscos de temperatura. (choques térmicos) que pueden llevar a generar micro-fisuras en los aislamientos sólidos, y éstas, de forma rápida, conducir a una “descarga disruptiva”. Por ello es preciso prestar especial atención a los fenómenos de dilatación entre aislantes sólidos y conductores. Un aislante sólido puede dilatar entre 5 y 15 veces más que un conductor.

5.- CÓMO GARANTIZAR LA PERMANENCIA DIELECTRICA

En la concepción del sistema de aislamiento eléctrico es preciso tener en cuenta los factores que pueden conducir a un envejecimiento prematuro y tratar de neutralizarlos. En este sentido, uno de los factores que intervienen en la integridad dieléctrica es el origen orgánico de la matriz polimérica en los aislantes sólidos.

Los fenómenos de degradación pueden afectar tanto a la superficie como al interior de los mismos y normalmente son derivados del sometimiento a esfuerzos dieléctricos y la interacción con procesos de envejecimiento físico y químico.

Así pues, pese a que la permitividad relativa de los aislantes sólidos es netamente superior a la de los líquidos y gases a presión atmosférica, se debe tener en cuenta que el aislamiento superficial en los sólidos está condicionado por las características de su entorno (ya sea líquido o gas) como por cualquier otro agente medioambiental: humedad, polución, agresividad química, etc.

Envejecimiento eléctrico superficial en aire

La presencia en el aire de humedad, contaminación, etc., en combinación con los ciclos térmicos a los que se puede ver sometido el aislante sólido y en especial en aquellas zonas de concentración elevada de campo eléctrico (puntos triples, aristas, inserciones) hace que se promuevan

situaciones que favorecen la ionización y la activación de reacciones degradantes.

Este proceso en la superficie del aislante provoca dos tipos de degradaciones: química y de erosión; cuyo mecanismo y secuencia de degradación se tratan de explicar de forma esquemática en el siguiente diagrama:

Este deterioro superficial del aislamiento se presenta de forma habitual en aquellos casos en los que el mantenimiento no se realiza con la debida frecuencia.

Envejecimiento eléctrico interno del aislante

Aún siendo menos habitual, es posible el deterioro dieléctrico en el interior de los aislantes sólidos.

Pese a que la tensión de servicio en la vida del aislante sólido es muy inferior a la que puede llegar a perforarlo, puede darse un proceso de degeneración mucho antes de que ocurra dicha perforación. Este siempre se origina en el material por la presencia de fenómenos parásitos que alteran la estabilidad del mismo en presencia de tensión.

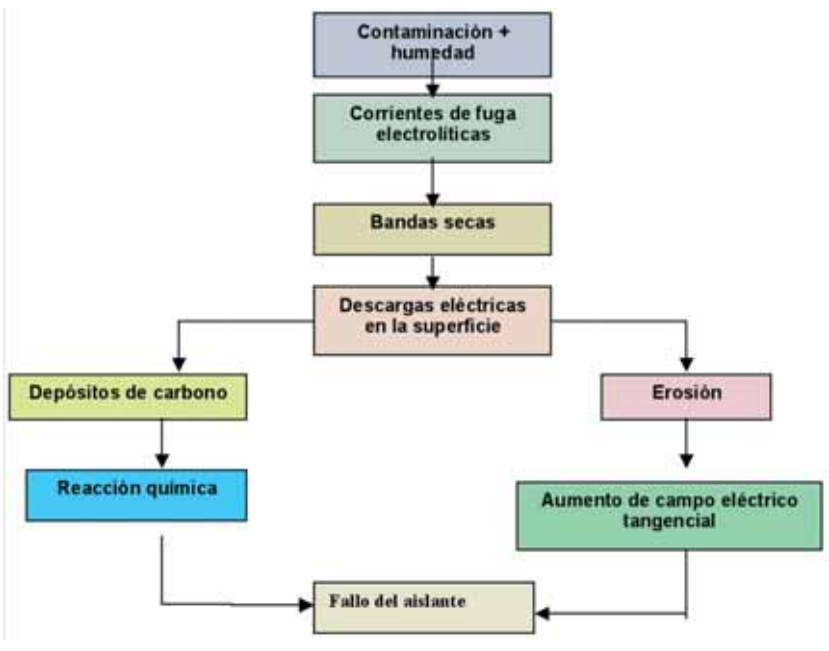
Entre los fenómenos que pueden conducir al fallo eléctrico se pueden mencionar:

- Las descargas parciales (DP)

Se trata de un fenómeno, detectable o no, que puede desarrollarse en las cavidades gaseosas del aislante, o en desuniones provocadas por esfuerzos mecánicos o diferencias en dilataciones.

Las descargas surgen cuando por motivo de la ampliación del campo eléctrico en la cavidad (mayor permittividad en el sólido que le rodea), ésta se ve erosionada por el impacto de la

Principio de degradación dieléctrica superficial



descarga, lo que provoca que se intensifique el campo eléctrico en el entorno erosionado. Este proceso auto-evolutivo puede hacer que el campo eléctrico alcance un valor crítico que desemboca en fenómenos de arborescencia eléctrica que conducen finalmente a la perforación del aislante.

- Las rupturas térmicas

Otra forma de degradación (más rápida que la erosión) es la ruptura térmica del aislante. Generalmente es producida por las pérdidas por conducción y por relajación dieléctrica que se ven favorecidas por un aumento de la temperatura. En esta situación puede provocarse un embalamiento térmico y la consiguiente carbonización del material causando así la ruptura del aislante.

Esta situación también puede generarse tras una lenta evolución química del aislante y un aumento de

sus pérdidas, en un tiempo mucho más largo sin que ello afecte a la funcionalidad del mismo.

6.- FACTORES BÁSICOS EN LA OBTENCIÓN DE UN NIVEL ESTABLECIDO DE PRESTACIONES

La relación entre un bien diseñado sistema de aislamiento y la obtención de una serie de prestaciones preestablecidas, dependerá fundamentalmente de resolver de forma satisfactoria las limitaciones que dichos aislantes presentan y que hemos comentado anteriormente.

La selección de materiales apropiados, con procesos de producción y control bien conocidos, y el empleo de unas "buenas prácticas" en la concepción y el diseño son los factores clave en la obtención de un sistema de aislamiento que asegure la calidad.



Fig. 2 - Piezas afectadas por la erosión del medio ambiente

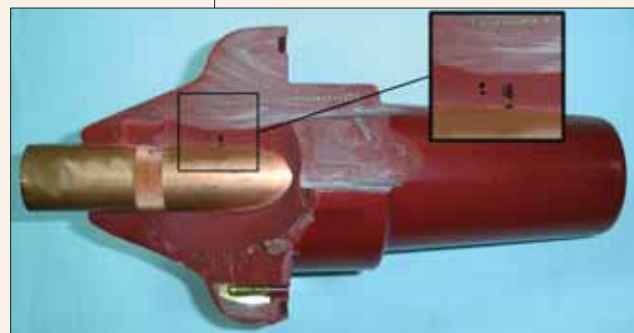
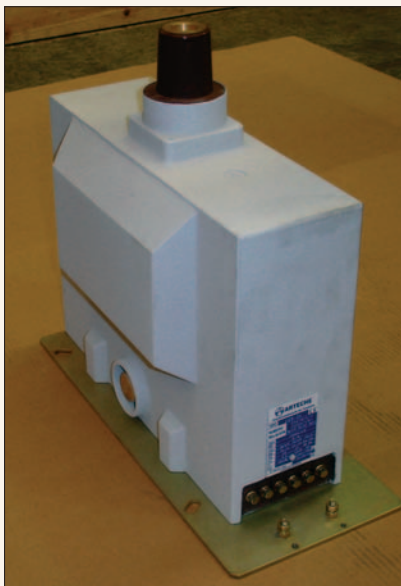


Fig. 3 - Detalle referido a DP (Descargas Parciales).



Transformador de tensión de M.T.

Una definición de forma conceptual de algunas de estas exigencias podría ser:

- Reducción de volumen y peso.
- Reducción del impacto medioambiental
- Insensibilidad ambiental, alargamiento ciclo de vida del producto.
- Reducción de costes globales, incluyendo ciclo de vida del producto (Inversión inicial, costos de explotación, fin de vida).
- Disponibilidad de servicio.
- Seguridad de los productos, bienes y personas.

Por otro lado, debemos tener en cuenta las limitaciones mencionadas.

- Afectación superficial sobre aislantes sólidos.
- Contaminación y humedad sobre aislantes líquidos y gaseosos.
- Falta de homogeneidad (fisuras, burbujas, etc.) en los aislantes sólidos.
- Esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos durante el ciclo de vida (fabricación, transporte y servicio).

De forma general, si tratamos de evitar las influencias medioambientales (contaminación, altitud, humedad, etc.) sobre los aislantes sólidos, se deberán optar por diseños que proporcionen una protección eficaz y estable, como es el caso de las celdas blindadas aisladas en SF₆ o el empleo de recubrimientos semiconductores puestos a tierra.

Ejemplos de aislamiento sólido con recubrimiento semiconductor puesto a tierra:

Transformador de tensión de M.T.
Sistema de barras Celda M.T.

Si tratáramos de reducir las dimensiones de las instalaciones, se optará por fluidos o sólidos con mayores prestaciones dieléctricas que el aire. Los actuales procesos industriales permiten concebir geometrías optimizadas que dan lugar a soluciones funcionales compactas favoreciendo así el coste global de la instalación, ya que permiten acercar la distribución eléctrica a los centros de consumo reduciendo de esta forma las pérdidas eléctricas y el impacto medioambiental.

En el criterio de selección de los materiales aislantes se han de tener en cuenta algunas de sus propiedades más relevantes, como son:

Eléctricas: Permitividad relativa, rigidez dieléctrica.

Mecánicas: Fragilidad, peso, resistencia mecánica.

Químicas: Estabilidad, compatibilidad mutua.

7.- EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Los sistemas de aislamiento en celdas de MT, como ya ha sido comentado, están caracterizados por el empleo de aislantes sólidos y gaseosos y, en menor medida, líquidos.

El mejor conocimiento de los materiales y la disponibilidad de nuevas

herramientas en el diseño de los mismos ha conducido a una importante evolución en la concepción de estos equipos.

La colaboración de las Compañías eléctricas, aportando su experiencia de usuario y definiendo nuevas especificaciones, ha ayudado en la innovación en este campo, lográndose sistemas de gestión y servicio cada vez más eficaces y de menor impacto medioambiental.

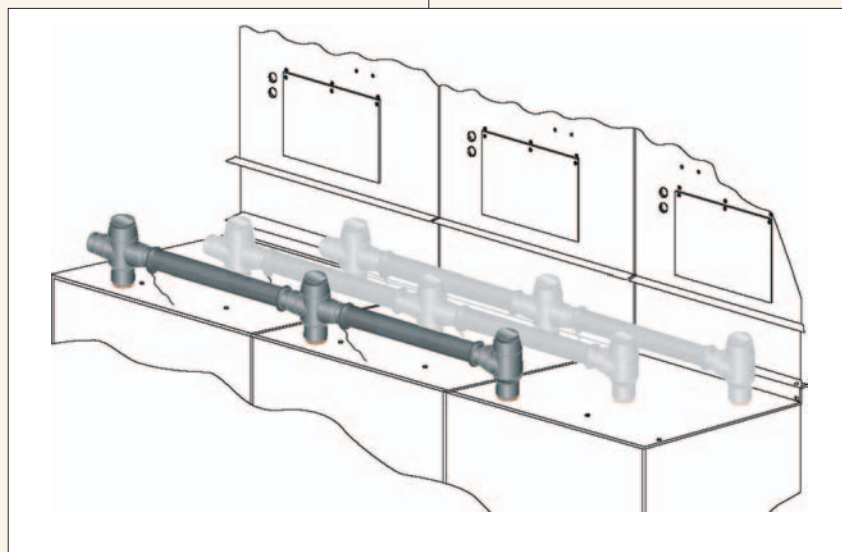
Algunos de los aspectos más significativos en la evolución mencionada podrían ser:

Aislantes sólidos

Desde los años 60, se ha producido una sustitución progresiva de los materiales empleados en los aislantes sólidos, de las porcelanas, vidrios y celulosas se ha pasado a compuestos poliméricos con cargas minerales, como son el epoxy y el poliuretano o también de cargas sintéticas como el poliéster con fibra de vidrio.

Estos componentes han presentado una evolución muy rápida en el diseño de principales componentes como pasamuros, polos de interruptores automáticos, transformadores de medida, todo ello en función de las distintas prestaciones de las resinas y de las tensiones de aplicación.

También es relevante la incorporación de resinas elastoméricas en los últimos tiempos, la silicona y el EPDM han afluado con gran incidencia en las aplicaciones electrotécni-



Sistema de barras Celda M.T.

Tabla 1

ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE FACTORES DE ENVEJECIMIENTO

Prestación deseada	Solución más usual	Comentario
Reducción de volumen y peso. Impacto medioambiental.	Utilización de SF ₆ , aceite o aislante sólido en lugar del aire	El SF ₆ es un gas con un poder dieléctrico 2,5 veces superior al aire atmosférico, cinco veces más denso, inerte, no tóxico y no inflamable.
Insensibilidad ambiental y alargamiento del ciclo de vida.	Utilización del SF ₆ , aceite o aislante sólido en atmósfera inerte o revestido de una capa semiconductora puesto a tierra en lugar del aire.	La protección de los aislantes sólidos, en medios gaseosos, confiere una alta estabilidad en el tiempo. Ej.: Celdas aislantes en SF ₆ .
Reducción de costes globales.	Utilización del SF ₆ , aceite o aislante sólido en atmósfera inerte o revestido de una capa semiconductora puesto a tierra en lugar del aire.	Proporciona reducción del espacio, de mantenimiento, de gestión y menores pérdidas eléctricas.
Alta disponibilidad de servicio.	Utilización del SF ₆ , aceite o aislante sólido en atmósfera inerte o revestido de una capa semiconductora puesto a tierra en lugar del aire.	La reducción de incidentes por causas medioambientales y elementos extraños.
Seguridad de productos, bienes y personas.	Utilización de fluidos no inflamables o aislante sólido resistentes al fuego. Protección en envoltorios blindados del tipo cerrado para la protección de contactos con partes bajo tensión.	Las celdas aisladas en SF ₆ , por su alta compacidad, presentan la ventaja añadida de un buen comportamiento frente a un eventual arco interno.
Factores a vigilar	Solución más usual	Comentarios
Afectación superficial sobre aislantes sólidos por el medio ambiente.	Celdas bajo envoltorio estanca. Celdas blindadas aisladas en SF ₆ .	La utilización de celdas aisladas en SF ₆ es preferente para evitar condiciones medioambientales.
Contaminación y humedad sobre aislantes líquidos y gaseosos.	Evitar la contaminación durante los procesos de producción y manipulación. Uso de procedimientos de aseguramiento de calidad.	Se deben sistematizar las verificaciones de las etapas críticas en producción.
Afectación por esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos en aislantes sólidos.	Empleo de "buenas prácticas" en la concepción del diseño. Seguimiento riguroso de la calidad en el proceso de fabricación.	Se debe profundizar en las características y las reglas de concepción con la ayuda de los fabricantes de la materia prima. Especial atención a la presencia de inserciones metálicas en los diseños.
Faltas de homogeneidad en aislantes sólidos.	Procesos industriales estables y controlados. Aseguramiento de la calidad con ensayos sistemáticos. Diseño apoyado en "buenas prácticas"	Es necesaria una detallada especificación del proceso industrial y sus controles.
Afectación por esfuerzos durante el transporte y la manipulación.	Elección de materiales de alta resistencia mecánica.	Se debe completar con un detallado Manual de Instrucciones del usuario.

cas, especialmente para terminaciones de cables, pararrayos y aislamiento del embarrado principal.

También se han introducido otros materiales termoplásticos como los poliamidas y policarbonatos como componentes de aplicación en MT.

Parece claro que la evolución de estos materiales ofrecerá nuevas opciones de mejora, en especial en lo referido a la reducción de dimensiones.

Aislantes gaseosos

En lo referente al medio gaseoso, ha sido evidentemente el aire el que se ha utilizado en exclusiva durante muchos años. Sin embargo, la irrupción del SF₆ y sus extraordinarias características eléctricas han ido desplazando progresivamente a las soluciones de aislamiento en aire.

Las excelentes prestaciones en cuanto a rigidez dieléctrica acompañadas de una gran estabilidad térmica, no inflamabilidad, no toxicidad y su carácter inerte, hizo que en los años 60 se generalizara con rapidez su utilización en aparellaje de AT hasta 110 kV.

Esta buena acogida en AT hizo que en los años 80 comenzara su aplicación en MT, aunque sólo a presiones de trabajo ligeramente superiores a la atmosférica. Para tensiones de hasta 36 kV, su aplicación se ha convertido en la actualidad en la solución óptima para las subestaciones de doble barra de cierta relevancia, desplazando en estos años a las soluciones de aire y aceite.

Las investigaciones de los últimos años van encaminadas a la búsqueda de mezclas (N₂-SF₆) o nuevos gases, pero aún no se ha llegado con éxito a las fases de industrialización.

Otro medio, siempre presente, es el vacío. En los últimos artículos técnicos referidos a su evolución se puede decir que su aplicabilidad como medio aislante se encuentra en fase de investigación y experimentación bastante avanzada.

Aislantes líquidos

Aunque el aceite mineral, junto con algunos tipos de aceites sintéticos, siguen siendo muy utilizados en el campo electrotécnico como, por ejemplo, en transformadores, condensadores y cables, su presencia

está muy limitada en las celdas de MT.

Uno de sus puntos débiles es su inflamabilidad, por lo que las investigaciones van orientadas a conseguir mejores comportamientos a la resistencia al fuego de forma que se puedan complementar las exigencias de seguridad requeridas.

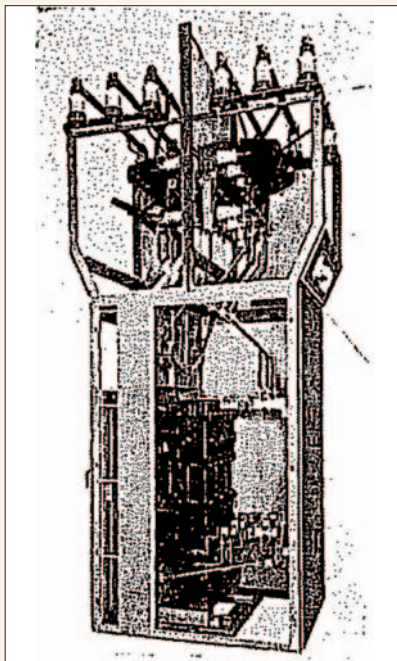
Algunos casos de aceites de silicona y fluorados presentan ciertas ventajas en este sentido, pero, en contrapartida, también algunas desventajas en lo referente a alto coste y pobre disipación de calor.

En resumen, la evolución hasta la fecha de los aislantes ha conducido a que las celdas de MT en la actualidad, presenten grandes mejoras especialmente en lo referente a dimensiones, la seguridad y la inseguridad al medio ambiente.

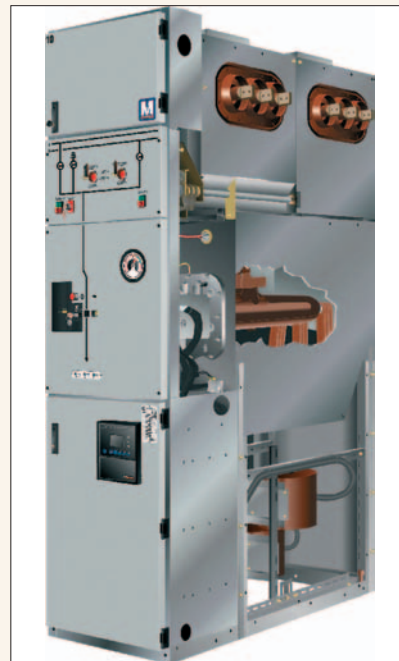
Se debe considerar que cualquier evolución futura mantendrá las mejoras citadas y deberá buscar salidas encaminadas a una mayor integración de funciones y una menor incidencia en el medio ambiente.

La tabla 2 recoge una clasificación de tipos de aislantes y diferentes componentes que integran el sistema de aislamiento en una celda de MT.

Ejemplos de evolución para celdas de MT: Ahorro del 70% en el espacio necesario para la misma función:



Celda de 30 kV aislamiento aire y porcelana (1965)



Celda 30 kV aislamiento SF₆ y epoxy (1995)

Grupo	Subgrupo	Aislantes sólidos			Aislantes líquidos		Aislantes gaseosos
		Convencional	Resina polimérica	Lámina	Aceite mineral	Impregnante sintético	
		Madera Papel Prespan Porcelana Vidrio Mica	Silicona – poliestireno – poliéster – epoxy - Poliamida – Polietileno – urea – fenólico – EPDM – policarbonatos – poliéster + fibra de vidrio - poliuretano	Polipropileno Poliéster Poliamida Polivinilo Poliestireno		Policlorobifenil (PCB) Isopropilbifenil neocraprato de benceno (NCB) Aceite de silicona	Vacío Tetracloruro de carbono Triclorometano Hexafluoruro de azufre (SF ₆) Difluordiclorometano Tetrafluoruro de metano CO ₂ SF ₆ + nitrógeno aire
Aislador	Mineral	Porcelana Vidrio					
Aislador	Sintético		Epoxy – poliuretano - poliéster - Silicona - EPDM				
Pasatapas	Mineral	Porcelana Vidrio					
Pasatapas	Ssintético	papel	Poliestaer – Poliestireno – Epoxy – Polietileno – Urea – Fenólico - EPDM				
Pasatapas	Impregnado				Aceite mineral		
Barras generales aisladas		Papel	Epoxy- Poliéster – Silicona - EPDM				
Interruptor automático	Aceite	Porcelana	Epoxy / fibra de vidrio – poliéster / fibra de vidrio		Aceite mineral		
	SF ₆	Porcelana	Epoxy - poliuretano				Hexafluoruro de azufre (SF6)
	Vacío	Vidrio	Epoxy – silicona - EPDM				Vacío
Transformador de medida	Sólido	Papel	Epoxy - poliuretano	Film			
	Impregnado	Madera – Papel - Prespan		Film	Aceite mineral	Aceite de silicona	
Terminación de cables - conéctica	Sintético		Epoxy – silicona - EPDM	Polipropileno			
	Impregnado		Papel				
Pararrayos	Mineral	Porcelana					
	Sintético		Silicona - EPDM				

Tabla 2