

CAPITULO II

MEDIOS DIELECTRICOS

CAPITULO II

MEDIOS DIELECTRICOS

2.1 Polarización de la materia

Cuando cualquier cuerpo descargado se coloca dentro de un campo eléctrico, se produce en él una redistribución de las partículas cargadas de los átomos. Si el cuerpo es de material conductor, sus electrones libres se trasladan de tal forma que el volumen del cuerpo constituye una región equipotencial; si es de material aislante, los electrones y los núcleos positivos de cada átomo o molécula sufren desplazamiento, debido a la acción del campo, pero en este caso el cuerpo no constituye una región equipotencial. Los materiales que tienen este comportamiento se conocen con el nombre de *dieléctricos*.

En los casos descritos, la carga neta del cuerpo es nula, aunque algunas regiones del mismo adquieren un exceso de carga positiva o negativa. A las cargas que aparecen en la superficie del cuerpo, debido al proceso mencionado, se les denomina inducidas, y, cuando ha ocurrido el desplazamiento de cargas debido a un campo eléctrico, se dice que la materia se ha polarizado.

En los dieléctricos, las cargas de las moléculas no pueden sufrir desplazamiento semejantes a los que experimentan los electrones de conducción en un bloque metálico. Por consiguiente, los desplazamientos originados por fuerzas eléctricas debidas a campos eléctricos externos al dieléctrico muy pequeños, y la magnitud de éstos dependerá de la mayor o menor rigidez con que las cargas de un átomo o molécula estén unidas.

En las siguientes imágenes tenemos el comportamiento de un bloque metálico al ser introducido en un campo eléctrico.

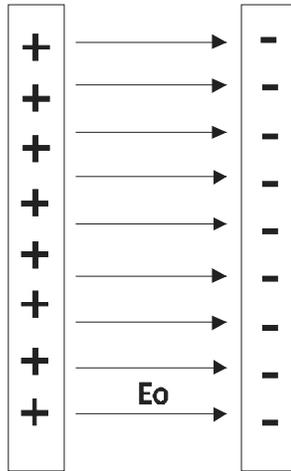


Figura 2.1. Se muestra un campo eléctrico entre dos placas paralelas cargadas.

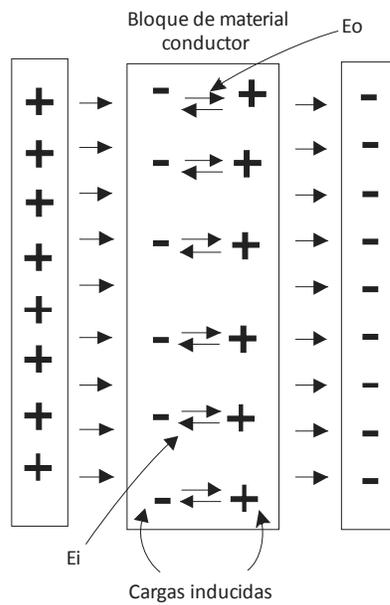


Figura 2.2 Superposición de los campos eléctricos producidos por las placas cargadas y por las cargas inducidas en el bloque metálico; observe que $|E_0| = |E_i|$.

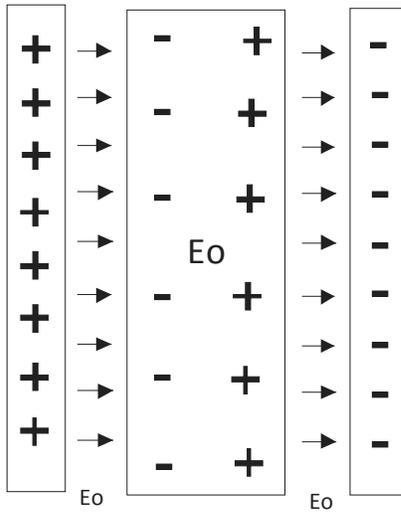


Figura 2.3 Campos eléctricos resultantes en el interior y exterior de bloques metálicos.

En las siguientes figuras analizamos el caso del comportamiento de un bloque dieléctrico al ser introducido en un campo eléctrico.

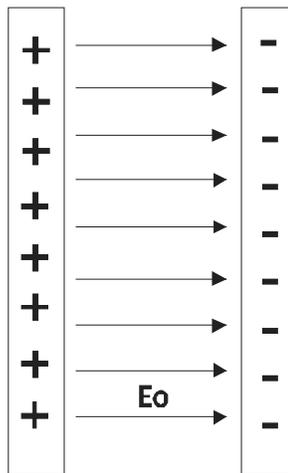


Figura 2.4 Se muestra un campo eléctrico entre dos placas paralelas cargadas.

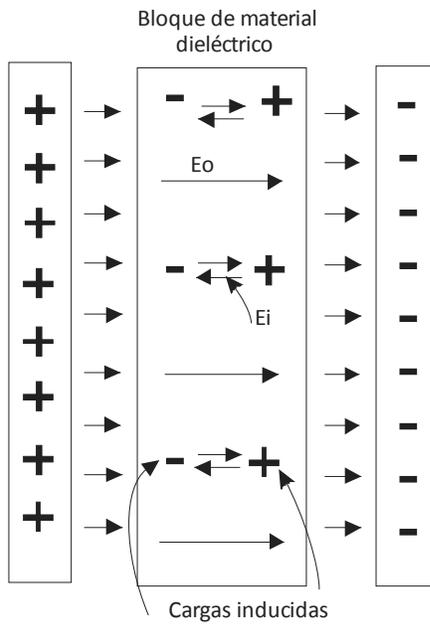


Figura 2.5 Superposición de los campos eléctricos producidos por las placas cargadas y por las cargas inducidas en el bloque dieléctrico metálico; nótese que $|E_0| > |E_i|$.

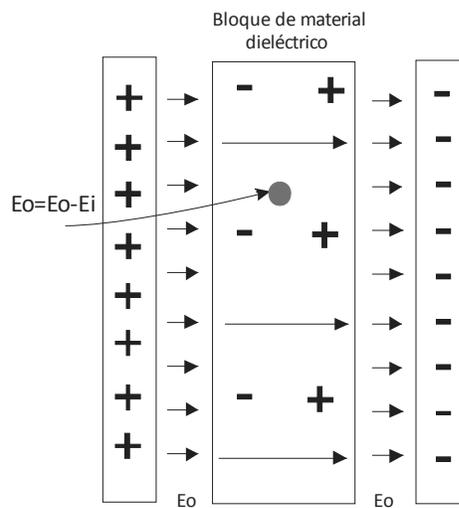


Figura 2.6 Campos eléctricos resultantes en el interior y exterior del bloque dieléctrico.

En las imágenes siguientes se analiza un ejemplo bidimensional de polarización de la materia en un bloque de material dieléctrico.

La figura 2.7 representa la una red de cargas positivas, la figura 2.8 representa una red de cargas negativas, la figura 2.9 representa la superposición de retículos positivos y negativos en ausencia de campo eléctrico externo y la figura 2.10 representa el desplazamiento originado en los retículos positivos y negativos debido a la influencia del campo eléctrico externo.

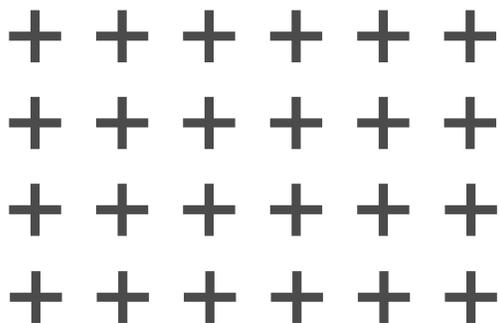


Figura 2.7



Figura 2.8



Figura 2.9

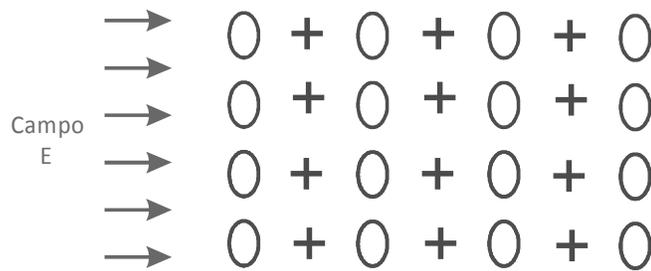


Figura 2.10

Analizando con más detalle el comportamiento de los materiales dieléctricos, se define la magnitud *momento dipolar*, \mathbf{p} , de la siguiente forma;

$$\mathbf{P} = q\mathbf{d} \text{ ----- (m)}$$

En la expresión (m), \mathbf{d} es una magnitud vectorial dirigida de la carga negativa a la positiva; $|\mathbf{d}|$ es la distancia de separación entre las dos cargas puntuales q y $-q$, y q representa la magnitud cualquiera de dichas cargas como podemos observar en la figura 2.11.

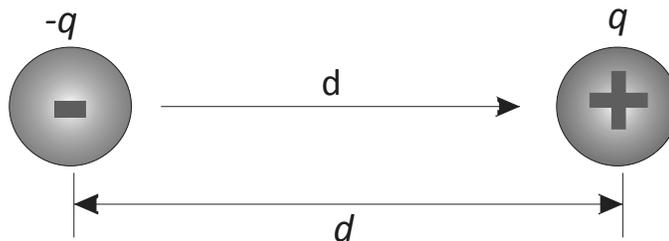


Figura 2.11. Dipolo y momento dipolar eléctrico

El sistema de dos cargas de la misma magnitud, de signo contrario y separado a una cierta distancia, se denomina dipolo eléctrico y es el mostrado en la figura anterior.

Continuando con el estudio de los materiales dieléctricos se observa lo siguiente; las moléculas que constituyen los diferentes tipos de dieléctricos se pueden clasificar en dos tipos, atendiendo el momento dipolar \mathbf{P} , de cada una de ellas, en los párrafos siguientes se analizan los diferentes tipos de molécula.

2.2 Moléculas no polares.

Son aquellas que no poseen un momento dipolar; es decir, su centro de cargas positivo coincide con el centro de cargas negativas. Un ejemplo de este tipo lo constituyen las moléculas de oxígeno diatómico (O_2) la cual podemos observar en la figura 2.12 otro ejemplo es el bióxido de carbono (CO_2) el cual se muestra en la figura 2.13.

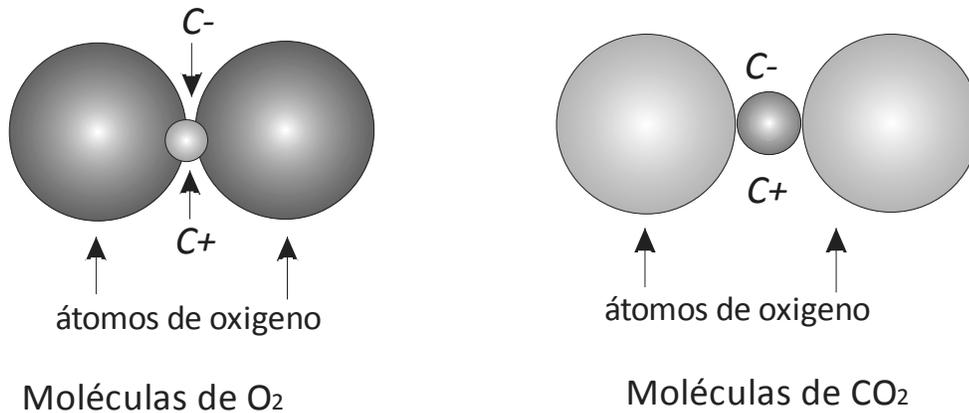


Figura 2.12. Ejemplo de moléculas no polares. Los centros de carga positiva ($C+$) y negativa ($C-$) coinciden en el mismo punto.

Sin embargo, si colocamos moléculas de este tipo dentro de un campo eléctrico, cada una de ellas se comportará como un dipolo eléctrico inducido, debido a que sus partículas subatómicas sufren un desplazamiento originado por la acción de las fuerzas eléctricas.

2.3 Moléculas Polares

Son aquellas en las que los centros de carga positiva y negativa no coinciden y su comportamiento es el de un dipolo eléctrico. Algunos ejemplos de este tipo de moléculas se presentan en la figura 2.13.

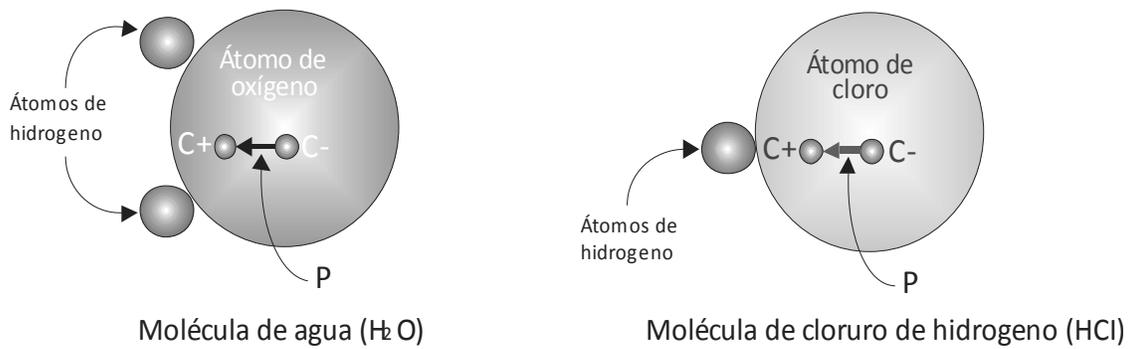


Figura 2.13. Ejemplo de moléculas polares

Al colocar un ion dentro de un dieléctrico constituido por moléculas polares dentro de un campo eléctrico, lo que sucede es que los dipolos de dichas moléculas, que tenían una orientación totalmente al azar, se orientan en la dirección del campo eléctrico aplicado, y el resultado macroscópico es que las caras de dieléctrico, perpendicular al campo eléctrico, se presentan cargas inducidas como se muestra en la figura 2.14.

Se puede observar que ya sean moléculas polares o no polares las que constituyen el dieléctrico, el efecto externo de aplicarle un campo eléctrico es el mismo; es decir, en ambos casos en las caras perpendiculares, al campo eléctrico se presentan cargas inducidas que hacen que todo el dieléctrico se comporte como un dipolo. Este efecto cesa al interrumpirse el campo eléctrico aplicado.

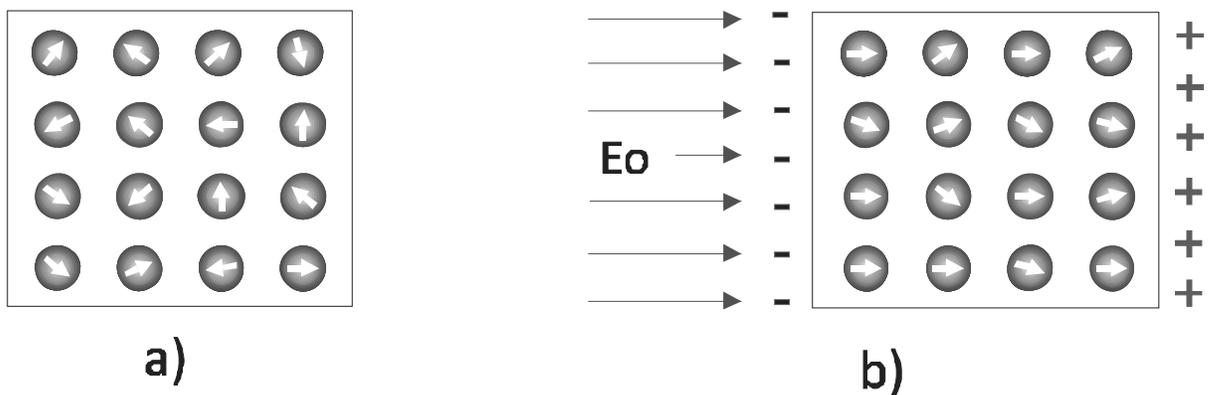


Figura 2.14. Moléculas de un dieléctrico de tipo polar: a) sin campo eléctrico aplicado, y b) al aplicarle un campo eléctrico.

Consideremos el bloque dieléctrico mostrado en la figura 2.15, al cual se le ha aplicado un campo eléctrico. Es posible cuantificar el momento dipolar, \mathbf{p} , del bloque, considerándolo como un dipolo, de la manera siguiente:

$$P=q_i l$$

Pero $q_i = \sigma_i A$

Por lo tanto $p = \sigma_i A l \quad \text{----- (2.1)}$

Si dividimos la expresión (2.1) entre el volumen del bloque, se tiene el momento dipolar en la unidad de volumen

$$\frac{p}{V} = \frac{\sigma_i A l}{V} \quad \text{----- (2.2)}$$

El primer miembro de la expresión 2.2, que representa el momento dipolar en cada unidad de volumen se conoce como vector polarización \mathbf{P} , es decir:

$$P = \frac{p}{V}$$

y como el volumen del bloque es $V = Al$ se puede concluir que la magnitud del vector polarización es igual a la densidad superficial de carga inducida en el bloque y, por lo tanto sus unidades son idénticas.

$$|P| = \sigma_i \left[\frac{C}{m^2} \right] \quad \text{----- (2.3)}$$

El momento dipolar \mathbf{p} a nivel molecular, no es medible por métodos macroscópicos; sin embargo como se observa en la expresión 2.3, el vector de polarización (\mathbf{P}) tiene una íntima relación con la densidad superficial de carga inducida en el bloque de dieléctrico.

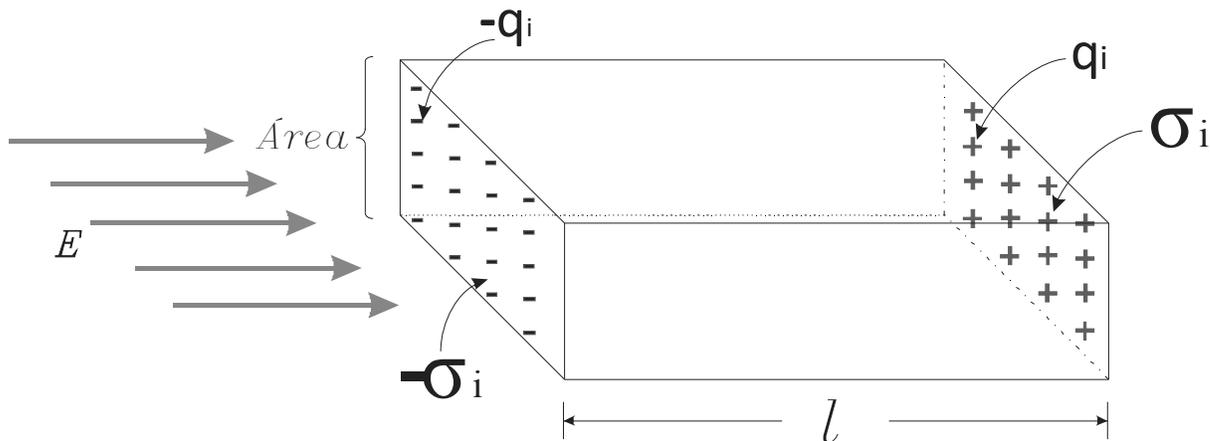


Figura 2.15. Bloque dieléctrico bajo la acción de un campo eléctrico.

2.4 Constantes dieléctricas

Al aplicarle a un dieléctrico, como en la figura 2.15, diferentes intensidades del campo eléctrico, las fuerzas eléctricas sobre las cargas de dicha sustancia variarán en relación directa a las intensidades aplicadas. Esto quiere decir que se modificará, en cada caso, el momento dipolar de de las moléculas y, en consecuencia, la polarización de dicha sustancia. Además, si con una misma intensidad de campo eléctrico se emplean diversas sustancias, la polarización en cada una de ellas será, en general, diferente y esto dependerá de la rigidez con que las cargas estén dispuestas en un átomo dado.

Es posible definir una magnitud que cuantifique el comportamiento descrito, que llamaremos susceptibilidad eléctrica, y representaremos por la letra griega χ_e (ji), con lo cual se puede establecer una relación entre la polarización y el campo eléctrico que produce;

$$P \propto \chi_e E$$

Esta última expresión se puede convertir en una ecuación si introducimos una constante de proporcionalidad que, de acuerdo con nuestro sistema de unidades resulta ser la permisividad del vacío; la relación entre polarización y campo eléctrico se escribe de la siguiente forma;

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \text{ - - - - - (2.4)}$$

Realizando un análisis de unidades veremos cuáles son las correspondientes a la susceptibilidad eléctrica

$$[x_e] = \frac{[P]_u}{[\epsilon_0 E]_u} = \frac{\frac{C}{m^2}}{\frac{C^2}{N \cdot m^2} \frac{N}{C}} = 1$$

Es decir, la susceptibilidad es una cantidad adimensional que nos indica la forma como se comporta una sustancia al ser introducida en una región en la que existe un campo eléctrico, y su valor será típico para cada sustancia. Analicemos ahora lo que sucede cuando un bloque dieléctrico se encuentra entre dos placas metálicas cargadas con igual cantidad de carga pero de signos diferentes, tal como se muestra en la figura 2.16.

Se puede observar que el arreglo de la figura 2.16 es realmente un capacitor de placas planas y paralelas en el que se han introducido un dieléctrico entre los electrodos. En esta figura se han denominado σ_l la densidad superficial de carga en los electrodos, y σ_i la densidad superficial de carga inducida en las caras del dieléctrico.

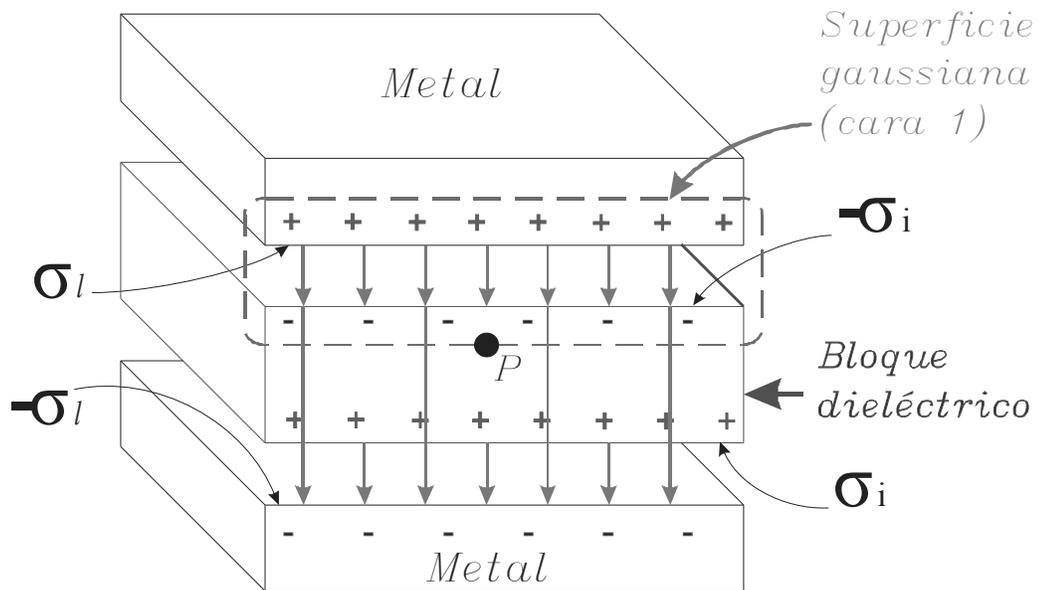


Figura 2.16. Aplicación de la ley de Gauss en un caso que se tienen dieléctricos presentes.

$$E = \frac{\sigma_l - \epsilon_0 \chi_e E}{\epsilon_0}$$

Si en esta última expresión se despeja la magnitud del campo eléctrico, E, se tiene

$$E = \frac{\sigma_l}{\epsilon_0(1 + \chi_e)} \quad \text{----- (2.5)}$$

Definiendo una nueva constante dieléctrica K_e , que denominaremos permitividad relativa, como:

$$K_e = 1 + \chi_e \quad \text{----- (2.6)}$$

La expresión (2.4) nos queda

$$E = \frac{\sigma_l}{K_e \epsilon_0} \quad \text{----- (2.7)}$$

Recordando la expresión que representa la expresión de Gauss para calcular la carga neta contenida en el interior de una superficie la cual se muestra a continuación:

$$\oiint E \cdot dA = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dV$$

al aplicar la ley de Gauss a la superficie mostrada se obtiene la siguiente expresión:

$$EA = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_l - \sigma_i) A$$

y el campo eléctrico para todos los puntos de la cara 1 de la superficie gaussiana está dada por:

$$E = \frac{\sigma_l - \sigma_i}{\epsilon_0}$$

y recordando que $|P| = \sigma_i$ y que $P = \epsilon_0 \chi_e E$ se obtiene:

De la expresión (2.7), se concluye que el campo eléctrico en un punto como el P de la figura r se ve disminuido por el factor $1/K_e$ al introducir en esa región una sustancia dieléctrica. En la definición dada en la expresión (2.6) se observa que la permitividad relativa K_e , es también adimensional.

Al producto $K_e \epsilon_0$ se le denomina permitividad del material; es decir

$$\epsilon = K_e \epsilon_0$$

De esta última expresión se destaca el por qué del nombre de K_e como permitividad relativa, ya que su valor depende de la relación entre la permitividad del material y la del vacío. En función de esta nueva constante, la expresión (2.6) se puede escribir como

$$E = \frac{\sigma_l}{\sigma}$$

Podemos concluir diciendo que el comportamiento de un dieléctrico, al estar en presencia de un campo eléctrico, es cuantificable por las constantes del dieléctrico en cuestión (χ_e , K_e , ϵ_0); aunque cabe resaltar el hecho de que dada la relación existente entre dichas cantidades, al conocer cualquiera de ellas es factible determinar las dos restantes. En la expresión (2.8) se resumen estas relaciones

$$E = K_e \epsilon_0 = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \text{ - - - - - (2.8)}$$

En la tabla 1.1 se presentan los valores de las constantes dieléctricas de algunos materiales comúnmente empleados.

Tabla 2.1. *Propiedades de algunas sustancias dieléctricas.*

Dieléctrico	Susceptibilidad χ_e	Permitividad relativa K_e	Campo eléctrico de ruptura [MV/m]
Aire	0.00059	1.00059	0.8
Bakelita	3.8	4.8	12
Mica	2 a 5	3 a 6	160
Neopreno	5.9	6.9	12
Papel	2.5	3.5	14
Polietileno	1.3	2.3	50
Porcelana	5.5	6.5	4
Vacío	0	1	∞
Vidrio	3.5	4.5	13

2.5 Rigidez dieléctrica

Entendemos por rigidez dieléctrica o rigidez electrostática el valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aisladora y pasa a ser conductor. Se mide en voltios por metro V/m (en el SI).

También podemos definirla como la máxima tensión que puede soportar un aislante sin perforarse. A esta tensión se la denomina tensión de rotura de un dieléctrico.

El término rigidez se utiliza porque cuando la materia transmite energía, vibra en su extensión llevando su mensaje de una molécula a otra. Cuando no vibra, pues está rígida y no transmite nada. Cuanto más rígida es, más aislante resulta.

Hemos visto que el efecto de colocar un dieléctrico dentro de un campo E conlleva la aparición de cargas inducidas en sus caras (véase figura 2.22), esto se debe a la polarización que ha experimentado la sustancia. Además, de las expresiones (2.3) y (2.4), se puede concluir que para un material dado, a mayor intensidad de campo eléctrico se tendrá una mayor densidad superficial de carga inducida; pero este fenómeno no puede crecer indefinidamente, ya que la orientación que sufren las cargas de un átomo o molécula expuesta a un campo eléctrico, es en esencia, debida a fuerzas de origen eléctrico. Si el campo eléctrico aplicado es de magnitud elevada, las fuerzas de origen eléctrico pueden

originar la ionización en los átomos o moléculas. Este desprendimiento de electrones, por el efecto de fuerzas eléctricas, origina que los electrones se desplacen y el material pierda sus propiedades dieléctricas y, en algunos casos, se destruya por combustión.

El campo eléctrico que origina la ionización del dieléctrico se conoce como campo eléctrico de ruptura, y el fenómeno de ionización de la sustancia se denomina ruptura de la rigidez dieléctrica. En la tabla 1.1 se indican los valores del campo de ruptura para diferentes sustancias.

2.6 Materiales dieléctricos

2.6.1 Polímeros. La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones. Algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran significación comercial como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de hevea y de los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

2.6.2 Historia. Los polímeros naturales, por ejemplo la lana, la seda, la celulosa, etc., se han empleado profusamente y han tenido mucha importancia a lo largo de la historia. Sin embargo, hasta finales del siglo XIX no aparecieron los primeros polímeros sintéticos, como por ejemplo el celuloide.

Los primeros polímeros que se sintetizaron se obtenían a través de transformaciones de polímeros naturales. En 1839 Charles Goodyear realiza el vulcanizado del caucho. El nitrato de celulosa se sintetizó accidentalmente en el año 1846 por el químico Christian Friedrich Schönbein y en 1868, John W. Hyatt sintetizó el celuloide a partir de nitrato de celulosa.

El primer polímero totalmente sintético se obtuvo en 1909, cuando el químico belga Leo Hendrik Baekeland fabrica la baquelita a partir de formaldehído y fenol. Otros polímeros importantes se sintetizaron en años siguientes, por ejemplo el poliestireno (PS) en 1911 o el poli (cloruro de vinilo) (PVC) en 1912.

En 1922, el químico alemán Hermann Staudinger comienza a estudiar los polímeros y en 1926 expone su hipótesis de que se trata de largas cadenas de unidades pequeñas unidas por enlaces covalentes. Propuso las fórmulas estructurales del poliestireno y del polioximetileno, tal como las conocemos actualmente, como cadenas moleculares gigantes, formadas por la asociación mediante enlace covalente de ciertos grupos atómicos llamados "unidades estructurales". Este concepto se convirtió en "fundamento" de la química macromolecular sólo a partir de 1930, cuando fue aceptado ampliamente. En 1953 recibió el Premio Nobel de Química por su trabajo.

Wallace Carothers, trabajando en la empresa DuPont desde 1928, desarrolló un gran número de nuevos polímeros: poliésteres, poliamidas, neopreno, etc.

La Segunda Guerra Mundial contribuyó al avance en la investigación de polímeros. Por ejemplo, fue muy importante la sustitución del caucho natural por caucho sintético.

En los años 1950 el alemán Karl Ziegler y el italiano Giulio Natta desarrollaron los catalizadores de Ziegler-Natta y obtuvieron el Premio Nobel de Química en 1963.

Otro Premio Nobel de Química fue concedido por sus estudios de polímeros a Paul J. Flory en 1974.

En la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron nuevos métodos de obtención, polímeros y aplicaciones. Por ejemplo, catalizadores metalocénicos, fibras de alta resistencia, polímeros conductores (en 2000 Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid y Hideki Shirakawa recibieron el Premio Nobel de Química por el desarrollo de estos polímeros), estructuras complejas de polímeros, polímeros cristales líquidos, etc.

2.7 Propiedades de los polímeros

2.7.1 Propiedades eléctricas. Los polímeros industriales en general son malos conductores eléctricos, por lo que se emplean masivamente en la industria eléctrica y electrónica como materiales aislantes. Las baquelitas (resinas fenólicas) sustituyeron con ventaja a las porcelanas y el vidrio en el aparellaje de baja tensión hace ya muchos años; termoplásticos como el PVC y los PE, entre otros, se utilizan en la fabricación de cables eléctricos, llegando en la actualidad a tensiones de aplicación superiores a los 20 KV, y casi todas las carcasas de los equipos electrónicos se construyen en termoplásticos de magníficas propiedades mecánicas, además de eléctricas y de gran duración y resistencia al medio ambiente, como son, por ejemplo, las resinas ABS.

Para evitar cargas estáticas en aplicaciones que lo requieran, se ha utilizado el uso de antiestáticos que permite en la superficie del polímero una conducción parcial de cargas eléctricas.

Evidentemente la principal desventaja de los materiales plásticos en estas aplicaciones está en relación a la pérdida de características mecánicas y geométricas con la temperatura. Sin embargo, ya se dispone de materiales que resisten sin problemas temperaturas relativamente elevadas (superiores a los 200 °C).

Las propiedades eléctricas de los polímeros industriales están determinadas principalmente, por la naturaleza química del material (enlaces covalentes de mayor o menor polaridad) y son poco sensibles a la micro estructura cristalina o amorfa del material, que afecta mucho más a las propiedades mecánicas. Su estudio se acomete mediante

ensayos de comportamiento en campos eléctricos de distinta intensidad y frecuencia. Seguidamente se analizan las características eléctricas de estos materiales.

Los polímeros conductores fueron desarrollados en 1974 y sus aplicaciones aún están siendo estudiadas.

2.7.2 Propiedades físicas de los polímeros. Estudios de difracción de rayos X sobre muestras de polietileno comercial, muestran que este material, constituido por moléculas que pueden contener desde 1.000 hasta 150.000 grupos CH₂ – CH₂ presentan regiones con un cierto ordenamiento cristalino, y otras donde se evidencia un carácter amorfo: a éstas últimas se les considera defectos del cristal. En este caso las fuerzas responsables del ordenamiento cuasicristalino, son las llamadas fuerzas de Van der Waals. En otros casos (nylon 66) la responsabilidad del ordenamiento recae en los enlaces de H. La temperatura tiene mucha importancia en relación al comportamiento de los polímeros. A temperaturas más bajas los polímeros se vuelven más duros y con ciertas características vítreas debido a la pérdida de movimiento relativo entre las cadenas que forman el material. La temperatura en la cual funden las zonas cristalinas se llama temperatura de fusión (T_f) Otra temperatura importante es la de descomposición y es conveniente que la misma sea bastante superior a T_f.

2.7.3 Propiedades mecánicas. Son una consecuencia directa de su composición así como de la estructura molecular tanto a nivel molecular como supermolecular. Actualmente las propiedades mecánicas de interés son las de los materiales polímeros y éstas han de ser mejoradas mediante la modificación de la composición o morfología por ejemplo, cambiar la temperatura a la que los polímeros se ablandan y recuperan el estado de sólido elástico o también el grado global del orden tridimensional. Normalmente el incentivo de estudios sobre las propiedades mecánicas es generalmente debido a la necesidad de correlacionar la respuesta de diferentes materiales bajo un rango de condiciones con objeto de predecir el desempeño de estos polímeros en aplicaciones prácticas. Durante mucho tiempo los ensayos han sido realizados para comprender el comportamiento mecánico de los materiales plásticos a través de la deformación de la red de polímeros reticulados y cadenas moleculares enredadas, pero los esfuerzos para describir la deformación de otros polímeros sólidos en términos de procesos operando a escala molecular son más recientes. Por lo tanto se considerarán los diferentes tipos de respuesta mostrados por los polímeros sólidos a

diferentes niveles de tensión aplicados; elasticidad, viscoelasticidad, flujo plástico y fractura.

2.8 Clasificación.

Existen varias formas posibles de clasificar los polímeros, sin que sean excluyentes entre sí. Según su origen

2.8.1 Polímeros naturales. Existen en la naturaleza muchos polímeros y las biomoléculas que forman los seres vivos son macromoléculas poliméricas. Por ejemplo, las proteínas, los ácidos nucleicos, los polisacáridos (como la celulosa y la quitina), el hule o caucho natural, la lignina, etc.

2.8.2. Polímeros semisintéticos. Se obtienen por transformación de polímeros naturales. Por ejemplo, la nitrocelulosa, el caucho vulcanizado, etc.

2.8.3. Polímeros sintéticos. Muchos polímeros se obtienen industrialmente a partir de los monómeros. Por ejemplo, el nylon, el poliestireno, el cloruro de polivinilo (PVC), el polietileno, etc.

Según su mecanismo de polimerización. En 1929 Carothers propuso la reacción:

2.8.4 Polímeros de condensación. La reacción de polimerización implica a cada paso la formación de una molécula de baja masa molecular, por ejemplo agua.

2.8.5 Polímeros de adición. La polimerización no implica la liberación de ningún compuesto de baja masa molecular. Ésta polimerización se genera cuando un "catalizador", inicia la reacción. Este catalizador separa la unión doble carbono en los monómeros, luego aquellos monómeros se unen con otros debido a los electrones libres, y así se van uniendo uno tras uno hasta que la reacción termina.

2.8.6 Polímeros formados por etapas. La cadena de polímero va creciendo gradualmente mientras haya monómeros disponibles, añadiendo un monómero cada vez. Esta categoría incluye todos los polímeros de condensación de Carothers y además algunos otros que no

liberan moléculas pequeñas pero sí se forman gradualmente, como por ejemplo los poliuretanos.

2.8.7 Polímeros formados por reacción en cadena. Cada cadena individual de polímero se forma a gran velocidad y luego queda inactiva, a pesar de estar rodeada de monómero.

2.9 Según su composición química.

Se dividen en dos grandes grupos:

- Polímeros orgánicos. Posee en la cadena principal átomos de carbono.
- Polímeros orgánicos vinílicos. La cadena principal de sus moléculas está formada exclusivamente por átomos de carbono.

Dentro de los polímeros orgánicos vinílicos se pueden distinguir un grupo de gran importancia para el campo de la ingeniería eléctrica; los polímeros vinílicos halogenados, que incluyen átomos de halógenos (cloro, flúor...) en su composición y ejemplo de ellos son el cloruro de polivinilo (PVC) y PTFE muy utilizada en el área de los aislantes eléctricos.

2.10 Según sus aplicaciones

Según sus aplicaciones. Atendiendo a sus propiedades y usos finales, los polímeros pueden clasificarse en:

2.10.1 Elastómeros. Son materiales con muy bajo módulo de elasticidad y alta extensibilidad; es decir, se deforman mucho al someterlos a un esfuerzo pero recuperan su forma inicial al eliminar el esfuerzo. En cada ciclo de extensión y contracción los elastómeros absorben energía, una propiedad denominada resiliencia.

2.10.2 Plásticos. Son aquellos polímeros que, ante un esfuerzo suficientemente intenso, se deforman irreversiblemente, no pudiendo volver a su forma original. Hay que resaltar que el término plástico se aplica a veces incorrectamente para referirse a la totalidad de los polímeros.

2.10.3 Fibras. Presentan alto módulo de elasticidad y baja extensibilidad, lo que permite confeccionar tejidos cuyas dimensiones permanecen estables.

2.10.4 Recubrimientos. Son sustancias, normalmente líquidas, que se adhieren a la superficie de otros materiales para otorgarles alguna propiedad, por ejemplo resistencia a la abrasión.

2.10.5 Adhesivos. Son sustancias que combinan una alta adhesión y una alta cohesión, lo que les permite unir dos o más cuerpos por contacto superficial.

2.11 Según respuesta a la temperatura

Existen otros tipos de clasificaciones las cuales no están al alcance de este texto como por ejemplo una clasificación debida al comportamiento al elevar su temperatura. Para clasificar polímeros, una de las formas empíricas más sencillas consiste en calentarlos por encima de cierta temperatura. Según si el material funde y fluye o por el contrario no lo hace se diferencian dos tipos de polímeros:

- 1) Termoplásticos, que fluyen (pasan al estado líquido) al calentarlos y se vuelven a endurecer (vuelven al estado sólido) al enfriarlos. Su estructura molecular presenta pocos (o ningún) entrecruzamientos. Ejemplos: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC).
- 2) Termoestables, que no fluyen, y lo único que conseguimos al calentarlos es que se descompongan químicamente, en vez de fluir. Este comportamiento se debe a una estructura con muchos entrecruzamientos, que impiden los desplazamientos relativos de las moléculas.

La clasificación termoplásticos / termoestables es independiente de la clasificación elastómeros / plásticos / fibras. Existen plásticos que presentan un comportamiento termoplástico y otros que se comportan como termoestables. Esto constituye de hecho la principal subdivisión del grupo de los plásticos y hace que a menudo cuando se habla de "los termoestables" en realidad se haga referencia sólo a "los plásticos termoestables". Pero ello no debe hacer olvidar que los elastómeros también se dividen en termoestables (la gran mayoría) y termoplásticos (una minoría pero con aplicaciones muy interesantes).

En la clasificación de polímeros termoplásticos se encuentra el polietileno, el polietileno (PE) es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(CH_2-CH_2)_n$. Por su alta producción mundial (aproximadamente 60 millones de toneladas son producidas anualmente (2005) alrededor del mundo ^[6]) es también el más barato, siendo uno de los plásticos más comunes. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química $CH_2=CH_2$ y llamado eteno por la IUPAC), del que deriva su nombre.

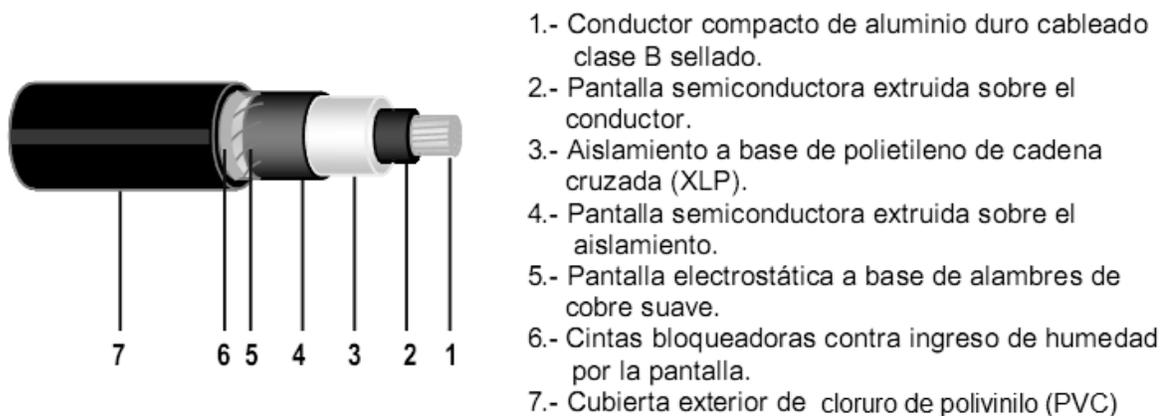


Figura 2.17. Aplicación del polietileno de cadena cruzada (XLP) y del cloruro de polivinilo (PVC) en la fabricación de cables de alto voltaje.

El polietileno más importante para la industria eléctrica es el polietileno de cadena cruzada (XLP) el cual es utilizado en el aislamiento de cables en tensiones de hasta 40kV.

2.12 Hexafluoruro de azufre (SF_6)

El hexafluoruro de azufre es un compuesto inorgánico de fórmula SF_6 . En condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, inodoro, no tóxico y no inflamable, con la peculiaridad de ser cinco veces más pesado que el aire, presentando una densidad de 6,13 g/L a una atmósfera de presión. El SF_6 presenta geometría molecular octaédrica, consistente en seis átomos de flúor enlazados a un átomo central de azufre. Es una molécula hipervalente que se encuentra en gases no polares. Es un gas muy inerte y poco soluble en agua, aunque sí en solventes orgánicos no polares (alcohol, éter). También reacciona con el litio.

Es un gas causante de efecto invernadero, catalogado con un índice GWP de 1761 (unas 20.000 veces más que el CO₂), pero dada su gran densidad no asciende a las capas altas de la atmósfera. Unido eso a su escasa presencia en la atmósfera, su contribución al calentamiento global es mínima.

Fue descubierto en 1901 por el premio Nobel de química Henri Moissan y por Paul Lebeau, sintetizado a partir de la exposición directa de azufre (S₈) y flúor gaseoso (F₂) a 300°C. En la actualidad sigue utilizándose esencialmente el mismo sistema para su fabricación industrial, con el único añadido de posteriores procesos de purificación.

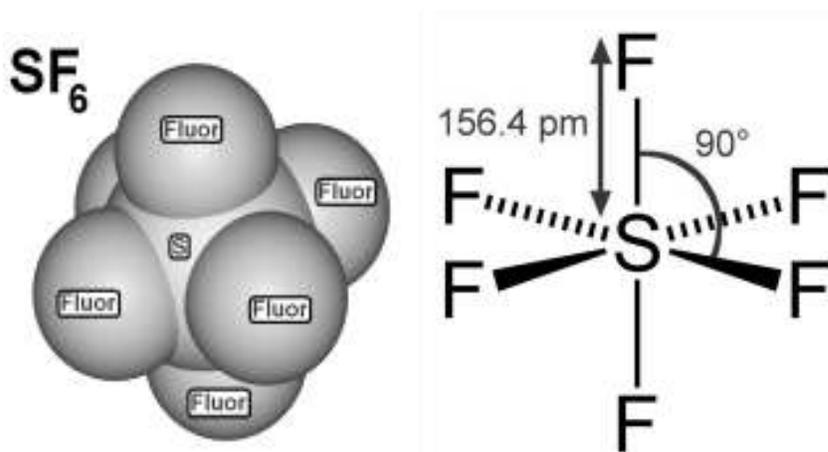


Figura 2.18. Composición química del gas SF₆.

2.12.1 Características. Es un gas de elevada constante dieléctrica (muy aislante), por lo que se usa habitualmente como medio para extinguir el arco eléctrico en los sistemas de distribución de electricidad, especialmente en altos voltajes. También se aplica en algunos procesos industriales siderúrgicos, y en cirugía ocular. A elevadas temperaturas (más de 204°C), se descompone en sustancias tóxicas, como ácido fluorhídrico, dióxido de azufre y distintos sulfatos. A continuación se muestran algunas de sus características principales a modo ilustrativo:

La fórmula química del gas hexafluoruro de azufre es SF₆. En las siguientes tablas se muestran las propiedades químicas y físicas del SF₆.

Peso molecular y composición química:

Tabla 2.2

Peso molecular	146,06
Contenido de azufre	21,95%
Contenido de flúor	78,05%

Solubilidad:

Tabla 2.3

En agua (25°C, 1 atm)	0,001 ml/ml
En aceite dieléctrico	0,297 ml/ml

Constantes críticas:

Tabla 2.4

Temperatura crítica	45,64 °C
Presión crítica	38,6990 bar
Densidad crítica	0,725 g/cm³
Volumen crítico molar	201 ml

Alrededor del año 1901 cuando se logra por primera vez la síntesis del SF₆ también se comprueba la excelente estabilidad química del SF₆ sometido a un arco eléctrico. Este acontecimiento permite prever el éxito posterior que tendría como aislante eléctrico.

El gas SF₆ reúne las siguientes características:

- 1.- Inodoro. (*)
- 2.- Incoloro. (*)
- 3.- Toxicidad media.
- 4.- Muy estable.
- 5.- No inflamable.

(*) En condiciones normales de presión y temperatura (presión absoluta: 1.013 hPa, temperatura: 20°C).

Además de su utilización en los equipos eléctricos, el gas SF₆ tiene amplia difusión en otras áreas como aislamiento fónico, gas trazador en minas, etc. La rigidez dieléctrica del SF₆, es muy superior a la del aire (más del doble) y sometido a presiones de 2 a 4 bares es cinco veces superior. Esta característica es la que lo destaca como medio dieléctrico.

El gas SF₆ tiene un comportamiento excelente como gas de corte de arcos eléctricos, permitiendo un rápido restablecimiento de la tensión. Esto lo logra especialmente debido a que su disociación es reversible y, además, a que posee una gran estabilidad térmica.

El SF₆ contiene impurezas que generalmente no tienen influencia sobre sus propiedades, siempre que se encuentren dentro de los valores del siguiente cuadro:

Tabla 2.5. *Impurezas del SF₆*

Impurezas	Concentración Máxima (Masa)
Tetracloruro de carbono (CF ₄)	0,05%
Oxígeno+Nitrógeno, aire	0,05%
Agua	15 ppm
Acidez (HF)	0,3 ppm
Fluoruros hidrolisables (HF)	1 ppm
Aceite mineral	10 ppm

No está comprobado que el SF₆ sea cancerígeno. En cambio, sí contribuye al efecto invernadero. Por esta razón, se debe evitar la posibilidad de que entre en contacto con la atmósfera.

Normalmente el gas SF₆ se suministra en garrafas o cilindros, líquido y a la temperatura ambiente. La presión de prueba de los cilindros es de 70 bar.

2.12.2 Densidad y presión. La densidad de los gases está directamente relacionada con la presión de ellos.

En efecto, partiendo de la Ley de Boyle:

$$PV = \text{constante (Temperatura constante; masa constante)}$$

P: Presión V: Volumen

Considerando la “constante universal de los gases ideales” R y la temperatura centígrada absoluta T, se tiene:

$$PV = n R T$$

Ecuación denominada “Ecuación de estado de los gases ideales”, donde n es el número de moles y es igual a la masa m del gas dividida por su masa molecular M.

$$n = m/M$$

Por lo tanto

$$PV = m(R/M) T$$

Por definición, la densidad de un gas, ρ , es $\rho = m / V$. Resulta entonces:

$$P = \rho \frac{R}{M} T \quad \text{o bien} \quad \rho = \frac{PM}{RT}$$

Se observa que la densidad de un gas depende de su presión P, además de su temperatura T y su masa molecular M. Es importante señalar que la masa molecular permanece constante mientras que la presión varía según las oscilaciones de temperatura. Por esta razón, para detectar las pérdidas de SF₆ se utiliza un densímetro y no un presostato.

2.12.3 Principales Fabricantes. Los principales proveedores en el ámbito mundial son^[7]:

- Ausimont (Italia).
- Promosol (Francia).
- Allied Chemical (USA).
- Solvay-Fluor and Derivate (Alemania).
- Air Products Imperial Chemical Industries (Inglaterra).

2.13 Aplicaciones.

De las 8,000 Toneladas de SF₆ producidas al año, la mayor parte (cerca de 6,000 toneladas) es utilizada en la industria eléctrica como medio dieléctrico.

2.13.1 SF₆ como medio dieléctrico. El gas SF₆ se utiliza en la industria eléctrica como un medio gaseoso dieléctrico de alta tensión (35 kV o más), disyuntores, interruptores y otros equipos eléctricos, a menudo reemplazando los circuitos de interrupción aislados en aceite (OCB), que pueden contener PCBs perjudiciales. El SF₆ a bajas presiones se utiliza como aislante en Subestaciones aisladas en Gas con (GIS), ya que tiene una mejor rigidez dieléctrica que la del aire o el nitrógeno seco. Esta propiedad hace posible reducir significativamente el tamaño del equipo eléctrico. Esto hace más conveniente para ciertos propósitos, tales como la colocación en interiores, caso contrario al equipo aislado en aire el cual ocupa mucho más espacio. El equipo eléctrico con aislamiento en gas también es más resistente a los efectos de la contaminación y el cambio climático, además de ser más confiable en la operación a largo plazo debido a su entorno operativo controlado. Los interruptores de circuito en vacío (VCBs) están desplazando a los interruptores de SF₆ en la industria, ya que son más seguros y requieren menos mantenimiento. Aunque la mayoría de los productos de descomposición del SF₆ tienden rápidamente a reorganizarse, el arco eléctrico y/o el “efecto Corona” puede llegar a producir disulfuro decafluorido (S₂F₁₀), un gas altamente tóxico, con una toxicidad similar a la de Fosgeno. El S₂F₁₀ fue considerado una potencial arma de guerra química en la Segunda Guerra Mundial, ya que no producen lagrimeo o irritación de la piel, proporcionando así poco aviso de la exposición.

El SF₆ también es comúnmente encontrado como un dieléctrico de alto voltaje en las fuentes de alta tensión de los aceleradores de partículas, tales como los generadores de Van de Graaff y Pelletrons y microscopios de alta tensión de transmisión de electrones.

2.12.2 Uso médico. Debido a que el SF₆ es relativamente lenta absorbido por el torrente sanguíneo, se utiliza para proporcionar un taponamiento a largo plazo o el enchufe de un agujero de la retina en las operaciones de reparación desprendimiento.

En otra aplicación médica, el SF₆ se emplea como un agente de contraste para obtener imágenes de ultrasonido. Las microburbujas del hexafluoruro de azufre se administran en solución a través de la inyección en una vena periférica. Estas microburbujas mejorar la

visibilidad de los vasos sanguíneos a los estudios por ultrasonidos. Esta aplicación se ha utilizado para estudiar la vascularización de los tumores entre otras cosas.

2.13.3 Compuesto marcador. El hexafluoruro de azufre fue el gas indicador que se utilizó en la primera calibración vía aérea de un modelo de dispersión de una carretera; este programa de investigación fue patrocinado por los EE.UU., la Agencia de Protección Ambiental y se llevó a cabo en Sunnyvale, California, en EE.UU. en la autopista 101. El gas SF₆ es un gas indicador permanente de uso general para su uso en experimentos a corto plazo de la eficacia de la ventilación en edificios y recintos interiores, y para determinar las tasas de infiltración. Hay dos factores principales que recomiendan su uso: 1) Su concentración se puede medir con una precisión satisfactoria en concentraciones muy bajas, y (2) la atmósfera de la Tierra tiene una concentración despreciable de SF₆.

El hexafluoruro de azufre se utiliza como gas de prueba inofensivo en experimentos en la estación de St John's Wood en Londres, Reino Unido, el 25 de marzo de 2007 fue lanzado el gas en toda la estación y monitoreado el cómo se acumula en los alrededores. El propósito del experimento, que había sido anunciado a principios de marzo por el Secretario de Estado de Transporte, Douglas Alexander, fue investigar cómo gases tóxicos podrían extenderse a través de estaciones de metro y los edificios durante un ataque terrorista.

Se ha utilizado con éxito como un indicador en oceanografía para estudiar la mezcla diapycnal y el intercambio de gases aire-mar.

2.13.4 Otros Usos. El hexafluoruro de azufre también se utiliza como reactivo para reaccionar en un sistema de propulsión basado en un ciclo Rankine cerrado, que reaccionan con litio sólido, tal como se utiliza en la Marina de los Estados Unidos en los torpedos Mark 50. El SF₆ en plasma se utiliza también en la industria de semiconductores como marcador.

La industria del magnesio utiliza grandes cantidades de SF₆ como gas inerte para rellenar moldes de fundición. El hexafluoruro de azufre también se utiliza para presurizar las guías de onda en los sistemas de radar.

El SF₆ se utiliza también como una alternativa al aceite en el aislamiento de equipos de alta tensión, como transformadores de potencia y subestaciones.

2.13.5 Efecto invernadero por SF₆. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el SF₆ es uno de los gases de efecto invernadero más potente que se han evaluado, con un potencial de calentamiento global de 22,800 ^[3] veces el del CO₂ en comparación durante un período de 100 años. Las mediciones de SF₆ demostraron que su relación de mezcla media mundial ha aumentado en cerca de 0.2 ppm por año a cerca de 7 ppm en el año 2010 ^[5]. El Hexafluoruro de azufre tiene una vida promedio extensa, es inerte en la troposfera y la estratosfera y tiene una vida estimada en la atmósfera de 800-3200 años ^[4]. El SF₆ es muy estable (para los países que presentan informes de sus emisiones a la UNFCCC, un potencial de calentamiento atmosférico (GWP) de 23,900 para el SF₆ fue sugerido en la tercera Conferencia de la Asociación Mundial del Agua: la unidad GWP es utilizada en el protocolo de Kioto) ^[8]. Las concentraciones promedio mundiales de SF₆ aumentaron un siete por ciento anual durante los años 1980 y 1990, principalmente como resultado de su uso en la industria de producción de magnesio, y por las empresas eléctricas y fabricantes de productos electrónicos. Dadas las bajas cantidades de emisiones de SF₆ al ambiente en comparación con el dióxido de carbono, su contribución general al calentamiento global se estima en menos del 0,2 por ciento.

En Europa, el SF₆ corresponde a la norma F-GAS la cual prohíbe o controla el uso de este gas en diversas aplicaciones. Desde el 1 de enero de 2006, está prohibido el SF₆ como gas trazador y en todas las aplicaciones excepto interruptores de alto voltaje ^[1].

2.13.6 Efectos fisiológicos y precauciones. El SF₆ tiene la capacidad de alterar las ondas de sonido del sistema vocal humano. El gas puede ser inhalado en cantidades pequeñas de forma segura y causar la relajación de la voz causando un sonido grave. Esto se debe a la gran masa molar del gas. A diferencia de helio, que tiene una masa molar de alrededor de 4 gr/mol, el SF₆ tiene una masa molar de alrededor de 146 gr/mol, y la velocidad del sonido a través del gas es 0.44 veces la velocidad del sonido en el aire debido a la inercia de las grandes moléculas del SF₆. En comparación, la masa molar del aire, que es alrededor del 80% de nitrógeno y 20% de oxígeno, es de aproximadamente 30 gr/mol. La inhalación de SF₆ provoca una disminución del timbre, o la frecuencia de los formantes y del tracto vocal, en contraste con la inhalación de helio la cual los aumenta ^[2]. Otros gases como el freón o

xenón tienen un efecto similar, aunque el Xenón por lo general no se utiliza para la demostración de estos efectos debido a su alto costo y propiedades anestésicas.

Es posible respirar con seguridad los gases pesados como el xenón o el hexafluoruro de azufre, siempre y cuando incluyan una mezcla del 20% de oxígeno. Los pulmones mezclan de los gases de manera muy eficaz y rápida logrando que los gases pesados se purguen junto con el oxígeno y no se acumulan en la parte inferior de los pulmones. Hay, sin embargo, un peligro asociado con cualquier gas pesado en grandes cantidades; puede estar presente de manera invisible en un contenedor, y si una persona entra al contenedor lleno de un gas inodoro e incoloro, puede estar respirando el gas sin saberlo.