



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño bajo norma y puesta en
marcha de una subestación en
anillo en SF₆

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ING. ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
PRESENTA
JESÚS GARCÍA SANTILLÁN

DIR.: ING. HUGO ALFREDO GRAJALES
ROMÁN



MÉXICO D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Con afecto a mis dos pequeño hijos, Joshua y Jimena.

Agradecimientos

A mi padre que siempre estuvo a mi lado.

A mi madre por su paciencia y amor.

A mi esposa por estar siempre a mi lado.

A mis hermanos que son mis eternos compañeros.

A mis sobrinos de los que aprendí la belleza de la infancia. .

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I	
FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA	1
1.1 Electrostática	2
1.2 Carga Eléctrica	3
1.3 Tensión eléctrica	4
1.4 Conducción eléctrica	6
1.5 Materiales conductores	7
1.6 Sólidos conductores y sólidos aislantes	7
1.7 Metales	8
1.8 Semiconductores	8
1.9 Superconductores	9
1.10 Electrolitos	9
1.11 Gases y plasmas	10
1.12 El vacío	10
1.13 Corriente eléctrica	11
1.14 Electromagnetismo	13
1.15 Perdida de energía por limitantes físicas	17
1.15.1 Resistencia	17
1.16 Resistividad	20
1.17 Efectos de la temperatura	22
1.18 Coeficiente térmico de resistencia	23
CAPÍTULO II	
MEDIOS DIELECTRICOS	
2.1 Polarización de la materia	27
2.2 Moléculas no polares	33
2.3 Moléculas polares	33
2.4 Constantes Dieléctricas	36
2.5 Rigidez Dieléctrica	40
2.6 Materiales Dieléctricos	41
2.6.1 Polímeros	41
2.6.2 Historia	42
2.7 Propiedades de los polímeros	43
2.7.1 Propiedades eléctricas	43
2.7.2 Propiedades físicas de los polímeros	44

2.7.3 Propiedades mecánicas	44
2.8 Clasificación.	45
2.8.1 Polímeros naturales	45
2.8.2. Polímeros semisintéticos	45
2.8.3. Polímeros sintéticos	45
2.8.4 Polímeros de condensación	45
2.8.5 Polímeros de adición	45
2.8.6 Polímeros formados por etapas	45
2.8.7 Polímeros formados por reacción en cadena	46
2. 9 Según su composición química.	46
2.10 Según sus aplicaciones	46
2.10.1 Elastómeros	46
2.10.2 Plásticos	46
2.10.3 Fibras	47
2.10.4 Recubrimientos	47
2.10.5 Adhesivos	47
2.11 Según respuesta a la temperatura	47
2.12 Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	48
2.12.1 Características	49
2.12.2 Densidad y presión	51
2.12.3 Principales fabricantes	52
2.13 Aplicaciones.	53
2.13.1 SF ₆ como medio dieléctrico	53
2.13.2 Uso médico	53
2.13.3 Compuesto marcador	54
2.13.4 Otros Usos	54
2.13.5 Efecto invernadero por SF ₆	55
2.13.6 Efectos fisiológicos y precauciones	55

CAPITULO 3

SUBESTACIONES AISLADAS EN SF₆

3.1 Conceptos Básicos	58
3.2 Evolución histórica	59
3.3 Generalidades de las GIS	60
3.4 Dimensiones de las subestaciones asiladas en Gas	63
3.5 Costos	66
3.6 Elementos generales de una subestación en SF ₆	67
3.7 Módulos de Juegos de barras	69
3.8 Módulos de de interruptor	71
3.9 Módulos de seccionadores	73
3.10 Módulos de transformadores de medición	73
3.11 Módulos de descargadores de tensión	74
3.12 Módulos de empalme	75

3.13	Tableros de control y comando, protecciones y medidores	78
3.14	Subestaciones aisladas en gas para media tensión (MV-GIS)	79
3.15	Tipos de distribución en MV-GIS.	82
3.15.1	Distribución primaria	83
3.15.2	Características de MV-GIS de distribución primaria	84
3.15.3	Aplicaciones típicas de MV-GIS de distribución primaria	84
3.15.4	Distribución secundaria	85
3.15.5	Características de MV-GIS de distribución secundaria	85
3.15.6	Aplicaciones típicas de MV-GIS de distribución secundaria	86
3.16	Características del sistema de aislamiento de MV-GIS	86

CAPITULO 4

DISEÑO DE LA SUBESTACIÓN

4.1	Arreglos comunes de subestaciones	89
4.2	Generalidades del proyecto	90
4.3	Objetivo del proyecto	93
4.4	Comportamiento y naturaleza de la carga y del sistema	93
4.5	Requerimientos del diseño	94
4.6	Criterios de diseño	96
4.6.1	Aspectos generales	96
4.6.2	Aspectos del diseño	98
4.6.3	Sistema de emergencia	98
4.6.4	Sincronización	99
4.7	Estudio de corto circuito	99
4.7.1	Aspectos generales	99
4.7.2	Software de Cálculo	100
4.7.3	Datos de entrada para el modelado del sistema eléctrico	100
4.7.4	Cálculo de corto circuito	104
4.7.5	Procedimiento del estudio de corto circuito	105
4.7.6	Primera red (Momentánea)	105
4.7.7	Segunda red (interruptiva)	106
4.7.8	Tercera red (30 ciclos)	106
4.7.9	Método de cálculo usado para el estudio	106
4.8	Resultados del análisis de corto circuito	107
4.8.1	Resultados del análisis de C.C. opción normalmente Abierto al centro	107
4.8.2	Resultados del análisis de C.C. opción Ruta A	108
4.9	Conclusiones y recomendaciones	108

CAPITULO 5

COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

5.1	Conceptos básicos	110
5.2	Generalidades	112
5.2.1	Esquemas de protección con relevadores	112
5.2.2	Interruptores de potencia	112

5.3	Diseño conceptual	113
5.3.1	Generalidades del Proyecto	113
5.3.2	Objetivo general	113
5.3.3	Objetivo de un Estudio de Coordinación de Protecciones	114
5.3.4	Metodología del Estudio de Coordinación de Protecciones.	114
5.4	Aspectos generales de la coordinación de protecciones	116
5.4.1	Software de Cálculo	117
5.4.2	Consideraciones Importantes	117
5.5	Configuración del Sistema	118
5.5.1	Transformadores.	118
5.5.2	Motores	118
5.5.3	Cables	118
5.5.4	Dispositivos de Protección	119
5.6	Criterios Básicos Empleados	120
5.6.1	Cálculo y Ajuste de los Dispositivos de Protección.	120
5.6.2	Ajuste de protecciones	120
5.7	Conclusiones y recomendaciones	121
CAPITULO 6		
MONTAJE DE SUBESTACION Y PRUEBAS DE CAMPO		
6.1	Datos necesarios para la adquisición	127
6.2	Pruebas	128
6.2.1	Pruebas de tipo	129
6.2.2	Pruebas de recepción	130
6.2.3	Pruebas en obra	131
6.3	Montaje y mantenimiento	132
6.4	Obras civiles y pruebas del sistema.	134
6.5	Detalles finales de la instalación	139
6.6	Mantenimiento	141
CONCLUSIONES		142
BIBLIOGRAFIA		143

INTRODUCCIÓN

Desde la Antigua Grecia se conoce que al frotar ámbar con una piel, ésta adquiere la propiedad de atraer cuerpos ligeros tales como trozos de paja y plumas pequeñas. Su descubrimiento se le atribuye al filósofo griego Tales de Mileto, quién vivió hace unos 2500 años.

La electricidad del griego *elektron*, cuyo significado es ámbar es un fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros. Se puede observar de forma natural en fenómenos atmosféricos, por ejemplo los rayos, que son descargas eléctricas producidas por la transferencia de energía entre la ionosfera y la superficie terrestre (proceso complejo del que los rayos solo forman una parte). Otros mecanismos eléctricos naturales los podemos encontrar en procesos biológicos, como el funcionamiento del sistema nervioso, como ya se menciona un rayo es el resultado de una descarga eléctrica en una nube, la cual provoca una intensa luz, calor, ruido, campos magnéticos e inducción de altos voltajes y corrientes.

En el cuerpo humano el ritmo cardiaco depende de la electricidad produciendo los latidos. De allí que todos los sistemas dependen de la sincronización del latido. El electrocardiógrafo es un aparato que permite medir esta pequeña cantidad de electricidad que gobierna al corazón. Un resucitador es otro aparato que, por medio de una descarga eléctrica, trata de volver a sincronizar al corazón tras un paro cardíaco.

A finales del siglo XIX abundaba una visión más pesimista sobre el futuro de una “*vida con la electricidad*”. El francés Albert Robida en su novela de ciencia-ficción “*Le Vingtième Siècle. La vie électrique*” escrita en 1890 veía con tintes apocalípticos el mundo de 1955 bajo el dominio de la electricidad: las familias no se hablan en las casas ya que todos escuchan las noticias con auriculares, no hay bibliotecas, sino modernas fonotecas, se pierden puestos de trabajo por la electrificación de las fábricas.

Como regla general el ser humano siente temor a lo desconocido pero la realidad es que la Electricidad es factor de progreso y bienestar que afecta todas las actividades de la sociedad moderna. Su costo incide generalmente en un pequeño porcentaje del costo de los productos industriales o del presupuesto familiar, pero a pesar de ello, suprimiendo la electricidad en la sociedad se produciría el mismo efecto que si se suprimiera el agua al cuerpo humano.

Es difícil imaginar un mundo sin electricidad. En cientos de maneras afecta e influye nuestra vida diaria. Se ve el uso de la electricidad directamente en nuestros hogares para iluminación, para el funcionamiento de los aparatos domésticos, el televisor, el receptor de radio, estufas, etc. También se ve el empleo de la electricidad en los transportes y en la industria. La electricidad se ha usado en la fabricación de la mayoría de los artículos que empleamos, ya sea directamente o indirectamente así como para operar las máquinas que manufacturan o procesan los productos que usamos a diario. Sin la electricidad, la mayor parte de las cosas que se usan y de las que se disfrutan hoy en día no serían posibles. Es la base del funcionamiento de muchas máquinas, desde pequeños electrodomésticos hasta sistemas de gran potencia como los trenes de alta velocidad, y asimismo de todos los dispositivos electrónicos. Además es esencial para la producción de sustancias químicas como el aluminio y el cloro.

La energía eléctrica, factor multiplicador del esfuerzo muscular y mental del hombre, es objeto de estudio constante y consideración por parte de los sectores públicos y privados. La ausencia o deficiencia en la previsión del suministro eléctrico, puede afectar profundamente la marcha económica de una nación. Los problemas de orden social y económico que tienen que afrontar los estados deben ser resueltos con el diseño de un adecuado aprovisionamiento de energía eléctrica. En el desarrollo de dicho aprovisionamiento deben intervenir una serie de recursos que deben ser provistos oportunamente con eficiencia y con eficacia.

El fluido eléctrico interesa pues por esta razón no sólo a los técnicos y especialistas sino más bien a un país entero; especialmente si se tiene en cuenta que este fluido es la forma conocida más económica de transporte, transformación y uso de la energía disponible en la naturaleza. La posibilidad de la electricidad de entrar en todos los campos de la actividad humana, tanto en las actividades productivas como en el bienestar, teniendo en cuenta que no es susceptible de almacenarse, nos permite evaluar a modo de índice certero el grado de progreso económico de los pueblos.

El uso de la energía eléctrica es probablemente la mayor y más compleja industria en el mundo. Los ingenieros eléctricos se enfrentan a diferentes retos y dificultades en el diseño de sistemas de potencia con el fin de incrementar la cantidad, eficiencia y calidad de la energía eléctrica de una forma segura y económica.

Es aquí donde entra el ingenio del los diseñadores de sistemas eléctricos para aprovechar al máximo la energía eléctrica, diseñando y poniendo en marcha los proyectos de la forma más segura posible proyectando evitar daños al personal operativo, a los usuarios de las instalaciones, así como a los equipos que forman parte de sistema eléctrico, construyendo sistemas modulares y listos para incrementar la capacidad de suministro de energía de la manera más simple y funcional posible valiéndose de las tecnologías actuales en lo que respecta a técnicas de aislamiento de arco eléctrico, desarrollo e investigación en dieléctricos, así como el estudio de conducción de energía en altos voltajes.

Otro factor también a tomar en cuenta es que los recursos naturales son limitados por lo cual es importante diseñar sistemas que maximicen el ahorro de energía y al mismo tiempo disminuyan los costos de suministro de energía a la gran diversidad de industrias de las urbes modernas las cuales demandan más y mejor calidad en el suministro de energía eléctrica.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

1.1 Electrostática

Aproximadamente en el año 600 a. C. antes de Cristo se sabe de las primeras observaciones del fenómeno de atracción entre pequeños objetos. Teofrasto (310 a. C.) realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir fenómenos eléctricos, escribiendo el primer tratado sobre la electricidad.

A comienzos y principios del siglo XVII comienzan los primeros estudios sobre la electricidad y el magnetismo orientados a mejorar la precisión de la navegación con brújulas magnéticas. El físico real británico William Gilbert utiliza por primera vez la palabra electricidad del griego elektron (ámbar). El jesuita italiano Niccolo Cabeo analizó sus experimentos y fue el primero en comentar que había fuerzas de atracción entre ciertos cuerpos y de repulsión entre otros.

Alrededor de 1672 el físico alemán Otto von Guericke construye la primera máquina electrostática capaz de producir y almacenar energía eléctrica estática por rozamiento. Esta máquina consistía en una bola de azufre atravesada por una varilla que servía para hacer girar la bola. Las manos aplicadas sobre la bola producían una carga mayor que la conseguida hasta entonces. Francis Hawkesbee perfeccionó la máquina de fricción usando una esfera de vidrio hacia 1707.

En 1733 el francés Francois de Cisternay du Fay propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa experimentando con vidrio y ámbar, constatando que:

- Los objetos frotados contra el ámbar se repelen
- También se repelen los objetos frotados contra una barra de vidrio
- Sin embargo, los objetos frotados con el ámbar atraen los objetos frotados con el vidrio.

1.2 Carga Eléctrica

En física, la carga eléctrica es una propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas (pérdida o ganancia de electrones) que se manifiesta mediante atracciones y repulsiones que determinan las interacciones electromagnéticas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos siendo, a su vez, generadora de ellos. La interacción entre carga y campo eléctrico origina una de las cuatro interacciones fundamentales: la interacción electromagnética.

Los trabajos de investigación realizados en la segunda mitad del siglo XIX por el premio Nobel de Física Joseph John Thomson lo llevaron en 1897 a descubrir el electrón, y de Robert Millikan a medir su carga, determinaron la naturaleza discreta de la carga eléctrica.



Figura 1.1. Interacciones entre cargas de igual y distinta naturaleza.

La carga eléctrica es de naturaleza discreta, fenómeno demostrado experimentalmente por Robert Millikan. Las dos partículas elementales cargadas que existen en la materia y que se encuentran de forma natural en la Tierra son el electrón y el protón. Por razones históricas, a los electrones se les asignó carga negativa: -1 , también expresada $-e$. Los protones tienen carga positiva: $+1$ o $+e$. Cuando un átomo gana o pierde un electrón, queda cargado eléctricamente. A estos átomos cargados se les denomina iones.

En 1785 el físico francés Charles Coulomb publicó un tratado en el que se describían por primera vez cuantitativamente las fuerzas eléctricas, formulando las leyes de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas, usando la balanza de torsión para realizar sus medidas. En su honor estas leyes se conocen con el nombre de ley de Coulomb. Esta ley, junto con su elaboración matemática más sofisticada a través del teorema de Gauss y la

derivación de los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico, describen la práctica totalidad de los fenómenos electrostáticos.

Durante todo el siglo posterior se sucedieron avances significativos en el estudio de la electricidad, y en los fenómenos eléctricos producidos por cargas en movimiento en el interior de un material conductor. Finalmente, en 1864 el físico escocés James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto reducido de leyes matemáticas.

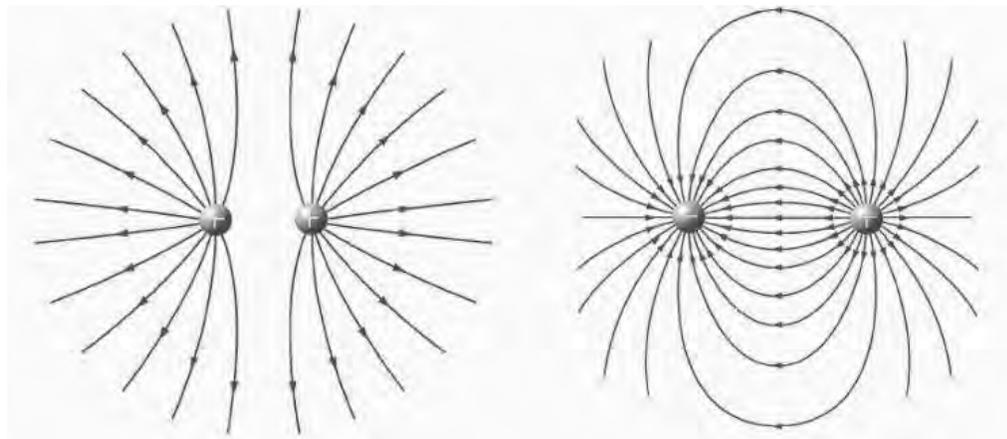


Figura 1.2. Representación de campo eléctrico producido por dos cargas.

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C) y se define como la cantidad de carga que pasa por una sección en 1 segundo cuando la corriente eléctrica es de 1 amperio. Se corresponde con la carga de $6,24 \times 10^{18}$ electrones aproximadamente. La carga más pequeña que se encuentra en la naturaleza es la carga del electrón (que es igual en magnitud a la del protón y de signo opuesto): $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C (1 eV en unidades naturales).

1.3 Tensión eléctrica

La tensión, voltaje o diferencia de potencial es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, provocando el flujo de una corriente eléctrica. La diferencia de potencial también se define como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico, sobre una partícula cargada, para moverla de un lugar a otro.

La tensión entre dos puntos de un campo eléctrico es igual al trabajo que realiza dicha unidad de carga positiva para transportarla desde el punto A al punto B. En el Sistema Internacional de Unidades, la diferencia de potencial se mide en voltios (V), al igual que el potencial.

La tensión es independiente del camino recorrido por la carga, y depende exclusivamente del potencial eléctrico de los puntos A y B en el campo.

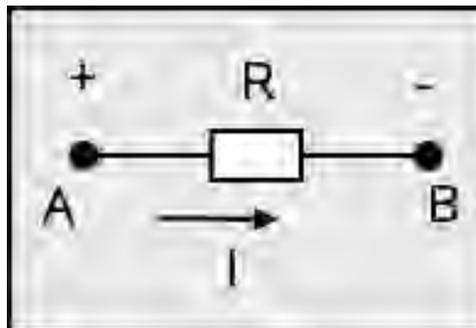


Figura 1.3. Polaridad de una diferencia de potencial.

Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, se producirá un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa (generador), esta corriente cesará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico (Ley de Henry). Este traslado de cargas es lo que se conoce como corriente eléctrica.

Cuando se habla sobre una diferencia de potencial en un sólo punto, o potencial, se refiere a la diferencia de potencial entre este punto y algún otro donde el potencial sea cero.

Cuando por dos puntos de un circuito puede circular una corriente eléctrica, la polaridad de la caída de tensión viene determinada por la dirección convencional de la misma; esto es, del punto de mayor potencial al de menor. Por lo tanto, si por una resistencia R circula una corriente de intensidad I , desde el punto A hacia el B, se producirá una caída de tensión en la misma con la polaridad indicada, y se dice que el punto A es más positivo que el B.

Otra de las formas de expresar la tensión entre dos puntos es en función de la intensidad de corriente y la resistencia existentes entre ellos; así se obtiene uno de los enunciados de la ley de Ohm, que dice:

$$V=R*I$$

Es importante destacar que V no se refiere al potencial eléctrico sino a la diferencia de potencial ΔV entre dos puntos.

1.4 Conducción eléctrica

La conducción eléctrica es el movimiento de partículas eléctricamente cargadas a través de un medio de transmisión (conductor eléctrico). El movimiento de las cargas constituye una corriente eléctrica. El transporte de las cargas puede ser a consecuencia de la existencia de un campo eléctrico, o debido a un gradiente de concentración en la densidad de carga, o sea, por difusión. Los parámetros físicos que gobiernan este transporte dependen del material en el que se produzca.

La conducción en metales y resistencias está bien descrita por la Ley de Ohm, que establece que la corriente es proporcional al campo eléctrico aplicado. Se calcula la conductividad σ para caracterizar la facilidad con la que aparece en un material una corriente de densidad (corriente por unidad de área) j , definida como:

$$j = \sigma E$$

o por su recíproco la resistividad ρ :

$$j = E / \rho$$

La conducción en dispositivos semiconductores puede darse debido a una combinación de campo eléctrico (deriva) y de difusión. La densidad de corriente es entonces:

$$j = \sigma E + D \nabla qn$$

siendo q la carga eléctrica elemental y n la densidad de electrones. Los portadores se mueven en la dirección de decrecimiento de la concentración, de manera que para los

electrones una corriente positiva es resultado de una gradiente de densidad positivo. Si los portadores son "huecos", cámbiese la densidad de electrones n por el negativo de la densidad de huecos p .

1.5 Materiales conductores

Un material conductor es cualquier sustancia que posee gran cantidad de portadores de carga libres por unidad de volumen; al utilizar esta definición se entiende que es posible transportar carga fácilmente de un lugar a otro a través de estos materiales los cuales poseen aproximadamente 10^{17} o más portadores libres por cm^3 [1] caso contrario a los materiales dieléctricos o aislantes lo cuales poseen muy pocos portadores de cargas libres del orden de 10^5 o menos portadores por cm^3 [1] e incluso puede presentarse el caso que no posean portadores libres.

Existe una tercer categoría de materiales que poseen portadores de carga libres la cual se encuentra entre los conductores y los dielectricos dichos materiales son conocidos como semiconductores y presentan una densidad aproximada de 10^{11} o más portadores libres por cm^3 [1] a temperatura ambiente de 300K.

1.6 Sólidos conductores y sólidos aislantes

En los sólidos cristalinos incluidos los sólidos aislantes, los átomos interaccionan con sus vecinos, y los niveles de energía de los átomos individuales forman bandas. El que un material conduzca o no, viene determinado por su estructura de bandas y por la ocupación de dichas bandas determinada por los niveles de Fermi. Los electrones, al ser fermiones, siguen el principio de exclusión de Pauli, por lo que dos electrones dentro de un mismo sistema de interacciones no pueden ocupar el mismo estado, lo cual significa que sus cuatro números cuánticos han de diferir. Así los electrones en un sólido rellenan bandas de energía hasta un cierto nivel, llamado la energía de Fermi.

Las bandas que están completamente llenas de electrones no pueden conducir la electricidad, porque no hay estados cercanos de energía a los que los electrones puedan saltar. Los materiales con todas las bandas llenas (la energía de Fermi es entre dos bandas) son aislantes. Sin embargo, en algunos casos, la teoría de bandas falla y materiales que se

predecían como conductores por la teoría de bandas se vuelven aislantes. Los aislantes de Mott y los aislantes de transferencia de carga son dos clases de ejemplos.

1.7 Metales

Los metales son buenos conductores de la electricidad y del calor porque tienen espacios sin rellenar en la banda de energía de valencia. (El nivel de Fermi marca una ocupación sólo parcial de la banda). En ausencia de campos eléctricos, la conducción eléctrica se produce en todas direcciones a velocidades muy elevadas. Incluso a la temperatura más fría posible - en el cero absoluto - la conducción eléctrica puede aún darse a la velocidad de Fermi (la velocidad de los electrones con energía de Fermi). Cuando se aplica un campo eléctrico, un ligero desequilibrio desarrolla un flujo de los electrones móviles. Los electrones de esta banda pueden verse acelerados por el campo porque hay multitud de estados cercanos sin rellenar en la banda.

La resistencia en los metales se da por la dispersión de electrones desde defectos en el entramado o por fonones. El modelo de Drude representa una teoría clásica para metales sencillos, en el que la dispersión es caracterizada por un tiempo de relajación τ . La conductividad viene entonces dada por la fórmula:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

donde n es la densidad de conducción eléctrica, e es la carga del electrón, y m es la masa del electrón. Un modelo mejor es el de la llamada teoría semiclásica, en la cual el efecto del potencial de periodicidad del entramado sobre los electrones los dota de una masa efectiva (Teoría de bandas).

1.8 Semiconductores

El nivel de Fermi en un semiconductor está situado de manera que está o lleno o vacío. Un sólido que no tiene bandas parcialmente rellenas es un aislante, pero a temperaturas finitas, los electrones pueden ser excitados térmicamente desde la banda de valencia hasta la siguiente más elevada, la banda de conducción que está vacía. De esta manera la fracción de electrones excitada depende de la temperatura y del salto entre bandas, que es la

diferencia de energía entre las dos bandas. Al excitar estos electrones en la banda de conducción se dejan atrás huecos cargados positivamente en la banda de valencia, que también pueden conducir la electricidad.

En los semiconductores, las impurezas afectan ampliamente a la concentración y al tipo de los portadores de cargas. Las impurezas donantes (de tipo *n*) tienen electrones de valencia extra con energías muy cercanas a las de la banda de conducción que pueden ser fácilmente excitados térmicamente hacia la banda de conducción. Las impurezas receptoras (de tipo *p*) capturan electrones desde la banda de valencia, facilitando la formación de huecos. Si un aislante es dopado con suficientes impurezas, puede darse una transición de Mott y que el aislante pase a ser conductor.

1.9 Superconductores

Los superconductores son conductores perfectos bajo una cierta temperatura crítica específica para cada material y bajo un campo magnético. En los metales y en algunos otros materiales, se da una transición a la superconductividad cuando se alcanzan bajas temperaturas (sub-criogénicas). Mediante una interacción en la que participan algunas otras partes del sistema (en los metales, los fonones), los electrones se emparejan en pares de Cooper. Los pares de Cooper bosónicos forman un superfluido que tiene resistencia cero (teoría BCS).

1.10 Electrolitos

Las corrientes eléctricas en los electrolitos son flujos de iones eléctricamente cargados. Por ejemplo, si se somete una disolución de Na⁺ y Cl⁻ a un campo eléctrico, los iones de sodio se moverán de forma constante hacia el electrodo negativo (Cátodo), mientras que los iones de cloro se moverán hacia el electrodo positivo (Ánodo). Si las condiciones son las correctas, se producirán reacciones redox en la superficie de los electrodos, liberando electrones el cloro y posibilitando que se absorban electrones en el sodio.

El hielo de agua y ciertos electrolitos sólidos llamados conductores de protones contienen iones positivos de hidrógeno que son de movimiento libre. En estos materiales, las corrientes eléctricas están compuestas por protones en movimiento (contrariamente a los electrones móviles que encontramos en los metales).

En ciertas mezclas electrolíticas, poblaciones de iones brillantemente coloreados forman las cargas eléctricas en movimiento. La lenta migración de esos iones a lo largo de una corriente eléctrica es un ejemplo de situación donde una corriente es directamente visible a los ojos humanos.

1.11 Gases y plasmas

En el aire y en otros gases corrientes por debajo del dominio de rotura, la fuente dominante de conducción eléctrica es a través de un relativamente reducido número de iones móviles producidos por gases radioactivos, luz ultravioleta, o rayos cósmicos. Dado que la conductividad eléctrica es extremadamente baja, los gases son dieléctricos o aislantes. Sin embargo, cuando el campo eléctrico aplicado se aproxima al valor de rotura, los electrones libres alcanzan una aceleración suficiente por parte del campo eléctrico como para crear electrones libres adicionales mediante la colisión, y la ionización de los átomos o las moléculas neutras del gas en un proceso llamado rotura en avalancha.

El proceso de rotura forma un plasma que contiene un número significativo de electrones móviles y de iones positivos, por lo que se comporta como un conductor eléctrico. En el proceso, se forma una senda conductiva que emite luz, como una chispa, un arco o un rayo.

Un plasma es un estado de la materia donde algunos de los electrones de un gas han sido separados o "ionizados" de sus moléculas o átomos. Un plasma puede formarse por altas temperaturas, o por la aplicación de un campo eléctrico o magnético intenso. Debido a sus masas inferiores, los electrones en un plasma aceleran más la respuesta aun campo eléctrico que los iones positivos de mayor peso, por lo que cargan con el grueso de la corriente.

1.12 El Vacío.

Dado que un vacío perfecto no contiene partículas cargadas, los vacíos normalmente se comportan como aislantes perfectos (serían los mayores aislantes conocidos). Pese a ello, las superficies de los electrodos de metal pueden causar que una región de vacío se convierta en conductora por la inyección de electrones libres o de iones a través tanto de emisiones de campo como de emisiones termiónicas.

Las emisiones termiónicas ocurren cuando la energía termal excede a la función trabajo, mientras que las emisiones tienen lugar cuando el campo eléctrico en la superficie del metal es lo suficientemente elevado como para causar un efecto túnel, el cual desemboca en el lanzamiento de electrones libres desde el metal al vacío. Se suelen emplear electrodos calentados externamente para generar una nube de electrones como en el filamento o en el cátodo calentado indirectamente de las válvulas termoiónicas.

Los electrodos fríos pueden también producir nubes de electrones espontáneamente a base de emisiones termoiónicas cuando se forman pequeñas regiones incandescentes (llamadas puntos catódicos o puntos anódicos). Estas son regiones incandescentes de la superficie del electrodo que son creadas por flujos de corriente localizadamente elevados. Pueden haberse iniciado por emisiones de campo, pero entonces son mantenidas por emisiones termiónicas localizadas una vez que se ha formado el arco de vacío. Estas zonas de emisión de electrones se pueden formar muy rápidamente, incluso de forma explosiva, en superficies de metal sujetas a campos eléctricos elevados. Las válvulas termoiónicas y los sphytrones ^[2] son algunos de los interruptores electrónicos y de los dispositivos de amplificación basados en la conductividad en el vacío.

1.13 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica se definió como un flujo de cargas positivas y se fijó el sentido convencional de circulación de la corriente como un flujo de cargas desde el polo positivo al negativo y sin embargo posteriormente se observó, gracias al efecto Hall, que en los metales los portadores de carga son negativos, estos son los electrones, los cuales fluyen en sentido contrario al convencional. En general, el sentido convencional y el real son ciertos en el sentido que los electrones fluyen desde el polo positivo hasta llegar al negativo (sentido real), cosa que no contradice que dicho movimiento se inicia al lado del polo positivo donde el primer electrón se ve atraído por dicho polo creando un hueco para ser cubierto por otro electrón del siguiente átomo y así sucesivamente hasta llegar al polo negativo (sentido convencional) es decir la corriente eléctrica es el paso de electrones desde el polo negativo al positivo comenzando dicha progresión en el polo positivo.

En el siglo XVIII cuando se hicieron los primeros experimentos con electricidad, sólo se disponía de carga eléctrica generada por frotamiento o por inducción. Se logró (por

primera vez, en 1800) tener un movimiento constante de carga cuando el físico italiano Alessandro Volta inventó la primera pila eléctrica.

De manera más formal la corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en [C/s] (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio. Una corriente eléctrica, puesto que se trata de un movimiento de cargas, produce un campo magnético, lo que se aprovecha en el electroimán.

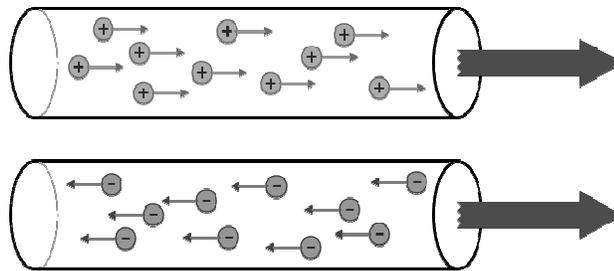


Figura 1.4. La corriente eléctrica está definida por convenio en el sentido contrario al desplazamiento de los electrones.

Haciendo una analogía con un sistema hidráulico la corriente sería el equivalente al flujo de agua en una tubería la cual tiene que recorrer cierta distancia para poder ser utilizada. La corriente sigue el mismo principio, es necesario transportarla de forma segura y eficiente en grandes distancias con las menores pérdidas posibles utilizando la menor cantidad de recursos económicos. La corriente al igual que el agua es la materia prima que hace funcionar muchos sistemas, el agua es fundamental para actividades de hidratación de organismos vivos, como sustancia universal para diluir otros líquidos, en actividades de limpieza, etc. de la misma forma la corriente eléctrica es la que hace funcionar todos los equipos electrónicos, equipos y sistemas eléctricos, iluminación en viviendas y en la industria, procesos industriales en fábricas.

El instrumento usado para medir la intensidad de la corriente eléctrica es el galvanómetro que, calibrado en amperios, se llama amperímetro, colocado en serie con el conductor cuya intensidad se desea medir.

1.14 Electromagnetismo

Desde la antigua Grecia se conocían los fenómenos magnéticos y eléctricos pero no es hasta inicios del siglo XVII donde se comienza a realizar experimentos y a llegar a conclusiones científicas de estos fenómenos. Durante estos dos siglos, XVII y XVIII, grandes hombres de ciencia como William Gilbert, Otto von Guericke, Stephen Gray, Benjamin Franklin, Alessandro Volta entre otros estuvieron investigando estos dos fenómenos de manera separada y llegando a conclusiones coherentes con sus experimentos.

A principios del siglo XIX Hans Christian Ørsted encontró evidencia empírica de que los fenómenos magnéticos y eléctricos estaban relacionados. De ahí es que los trabajos de físicos como André-Marie Ampère, William Sturgeon, Joseph Henry, Georg Simon Ohm, Michael Faraday en ese siglo, son unificados por James Clerk Maxwell en 1861 con un conjunto de ecuaciones que describían ambos fenómenos como uno solo, como un fenómeno electromagnético.

Las ahora llamadas ecuaciones de Maxwell demostraban que los campos eléctricos y los campos magnéticos eran manifestaciones de un solo campo electromagnético. Además describía la naturaleza ondulatoria de la luz, mostrándola como una onda electromagnética. Con una sola teoría consistente que describía estos dos fenómenos antes separados, los físicos pudieron realizar varios experimentos prodigiosos e inventos muy útiles como la bombilla eléctrica por Thomas Alva Edison o el generador de corriente alterna por Nikola Tesla ^[3]. El éxito predictivo de la teoría de Maxwell y la búsqueda de una interpretación coherente de sus implicaciones, fue lo que llevó a Albert Einstein a formular su teoría de la relatividad que se apoyaba en algunos resultados previos de Hendrik Antoon Lorentz y Henri Poincaré.

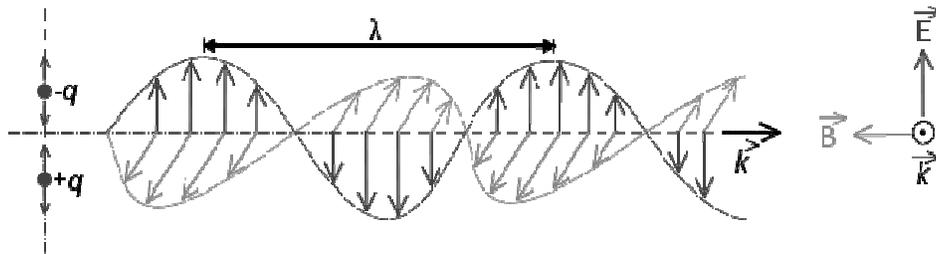


Figura 1.5. Esquema de una onda electromagnética.

Los estudios científicos de la Electrostática llevaróna a el matemático y físico, Carl Friedrich Gauss, a demostrar que la cantidad de flujo eléctrico en un campo es igual al cociente de la carga encerrada por la superficie en la que se calcula el flujo, q_{enc} , y la permitividad eléctrica, ϵ_0 . Esta relación se conoce como ley de Gauss:

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

En el año de 1820 Hans Christian Ørsted descubrió que el fenómeno magnético estaba ligado al eléctrico y entonces se formulo una teoría científica para el magnetismo^[4]. La presencia de una corriente eléctrica, o sea, de un flujo de carga debido a una diferencia de potencial, genera una fuerza magnética que no varía en el tiempo. Si tenemos una carga a una velocidad \vec{v} , ésta generará un campo magnético \vec{B} que es perpendicular a la fuerza magnética inducida por el movimiento en ésta corriente, así:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Para determinar el valor de ese campo magnético, Jean Baptiste Biot en 1820, dedujo una relación para corrientes estacionarias, ahora conocida como ley de Biot-Savart la cual esta descrita por la siguiente ecuación:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Donde μ_0 es un coeficiente de proporcionalidad conocido como permeabilidad magnética, I es la intensidad de corriente, el $d\vec{l}$ es el diferencial de longitud de la corriente y \vec{r} es la dirección de la corriente. De manera más estricta, \vec{B} es la inducción magnética, en otras palabras, es el flujo magnético por unidad de área. Experimentalmente se llegó a la conclusión que las líneas de fuerza de campos magnéticos eran cerradas, eliminando la posibilidad de un monopolo magnético. La relación matemática se la conoce como ley de Gauss para el campo magnético:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación es una generalización de la ley de Biot-Savart. Además que las fórmulas expresadas aquí son para cargas en el vacío

En esa época solo se habían estudiado los campos eléctricos y magnéticos que no varían con el tiempo pero los físicos a finales del siglo XIX descubrieron que ambos campos estaban ligados entonces se dedujo que un campo eléctrico en movimiento y una corriente eléctrica que varíe, generan un campo magnético y un campo magnético, dicho campo magnético ya implica de forma intrínseca la presencia de un campo eléctrico. Entonces se definió la fuerza que tendría una partícula cargada que se mueve en un campo magnético y así se llegó a la unión de las dos fuerzas anteriores, lo que hoy se conoce como la fuerza de Lorentz.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Por otro lado, para generar una corriente eléctrica en un circuito cerrado debe existir una diferencia de potencial entre dos puntos del circuito, a ésta diferencia de potencial se la conoce como fuerza electromotriz o FEM. Ésta fuerza electromotriz es proporcional a la rapidez con que el flujo magnético varía en el tiempo, esta ley fue encontrada por Michael Faraday y es la interpretación de la inducción electromagnética, entonces un campo magnético que varía en el tiempo induce un campo eléctrico, con respecto a una fuerza electromotriz. Matemáticamente se representada como:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

En un trabajo del físico James Clerk Maxwell de 1861 reunió las tres ecuaciones anteriormente citadas (1), (2) y (4) e introdujo el concepto de una corriente de desplazamiento como una densidad de corriente efectiva y llegó a la última de las ecuaciones, la ley de Ampère generalizada (5), ahora conocidas como ecuaciones de Maxwell:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

Las cuatro ecuaciones, tanto en su forma diferencial como en la integral aquí descritas, fueron las revisiones hechas por Oliver Heaviside. Pero el verdadero poder de éstas ecuaciones, más la fuerza de Lorentz (3), se centra en que juntas son capaces de describir cualquier fenómeno electromagnético, además de las consecuencias físicas que conlleva [5].

La genialidad del trabajo de Maxwell es que sus ecuaciones describen un campo eléctrico que va ligado inequívocamente a un campo magnético perpendicular a éste y a la dirección de su propagación, éste campo es ahora llamado campo electromagnético [4]. Además la solución de éstas ecuaciones permitía la existencia de una onda que se propagaba a la velocidad de la luz, con lo que además de unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos la teoría formulada por Maxwell predecía con absoluta certeza los fenómenos ópticos.

Así la teoría predecía a una onda que, contraria a las ideas de la época, no necesitaba un medio de propagación; la onda electromagnética se podía propagar en el vacío debido a la generación mutua de los campos magnéticos y eléctricos. Esta onda a pesar de tener una velocidad constante, la velocidad de la luz C , puede tener diferente longitud de onda y consecuentemente dicha onda transporta energía. La radiación electromagnética recibe diferentes nombres al variar su longitud de onda, como rayos gamma, rayos X, espectro visible, etc.; pero en su conjunto recibe el nombre de espectro electromagnético.

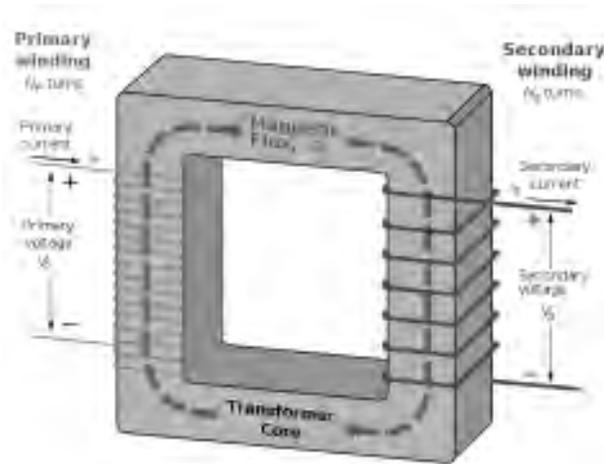


Figura 1.6. Transformador monofásico

Gracias a estos principios es como se ha desarrollado hoy en día interruptores electromagnéticos, transformadores de corriente (TC's), transformadores de potencial

(TP's), transformadores de acoplamiento, interruptores en vacío, arrancadores termomagnéticos, relevadores de protección, etc. dispositivos muy utilizados en la industria eléctrica.

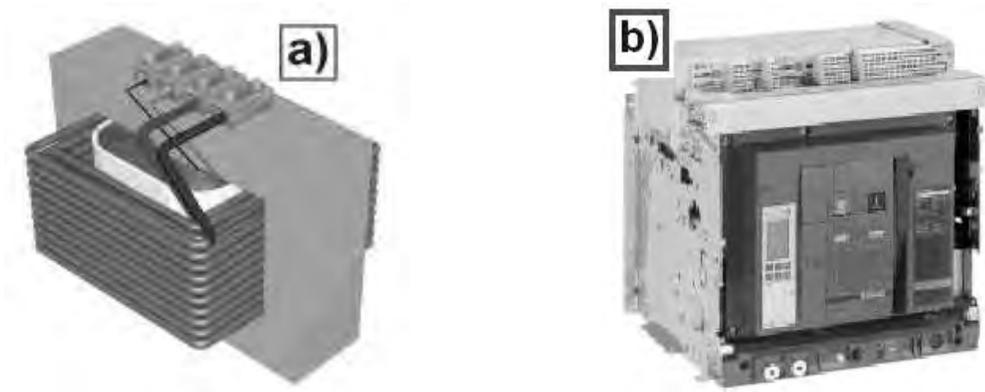


Figura 1.7. Dispositivos que utilizan principios electromagnéticos a) Transformador b) Interruptor de potencia

1.15 Pérdida de energía por limitantes físicas.

1.15.1 Resistencia. Se denomina resistencia eléctrica, simbolizada habitualmente como R , a la dificultad u oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica para circular a través de él. En el Sistema Internacional de Unidades, su valor se expresa en ohmios, que se designa con la letra griega omega mayúscula, Ω . Para su medida existen diversos métodos, entre los que se encuentra el uso de un ohmmetro.

Esta definición es válida para la corriente continua y para la corriente alterna cuando se trate de elementos resistivos puros, esto es, sin componente inductiva ni capacitiva. De existir estos componentes reactivos, la oposición presentada a la circulación de corriente recibe el nombre de impedancia.

Según sea la magnitud de esta oposición, las sustancias se clasifican en conductoras, aislantes y semiconductoras. Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo.

Una resistencia ideal es un elemento pasivo que disipa energía en forma de calor según la ley de Joule. También establece una relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente que la atraviesa y la tensión medible entre sus extremos, relación conocida como ley de Ohm:

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

donde $i(t)$ es la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de valor R y $u(t)$ es la diferencia de potencial que se origina. En general, una resistencia real podrá tener diferente comportamiento en función del tipo de corriente que circule por ella.

Una resistencia real en corriente continua (CC) se comporta prácticamente de la misma forma que si fuera ideal, esto es, transformando la energía eléctrica en calor por efecto Joule. La ley de Ohm para corriente continua establece que:

$$R = \frac{V}{I}$$

donde R es la resistencia en ohmios, V es la diferencia de potencial en voltios e I es la intensidad de corriente en amperios.

Una resistencia real muestra un comportamiento diferente del que se observaría en una resistencia ideal si la intensidad que la atraviesa no es continua, es decir hablamos del comportamiento en corriente alterna (CA). En el caso de que la señal aplicada sea senoidal, a bajas frecuencias se observa que una resistencia real se comportará de forma muy similar a como lo haría en CC, siendo despreciables las diferencias. En altas frecuencias el comportamiento es diferente, aumentando en la medida en la que aumenta la frecuencia aplicada, lo que se explica fundamentalmente por los efectos inductivos que producen los materiales que conforman la resistencia real. Por ejemplo, en una resistencia de carbón los efectos inductivos solo provienen de los propios terminales de conexión del dispositivo mientras que en una resistencia de tipo bobinado estos efectos se incrementan por el devanado de hilo resistivo alrededor del soporte cerámico, además de aparecer una cierta componente capacitiva si la frecuencia es especialmente elevada.

En estos casos, para analizar los circuitos, la resistencia real se sustituye por una asociación serie formada por una resistencia ideal y por una bobina también ideal, aunque a

veces también se les puede añadir un pequeño condensador ideal en paralelo con dicha asociación serie. En los conductores, además, aparecen otros efectos entre los que cabe destacar el "Efecto Piel".

Consideremos una resistencia R, como la de la figura 2, a la que se aplica una tensión alterna de valor:

$$u(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \beta)$$

De acuerdo con la ley de Ohm circulará una corriente alterna de valor:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad \text{donde} \quad I_0 = \frac{V_0}{R}$$

Se obtiene así, para la corriente, una función senoidal que está en fase con la tensión aplicada (*Figura 1.8*).

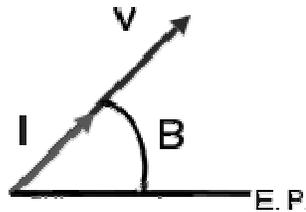


Figura 1.8. Diagrama fasorial de una resistencia en CA.

Al utilizar un sistema polar y realizar operaciones matemáticas se deduce que en los circuitos de CA la resistencia puede considerarse como una magnitud compleja con parte real y sin parte imaginaria o, lo que es lo mismo con argumento nulo, cuya representación binómica y polar serán:

$$\vec{R} = R + 0j = R \angle 0^\circ$$

1.16 Resistividad

La resistencia de cualquier material con un área transversal uniforme se determina mediante los siguientes cuatro factores:

- Material
- Longitud
- Área transversal
- Temperatura

El material escogido, con su estructura molecular única, reaccionara diferencialmente a presiones para establecer una corriente a través de su núcleo. Los conductores que permiten un flujo de carga abundante con poca presión externa tendrán bajos niveles de resistencia, mientras que los aislantes tendrán altas características de resistencia.

Como podría esperarse, entre mayor es la trayectoria que las carga debe recorrer, mayor es el nivel de resistencia, mientras que a mayor área (y por tanto, espacio disponible), menor será la resistencia. La resistencia es entonces directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área.

Conforme la temperatura de la mayoría de los conductores aumenta, el movimiento incrementado de la partículas dentro de la estructura molecular vuelve más difícil que los portadores “libres” circulen, incrementándose así el nivel de la resistencia.

A una temperatura fija de 20°C (temperatura ambiente), la resistencia esta relacionada con los otros tres factores por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ en } \Omega \quad (\text{a})$$

Donde ρ es una característica del material llamada **resistividad**, l es la longitud de la muestra, y A es el área transversal de la muestra.

Las unidades de medición utilizadas en la ecuación anterior están relacionadas con la aplicación. Para alambre circulares, las unidades de medición generalmente son los *CM* del inglés *circular mil*, para la mayoría de las otras aplicaciones las unidades son $\Omega \cdot \text{m}$ o $\Omega \cdot \text{cm}$.

La constante ρ es diferente para cada material. Su valor es la resistencia de un alambre de 1 [ft] por un mil de diámetro, medida a 20°C, esto para conductores circulares. En la industria en general se utilizan unidades métricas para las cantidades de la ecuación (a). En unidades del Sistema Internacional (SI), la resistividad mediría en $\Omega \cdot m$, el área en m^2 y la longitud en metros. Sin embargo, el metro es generalmente es una unidad de medición muy grande para la mayor parte de aplicaciones, por lo que usualmente se emplea el centímetro. Las dimensiones resultantes para la ecuación (a) son:

$$\begin{aligned}\rho &= \Omega \cdot \text{cm} \\ l &= \text{cm} \\ A &= \text{cm}^2\end{aligned}$$

La resistividad de un material es realmente la resistencia de una muestra como la que aparece en la siguiente figura:

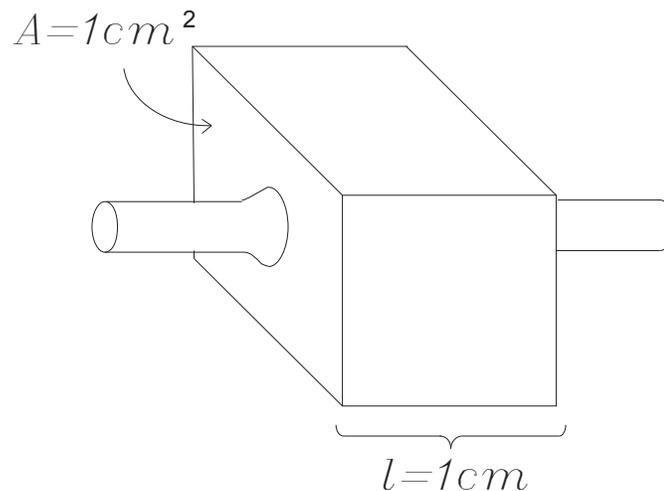


Figura 1.9. Resistividad en un volumen de 1 cm^3 .

A continuación se muestra una tabla de la resistividad de diversos materiales utilizando la definición de la figura anterior. La resistividad ρ se mide también en $\Omega \cdot \text{mil-ft}$ o en $\Omega \cdot \text{m}$ en el *Sistema Internacional* de unidades.

Tabla 1.1. Resistividad ρ de algunos materiales.

Material ^[8]	$\rho \times 10^{-6} [\Omega \cdot \text{cm}] @ 20^\circ\text{C}$
Plata	1.645
Cobre	1.723
Oro	2.443
Aluminio	2.825
Tungsteno	5.485
Níquel	7.811
Hierro	12.299
Tantalio	15.54
Cromo-Níquel	99.72
Óxido de estaño	250
Carbono	3500

1.17 Efectos de la temperatura

La temperatura tiene un efecto considerable sobre la resistencia de conductores, semiconductores y aislantes. Los conductores tienen un número abundante de electrones libres, y cualquier introducción de energía térmica tendrá poco impacto en el número total de portadores libres. De hecho, la energía térmica solo aumentará la intensidad del movimiento aleatorio de las partículas dentro del material y hará más difícil que se establezca un flujo general de electrones en cualquier dirección, dicho de otra forma: para buenos conductores, un aumento en la temperatura resultará en un aumento en el nivel de resistencia. En consecuencia, los conductores tienen un coeficiente térmico de resistencia positivo.

En los semiconductores, un aumento de temperatura impartirá cierta energía térmica al sistema que resultará en un aumento en el número de portadores libres para conducción en el material, dicho de otra forma un aumento de temperatura resultará en una disminución del nivel de resistencia por lo cual hablamos de un coeficiente térmico de resistencia negativo. Al igual que en los semiconductores, un aumento de temperatura tendrá como consecuencia una disminución en la resistencia de un aislante, entonces podemos afirmar que tienen un coeficiente térmico de resistencia negativo. En la siguiente grafica se comparan las pendientes de los coeficientes térmicos de materiales conductores y semiconductores y aislantes.

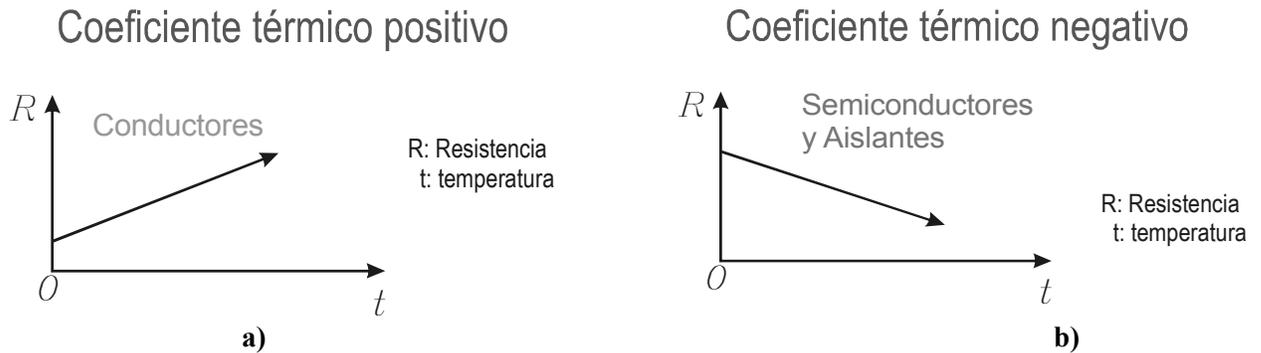


Figura 1.10. Coeficiente térmico de un material, a) Coeficiente positivo para materiales conductores, b) Coeficiente negativo para materiales conductores.

1.18 Coeficiente térmico de resistencia

Existe una segunda ecuación para calcular la resistencia de un conductor a diferentes temperaturas. Si define como ^[8]:

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_1| + 20^\circ\text{C}} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$$

Donde;

α_{20} : Coeficiente térmico de resistencia

T_1 : Temperatura

Con un coeficiente térmico de resistencia a temperatura de 20°C como referencia, una resistencia R_1 de interés a una temperatura T_1 se define de la siguiente forma:

$$R_1 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_1 - 20^\circ\text{C})] \quad (\text{d})$$

Donde;

α_{20} : Coeficiente térmico de resistencia

R_{20} : Resistencia de la muestra a una temperatura de 20°C

R_1 : Resistencia de interés.

T_1 : Temperatura de interés

Existen en la literatura tablas del coeficiente térmico de resistencia para diferentes materiales a continuación se presentan algunos de ellos.

Tabla 1.2. *Coeficiente térmico de resistencia para algunos metales.*

Material ^[8]	α_{20} [1/°C] @ 20°C
Plata	0.0038
Cobre	0.0039
Oro	0.0034
Aluminio	0.003
Tungsteno	0.005
Níquel	0.006
Hierro	0.0055
Constantán	0.000008
Cromo-Níquel	0.00044

La ecuación (d) puede escribirse en la siguiente forma:

$$\alpha_{20} = \frac{R_1 + R_{20}}{R_{20}} \frac{\Delta R}{\Delta T} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$$

De la cual se definen las unidades $\left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ para α_{20} . Como $\Delta R/\Delta T$ es la pendiente de la curva de la *Figura 1 a)* de lo cual podemos concluir que entre mayor es el coeficiente térmico de resistencia de un material, más sensible es el nivel de resistencia a cambios de temperatura. De la tabla anterior podemos observar que el cobre es el más sensible a variaciones de temperatura que la plata, el oro o el aluminio, aunque las diferencias son bastante pequeñas. La pendiente definida α_{20} para el Constantán es tan pequeña que la curva es casi horizontal.

Como la R_{20} de la ecuación (d) es la resistencia del conductor a 20°C y $T_1 - 20^\circ\text{C}$ es el cambio de la temperatura desde 20°C , la ecuación (d) puede escribirse de la siguiente forma:

$$R = \rho \frac{1}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T]$$

Que es una ecuación para la resistencia en términos de todos los parámetros de control.

A lo largo de este capítulo se revisaron los diversos fundamentos de la corriente alterna, los cual nos servirán en los capítulos siguientes para la comprensión de la teoría de dieléctricos y el estudio de la extinción del arco eléctrico.

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.

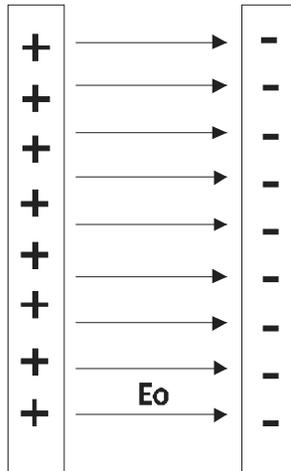


Figura 2.1. Se muestra un campo eléctrico entre dos placas paralelas cargadas.

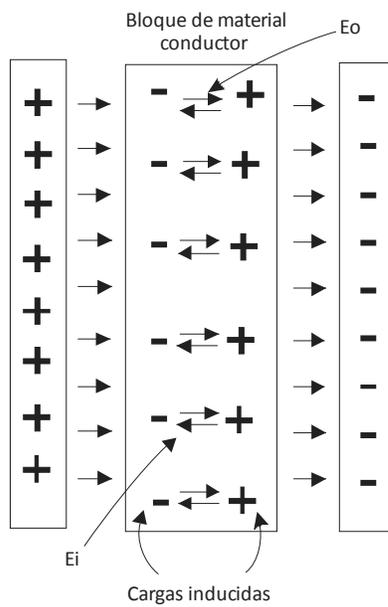


Figura 2.2 Superposición de los campos eléctricos producidos por las placas cargadas y por las cargas inducidas en el bloque metálico; observe que $|E_0| = |E_i|$.

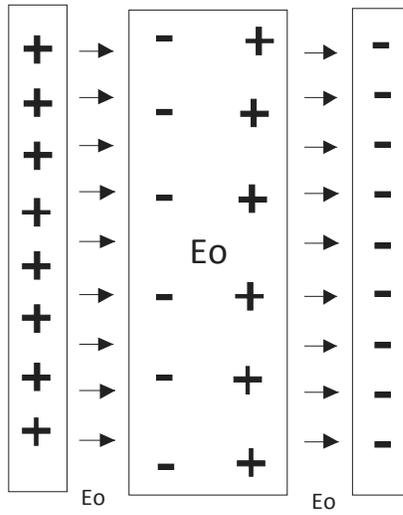


Figura 2.3 Campos eléctricos resultantes en el interior y exterior de bloques metálicos.

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

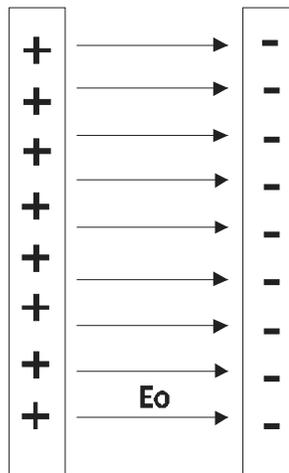


Figura 2.4 Se muestra un campo eléctrico entre dos placas paralelas cargadas.

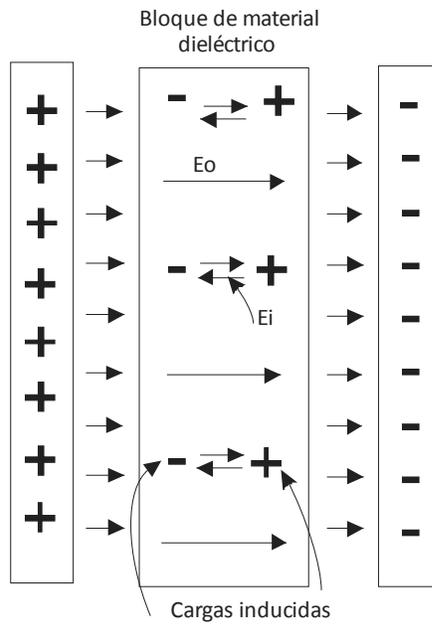


Figura 2.5 Superposición de los campos eléctricos producidos por las placas cargadas y por las cargas inducidas en el bloque dieléctrico metálico; nótese que $|E_0| > |E_i|$.

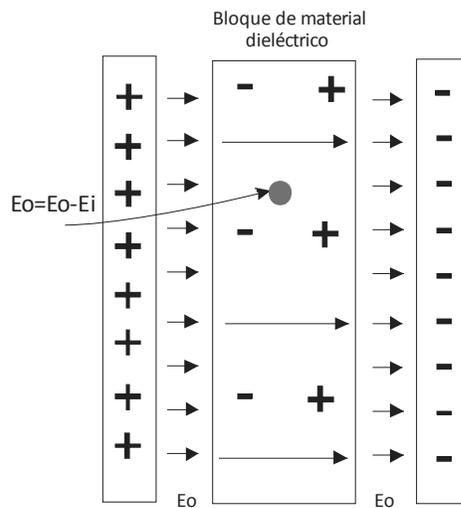


Figura 2.6 Campos eléctricos resultantes en el interior y exterior del bloque dieléctrico.

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.

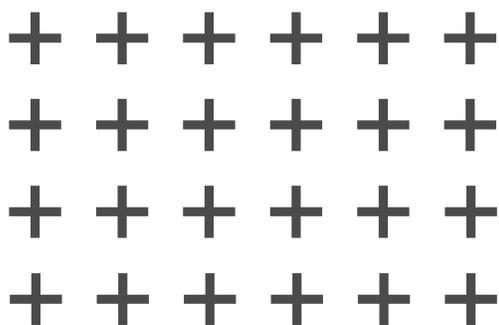


Figura 2.7



Figura 2.8



Figura 2.9

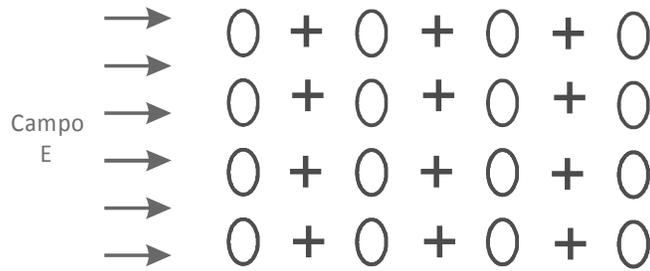


Figura 2.10

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.

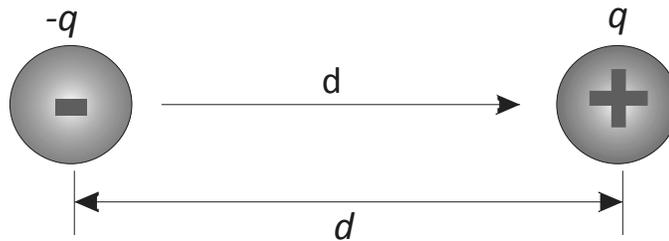


Figura 2.11. Dipolo y momento dipolar eléctrico

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.

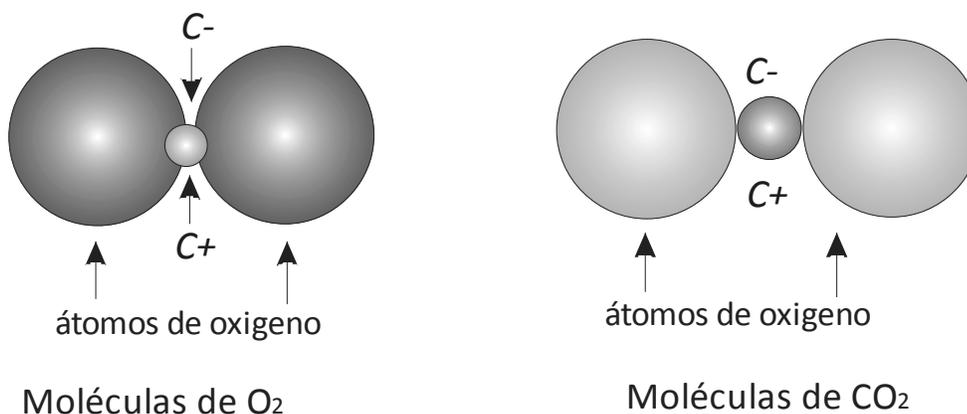


Figura 2.12. Ejemplo de moléculas no polares. Los centros de carga positiva (C^+) y negativa (C^-) coinciden en el mismo punto.

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.

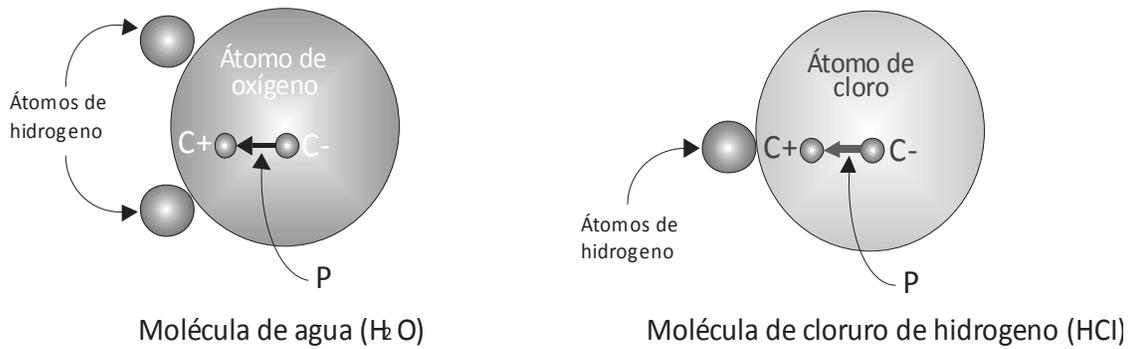


Figura 2.13. Ejemplo de moléculas polares

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.

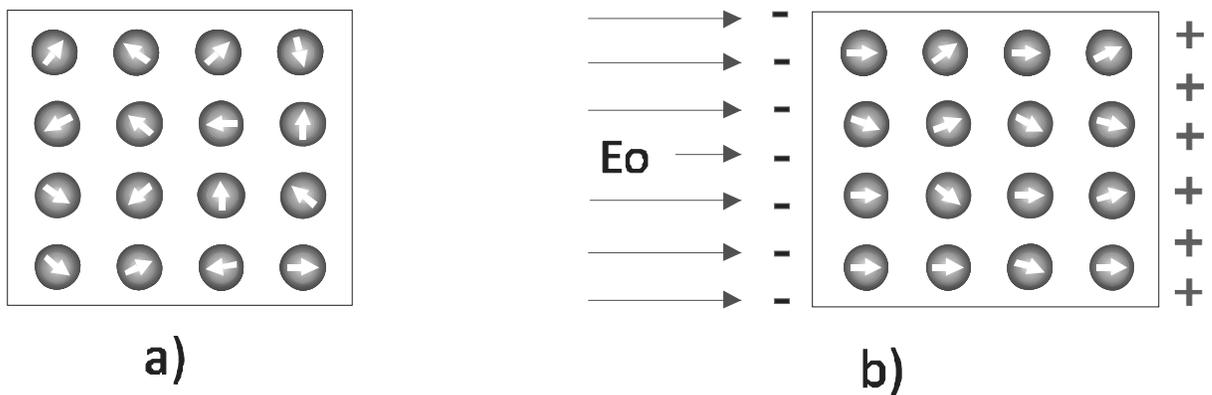


Figura 2.14. Moléculas de un dieléctrico de tipo polar: a) sin campo eléctrico aplicado, y b) al aplicarle un campo eléctrico.

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.

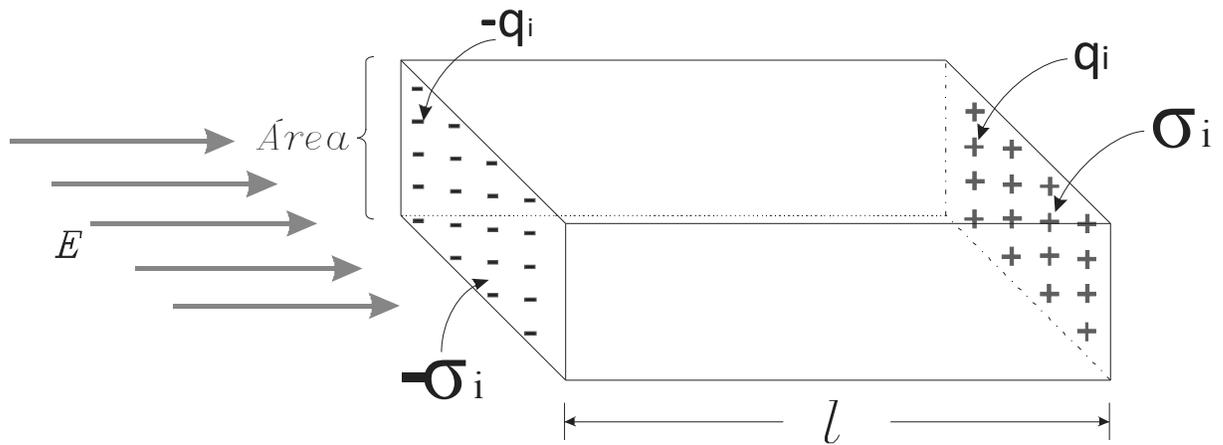


Figura 2.15. Bloque dieléctrico bajo la acción de un campo eléctrico.

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.

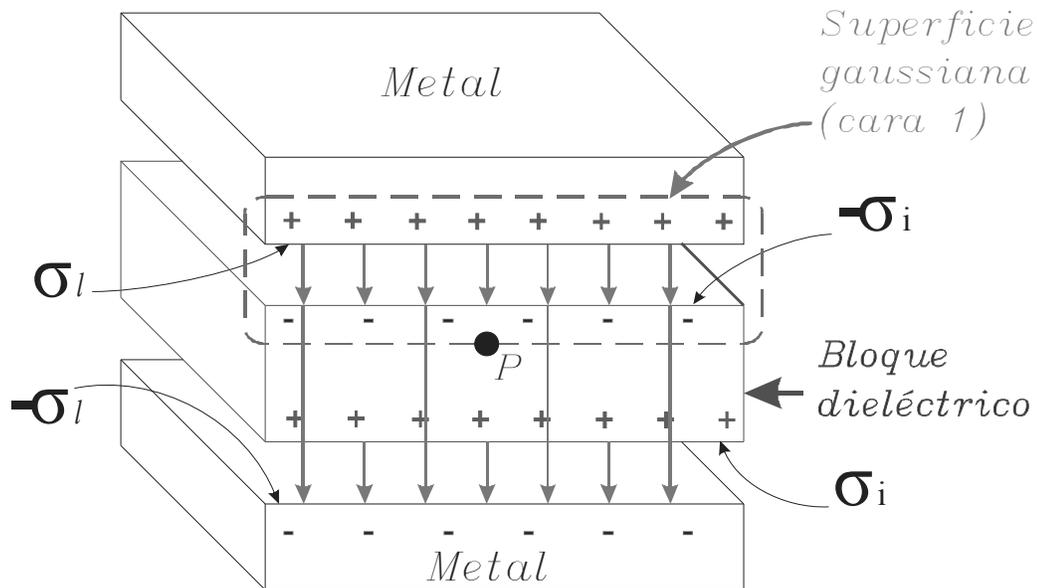


Figura 2.16. Aplicación de la ley de Gauss en un caso que se tienen dieléctricos presentes.

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

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 metallocénicos, 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 CO_2), 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 (S_8) y flúor gaseoso (F_2) 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.

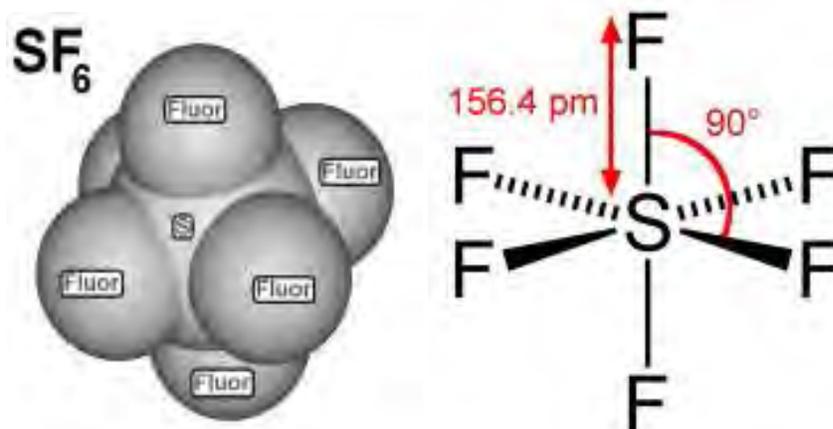


Figura 2.18. Composición química del gas SF_6 .

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 SF_6 . En las siguientes tablas se muestran las propiedades químicas y físicas del SF_6 .

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.

CAPITULO III

SUBESTACIONES AISLADAS EN SF₆

CAPITULO 3

SUBESTACIONES AISLADAS EN SF₆

3.1 Conceptos Básicos

Las Subestaciones Eléctricas aisladas en gas usan este fluido para el aislamiento eléctrico de sus distintos componentes -maniobra, medición, barras, etc.- de alta tensión. Cuando se trata de alta tensión su denominación común es GIS (Gas-Insulated Switchgear). En media tensión se denominan MV-GIS (Medium Voltage-Gas-Insulated Switchgear).

Por sus propiedades óptimas, el gas utilizado es el hexafloruro de azufre (SF₆). En el capítulo anterior se revisaron las características principales de este gas las cuales son: el no tóxico, muy estable y no inflamable, además de inodoro e incoloro a condiciones normales de presión y temperatura (1.013 hPa y 20°C).



Figura 3.1. Subestación AEG aislada en SF₆ de 420 kV.

Existen diferencias fundamentales con las Subestaciones clásicas aisladas en aire (AIS: Air- Insulated Switchgear). La más importante a favor de las GIS es que en éstas las dimensiones son muy reducidas. El volumen ocupado por una GIS está entre el 3 al 8% del

que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones. Del mismo modo, el área ocupada por una GIS está entre el 3 al 12% de la que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones.

En las grandes ciudades densamente pobladas, cada día es más notoria la necesidad de abastecer demandas de energía eléctrica que por sus características es imperioso satisfacerlas utilizando sistemas de alta tensión (132 kV en adelante), lo que hace imprescindible la instalación de Subestaciones para esas tensiones. Por otra parte, el precio muy elevado de los terrenos en estas ciudades, sumado a la imposibilidad de conseguirlos de las dimensiones necesarias para instalar una AIS, prácticamente desaconseja el uso de éstas.

En cambio, las dimensiones (área y volumen) reducidas de las GIS, las convierten en la mejor solución para utilizarlas en ciudades importantes y/o industriales.

También, en centrales hidráulicas o terrenos escarpados donde el espacio disponible para la instalación de las subestaciones es sumamente reducido, las GIS encuentran una extendida aplicación. Lo mismo ocurre en instalaciones cercanas a industrias de alta polución.

3.2 Evolución histórica

Entre 1960 y 1970, aparecen las primeras GIS de alta tensión. En 1966 se instala en Plessis-Gassot, Francia, un prototipo experimental de 245 kV. La evolución de las GIS reconoce diferentes períodos caracterizados por:

- 1) El auge de la técnica empleada para el corte del arco en los interruptores de alta tensión que utilizan el gas SF₆.
- 2) El intenso desarrollo informático alcanzado para los medios de cálculo y la utilización de modelos de diseño y por la técnica de corte basada en la expansión térmica y ayuda a la apertura. Se consiguen así comandos reducidos que utilizan la energía de resortes, de forma similar a los comandos de los interruptores de media tensión. En efecto, el conocimiento de los fenómenos involucrados en el corte que ocurre en las cámaras de los interruptores de SF₆ han llevado a conseguir

dimensiones dieléctricas más pequeñas, a la par de alcanzar un aumento de la confiabilidad de estos equipos.

Aparecen nuevos programas informáticos que superan a los que se utilizaban para el cálculo del campo eléctrico; a saber: de simulación del funcionamiento dinámico del corte, de simulación de redes para el estudio del arco asociado con una red, etc. Así, se llega a las GIS moderna, de muy reducidas dimensiones, de alta confiabilidad, con materiales de alto rendimiento y durabilidad y de muy bajo mantenimiento. Los costos cada vez más reducidos de las GIS y su adaptabilidad a las Normas de cuidado del medio ambiente, hacen pronosticar que su uso se intensificará cada vez más en los próximos años.



Figura 3.2 Primera Subestación GIS de 800 kV (Sistema de American Electric Power (USA)).

3.3 Generalidades de las GIS

Las GIS se diseñan para intemperie o para interior. En este último caso se ubican dentro de edificios, que las aíslan de las condiciones climáticas exteriores. En capítulos posteriores se indican los requisitos que se deben tener presentes en el diseño de una obra civil para una Subestación GIS.

Cualquiera sea su tipo –intemperie o interior- el proyectista debe intentar diseñar la disposición técnica y económica más conveniente para lograr las configuraciones usuales en subestaciones de alta tensión, que son:

- 1) Juego de barras simple.

- 2) Juego de barras doble.
- 3) Juego de barras múltiples (más de dos).
- 4) Juego de barras en anillo.
- 5) Interruptor y medio por campo (celda).
- 6) Doble interruptor por campo (celda).

En donde corresponda, incluyendo o no barra de transferencia, seccionador bypass de interruptor, acoplamientos longitudinales y transversales.

En los módulos de seccionadores y con el objeto de permitir el “corte visible”, se pueden disponer de visores de vidrio -en algunos casos de tipo telescópico- que permiten observar el estado abierto/cerrado del seccionador en cuestión.

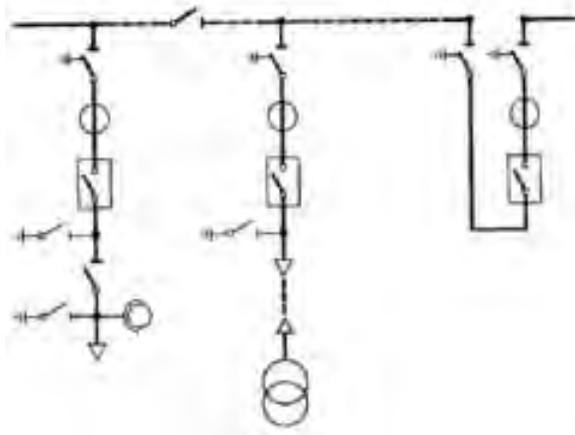


Figura 3.3 Esquema unifilar de juego de barras simple.

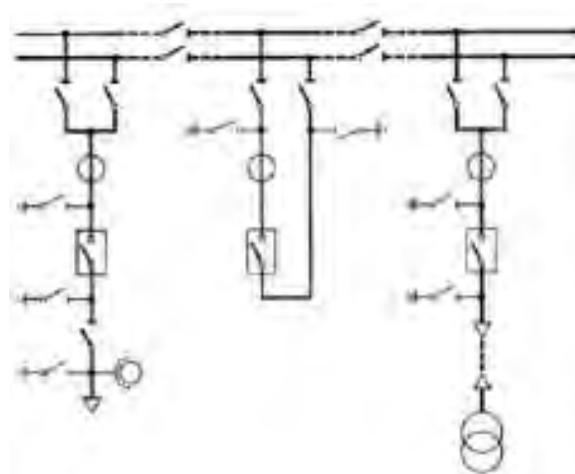


Figura 3.4 Esquema unifilar de juego de barras doble.

Los distintos módulos también pueden suministrarse con medidores de densidad del gas, que permiten supervisar la presión de éste en forma directa. También puede ejercerse la supervisión del gas mediante presostatos compensados por temperatura.

Es práctica común en la actualidad que estos valores de densidad o presión de cada módulo se agrupen en un único instrumento electrónico instalado en el tablero de comando y control de cada campo (celda). La presión del gas SF₆ dependiendo del fabricante, el tipo - mono polar o tripolar- y la tensión nominal de la Subestación puede establecerse entre 4 a 6 bar. La presión del gas del interruptor muchas veces es distinta y mayor que la presión de los otros módulos. Ejemplo para una GIS de 145 kV: presión de interruptor = 6,0 bar; presión del resto de los módulos = 4,3 bar.

Para permitir futuras ampliaciones de las Subestaciones GIS, el módulo de barras que se instala en el último campo (celda) es cerrado en su extremo por aisladores cónicos estancos que permiten acoplarse a nuevos campos (celdas) sin necesidad de cortar el servicio de la Subestación de la que forman parte.

Los distintos módulos, generalmente en la parte inferior, llevan válvulas que permiten el llenado o la extracción del gas SF₆, mediante la utilización de un equipo de recarga y evacuación de gas.

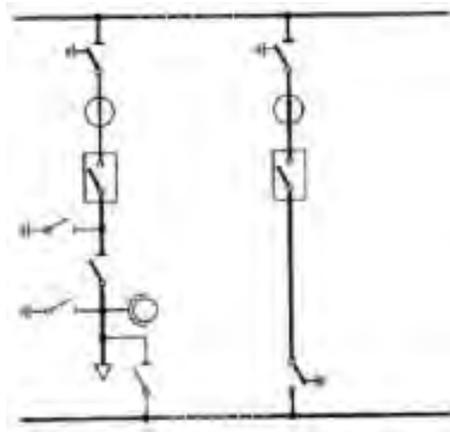


Figura 3.5 Esquema unifilar de juego de barras simple más bypass de interruptor.

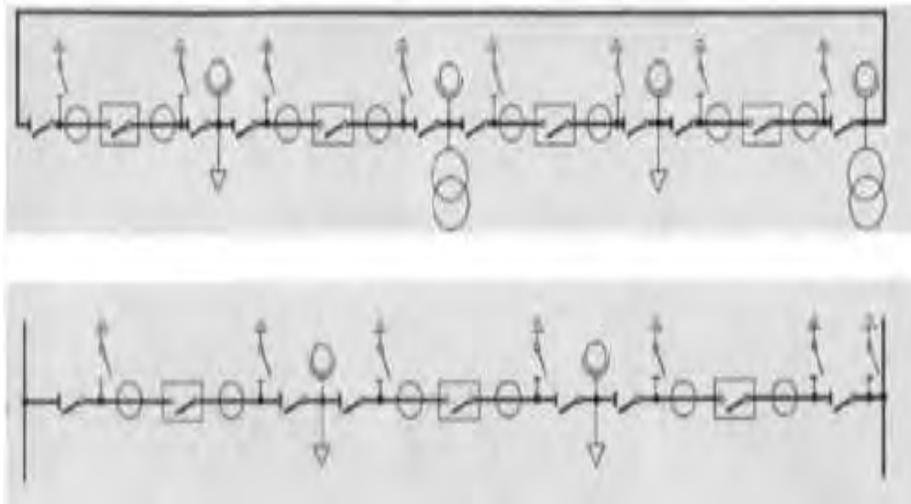


Figura 3.6 Esquemas unifilares de juego de barras en anillo (arriba) e interruptor y medio (abajo).

3.4 Dimensiones de las Subestaciones aisladas en SF6

Como se indica en párrafos anteriores la diferencia más importante entre las GIS y las AIS es que el volumen ocupado por una GIS está entre el 3 al 8% del que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones. Cuando se trata de superficies, el área ocupada por una GIS está entre el 3 al 12% del que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones.

La reducción de la superficie que se logra con las GIS se hace más evidente para tensiones mayores y puede alcanzar hasta 30 veces menos que una AIS para el caso de Subestaciones de 800 kV. En la figura 3.1 se aprecia la diferencia de área y volumen.

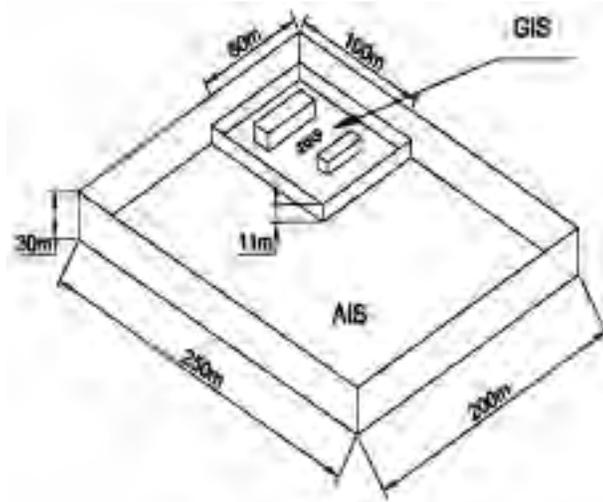


Figura 3.7 Subestación formada por 9 campos de 420 kV y 18 campos de 123 kV. El volumen ocupado por la GIS es el 5,8 % del que ocupa la AIS.

Como se ha señalado al inicio del capítulo en las grandes ciudades industrializadas, donde el precio muy elevado de los terrenos y la imposibilidad de conseguirlos de las dimensiones necesarias para instalar una AIS, prácticamente desaconsejan el uso de éstas.

En cambio, las dimensiones reducidas de las GIS, las convierten en la mejor solución para utilizarlas en tales circunstancias.

Lo mismo puede decirse en centrales hidráulicas o terrenos escarpados donde el espacio disponible para la instalación de las Subestaciones es sumamente reducido. También, en lugares de alta polución, la instalación de GIS constituye la mejor solución.

Puede afirmarse que: “Si el problema es el espacio, la solución siempre es GIS” Pero no sólo en la reducción del espacio presenta ventajas la instalación de una GIS en lugar de una AIS. Deben considerarse siempre dos aspectos importantes donde existen claras diferencias a favor de las GIS:

- 1) Rápido montaje. Las GIS -hasta tensiones nominales de 300 kV- se envían de fábrica totalmente armadas y ensayadas por campos (celdas) completos. Luego, se montan en obra como se hace con las celdas de media tensión: se sujetan al piso y se interconectan unas con otras hasta formar un conjunto (Subestación).

- 2) Mantenimiento reducido. Debido a la génesis de su concepción de módulos encapsulados en gas, el mantenimiento de las GIS es de muy baja frecuencia en comparación con las AIS. Esto es debido a que este tipo de aislamiento hace que los elementos de la Subestación estén menos expuestos a la contaminación ambiental y a la humedad del ambiente las cuales tiende a oxidar y deteriorar los elementos de la Subestación.

En la figura 3.7 podemos apreciar los puntos que hacen referencias al espacio y a la exposición a la intemperie que mencionamos



Figura 3.8. Vista de una subestación de alto voltaje aislada en aire (AIS) en la cual se puede apreciar sus dimensiones y la forma en la que está expuesta a la intemperie.

En la figura 3.8 podemos apreciar las ventajas de las Subestaciones aisladas en gas (GIS) sobre las AIS en lo referente al espacio y a la exposición al medio ambiente.

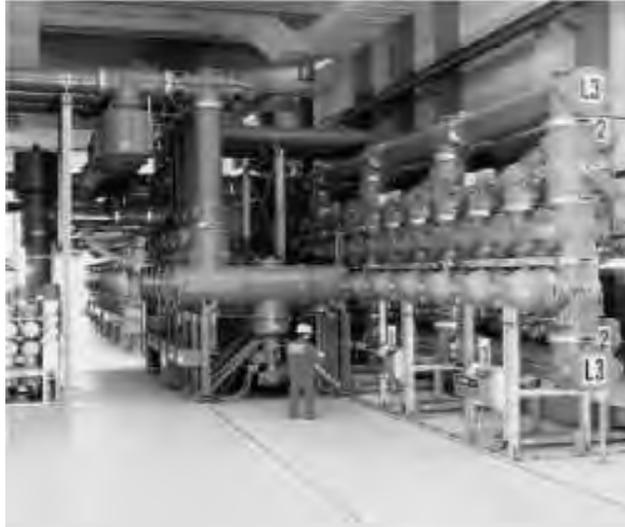


Figura 3.9 Vista de una subestación de alto voltaje aislada en gas SF₆ (GIS) del fabricante Inglés T&D en la cual se puede apreciar las ventajas en comparación con las AIS.

3.5 Costos

En las oficinas de planeamiento y proyecto de sistemas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión, nunca se deja de hacer la misma e "histórica" pregunta: ¿qué cuesta más, instalar una AIS o una GIS? Tal vez, si las GIS continúan evolucionando como lo han hecho hasta ahora, en un futuro próximo esta pregunta no se hará más. Para la comparación económica entre Subestaciones GIS y AIS, hoy deben considerarse dos casos particulares:

- 1) Si se dispone de terrenos amplios de bajo costo, lo que ocurre generalmente en sitios lejos de las grandes ciudades, las AIS son más económicas que las GIS.
- 2) Si se dispone de terrenos de superficies pequeñas y de alto costo, lo que ocurre generalmente en las grandes ciudades, las GIS son más económicas que las AIS.

En el resto de las situaciones intermedias el costo de comparación GIS versus AIS debe hacerse caso por caso, de la misma forma que se hace para cualquier comparación económica de instalaciones industriales.

Para ambas soluciones -GIS/AIS- deben considerarse, además del costo propio de los equipos principales, los costos del terreno, del montaje, de las obras civiles asociadas, de la

Ingeniería, de las inspecciones en fábrica y en obra y del mantenimiento, entre otros de menor cuantía.

El cuidado del medio ambiente reviste a veces una importancia tal que una instalación no está afectada por comparaciones de costos. En estos casos, las GIS son la solución más económica, ya que conceptualmente sus diseños se adaptan a esas circunstancias. Lo mismo ocurre en instalaciones con ambientes caracterizados por la alta polución. En estos casos, y pensando en AIS de tipo interior, la comparación con las GIS siempre favorecerá a estas últimas. También el ruido producido por los interruptores utilizados en las GIS es de un nivel muy bajo, lo que es muy apreciado cuando se trata de subestaciones urbanas. Cabe destacar también que desde el punto de vista del impacto visual las GIS presentan una menor contaminación.

El costo de las GIS se ha ido reduciendo con los años y para finales del siglo XX decreció a un nivel cercano al de las AIS, considerando equipos solamente. Si a esto se le agregan a las GIS las otras ventajas mencionadas, puede asegurarse que su uso se extenderá cada vez más.

3.6 Elementos generales de una Subestación eléctrica en SF₆

Las Subestaciones GIS tienen sus partes bajo tensión aisladas en gas hexafluoruro de azufre (SF₆), en lugar de aislación en aire como en las Subestaciones AIS. Cada equipo de alta tensión, incluyendo las barras principales o colectoras, está encapsulado independientemente en un compartimiento metálico provisto de un ambiente de gas SF₆ a presión mayor que la atmosférica. Se forman así módulos individuales por equipo, que luego se interconectan mecánica y eléctricamente entre sí para formar distintas configuraciones. Los módulos individuales corresponden a:

1. Módulo de juego de barras principales o colectoras.
2. Módulo de interruptor.
3. Módulo de seccionador de barras.
4. Módulo de seccionador de línea.
5. Módulo de seccionador de puesta a tierra.
6. Módulo de seccionador de aislamiento.
7. Módulo de transformador de corriente.

8. Módulo de transformador de tensión.
9. Módulo de transformador de tensión de barras.
10. Módulo de descargador de sobretensiones.
11. Módulo de prolongación (recto, ángulo).
12. Módulo de empalme con cable subterráneo.
13. Módulo de empalme con línea aérea.
14. Módulo de empalme con máquinas (transformador/autotransformador de potencia, reactor, etc.).

Los distintos módulos de equipos y juegos de barras principales o colectoras se conectan entre sí utilizando bridas selladas y atornilladas.

Entre módulos se utilizan aisladores cónicos de resina que a la vez que soportan las barras conductoras, ofrecen una barrera estanca al gas SF₆. Se evita así la contaminación del gas en toda la Subestación en los casos de apertura de interruptores sobre fallas, al tiempo que también evitan la propagación de una falla al resto de la Subestación.



Figura 3.10 Aislador cónico de resina.

Las envolventes metálicas pueden ser de aluminio -utilizado en la gran mayoría de los casos- o acero. El aluminio, además de disminuir el peso de toda la Subestación, ofrece una buena resistencia a la contaminación ambiental y a la descomposición del gas SF₆ por efecto del arco eléctrico. Estas envolventes de aluminio no necesitan, por esta causa, ninguna protección interior, lo que además evita el riesgo de crear partículas indeseables.

Para compensar las dilataciones térmicas y las tolerancias de montaje se disponen entre los distintos módulos, en especial los correspondientes a prolongaciones, de juntas de

dilatación del tipo fuelle que permiten dichas expansiones y evitan el escape del gas interno.

Los conductores internos de alta tensión de los distintos módulos se realizan con barras de sección circular de cobre o aluminio. Se conectan entre sí mediante contactos de presión que aseguran la continuidad eléctrica, al tiempo que absorben la expansión térmica y eventuales desalineamientos angulares, evitando así la transmisión de esfuerzos a los aisladores que las soportan.

Todas las envolventes de los distintos módulos se conectan a tierra en ambos extremos, debiendo asegurarse su continuidad a través de toda la Subestación. Al circular corriente por la barra conductora, se induce en la envolvente metálica una tensión de forma similar a lo que ocurre en un transformador de corriente. Al tener la envolvente puesta a tierra, circulará por ella una corriente similar en valor pero de sentido opuesto a la que circula por la barra conductora, considerándose así que las envolventes se encuentran a potencial de tierra.



Figura 3.11. Junta de Expansión

3.7 Módulos de juego de barras (barras principales o colectoras)

Como se indicó, están formadas por una barra conductora de aluminio o cobre, de sección circular y soportada por aisladores situados a lo largo de la envolvente metálica. El volumen entre la barra conductora y su envolvente permanece con gas SF_6 a presión mayor que la atmosférica (distintos valores según cada fabricante). Hasta la tensión nominal de

145 kV existen envolventes tripolares (las tres fases dentro de un mismo encapsulado). A partir de esa tensión, son unipolares (fases separadas). En el caso de Subestaciones de distribución de 23kV muy utilizadas en la ciudad de México se utilizan envolventes unipolares. Las GIS unipolares o de fases separadas son más voluminosas que las tripolares o de fases juntas. También las tripolares tienen un mantenimiento más sencillo al facilitar la entrada del personal asignado a esas funciones, tienen menos partes móviles y por ser una sola envolvente en lugar de tres, la posibilidad de fugas de gas es menor. Además, los flujos magnéticos de cada una de las tres fases se compensan, ahorrando así pérdidas de energía.

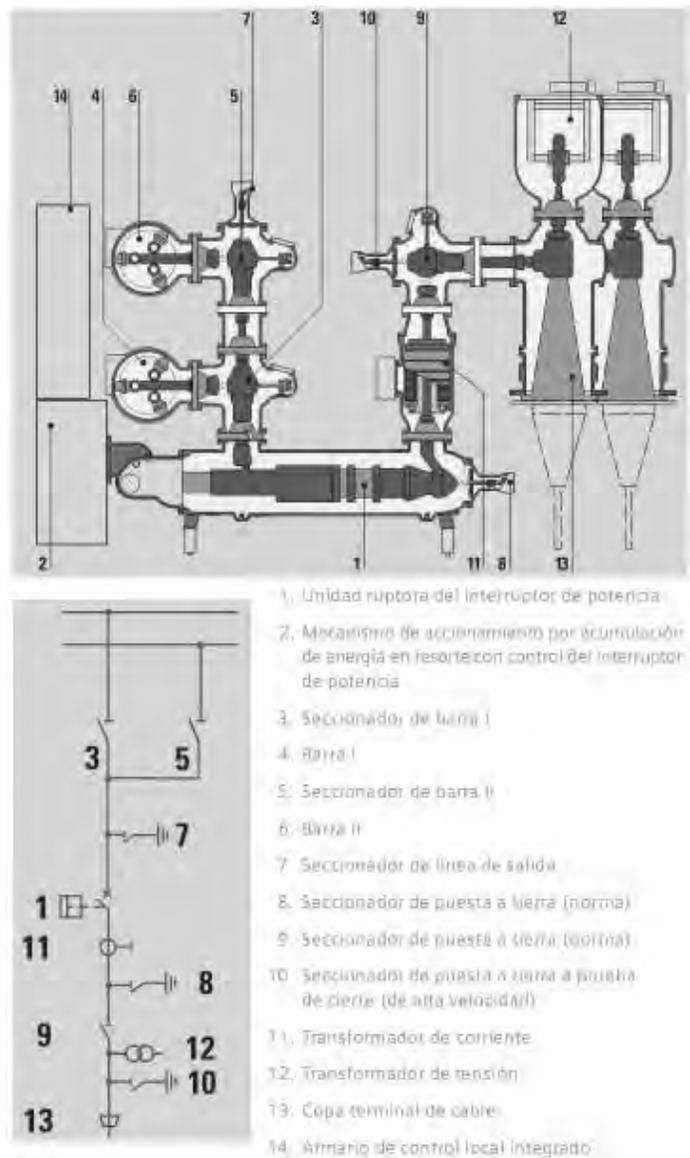


Figura 3.12. Corte típico de una celda seccionadora 8DN9 de Siemens con operación hasta voltajes de 245kV de una GIS de doble juego de barras, disposición mono polar y salida con cable subterráneo.



Figura 3.13. Vista en campo de la celda seccionadora 8DN8 de Siemens.

3.8 Módulos de interruptores

Los interruptores utilizados en las GIS modernas utilizan el mismo principio que los interruptores utilizados en las AIS: auto compresión. Ante un cortocircuito, el gas SF₆ presente como elemento de corte, se recalienta como consecuencia del contacto con la energía desarrollada por el arco eléctrico. Aumenta así la presión en el interior del cilindro de contacto, sumándose a la presión de separación propia de su mecanismo de accionamiento. Esta razón hace que no haga falta que el sistema de accionamiento sea el único encargado de aportar la energía necesaria para generar una presión capaz de extinguir el arco eléctrico. De este modo, los accionamientos modernos son simples y basados en la acumulación de energía en resortes.

Los interruptores modernos de alta tensión utilizan accionamientos de “carga de resortes” hasta 500 kV. En tensiones superiores se utilizan accionamientos electrohidráulicos, constructivamente muy compactos, y con un control simplificado de las válvulas.

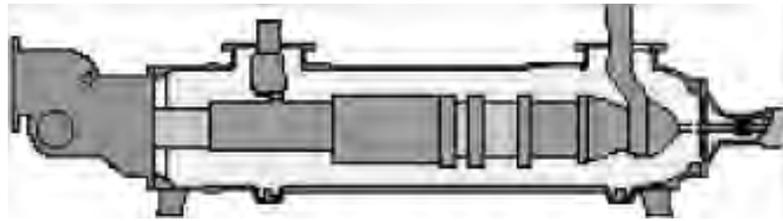


Figura 3.14. Módulo constructivo de interruptor de potencia.

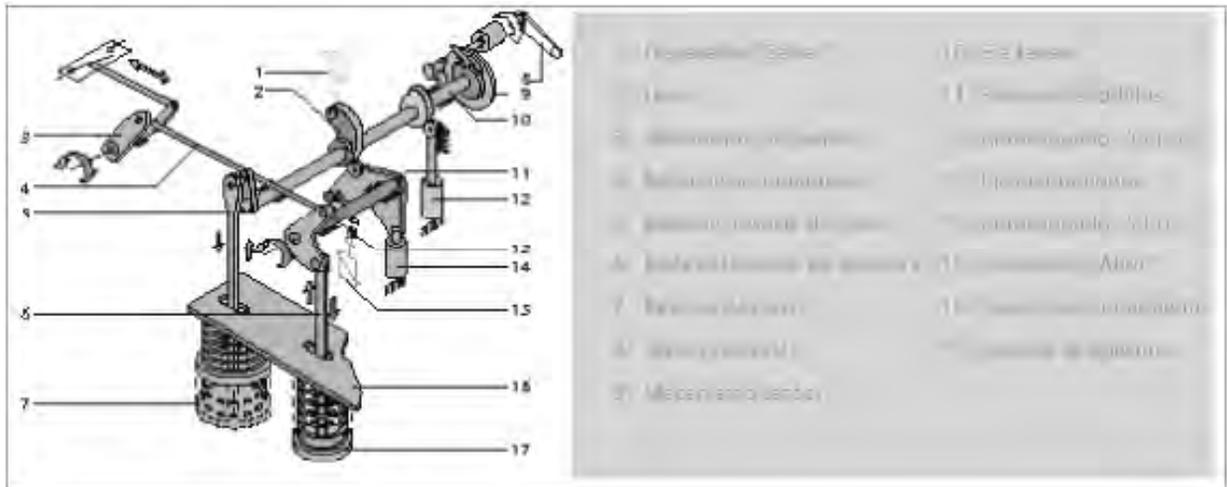


Figura 3.15. Módulo constructivo del sistema de accionamiento por acumulación de energía en resorte.

Al inicio del Capítulo se indica el reconocimiento que le cabe a esta técnica de corte como uno de los desarrollos que contribuyeron a la evolución de las GIS. Según el fabricante y la configuración adoptada, los interruptores se instalan en posición horizontal o vertical. En la posición horizontal, mediante el uso de un carrito apropiado y suministrado por el fabricante, puede extraerse para mantenimiento el contacto móvil con mayor facilidad

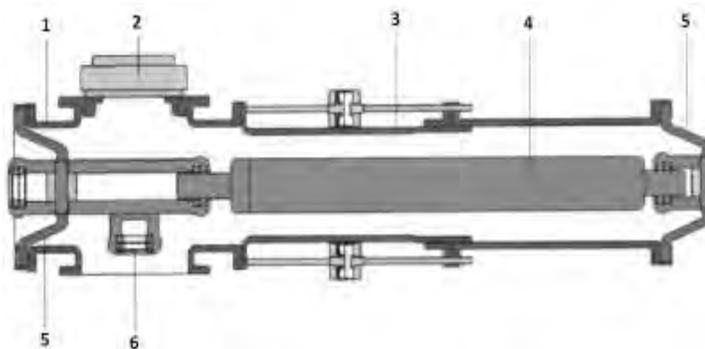


Figura 3.16. Módulo constructivo de barras principales. (1) Envolture, (2) Descarga de sobrepresión, (3) Compensador, (4) Barra conductora, (5) Aislador cónico, (6) Contracontacto fijo.

3.9 Módulos de seccionadores

Los seccionadores adoptan diversas formas constructivas y algunos fabricantes combinan las funciones del seccionador con su cuchilla de tierra en un solo aparato de tres posiciones. Resulta así que el contacto móvil tiene tres posiciones: (a) se une al contacto fijo, (b) permite unir la barra conductora con el contracontacto de la cuchilla de tierra y (c) en una posición neutra donde no se cierran el seccionador y la cuchilla de tierra. Este diseño posibilita un enclavamiento recíproco de ambas funciones.

El contracontacto de la cuchilla de tierra se extrae aislado de la envoltura metálica para fines de medición. Los polos de un seccionador están acoplados mecánicamente y así son movidos simultáneamente mediante un accionamiento motorizado o en forma manual externa. Los seccionadores de puesta a tierra soportan las corrientes de cortocircuito máximas de diseño del sistema.

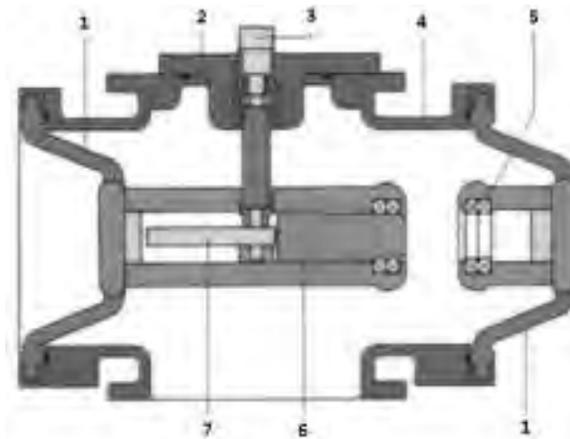


Figura 3.17 Módulo constructivo de seccionador. (1) Aislador cónico de soporte, (2) Eje aislante, (3) Eje motor, (4) Envoltura, (5) contracontacto fijo, (6) Perno de contacto móvil, (7) Varilla dentada interior.

3.10 Módulos de transformadores de medición

Los transformadores de corriente son de tipo inductivo y se pueden instalar en cualquier punto de la GIS, ya que su primario está constituido por la barra conductora de alta tensión. Los transformadores de tensión pueden ser de tipo inductivo o capacitivo, siempre inmersos en una atmósfera de gas SF₆. Los terminales secundarios de los transformadores de medición se extraen de la envoltura metálica a través de una placa de paso perfectamente estanca al gas, quedando eléctricamente accesibles en la caja de bornes, lugar desde donde,

además, se pueden cambiar las relaciones de transformación en el caso de los transformadores de corriente.

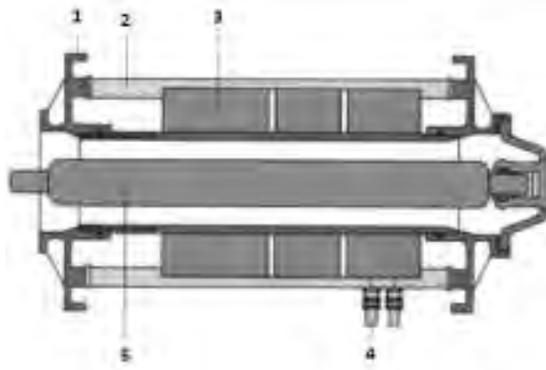


Figura 3.18. Módulo constructivo de transformador de corriente. (1) Envoltura, (2) Barra de tracción, (3) Núcleos, (4) Paso de cables de B.T., (5) Barra conductora de A.T.

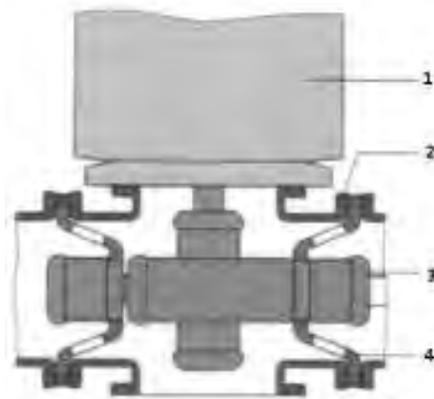


Figura 3.19. Módulo constructivo de transformador de tensión. (1) Transformador, (2) Envoltura, (3) Barra conductora de A.T., (4) Aislador cónico.

3.11 Módulos descargadores de sobretensiones

Normalmente se instalan fuera del GIS en los puntos donde las líneas aéreas se conectan a la Subestación. No obstante, también pueden instalarse en módulos aislados en gas SF₆ que forman parte integrante de la Subestación GIS. Los descargadores de sobretensiones - de óxido de zinc- tienen en su envoltura metálica un registro que permite abrir la barra conductora interna para realizar ensayos de la Subestación. Por la parte inferior, además de la existencia de terminales para el monitoreo del gas, se instalan los dispositivos de control propios.

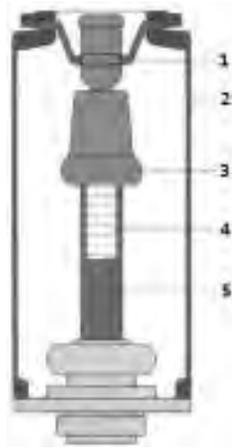


Figura 3.20 Módulo constructivo de descargador de sobretensiones. (1) Aislador cónico, (2) Envoltura, (3) Electrodo de control de campo, (4) Cuerpo activo, (5) Tubo aislante.

3.12 Módulos de empalme

Los módulos de empalme o conexión unen los campos (celdas) de las Subestaciones GIS con otros equipos externos: líneas aéreas, transformadores de potencia o reactores, cables subterráneos, etc. Asimismo, son el pasaje del aislamiento en gas SF₆ de las GIS a otro medio de aislamiento: aire (líneas aéreas), aceite (transformadores de potencia). Permiten junto con los módulos de unión o prolongación rectos, en ángulo, en “T”, etc., la realización de diversas configuraciones, con una mayor versatilidad y facilidad que las utilizadas en las AIS. Los módulos de empalme o conexión para líneas aéreas, que contemplan aisladores gas / aire, se diseñan en función de la coordinación de la aislación, las distancias eléctricas mínimas y el grado de polución existente en el lugar de implantación de la GIS. En el caso de los módulos de empalme o conexión para cable permiten la conexión de las GIS con cables subterráneos de alta tensión de cualquier tipo y sección. También se pueden conectar varios cables en paralelo (2, 3, cables por fase) cuando se trata de intensidades nominales que superan las secciones comerciales de los cables y, por lo tanto, debe adoptarse el criterio de utilizar más de un cable por fase.



Figura 3.21. Módulo constructivo para empalme de la celda a cables de alto voltaje de acuerdo a las normas de la IEC (International Electrotechnical Commission). La construcción estandarizada de los módulos permite la conexión de varias secciones y diferentes tipos de aislamientos. La conexión de cables paralelos para conducir altos rangos de corrientes también es posible usando el mismo modulo



Figura 3.22. Módulo constructivo para empalme directo de la celda a transformadores aislados en aceite o reactores. Pueden ser conectados de forma económica a Transformadores de diversas dimensiones a través de módulos estandarizados.

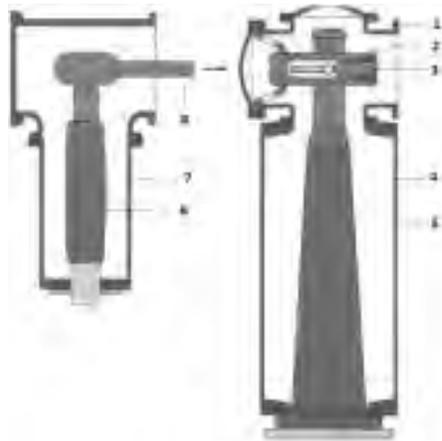


Figura 3.23. Módulo constructivo para conexión a cable subterráneo (derecha) con adaptador para prueba de cable (izquierda). (1) Brida, (2) Conductor interno, (3) Perno móvil de seccionamiento, (4) Envoltura del terminal de cable subterráneo, (5) Terminal del cable, (6) Cable de prueba, (7) Envoltura del cable de prueba, (8) Contacto de alimentación de la tensión de prueba.

Para el ensayo de rigidez dieléctrica de los cables se los aísla del módulo respectivo de empalme de la GIS mediante la separación mecánica del punto de contacto. Los módulos de empalme o conexión para transformadores (autotransformadores, reactores) de potencia son del tipo gas / aceite. El aislador pasatapas (bushing) del transformador de potencia tiene que ser estanco al aceite y al gas SF₆ comprimido. Los movimientos provocados por los cambios de temperatura y por los asentamientos diferenciales de las fundaciones del GIS y del transformador de potencia se neutralizan por medio de juntas de compensación.



Figura 3.24. Módulo constructivo de conexión a transformador/autotransformador/reactor con aislador gas/aceite. (1) Módulo de conexión, (2) Módulo de prolongación, (3) Fuelle compensador, (4) Barra conductora de conexión, (5) Envoltura, (6) Aislador pasante gas/aceite.

Mediante la utilización de diversos tipos de módulos de prolongación rectos y en ángulos, más los módulos de empalme o conexión correspondientes, se logra la adaptación más económica de las conexiones de las GIS con diversos equipos de alta tensión. Hasta tensiones nominales de 145 kV, los módulos de transición mono polar / tripolar permiten interconectar módulos y componentes de esas características entre sí. Generalmente se utilizan para el módulo de empalme o conexión de salida tripolar con módulos terminales mono polares de líneas aéreas y transformadores trifásicos de potencia.

3.13 Tableros de control y comando, protecciones y mediciones

Normalmente, los tableros de baja tensión de comando y control, protecciones y mediciones, se disponen en el frente de cada campo (celda) adosado al mismo o, pasillo por medio, enfrentados, pero siempre en forma individual por campo (celda). También las protecciones y mediciones, juntas o por separado, pueden disponerse en tableros específicos ubicados en otras salas tal como se utiliza en las Subestaciones AIS. Asimismo, el control y comando de toda la Subestación GIS se los puede centralizar en una sala de control general. Cualquiera sea el criterio que se utilice para la ubicación de estos tableros de comando y control, protecciones y mediciones, deberá preverse que en los sistemas de alta tensión es de uso corriente que toda la Subestación pueda controlarse en forma remota. De este modo, generalmente se establecen tres niveles de comando y control:

- 1) Local, desde cada campo (celda), bien sea el tablero respectivo adosado a éste o enfrentado pasillo por medio.
- 2) Remoto desde la sala de control general ubicada en el mismo edificio.
- 3) Remoto desde un centro de despacho de cargas regional y/o nacional.

Los instrumentos medidores de la presión de los diferentes módulos que se describen más adelante, pueden ubicarse localmente en los mismos tableros individuales de comando y control, protecciones y mediciones.

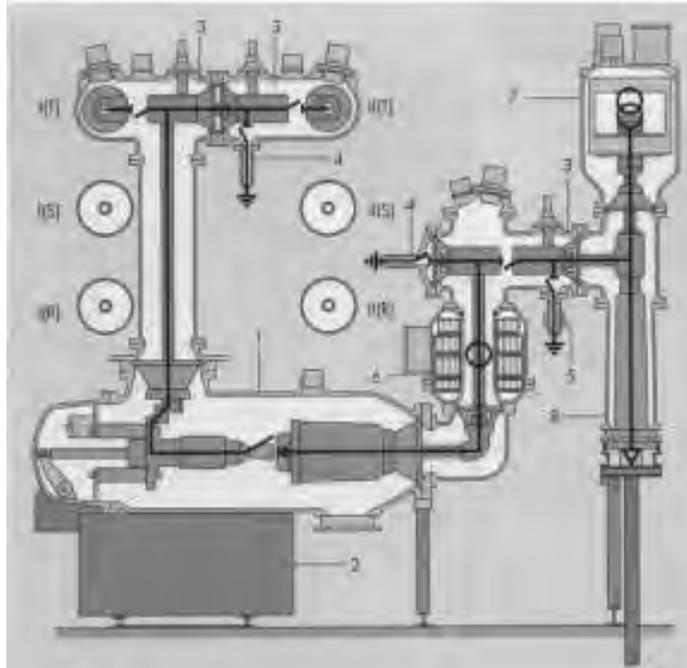


Figura 3.25. Corte típico de un campo (celda) de un GIS de doble juego de barras, disposición mono polar y salida con cable subterráneo. (1) Módulo de interruptor, (2) Mando de resortes, (3) Módulo de seccionador, (4) y (5) Módulo de seccionador de puesta a tierra, (6) Módulo de transformador de corriente, (7) Módulo de transformador de tensión, (8) Módulo de conexión a cable subterráneo.

3.14 Subestaciones aisladas en gas para media tensión (MV-GIS)

En los últimos años y fundamentalmente donde se necesitan altos valores de intensidades de corrientes nominales están siendo utilizadas Subestaciones GIS para media tensión (tensiones menores de 36kV). No obstante, que su uso no está tan difundido como lo son las GIS de alta tensión. Se denominan comúnmente MV-GIS (Medium Voltage-Gas Insulated Switchgear). También se las llama Gas Insulated-Metal Clad Switchgear (C-GIS).



Figura 3.26. MV-GIS 8DA Siemens de distribución primaria con juego de barras sencillo con capacidad para tensiones de hasta 38 kV.

En algunos casos, puede decirse que se trata de reducciones a escala de las Subestaciones GIS de alta tensión. En otros, quizás las más comunes, se trata de celdas que conservan el aspecto exterior de las celdas aisladas en aire de media tensión, del tipo metal clad, pero con sus componentes encapsulados y aislados en gas SF₆. En otros casos, el interruptor utiliza como medio de corte el vacío, al tiempo que los otros componentes están aislados en gas SF₆.

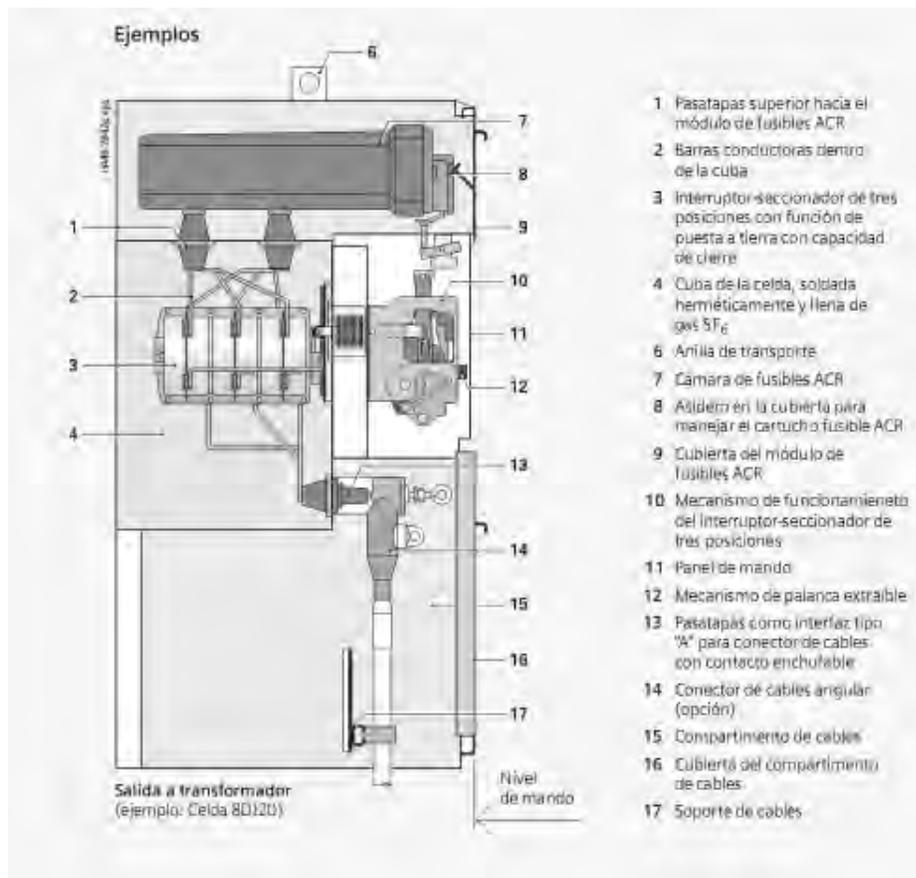


Figura 3.27. Estructura básica de una celda 8DJ20 de Siemens de distribución secundaria con interruptor-seccionador salida a transformador.

En estos momentos, con estas MV-GIS se alcanza los 4500A de intensidad de corriente nominal en barras principales o colectoras para tensiones nominales de 36 kV e intensidades de corrientes de corte en cortocircuito de 40 kA. Los conceptos indicados para las GIS de alta tensión son -en general y con algunas reservas- aplicables a las MV-GIS, tanto para el diseño, montaje y mantenimiento.

Lo mismo, también con ciertas restricciones, puede decirse para las obras civiles, ya que los MV-GIS son normalmente para instalaciones de interior y no ameritan obras civiles de envergadura por ser sus dimensiones y pesos significativamente menores a las GIS de alta tensión. La utilización de puentes grúa, tan común en instalaciones de interior de GIS de alta tensión, debe ser en este caso motivo de estudios particulares que justifiquen o no su utilización.

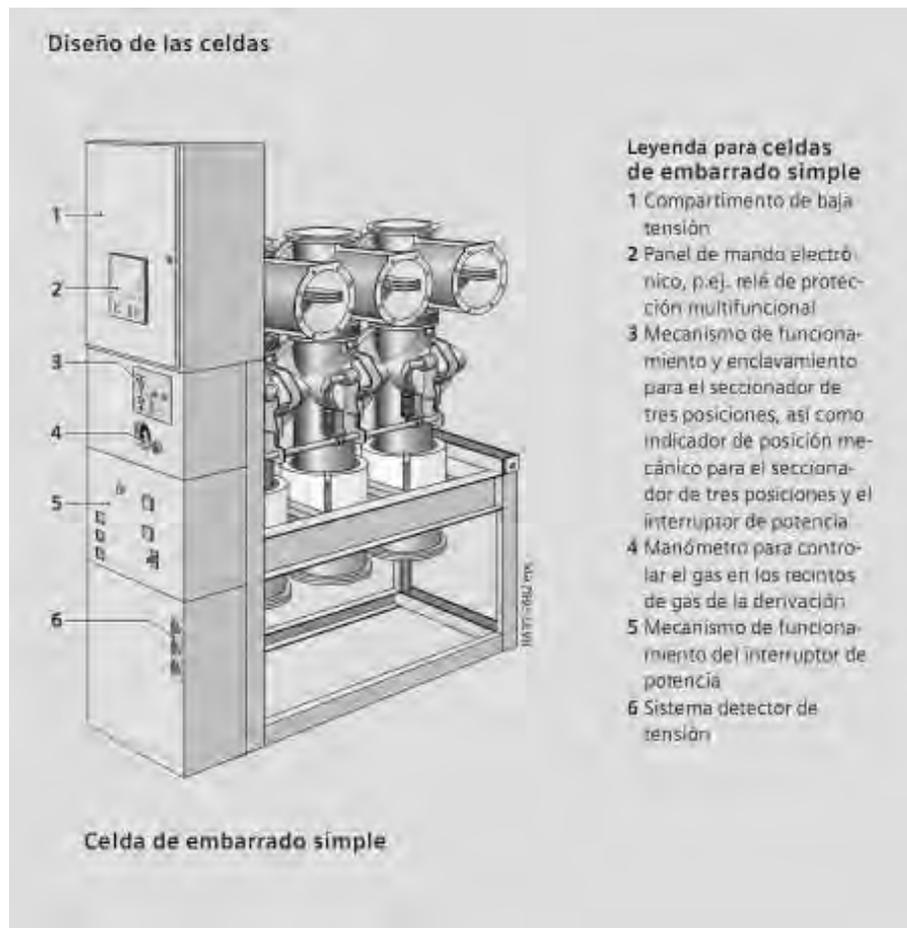


Figura 3.28. Estructura básica de celda de una MV-GIS de distribución primaria con interruptor de potencia de hasta 40.5 kV.

3.15 Tipos de distribución en MV-GIS.

Las MV-GIS se dividen principalmente en dos grupos:

- 1) Distribución primaria
- 2) Distribución secundaria

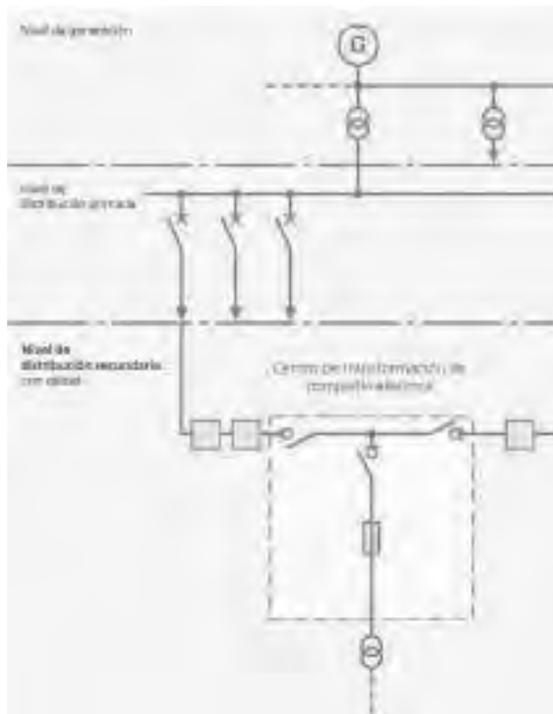


Figura 3.29. Niveles de distribución de una MV-GIS.

3.15.1 Distribución primaria. Este tipo de subestaciones utilizan celdas fijas comúnmente acompañadas de interruptores de potencia, son celdas para interiores, montadas en fábrica, con ensayos de tipo, envolvente metálica unipolar, separación metálica, aisladas en SF₆ para aplicaciones de embarrado simple y doble, así como para sistemas de electrificación ferroviaria.

Se aplican en subestaciones de transformación y distribución, por ejemplo en:

- Compañías eléctricas
- Centrales eléctricas
- Industria cementera
- Industria del automóvil
- Plantas siderúrgicas
- Trenes de laminación
- Industria minera
- Industria textil y alimentaria
- Industria química
- Industria del petróleo

- Instalaciones de oleoductos
- Instalaciones en alta mar
- Industria electroquímica
- Industria petroquímica
- Industria de construcción naval
- Centrales diesel
- Grupos electrógenos de emergencia
- Minas de lignito a cielo abierto
- Electrificación ferroviaria.

3.15.2 Características de MV-GIS de distribución primaria. Independencia del medio ambiente. La parte de media tensión encapsulada de las celdas es adecuada para su aplicación ante condiciones ambientales agresivas, tales como:

- aire salino
- humedad del aire
- polvo
- condensación

Está protegida contra la penetración de cuerpos extraños, tales como: polvo, contaminación y animales pequeños.

3.15.3 Aplicaciones típicas de MV-GIS de distribución primaria. Su aplicación es independiente de la altitud de emplazamiento y tiene un diseño compacto al emplear un aislamiento de SF₆ se obtienen dimensiones compactas. De este modo:

- Se pueden usar salas eléctricas existentes de forma eficaz
- Las construcciones nuevas son más económicas
- Las superficies en centros urbanos se utilizan de forma económica.

Cuando se diseñan en fábrica se realizan pensando en un "Diseño libre de mantenimiento". Por ejemplo las cajas de las celdas están diseñadas como sistema de presión sellado (sealed pressure system), los dispositivos de maniobra libres de mantenimiento y los conectores de cables encapsulados proporcionan máxima seguridad de

suministro de energía, buen nivel de seguridad del personal, gastos de servicio reducidos y representan una buena inversión económica.

Otro aspecto importante es la innovación tecnológica. El empleo de sistemas secundarios digitales y equipos de protección y mando combinados proporciona una clara integración en sistemas de control de proceso, ajustes flexibles y sencillos a nuevos estados de las celdas y, de este modo, a un servicio económico. La vida útil esperada bajo condiciones de servicio normales, para las celdas aisladas en gas, considerando la estanqueidad de la parte de media tensión encapsulada, es de 35 años como mínimo, probablemente hasta 40 ó 50 años, aunque en muchos casos la vida útil queda limitada por los dispositivos de maniobra utilizados al alcanzar éstos su máximo número de ciclos de maniobra.

3.15.4 Distribución secundaria. Las celdas de unas MV-GIS de distribución secundaria son del tipo de celdas bajo envolvente metálica, aisladas en gas, para instalaciones interiores, como celdas no modulares, en construcción tipo bloque, celdas con interruptores seccionadores, celdas ejecutables con interruptores-seccionadores e interruptores de potencia y celdas en construcción modular–adosables y ampliables.

3.15.5 Características de MV-GIS de distribución secundaria. Aunque las características varían dependiendo del fabricante, en general las Subestaciones del tipo MV-GIS tiene características en común. Algunos fabricantes añaden sistemas de control, de monitoreo, fusibles de media tensión, integración de relevadores de protección, incluso se puede solicitar sistemas de control y monitoreo del gas. A continuación se enlistan algunos elementos comunes de las subestaciones MV-GIS.

- Envolvente primaria tripolar, metálica
- Gas aislante SF₆
- Libres de mantenimiento e independientes del clima inclusive los módulo de fusibles aislados en aire y la conexión de cables
- Interruptor-seccionador de tres posiciones con extinción mediante gas SF₆
- Interruptor-seccionador de tres posiciones con función de puesta a tierra con capacidad de cierre
- Interruptor de potencia al vacío en cierto tipos de celdas

- Seccionador de potencia de tres posiciones con extinción mediante gas SF₆ en celdas
- Cubas soldadas y sin juntas, de acero inoxidable
- Conexión de cables diseñada como pieza de conexión de equipos con cono exterior para pasa tapas según modelo; con contacto atornillado o enchufable
- Conexión de cables para terminaciones de cables convencionales.

3.15.6 Aplicaciones típicas de MV-GIS de distribución secundaria. Las subestaciones del tipo MV-GIS se aplican en redes secundarias de distribución, como por ejemplo:

- Centros de transformación, de transferencia y subestaciones de compañías eléctricas privadas y municipales.
- Instalaciones industriales
- Parques eólicos
- Edificios singulares
- Aeropuertos
- Minas de lignito a cielo abierto
- Estaciones de metro
- Estaciones de depuración de aguas residuales
- Instalaciones portuarias
- Electrificación ferroviaria
- Industria del automóvil
- Industria de aceites minerales
- Industria química
- Industria cementera

3.16 Características del sistema de aislamiento de MV-GIS

A continuación se enlistan las características generales del sistema de aislamiento en SF₆ de Subestaciones MV-GIS tanto en distribución primaria como en distribución secundaria:

- Cajas de las celdas llenas de gas SF₆
- Características del gas SF₆:
- No tóxico
- Inodoro e incoloro

- Incombustible
- Químicamente neutro
- Más pesado que el aire
- Electronegativo (aislante de alta calidad)

La presión del gas SF₆ en las cajas de la celda depende de los valores eléctricos asignados (presión relativa a 20 °C), a continuación se enlistan algunos parámetros del diseño en planta de las celdas 8DJ y 8DH del fabricante alemán Siemens.

- Nivel de llenado asignado: 50 kPa hasta 130 kPa
- Presión de diseño: 190 kPa
- Temperatura de diseño del gas SF₆: 90 °C
- Presión de reacción del disco de ruptura: ≥ 300 kPa
- Presión de ruptura: ≥ 600 kPa
- Cuota de fugas de gas: $< 0,1$ % por año

CAPITULO IV

DISEÑO DE LA SUBESTACIÓN

CAPITULO IV DISEÑO DE LA SUBESTACIÓN

4.1 Arreglos comunes de subestaciones.

El principio bajo el cual funciona el nuevo cuarto de generación es el de un anillo en el cual es posible aislar una falla o cargas y/o alimentadores que requieran mantenimiento sin que sean afectadas las demás cargas únicamente se aísla la zona de falla. En la figura 4.1 se tiene un ejemplo de un sistema radial. Si hubiese una falla en la marca roja se pierde gran parte de las cargas del sistema eléctrico.

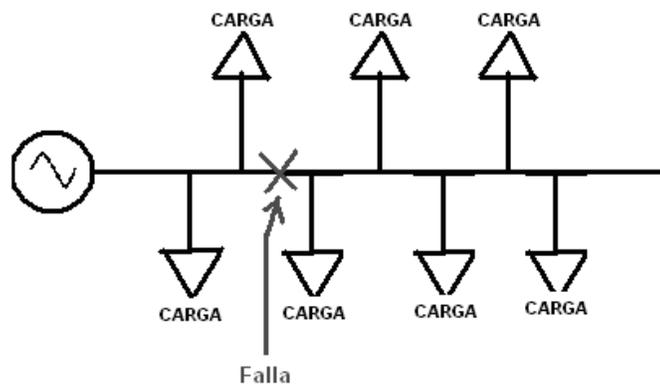


Figura 4.1. Sistema eléctrico en arreglo radial.

En cambio en un sistema en anillo como el que se presenta en la figura 4.2 en el caso de de presentarse fallas eléctricas como la que se indica en la marca color rojo es posible aislar el problema mediante el cierre y apertura de de interruptores en esa zona sin afectar el resto del sistema eléctrico.

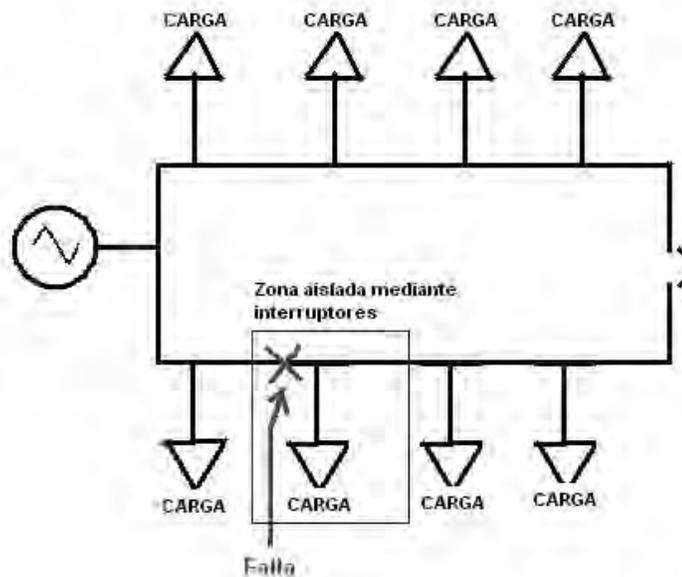


Figura 4.2. Sistema eléctrico en arreglo anillo.

4.2 Generalidades del Proyecto.

El diseño del nuevo sistema eléctrico se realizó para la empresa “COMUNICACIONES DIGITALES”, una empresa dedicada a las comunicaciones digitales y analógicas tanto de video como de voz e internet, dicha empresa se encuentra ubicada en la ciudad de México.

La empresa actualmente se encuentra en un proceso de remodelación y de aumento de infraestructura en el sistema eléctrico debido a la instalación de nuevos equipos los cuales que son necesarios ya sea por mejorar la eficiencia de los procesos actuales o por aumentar el número de procesos que maneja la empresa.

A continuación se enlistan los procesos críticos de la empresa en base a los cuales se desarrollará la nueva subestación:

- El Consumo promedio en todo el campus de la empresa al día es de 3000 kW.
- Operación con equipo electrónico muy sensible a las variaciones de voltaje y a las fallas de la compañía suministradora, como los son transmisores de potencia de HF (High Frequency), servidores de SITES, Racks de equipo de telefonía, equipo electrónico de transmisión satelital, redes de datos de fibra óptica entre otros.
- Crecimiento anual de los requerimientos de carga debido a los múltiples procesos

Los requerimientos principales del proyecto según las necesidades de la empresa son los siguientes:

- Aumento de la capacidad de carga
- Mayor confiabilidad del sistema en lo que respecta a fallas de la compañía suministradora y calidad de la energía (voltaje, armónicos, etc.)
- El mayor ahorro posible en el consumo de energía mensual.
- Sistemas ininterrumpidos de energía en los procesos más importantes de la empresa como lo son transmisión de señales de video digital y análogo, SITES de telefonía y computo.
- Realizar el proyecto de la forma menos invasiva en las instalaciones actuales y aprovechando la infraestructura actual.
- Un buen rango de vigencia del sistema eléctrico en lo que respecta a capacidad de carga y eficiencia del sistema.

En la página siguiente se muestra el diagrama unifilar IE-01 el cual es una vista aérea de la ubicación de la carga instaladas y cargas nuevas proyectadas también se muestra la trayectoria propuesta para la canalización del nuevo sistema en anillo. El área encerrada en un círculo en la esquina superior izquierda muestra el punto donde se centra toda la operación y control del sistema eléctrico. En la esquina superior derecha del plano IE-01 se observa el detalle para la instalación de la charola que alojara el cableado de media tensión.

Plano IE-01

4.3 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es mantener el suministro de energía eléctrica de forma ininterrumpible y de la mejor calidad posible al campus de “COMUNICACIONES DIGITALES” para evitar disturbios interno y externo en el sistema, mediante los medios proporcionados por un sistema eléctrico confiable.

El nuevo sistema tiene como función principal la distribución de la energía eléctrica provista por la compañía Suministradora mediante sus 2 acometidas y como respaldo actuaran los sistemas de emergencia.

4.4 Comportamiento y naturaleza de la carga y del sistema.

En lo que respecta al tipo de carga al realizar una inspección visual a todo el campus podemos observar que la mayoría de la carga es del tipo resistiva como lo son alumbrado de oficinas, contactos para computadoras, equipo electrónico de HF, Sistemas ininterrumpibles de energía (UPS), motores de aire acondicionado y alumbrado de alta potencia (lámparas de vapor). La carga inductiva son únicamente los motores de los aires acondicionados de los varios edificios del campus.



Figura 4.3. Cargas del tipo inductivas



Figura 4.4. Cargas del tipo Resistiva

4.5 Requerimientos del diseño.

De acuerdo a los datos proporcionados por la empresa y a un levantamiento previo de las instalaciones se establece el parámetro de potencia a suministrar por la nueva infraestructura eléctrica. La cantidad de energía requerida mensual se calculo obteniendo el promedio de las lecturas mensuales durante un año. Dichos medidores son en baja tensión y están ubicados en las acometidas de la compañía suministradora. El promedio mensual de consumo en todo el campus fue un aproximado de 3000 kW con picos de hasta 3500kW. En las figuras 4.3 y 4.4 podemos observar el comportamiento de la carga en el mes de Septiembre del 2010.

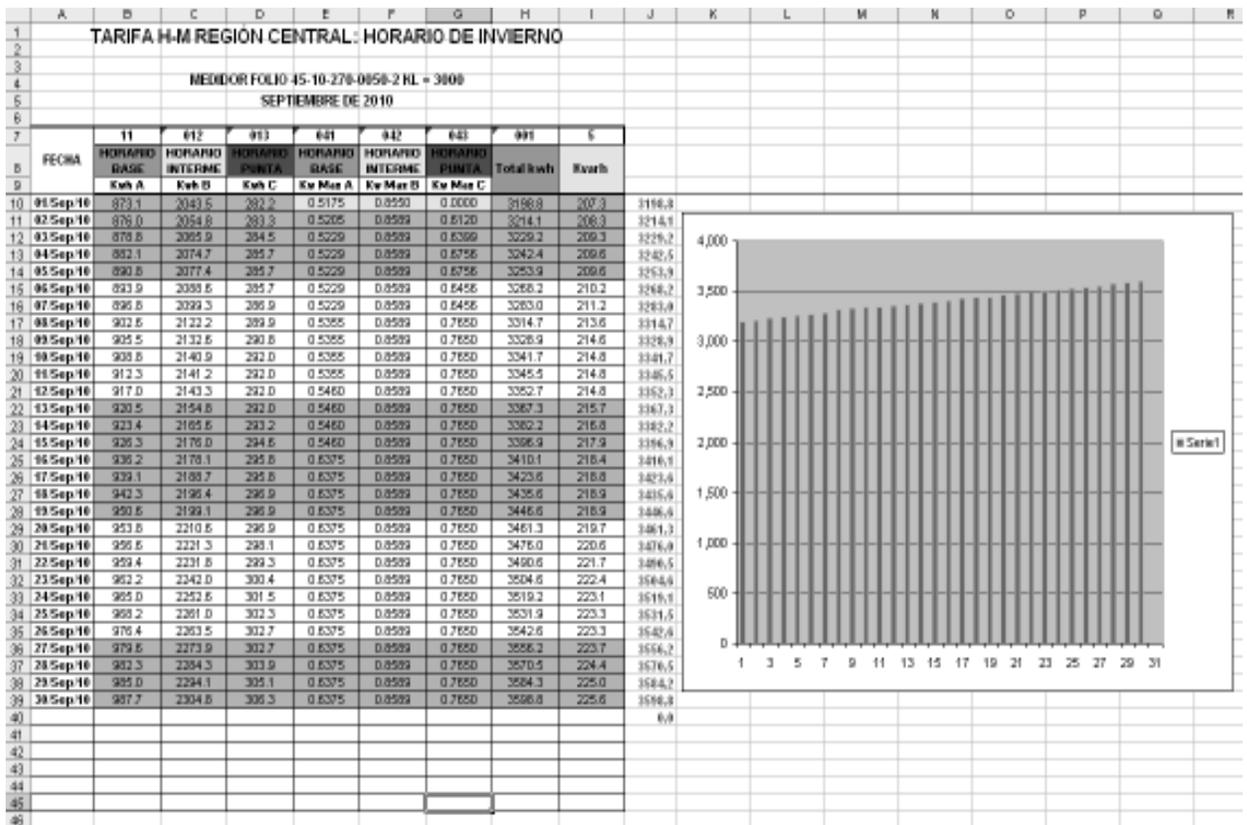


Figura 4.5. Valores mensuales de consumo en kWh.

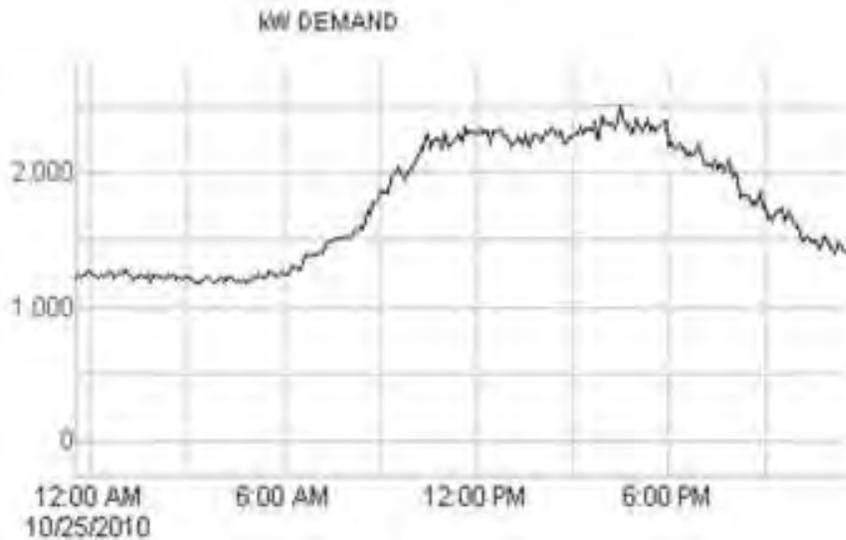


Figura 4.6. Grafica del consumo aproximado en todo el campus obtenida con un medidor digital de parámetros Energy Meter 8100 SERIES.



Figura 4.7. Medidores de consumo de energía Energy Meter 8100 SERIES

En el plano IE-02 se muestra el diagrama unifilar del sistema eléctrico original. Podemos observar que en lo general la mayoría de cargas son alumbrado, equipo de cómputo, algunos motores de 562HP y cargas del tipo activa como UPS (Uniterruptible Power Supply).

4.6 Criterios de diseño.

4.6.1 Aspectos generales. El sistema eléctrico de “COMUNICACIONES DIGITALES” está conformado actualmente por dos acometidas en un voltaje de 23kV, 3 fases, 60 Hz, denominadas “Acometida preferente “ y una segunda denominada “Acometida Emergente“. En la figura 4.7 podemos apreciar el sistema eléctrico de forma general.

Estas dos acometidas conmutan entre sí de forma basculante, es decir la salida de energía es alimentada por la última acometida donde se censo energía. La conmutación es en media tensión y es llevada a cabo por una transferencia automática aislada en aire propiedad de la compañía suministradora.

Este esquema ha reportado múltiple fallas debido a que la energía eléctrica en baja tensión es más propensa a generar disturbios en el sistema como por ejemplo sobre voltajes o corrientes armónicas. Otro aspecto negativo es que se requieren de mayor cantidad de conductores para soportar la exigencia de corriente debido al incremento de carga anual que se presenta en las instalaciones.

Plano IE-02

4.6.2 Aspectos del diseño. Se consideraron para el diseño de la subestación los puntos que se enlistan a continuación, y procurando utilizar en la medida de lo posible la infraestructura ya existente, como lo son transformadores, tableros de distribución etc.:

- Seguridad
- Confiabilidad
- Simplicidad de operación
- Calidad de la energía
- Mantenimiento
- Flexibilidad
- Costo

En la figura 4.8 se presenta *a grosso modo* el nuevo esquema de alimentación en media tensión. Existen dos fuentes de energía que proporcionan energía al anillo; un sistema de doble acometida de la compañía suministradora y un sistema de 3 plantas de emergencia sincronizadas.

El sistema de doble acometida es manejado por el transfer automático de la compañía suministradora el cual conmuta dependiendo de las condiciones del sistema a Acometida Preferente o Acometida Emergente, dicho transfer ha presentado fallas mecánicas debido a sus elementos a fallas internas en sus elementos.

4.6.3 Sistema de emergencia. El nuevo sistema de emergencia cuenta con 3 plantas de emergencia; 2 con capacidad de 1130kW en emergencia y una de 2000 kW en emergencia, las cuales se encontraban en servicio excepto una planta de 2000kW que se adquirió para el proyecto. Las plantas generan en 440V para posteriormente conducir la corriente alterna a un transformador elevador el cual entregara la energía al anillo con un voltaje de 23kV. Los tiempos elegidos para el diseño de la operación de las plantas de emergencia son:

1. Tiempo de retransferencia es de 1 minuto.
2. Tiempo de operación en vacío es de 1 minuto.
3. Tiempo de protección de marcha y paro del ventilador del radiador es de 20 seg.

4.6.4 Sincronización.

Ante la ausencia de potencial por más de 2 segundos en la celda de SF₆ de las acometidas, las plantas de emergencia arrancarán de forma automática y se sincronizarán en aproximadamente 10 segundos. Las señales de control se tomarán del lado de alta de los transformadores y se hará de forma automática, quedando deshabilitada la sincronía manual. La sincronía se realizará tomando como referencia la planta de 2000 kW.

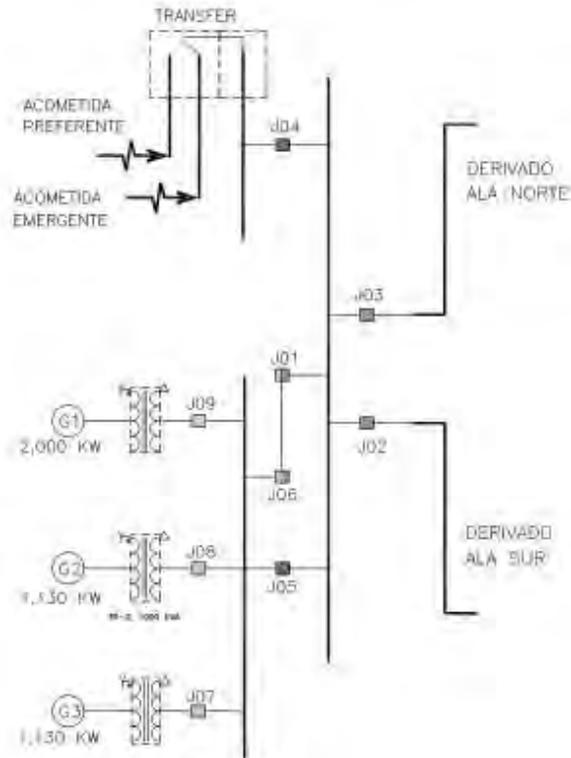


Figura 4.8. Diagrama del nuevo sistema de alimentación en media tensión.

4.7 ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

4.7.1 Aspectos generales. Se realizó un estudio de corto circuito con la intención de obtener el valor de las corrientes de falla trifásica, monofásica y de las aportaciones del sistema eléctrico de “COMUNICACIONES DIGITALES”, ubicado en Cd. De México, los valores obtenidos servirán como marco de referencia para la definición y evaluación de capacidades interruptivas de los tableros de potencia tanto de media como de baja tensión; además de ser parte fundamental para el análisis para el cálculo de la red de tierras.

El objetivo de este estudio es determinar las corrientes de corto circuito trifásica, monofásica y las aportaciones del sistema para obtener información base para la definición

de la capacidad interruptiva de los interruptores principales y derivados así como para el estudio de coordinación de protecciones y red de tierras.

4.7.2 Software de Cálculo. Para el desarrollo de este proyecto se trabajó con el software Power Tools de SMK 6.0 que es una herramienta computacional de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia, industriales, comerciales y de empresas de suministro. Esta herramienta permite trabajar directamente desde el diagrama unifilar; además cuenta con una interfase hombre-máquina desarrollada para el análisis de sistemas de potencia, y utiliza avanzadas técnicas de análisis de redes desarrolladas a nivel mundial para computadoras.

4.7.3 Datos de entrada para el modelado del sistema eléctrico. A continuación se describen las consideraciones tomadas para la realización del estudio de corto circuito y coordinación de protecciones de sobrecorriente.

- 1) Configuración del sistema. La configuración del sistema eléctrico de “COMUNICACIONES DIGITALES” es anillo con operación radial. El nivel de tensión con el cual llega la acometida de la compañía suministradora es de 23 kV para distribuir la energía en media tensión a las diferentes áreas; y de este nivel se transforma a 440, 220/127V para la alimentación de las cargas del sistema. El sistema de autogeneración está compuesto por generadores con motor diesel operando a 440 V, de este punto se eleva la tensión a 23kV para ser distribuida en el anillo a través de transformadores elevadores. La carga instalada consiste básicamente de cargas mixtas esto quiere decir que está compuesta por tableros de alumbrado y unidades electrónicas y motoras, etc.
- 2) Transformadores. El sistema eléctrico cuenta con transformadores elevadores y reductores tipo OA de capacidades varias, con valor de impedancia acorde a ANSI C57.12.59DT, el cual fue considerado con tap fijo ^[10].
- 3) Cables. Dentro de este estudio son considerados los cables involucrados en los radiales y son modelados de acuerdo a su curva de daño, tal y como lo establece el estándar ANSI/IEEE 242 ^[10].

Los cables representados en el estudio se consideraron de la siguiente manera:

- Todos los conductores son de cobre.
 - El tipo aislamiento es THW para bajo voltaje y XLP para media tensión.
- 4) Motores. Para el análisis de los motores bajo condiciones de corto circuito se tomaron las recomendaciones del estándar 141-1993 de la IEEE ^[9], el cual en su punto 4.5.4.1 First-cycle duties for fuses and circuit breakers establece que para un cálculo de corto circuito que será utilizado para evaluar la capacidad interruptiva de los dispositivos de interrupción del sistema; la impedancia subtransitoria modificada o sin modificar puede ser usada para representar todas las máquinas rotatorias en una red equivalente, por lo tanto a efectos de simplificar el presente análisis se agruparon los motores menores a 50 hps para obtener uno equivalente por cada tipo, sin alterar la suma de la potencia de todos los motores.
 - 5) Generadores de emergencia. Para esta etapa se consideran los generadores de emergencia a modo de obtener el escenario más crítico de operación del sistema y obtener los valores de corrientes de corto circuito más altos posibles dentro del sistema.
 - 6) Definición de elementos. Los elementos podrán ser identificados en base a sus respectivos tag's acorde a los diagramas unifilares anexos.

En la siguiente página se muestran el plano IE-03 el cual representa el nuevo sistema de alimentación en media tensión ya dispuesto en anillo el cual consta de nueve subestaciones alimentando las cargas principales en un voltaje de 23kV. En lo que respecta a los sistemas de emergencia podemos observar que sigue haciendo uso de doble acometida y se agrega un nuevo bloque de plantas de emergencia para actuar en caso de falla en la compañía suministradora las cuales generan en 440V y a través de transformadores elevadores conducen la energía hacia los dos derivados del anillo.

El plano IE-04 representa el diagrama utilizado en el software de diseño, en el podemos observar que existen diferentes rutas para el cálculo de corto circuito y para la coordinación de protecciones.

Plano IE-03

Plano IE-04

4.7.4. Cálculo de corto circuito. El estudio de corto circuito nos permite obtener los valores de corriente que se presentan en un sistema eléctrico ante condiciones de falla y son utilizados para seleccionar la capacidad interruptiva y momentánea de interruptores y otros dispositivos de protección que forman parte del sistema; al mismo tiempo estos valores de corriente nos permiten evaluar la capacidad de los componentes del sistema para resistir los esfuerzos mecánicos y térmicos ante condiciones de falla, al mismo tiempo el estudio de corto circuito es la base para poder realizar un estudio de coordinación de protecciones, asegurando así la mínima interrupción y evitando daños a los equipos. Es decir, permite obtener y evaluar los valores de las corrientes que deben interrumpirse y conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de corriente.

Una instalación eléctrica debe de estar preparada para soportar un corto circuito cuando sus elementos cumplen con las siguientes condiciones:

- Robustez suficiente para soportar los esfuerzos mecánicos de la máxima corriente posible.
- Capacidad de los conductores para soportar los esfuerzos térmicos de la corriente más alta
- que pueda presentarse.
- Rapidez de respuesta coordinada de acuerdo al esquema de protección seleccionado.
- Capacidad de los interruptores para soportar la corriente del arco.

En el análisis de las condiciones de falla en un estudio de corto circuito, se deben considerar aspectos previos, a saber:

1. Seleccionar el lugar o punto de la instalación donde se requiere conocer el nivel de la falla.
2. Establecer el modelo eléctrico.
3. Reconocer y calcular las desviaciones de los resultados finales en función de las simplificaciones realizadas, como las recomendaciones de la norma [5], por ejemplo el agrupamiento de motores menores de 50 hp a un motor equivalente que entregará un valor dado de contribución de corriente de falla

4.7.5 Procedimiento del estudio de corto circuito. En el estudio de corto circuito se realiza el análisis de dos tipos de fallas. Primero se realiza un estudio de falla trifásica para la primera red de medio ciclo; para el cual sólo necesitamos las componentes de secuencia positiva y otro estudio monofásico igual para la primera red. Para el segundo estudio, de acuerdo con la teoría de componentes simétricas, se necesitan las tres redes de secuencia: positiva y negativa, que serán consideradas iguales, y la red de secuencia cero. El cálculo de corriente de corto circuito monofásico es importante, además, por el hecho de que, aunque no es común, este tipo de falla puede llegar a tener un valor mayor que la corriente de falla trifásica; lo que obligaría a la inserción de una resistencia de puesta a tierra con el fin de limitar su magnitud.

Es importante mencionar que el software utilizado necesita la adición de buses nodo para efectos del análisis de corto circuito, es decir cada elemento activo y/o pasivo requiere estar conectado a un bus físico o bus nodo de referencia, físicamente este último es un punto de conexión normalmente terminales o zapatas. Con la combinación de buses y buses nodo el software forma una matriz con la cual realiza los cálculos para obtener las diferentes corrientes de falla y relaciones X/R.

4.7.6 Primera red (Momentánea). El fin de esta red es obtener las corrientes de corto circuito momentáneas que circulan durante el primer ciclo después de haber ocurrido la falla. Para elaborar esta red se deben tomar los valores subtransitorios de todas las fuentes de corriente que contribuyen al corto circuito afectados por los factores indicados en las tablas 24 y 25 de IEEE/ANSI 141 – 1993 Norma para el cálculo de corto circuito, y los elementos estáticos.

Las corrientes calculadas en esta red tienen diferentes usos:

- a) Selección de las capacidades interruptivas.
- b) Diseño de equipos y estructuras (efecto electrodinámico).
- c) Diseño de red de tierras.

4.7.7 Segunda red (interruptiva). Esta red se emplea para determinar los esfuerzos en los interruptores y fusibles de mediano y alto voltaje.

Se consideran los valores subtransitorios de todas las fuentes de contribución al corto circuito (solo con la excepción de los generadores hidráulicos, en cuyo caso, se considera la reactancia transitoria) y se toman en cuenta los factores indicados en la tablas 4.1 de IEEE/ANSI 141 – 1993¹.

4.7.8 Tercera red (30 ciclos). Esta tercera red es calculada para ser empleada principalmente en el ajuste de los relevadores con retardo de tiempo, aquellos cuyo tiempo de retardo es mayor a seis ciclos. En esta red, solamente se tiene contribución de la compañía suministradora y de los generadores síncronos (representados con su impedancia transitorios), pues todos los motores de inducción son omitidos.

4.7.9 Método de cálculo usado para el estudio. El estudio de corto circuito se hace de acuerdo con las normas internacionales aceptadas para tal fin. El método normalizado por el Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE y American National Standards Institute, ANSI; conocido como Norma para el cálculo de corto circuito IEEE/ANSI 141 – 1993 ^[9].

El método consiste básicamente en la aplicación de factores de multiplicación sobre el cálculo de las corrientes de corto circuito, mismas que dependen del punto del sistema en el cual se analiza la falla, de la relación X/R de los equivalentes correspondientes del sistema reducido, tiempo en que inicie la apertura de los contactos primarios del interruptor y uso de la corriente calculada.

La Norma considera la elaboración de tres redes (circuitos equivalentes del sistema eléctrico) para los cálculos de las corrientes de corto circuito. La diferencia entre cada red es el valor de la impedancia de las máquinas rotatorias. Esto se justifica en el hecho de que el estado electrodinámico de las redes cambia a cada instante, existiendo contribuciones diferentes para cada red. Para este caso en particular solo se analizará la primera red de medio ciclo.

El estudio de corto circuito permite obtener resultados para analizar el comportamiento de las protecciones eléctricas con un estudio de la coordinación de protecciones.

4.8 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO OPCIÓN NORMALMENTE ABIERTO AL CENTRO.

Los resultados del análisis de corto circuito muestran el nombre del bus de referencia, el voltaje de línea, la relación E/Z, la corriente trifásica y de línea a tierra, para ver detalles resultados del corto circuito se anexan a continuación algunas corridas del software Power Tools de SMK 6.0. Las siguientes tablas muestran los datos de entrada para el software.

Apr 14, 2008 21:06:28 UNBALANCED INTERRUPTING DUTY PAGE 5

INTERRUPTING DUTY SUMMARY REPORT

PRE FAULT VOLTAGE: 1.0000
 MODEL TRANSFORMER TAPS: NO
 NACD OPTION: INTERPOLATED

BUS RECORD NO NAME	VOLTAGE L-L	NACD RATIO	* 3 P H A S E * E/Z KA	X/R	* * * S L G * * * E/Z KA	X/R
B-A-GEN	23000.	0.975	25.563	7.39	22.720	7.31
B-ACOM	23000.	0.975	25.664	7.72	22.837	7.66
B-ENDC	23000.	0.975	25.566	7.39	22.722	7.32
B-TR01	23000.	0.974	17.879	1.63	14.965	1.63
B-TR02	23000.	0.974	18.253	1.69	15.308	1.69
B-TR03	23000.	0.974	18.278	1.70	15.331	1.69
B-TR04	23000.	0.974	18.576	1.75	15.607	1.75
B-TR05	23000.	0.974	19.641	1.98	16.606	1.96
B-TR06	23000.	0.974	19.643	1.98	16.607	1.96
B-TR07	23000.	0.974	22.160	2.72	19.092	2.66
B-TR08	23000.	0.974	22.673	2.98	19.614	2.91
B-TR09	23000.	0.974	23.138	3.27	20.094	3.19
B-TR10	23000.	0.974	24.476	4.62	21.514	4.51
B-TR11	23000.	0.975	25.470	7.00	22.613	6.91

19 FAULTED BUSES, 58 BRANCHES, 17 CONTRIBUTIONS
 UNBALANCED FAULTS REQUESTED

*** SHORT CIRCUIT STUDY COMPLETE ***

Figura 4.9. Corrida del software de cálculo de corto circuito Power Tools de SMK 6.0

4.8.1 Resultados del análisis de C.C. opción normalmente Abierto al centro. Los resultados del análisis de corto circuito muestran el nombre del bus de referencia, el voltaje de línea, la relación E/Z, la corriente trifásica y de línea a tierra, para ver detalles resultados del corto circuito ver anexo.

4.8.2 Resultados del análisis de C.C. opción Ruta A. Los resultados del análisis de corto circuito muestran el nombre del bus de referencia, el voltaje de línea, la relación E/Z, la

corriente trifásica y de línea a tierra, para ver detalles resultados del corto circuito ver anexo.

4.9 Conclusiones y recomendaciones

En base en el presente estudio se concluye que el sistema eléctrico de potencia de "COMUNICACIONES DIGITALES" soportará los esfuerzos térmicos y dinámicos que baja condiciones de corto circuito puedan presentarse, lo anterior aunado a un sistema de tierras que deberá estar diseñado acorde a las corrientes de corto circuito que por ella circularan, nos garantiza que el sistema es seguro tanto para las instalaciones como para el personal operario. No se observan elementos de protección que tengan una menor capacidad interruptiva que la mínima necesaria a la cual estarán sometidos bajo condiciones de corto circuito.

Para la elaboración del presente análisis se tomó como base una aportación de corto circuito de 1000 MVAs, acorde a instrucciones de "COMUNICACIONES DIGITALES".

CAPITULO V

COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

CAPITULO V

COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

5.1 Conceptos básicos

El objetivo principal y primordial de todos los sistemas de potencia es el mantener en un alto nivel la continuidad del servicio, y que cuando ocurran condiciones intolerables, reducir el número de cortes de energía eléctrica. Las pérdidas de potencia, y sobre - voltajes ocurren de cualquier manera, porque es imposible y también poco práctico, poder evitar las consecuencias de eventos naturales y accidentes físicos; como son fallas del equipo, o mala operación debido a errores humanos. Muchas de estas fallas resultan de: descuidos, conexiones accidentales o "descargas" entre conductores de fase o de un conductor de fase a tierra.

Las causas naturales que pueden provocar cortos circuitos (fallas) son descargas atmosféricas (voltaje inducido o descarga directa en el conductor), viento, hielo, terremotos, fuego, explosiones, árboles caídos sobre las líneas, objetos voladores, contactos físico de animales y contaminación. Los accidentes incluyen las fallas resultantes de choques de vehículos con los postes o equipo vivo, así como el sabotaje por parte de las personas a las instalaciones y equipos del sistema eléctrico de potencia. Se hace un esfuerzo considerable para reducir los posibles daños, pero la eliminación de todos estos problemas semejantes aún no es posible.

La mayoría de fallas en un sistema eléctrico de distribución con red de líneas aéreas son fallas de fase a tierra, producto de las descargas atmosféricas, que inducen un alto voltaje transitorio y dañan o flamean el aislamiento. En los sistemas aéreos de distribución, el contacto de árboles con líneas originado por viento es otra fuente de fallas. El hielo, nieve y viento durante tormentas severas pueden originar muchas fallas y daños, al equipo.

En algunos casos la descarga originada por eventos de esta naturaleza, no causan daño permanente si el circuito es interrumpido rápidamente. Esta interrupción rápida es una práctica común. Pero en muchos casos se produce una sobre - tensión en la tensión nominal del sistema causada por este corte momentáneo de energía. El tiempo

promedio del corte de energía esta en el orden del $\frac{1}{2}$ a 1 ó 2 minutos que es un buen tiempo en comparación con muchos minutos y horas que puede estar fuera el sistema.

Las fallas originadas en el sistema no siempre suministran cambios significativos de las cantidades eléctricas del sistema que pueden ser usadas para distinguir las condiciones tolerables de las no tolerables por el sistema. Estos cambios cuantitativos, incluyen sobre - corriente, sobre o bajo voltaje, potencia, factor de potencia, dirección de la corriente, impedancia, frecuencia, temperatura, movimientos físicos y presión. También la acumulación de contaminación en el aislamiento es una fuente de falla muy común que es impredecible y que generalmente significa un incremento en la corriente, por lo que la protección de sobre - corriente es muy aplicada.

La protección es la ciencia, técnica o arte de aplicar y seleccionar relevadores y / o fusibles para proporcionar la máxima sensibilidad para la detección de las fallas o condiciones indeseables, y no obstante, evitar su operación en todas las condiciones permisibles o tolerables.

Es importante reconocer que la decisión del "time window" en el sistema protegido es muy estrecha y cuando ocurre una falla, deberá verificarse la operación correcta de la coordinación de protecciones de los relevadores y los demás medios de protección en un Sistema Eléctrico de Potencia para comprobar su comportamiento o en su defecto corregir el ajuste tiempo - corriente.

Es vital que la decisión correcta sea hecha por el mecanismo de protección, si la perturbación es intolerable y de esta manera demande una acción rápida, o si es una perturbación tolerable o situación transitoria que el sistema pueda absorber toman la decisión para que el dispositivo de protección opere si es necesario para aislar el área de perturbación rápidamente como sea posible y con un mínimo de disturbios en el sistema, este tiempo de perturbación es asociado a menudo de señales extrañas e la fuente, los cuales no beben "engañar" al dispositivo de protección que para que origine una incorrecta operación. Ambas, la operación por falla y la operación incorrecta pueden originar al sistema un problema mayor involucrando un aumento del daño al equipo, aumento en el riesgo para el personal, y una posible interrupción del servicio más larga. Estos requerimientos rigurosos hacen que los ingenieros de protección sean conservadores. Es debido a esto que un ingeniero de protección experimentado a

menudo desea continuar usando equipos de protección que tengan un largo historial y confiabilidad.

5.2 Generalidades

5.2.1 Esquemas de protección con relevadores. Los diseños y presentaciones específicas varían mucho con los requerimientos de aplicación, las diferencias de construcción, y el tiempo de operación del diseño en particular. Originalmente, todos los relevadores de protección fueron del tipo electromagnético, y electromecánico que siguen estando en gran uso, pero los diseños de estado sólido están proliferando. Los relevadores de estado sólido son usados en sistemas de protección de bajo voltaje donde el relevador y el circuito del interruptor automático son una unidad común. Aquí los relevadores electromecánicos fueron generalmente y relativamente inexactos, algunas veces insensibles, y difícilmente conservan las condiciones. Es en este caso donde los relevadores de estado sólido son hoy en día muy efectivos.



Figura 5.1. Relevador Siemens de protección diferencial.

5.2.2. Interruptores de potencia. Los relevadores de protección haciendo una comparación sobre el "cerebro" para censar disturbios, pero como mecanismo de baja energía no son capaces de interrumpir y aislar el área con problemas de el sistema de potencia. Los interruptores de potencia en sus distintos tipos son el "músculo" que puede aislar la falla. De esta manera los relevadores de protección y los interruptores de potencia son los equipos necesarios para el rápido aislamiento de un área con problemas ó equipos dañados. Un relevador de protección sin un interruptor no tiene valor, excepto posiblemente

para alarma. Así también, un interruptor sin relevadores tiene mínimo valor, éste podrá ser usado solamente para energizar o desenergizar manualmente el equipo o los circuitos.

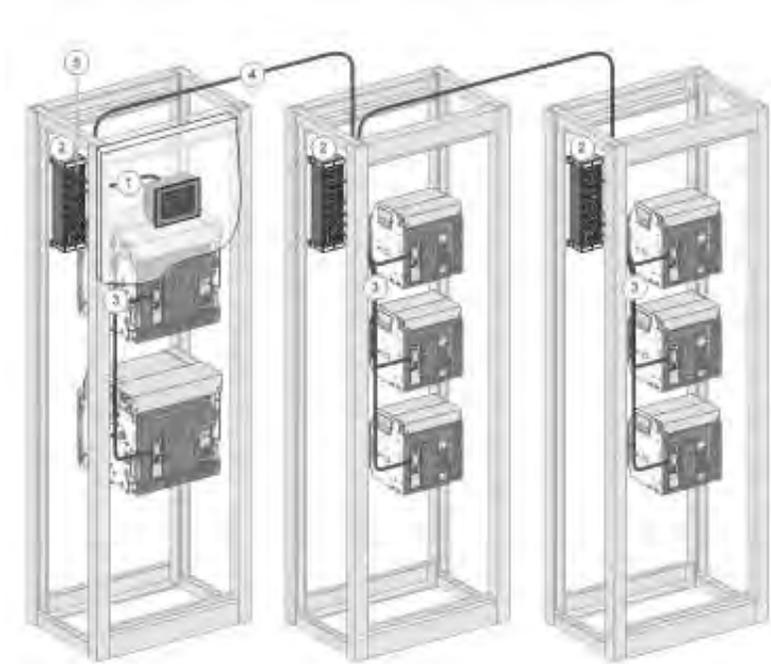


Figura 5.2. Interruptor de potencia Masterpac equipados con unidades de control Micrologic y la opción ecoc COM ModBus.

5.3 Diseño Conceptual

5.3.1 Generalidades del Proyecto. A partir de los resultados obtenidos en el estudio realizado de Corto Circuito, y considerando los rangos de cada uno de los equipos de protección involucrados en el sistema, se obtuvieron los resultados de ajuste de los elementos de protección para brindar seguridad tanto al personal como a las instalaciones, la selectividad en la operación no existe por la limitante del fusible principal de 160 A, es decir NO solo el elemento de protección más cercano una falla será el que opere sino también elementos aguas arriba.

5.3.2. Objetivo general. El objetivo de este estudio es seleccionar los ajustes de los dispositivos de protección de sobre corriente para el sistema eléctrico de "COMUNICACIONES DIGITALES" en la Cd. De México, asegurándonos de conseguir

una coordinación adecuada que nos permita tener selectividad en los dispositivos de protección y continuidad en el servicio.

5.3.3. Objetivo de un Estudio de Coordinación de Protecciones. Los objetivos de un sistema eléctrico de protección y coordinación son prevenir el daño al personal, minimizar el daño a los componentes del sistema y limitar la extensión y duración de la interrupción del servicio cuando una falla en el equipo, error humano o condiciones naturales adversas ocurran en cualquier porción del sistema. Las circunstancias que causan mal funcionamiento del sistema son usualmente impredecibles, en base a un excelente diseño y un programa de mantenimiento preventivo pueden reducir que las fallas sucedan. El sistema eléctrico debe ser diseñado y mantenido de modo que se proteja automáticamente.

La prevención del daño humano es el objetivo más importante de un sistema eléctrico de protecciones. Los dispositivos de interrupción deben tener adecuada capacidad interruptiva y las partes energizadas deben estar lo suficientemente aisladas o contenidas dentro de un gabinete, esto para no exponer al personal a una explosión, fuego o arco.

5.3.4. Metodología del Estudio de Coordinación de Protecciones. El análisis de corto circuito es el punto de partida para el estudio de coordinación de protecciones. Este estudio se basa en la memoria de cálculo de corto circuito, además de las características nominales de todos los equipos y dispositivos seleccionados en esta red. La metodología para el estudio de coordinación de protecciones de sobrecorriente consiste en determinar los puntos de operación de las curvas de los dispositivos de protección y conjuntamente con las curvas características tiempo-corriente de los elementos serie del sistema, los cuales se expresan en ejes logarítmicos, para dar como resultado la gráfica final de coordinación.

El dispositivo de protección próximo a una carga específica debe operar rápidamente, de acuerdo a los tiempos establecidos, operando con cierto retraso de tiempo la siguiente protección que está hacia la fuente.

De esta manera se deben cumplir las limitaciones que los dispositivos de protección imponen unos a otros, además de los límites naturales de operación de los equipos, como son:

- Corriente de inrush o energización de los transformadores

La corriente de inrush se representa como un punto. El valor de esta corriente es de 8 a 12 veces la corriente nominal del transformador, la cual se presenta en un tiempo de 0.1 segundo.

- Curvas de daño de los cables y transformadores

Los equipos y accesorios deben soportar las altas temperaturas ocasionadas por el exceso de corriente. Estos límites deben quedar por encima de las curvas de las protecciones, para evitar que sufran daños si esta no llega a operar; en lo que opera la protección de respaldo. La curva de daño de los conductores está definida por la ecuación de Ordendonk, siendo conocida para los transformadores como curva ANSI; esta curva determina los puntos y establece las características que deben cumplir los devanados para soportar, sin resultar dañados, los esfuerzos térmicos y magnéticos producidos por corto circuitos en sus terminales.

- Perfil de arranque de los motores

En el estudio de las protecciones, es necesario considerar el análisis de motores eléctricos, sobre todo los de mayor potencia. Esta representación conocida como perfil de arranque del motor, está definido por las corrientes de rotor bloqueado, corriente de arranque y la corriente de operación nominal; cada una en sus respectivos tiempos de operación en función de las características nominales de operación normal y transitoria de cada motor.

- Cargas estáticas ó resistivas, etc.

Las cargas fijas, tales como iluminación, resistencias, fuerza, etc. no tienen mayores exigencias en el proceso de coordinación y ajuste, pues estas cargas no implican la presencia de grandes transitorios electromecánicos en su operación, y al estar alejadas de las fuentes de potencia, da como resultado un bajo nivel de corriente de falla. Por estas razones regularmente no son representadas en el estudio.

La finalidad del estudio es que los dispositivos de protección operen dentro de estos límites o fronteras, y a la vez proporcionen una coordinación selectiva entre los diferentes dispositivos de protección y las curvas y/o perfiles de arranque y operación de los equipos.

Para la selección y ajuste de protecciones se deben tomar las características que definen el comportamiento de una coordinación ideal:

- a) Sensibilidad. Define la característica por medio de la cual todos los dispositivos deben operar con señales relativamente pequeñas.
- b) Selectividad. Esta característica, sostiene que al presentarse una falla en el sistema, deberá operar la protección más cercana al punto de falla, garantizando con esto la continuidad del servicio al resto de la instalación.
- c) Velocidad. Es una característica fundamental, pues la rapidez con que se despeje la sobre corriente es de suma importancia para disminuir al máximo los daños en la zona de falla. La velocidad depende de la magnitud de la sobre corriente y de la coordinación con las demás protecciones.
- d) Confiabilidad. Esta característica en conjunto con la velocidad de despeje es de los puntos más importantes, ya que un relevador digital puede ser muy rápido y en un momento crítico puede fallar. Por esta razón las protecciones seleccionadas deben corresponder a una manufactura de primera calidad.
- e) Costo. La selección de un esquema específico de coordinación de protecciones, equipos y secuencias de operación, tiene como principal objetivo el proteger y aislar la zona fallada, evitando así que esta se extienda hacia más equipos. El costo de los esquemas depende de su selectividad, y por lo tanto se evalúa el punto óptimo o de equilibrio entre el costo y la selectividad de la protección.

5.4 Aspectos Generales de la Coordinación de Protecciones

Una protección efectiva requiere que el dispositivo de protección sea seleccionado, calibrado, y ajustado para permitir circular la corriente normal de carga del equipo y sólo abriendo instantáneamente o con un retardo de tiempo cuando se presente un valor de corriente que sobrepase el umbral definido del flujo de corriente. Para la mayor continuidad

en el servicio se requiere que los dispositivos operen con esta selectividad. El máximo servicio y la máxima continuidad son aspectos difíciles de equilibrar en el proceso de coordinación de las protecciones, por lo que lógicamente se prefiere la protección ante la coordinación selectiva.

El proceso de coordinación de protecciones implica necesariamente el uso de curvas tiempo-corriente de los distintos elementos de protección que intervienen. Esto obliga a considerar ciertos intervalos de tiempo entre las curvas y dispositivos de protección, ya que es la única forma de garantizar una operación secuencial correcta.

La coordinación de los intervalos de tiempo de los dispositivos de protección se determina de acuerdo con los siguientes parámetros:

- La magnitud de la corriente de falla en el punto que se esté protegiendo.
- Características del detector del dispositivo de protección.
- La sensibilidad del dispositivo de protección correspondiente a las magnitudes de las corrientes de falla.
- El margen de tiempo que se presenta entre el detector del dispositivo de protección y el propio tiempo de apertura del interruptor.

5.4.1. Software de Cálculo. Para el desarrollo de este proyecto se trabajó con el software Power Tools de SMK 6.0 que es una herramienta computacional de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia, industriales, comerciales y de empresas de suministro. Esta herramienta permite trabajar directamente desde el diagrama unifilar y es el mismo software con el que se realizó el cálculo de corto circuito.

5.4.2. Consideraciones Importantes. Tomando como base la información obtenida del diagrama unificar general, se seleccionaron los radiales para la elaboración del estudio de coordinación de protecciones.

Dicho estudio comprende la selección de ajustes de sobre corriente de fase y de tierra, así como la protección diferencial para el transformador principal asegurando conseguir una selectividad adecuada en base a cálculos emitidos en cada ramal con el objeto de asegurar la coordinación óptima.

A continuación se describen las consideraciones tomadas para la realización del estudio de coordinación de protecciones de sobre corriente.

5.5 Configuración del Sistema

La configuración del sistema eléctrico de "COMUNICACIONES DIGITALES" es anillo con operación radial. El nivel de tensión con el cual llega la acometida de la compañía suministradora es de 23 kV para distribuir la energía en media tensión a las diferentes áreas; y de este nivel se transforma a 440, 220/127V para la alimentación de las cargas del sistema. El sistema de autogeneración está compuesto por generadores con motor diesel operando a 440 V, de este punto se eleva la tensión a 23 kV para ser distribuida en el anillo a través de transformadores elevadores. La carga instalada consiste básicamente de cargas mixtas esto quiere decir que está compuesta por tableros de alumbrado y unidades electrónicas y motoras, etc.

5.5.1. Transformadores. Se represento la curva de daño de los transformadores considerando lo siguiente:

- Para la representación de las curvas de daño de los transformadores se empleo la norma ANSI C.57 ^[12].
- La corriente inrush en todos los casos se consideró de 12 veces la corriente nominal con una duración de 0.1 segundo.
- Se asume que la curva de daño corresponde a transformadores sujetos a fallas frecuentes, lo que permite ofrecer una protección al transformador más conservadora.

5.5.2. Motores. Se representó el perfil de arranque de motores tomando en cuenta:

- Se consideró que la corriente a rotor bloqueado es de seis veces la corriente nominal y tiene una duración de 10 segundos.
- La corriente de magnetización se consideró igual a 1.73 veces la corriente a rotor bloqueado con una duración de 0.1 segundos. Para efecto de análisis se consideró un motor equivalente con una potencia de 600 hp's.

5.5.3. Cables. Se representó la curva de daño de los cables considerando:

- Los tiempos en que se muestran los valores son 1 y 10 segundos

5.5.4. Dispositivos de Protección. Los dispositivos de protección considerados corresponden a:

- Relevadores 7SJ Siemens para la protección de interruptores principales y derivados.
- Interruptores de Baja Tensión Master pact

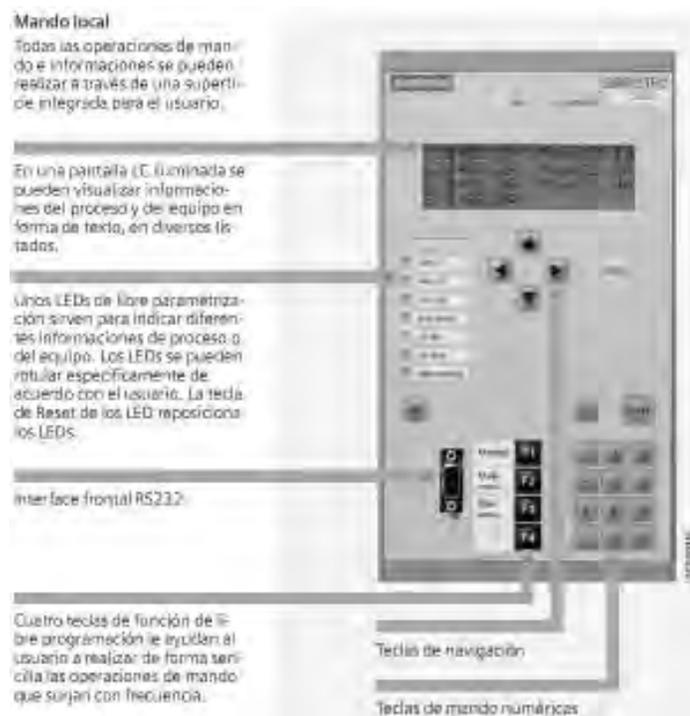


Figura 5.3. Relevadores SIPROTEC 7SJ61/62/64 utilizados para la coordinación de protecciones.

5.6 Criterios Básicos Empleados

Las gráficas están representadas en formato Log-Log a niveles de voltaje de referencia de 23000 V. Se dió prioridad a la protección de los equipos eléctricos (transformadores, cables, motores y generadores) y después a lograr una coordinación entre la operación de los dispositivos de protección.

Los criterios básicos de protección establecidos por IEEE [9] fueron aplicados en todos los casos.

5.6.1. Cálculo y Ajuste de los Dispositivos de Protección. Para realizar la coordinación de protecciones de "COMUNICACIONES DIGITALES" se dividió el sistema eléctrico en 56 curvas TCC con lo cual se cubre la totalidad del sistema de media tensión y parte del sistema de baja tensión, en los escenarios modelados; para cada ramal se muestran de manera resumida cada uno de los ajustes de los elementos de protección contenidos.

5.6.2. Ajuste de protecciones. A continuación se muestran a manera de ejemplo algunas tablas de ajuste para las protecciones del sistema en anillo proporcionadas por el software Power Tools de SMK 6.0:

Tabla 5.1. *Parámetros del estudio para la coordinación de protecciones utilizando el software Power Tools.*

**Relevador R-GEN1
TC= 75**

Fase	Ajustes
Tipo de Curva	Ansi Very Inv.
51 (0.5-20.0 x CTR)	4.5 (68 A)
Dial	4.5
50 - 1 (0.5-175 x CTR)	15 (225 A)
50 - 1 (0-60 Sec)	0.2 Sec.
Tierra In=5A	
Tipo de Curva	Definite Time
50N-1 (0.25-175 x CT)	0.25 (2.5A)
50N-1 Delay (0 - 60 sec)	0.5 Sec.

**Relevador R-GEN2 = R-GEN3
TC= 75**

Fase	Ajustes
Tipo de Curva	Ansi Very Inv.
51 (0.5-20.0 x CTR)	2.5 (38 A)
Dial	4
50 - 1 (0.5-175 x CTR)	15 (225 A)
50 - 1 (0-60 Sec)	0.2 Sec.
Tierra In=5A	
Tipo de Curva	Definite Time
50N-1 (0.25-175 x CT)	0.25 (2.5A)
50N-1 Delay (0 - 60 sec)	0.50 Sec.

Tabla 5.2. *Parámetros del estudio para la coordinación de protecciones utilizando el software Power Tools.*

**Relevador R-ENLC-1
TC= 400**

Fase	Ajustes
Tipo de Curva	Ansi Extremely Inv.
51 (0.5-20.0 x CTR)	2.25 (180A)
Dial	5
50 - 1 (0.5-175 x CTR)	7 (560 A)
50 - 1 (0-60 Sec)	0.1
Tierra In=5A	
Tipo de Curva	Definite Time
50N-1 (0.25-175 x CT)	6 (30A)
50N-1 Delay (0 - 60 sec)	1.65 Sec.

**Interruptor Masterpact I-TR07
Sensor: 2000A, LSI TRAF0. 750 KVA**

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.7 (1400A)	4
STPU (1.5-10 X LTPU)	10 (14000A)	
STD (INST-0.4)	0.1 I ² t Out	
INST (2-15 X S)	15 (30000A)	

**Interruptor Masterpact I-TR11
Sensor: 1600A, LSI TRAF0. 500 KVA**

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.9 (1440A)	8
STPU (1.5-10 X LTPU)	6 (8640A)	
STD (INST-0.4)	0.2 I ² t Out	
INST (2-15 X S)	15 (24000A)	

Tabla 5.3. *Parámetros del estudio para la coordinación de protecciones utilizando el software Power Tools.*

Interruptor Masterpact I-TR10
Sensor: 1000A, LSI TRAF0. 300 KVA

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.8 (800A) 8
STPU (1.5-10 X LTPU)	6 (4800A)
STD (INST-0.4)	0.3 I ² t Out
INST (2-15 X S)	15 (15000A)

Interruptor Masterpact I-TR08
Sensor: 1000A, LSI TRAF0. 225 KVA

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.5 (500A) 1
STPU (1.5-10 X LTPU)	2 (1000A)
STD (INST-0.4)	0.3 I ² t Out
INST (2-15 X S)	15 (15000A)

Interruptor Masterpact PD-0015
Sensor: 4000A, LSI GENERADOR 1

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.7 (2800A) 2
STPU (1.5-10 X LTPU)	1.5 (4200A)
STD (INST-0.4)	0.2 I ² t Out
INST (2-15 X S)	12 (48000A)

Interruptor Masterpact PD-0016
Sensor: 4000A, LSI GEN 1 = GEN 2

LTPU/LTP (A 0.4-1.0)	0.4 (1280A) 4
STPU (1.5-10 X LTPU)	2 (2560A)
STD (INST-0.4)	0.2 I ² t Out
INST (2-15 X S)	8 (25600A)

5.6 Conclusiones y recomendaciones

Del presente análisis realizado al sistema eléctrico de potencia del proyecto "COMUNICACIONES DIGITALES" se concluye que los equipos instalados funcionarán de manera optima tanto en condiciones de operación normal, mas no en condiciones anormales, pues la presencia de corto circuito en cualquiera de sus posibles variantes, ya sea fase a tierra, bifásico, trifásico, etc. con magnitudes mayores a 1500 amperes referidos a 23 kV el Fusible principal abrirá junto con los interruptores aguas abajo y puede disparar uno o más interruptores, independientemente si los relevadores tienen ajustes instantáneos o no. Se recomienda ampliamente la sustitución del fusible general de 160 Amp por un interruptor de potencia con relevador para poder tener un sistema coordinado pues elimina toda posibilidad de selectividad y continuidad en la operación del sistema.

Para realizar la coordinación de protecciones del sistema anillo de "COMUNICACIONES DIGITALES" se consideraron tres modos de operación los cuales fueron definidos como ramal A, ramal B y operación Normalmente Abierta al Centro, el primero considera el interruptor del alimentador A cerrado y el interruptor del alimentador B abierto, toda la carga se alimenta desde dicho alimentador A. El ramal B se considera en forma inversa el interruptor del ramal A abierto y el interruptor del ramal B cerrado y la carga en su totalidad se alimenta desde el interruptor B.

El modo de operación normal con la cuchilla de celda LS del NODO (Maquinaria) y Edificio 1 y 2 Abierta, considera los ajustes normales de los ramales A y B respectivamente

hasta ese punto, por lo que el sistema de control del anillo debe informar el estado de operación a los relevadores y estos deben cambiar de un ajuste a otro por medio de dicha información la cual es mediante una entrada analógica y se deja lista para infraestructura adicional futura.

En las siguientes figuras se muestran algunas graficas a modo de ejemplo tanto para la Ruta A como para la Ruta B. El anexo se puede observar las graficas de las rutas TCC-ALIM-A y las rutas TCC-ALIM-B que son las rutas de protección de los alimentadores A y B.

ESTUDIO DE COORDINACION DE PROTECCIONES

ruta de coordinacion: TCC-ALIM-A

Tensión de referencia (V): 23000
 Fecha: April 25, 2008 2:00 PM

Escala de corriente: x 10
 SKM Systems Analysis, Inc.

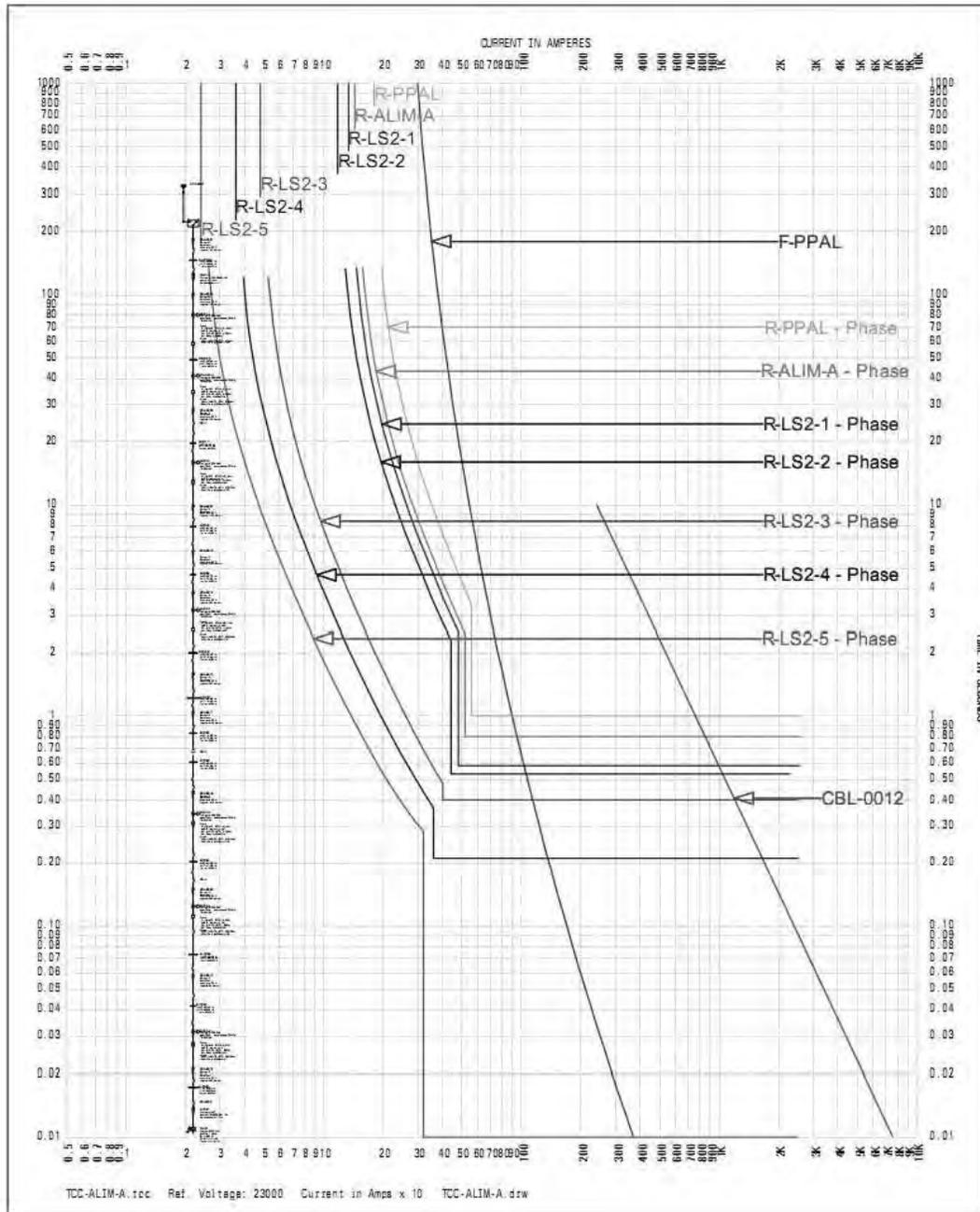


Figura 5.4. Curvas para cálculo de protecciones TCC-ALIM-A.

ESTUDIO DE COORDINACION DE PROTECCIONES

RUTA DE COORDINACION: TCC-ALIM-B

Tensión de referencia (V): 23000
Fecha: April 25, 2008 2:05 PM

Escala de corriente: x 1
SKM Systems Analysis, Inc.

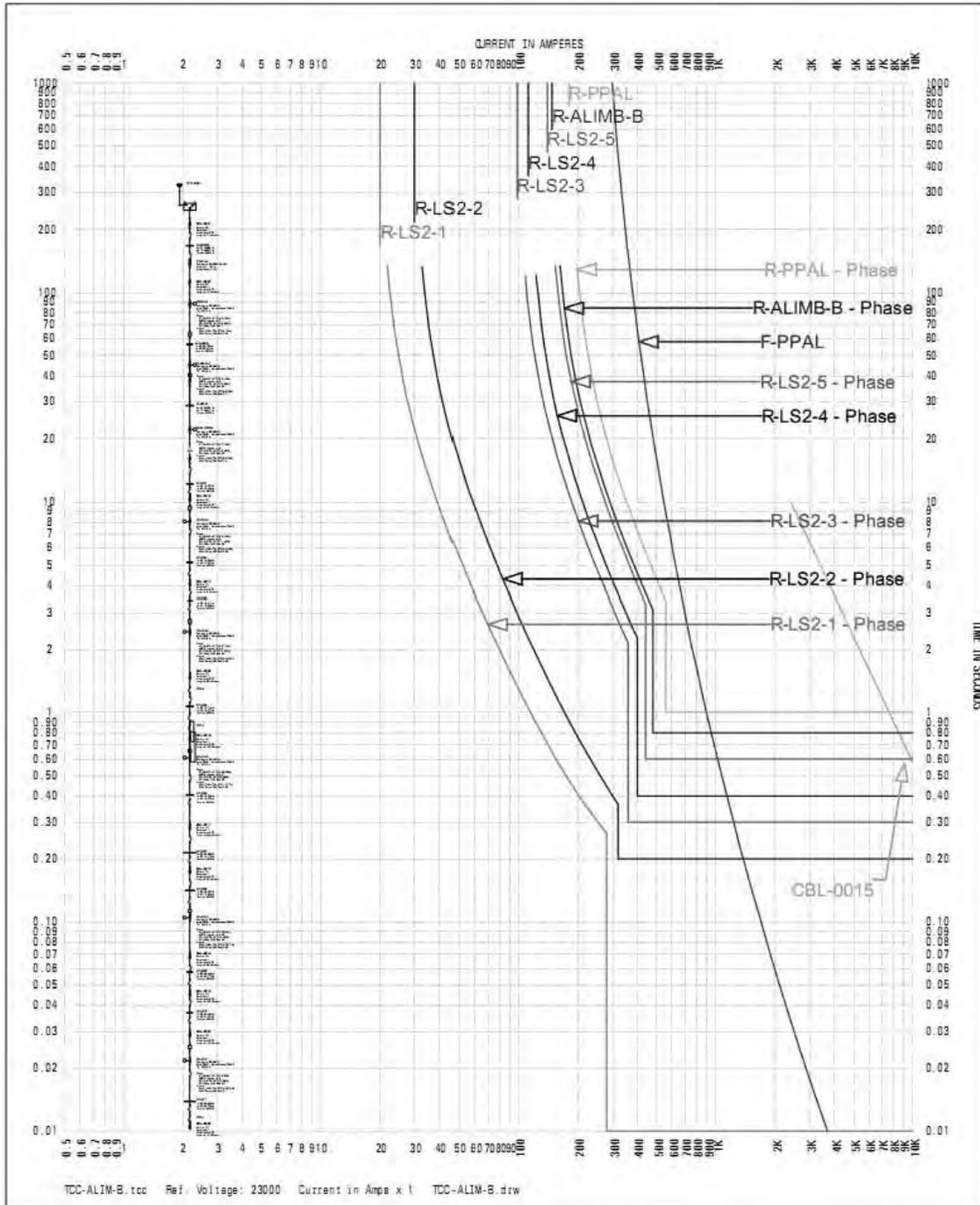


Figura 5.5. Curvas para cálculo de protecciones TCC-ALIM-B.

De los resultados obtenidos de este estudio de coordinación de protecciones, puede decirse que los ajustes que fueron recomendados y que se indican en las curvas TCC y planos correspondientes, cumplen con los criterios de selectividad, confiabilidad y seguridad para garantizar la correcta operación del sistema eléctrico.

Para la elaboración del presente estudio se tomó como aportación de corto circuito del sistema 1000 MVA, por recomendación de "COMUNICACIONES DIGITALES", valor que debe ser verificado en campo antes de poner en marcha el sistema, es riesgoso no verificar dicho valor de aportación, pues se eliminó la evaluación de los dispositivos contra los esfuerzos de corto circuito, sí en caso que la aportación de la compañía suministradora sea mayor el estudio realizado es necesario ajustar los parámetros nuevamente, sí la contribución es menor no es necesario dicho ajuste.

Para las cargas conectadas se observa en las curvas tiempo-corriente de los relevadores que protegen estas cargas permiten el arranque de la "operación" y protegen ante condiciones de corto circuito.

Es importante indicar que los ajustes obtenidos permitirán proteger a los transformadores y equipos ante posibles sobrecargas, asimismo a los cables que tienen un valor de ampacidad nominal, característica que no debe ser rebasada por seguridad del personal y de las instalaciones.

Los relevadores de protección contienen los dos ajustes propuestos uno para operación radial y otro para operación en anillo y reciben vía señal seca el estado de operación del anillo para seleccionar el ajuste programado para cada modo de operación.

CAPITULO VI

MONTAJE DE LA SUBESTACIÓN Y PRUEBAS DE CAMPO.

CAPITULO VI

MONTAJE DE LA SUBESTACION Y PRUEBAS DE CAMPO.

6.1 Datos necesarios para la adquisición

Como se indicó, en alta tensión no se puede prescindir de un estudio eléctrico previo que indique las características del sistema asociado y las particularidades propias de la Subestación GIS que deberán considerarse para su adquisición.

Deben conocerse, especialmente en GIS de intemperie, los siguientes valores climático y ambientales:

- Vientos.
- Temperaturas (Media, máxima, mínima).
- Humedad
- Grado de sismicidad.
- Régimen de lluvias.
- Condiciones naturales o artificiales de probable aparición, tales como polución ambiental, tormentas de tierra, granizo, cualquier elemento
- de la flora o fauna, etc., que pueda influir o afectar las instalaciones.
- Altura sobre el nivel del mar.

Del citado estudio eléctrico y también en función de la experiencia de explotación del comprador se eligió la configuración para el MV-GIS considerada óptima. Así se realizó el esquema unifilar que acompañará a las condiciones de adquisición. A este esquema se le sumo todos aquellos elementos escritos y/o en forma de plano o diagrama que definieron todas las características de la obra (sistema de auxiliares, de protección, de medición, de control y comando, telecomunicaciones, obras civiles, etc.) y que sean de uso común en la nuevas instalación y que respondan a Normas técnicas reconocidas internacionalmente.

En las condiciones de adquisición también deberán citarse -entre otras- las siguientes características:

- Tensión nominal y máxima de servicio.
- Tipo de instalación (interior o intemperie).

- Disposición de fases (monopolar o tripolar).
- Número de barras.
- Frecuencia nominal.
- Niveles de aislación (impulso atmosférico y de maniobra y tensión de prueba a frecuencia de régimen).
- Corrientes nominales de las barras principales o colectoras y de las derivaciones.
- Corrientes de cortocircuito.
- Valores nominales de cada uno de los componentes.
- Detalles de conexiones de alta tensión (cable subterráneo, línea aérea, etc.).
- Detalles especiales de enclavamientos.
- Tensiones de servicios auxiliares.
- Ensayos a que serán sometidas las GIS.
- Lista de repuestos.
- Otras, según usos y costumbres del comprador y/o particulares de la instalación (Ejemplo: Planillas de Datos Técnicos Garantizados).

Para nuestro caso se eligieron celdas de distribución secundaria aisladas en gas 8DJ y 8DH del fabricante Siemens las cuales e importaron de Alemania.

6.2 Pruebas

Se realizan diversas pruebas a las Subestaciones MV-GIS previos a su funcionamiento industrial. Escapa a los alcances de este trabajo los detalles de la realización práctica de cada uno de los ensayos y sus fundamentos teóricos, que merecen por su importancia un tratamiento específico particular. Como todo equipo eléctrico de alta tensión, existen también para los MV-GIS distintos tipos de ensayos que permiten verificar su adecuado funcionamiento conforme a la requisitoria técnica y/o normas sobre la materia.

Estos ensayos se agrupan básicamente en:

- Ensayos de tipo.
- Ensayos de recepción.
- Ensayos en obra.

Si se trata de un equipo prototipo -sin antecedentes de fabricaciones iguales o similares- los Ensayos de Tipo deben realizarse, por obvias razones, en un laboratorio

independiente del fabricante. Las Normas de construcción de las MV-GIS indican los ensayos a los que deben ser sometidos el conjunto de la Subestación y cada uno de los módulos componentes de las distintas celdas.

Los ensayos a realizar sobre los interruptores, seccionadores, transformadores de medición, descargadores de sobretensiones, terminales, no difieren mayormente de los que se realizan para estos equipos cuando se utilizan para conformar una AIS. Lo mismo es válido para los sistemas asociados de servicios auxiliares, de comando y control, protecciones y mediciones.

Los ensayos que se realizan generalmente son los siguientes, aclarándose que entre el comprador y el fabricante pueden suprimirse algunos o pautarse otros. También se entiende que los equipos deben estar completos y en condiciones de funcionamiento.

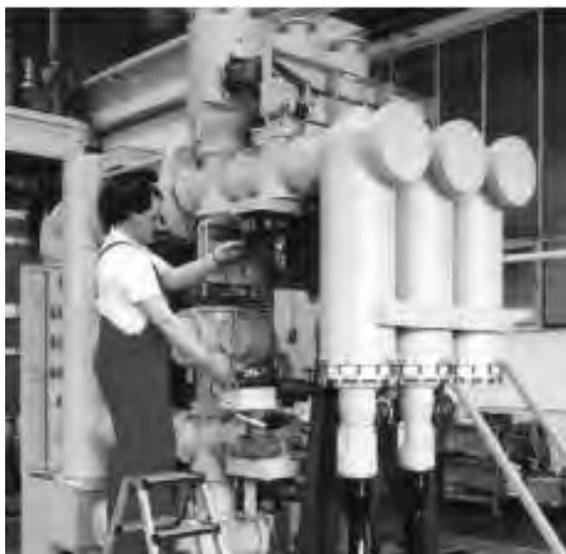


Figura 6.1. Operario realizando medidas de ensayo de recepción en una MV-GIS de distribución primaria.

6.2.1 Pruebas de Tipo.

- Ensayo de tensión de impulso atmosférico.
- Ensayo de tensión de impulso de maniobra.
- Ensayo de tensión a frecuencia industrial.
- Ensayo de descargas parciales.
- Ensayo de arco interno.

- Ensayo de los circuitos principales y de tierra a las corrientes de cortocircuito.
- Ensayo de tensión de radio interferencia.
- Ensayo de calentamiento.
- Ensayo dieléctrico de los circuitos auxiliares.
- Ensayo de prueba del encapsulado. Sobrepresión del gas SF₆.
- Ensayo de fugas de gas SF₆.
- Ensayo de desgaste mecánico.
- Ensayo de verificación de resistencia del circuito principal.
- Ensayos sobre componentes: interruptores, seccionadores, transformadores de medición, descargadores de sobretensiones, terminales, de acuerdo con las Normas respectivas.



Figura 6.2. Maniobras para instalación de celdas y pruebas de recepción de celdas 8DJ y 8DH.

6.2.2 Pruebas de recepción.

- Ensayo de tensión a frecuencia industrial.
- Medición de la resistencia del circuito principal.
- Ensayo de tensión de circuitos auxiliares.
- Ensayos de funcionamiento mecánico.
- Ensayos de detección de fugas de gas SF₆.
- Ensayo de dispositivos auxiliares varios.
- Control del cableado de baja tensión.

- Ensayo de hermeticidad de módulo y MV-GIS completo.
- Ensayo de pintura y galvanizado.
- Ensayos sobre componentes: interruptores, seccionadores, transformadores de medición, descargadores de sobretensiones, terminales, de acuerdo con las Normas respectivas.



Figura 6.3. Maniobras para pruebas e instalación de celdas en SF₆.

6.2.3. Pruebas en obra.

- Ensayo de tensión de circuitos principales.
- Ensayo de la verificación de resistencia del circuito principal.
- Ensayo de tensión de circuitos auxiliares.
- Ensayo de detección de fuga de gas SF₆.
- Ensayo de medición del contenido de humedad del gas SF₆.
- Ensayo de verificación de no circulación de corrientes sobre cubiertas metálicas.
- Ensayos sobre componentes: interruptores, seccionadores, transformadores de medición, descargadores de sobretensiones, terminales, de acuerdo con las Normas respectivas.

Las pruebas indicados -tipo, recepción y obra- sirven como guía, aunque es recomendable que entre comprador y fabricante se establezcan contractualmente en coincidencia con alguna norma internacional reconocida. Del mismo modo, los ensayos en

obra de las MV-GIS deben formar parte de los ensayos de conjunto de todas las instalaciones, previos a la energización.

6.3 Montaje y mantenimiento

Las Subestaciones MV- GIS están diseñadas para ser instaladas en interior, dentro de edificios, o a la intemperie. En este caso pueden ser instaladas bajo cualquier condición ambiental:

- Polución industrial.
- Proximidad del mar.
- Clima extremo.
- Temperatura máxima.
- Zona sísmica.
- Altitud elevada.

Hasta tensiones nominales de 24kV, una de las ventajas que tienen las Subestaciones MV-GIS respecto de las AIS es que los distintos campos (celdas) que conforman la Subestación salen totalmente armados y ensayados de la fábrica en forma individual. Así se transportan y llegan a la obra. Para tensiones 100kV y por consideración de las exigencias para el transporte marítimo y terrestre, los campos (celdas) de las MV-GIS se separan en un mínimo de componentes, manteniendo así las ventajas de montaje respecto de las AIS.



Figura 6.4. Maniobras para canalización del cableado XLP de media tensión de la nueva subestación.

Una vez en obra, los distintos campos (celdas) se instalan sobre el piso y se aseguran a él. Luego se interconectan mecánica y eléctricamente entre sí (Alta tensión) y a sus sistemas auxiliares (baja tensión).

La instalación de las MV-GIS de distribución secundaria guarda analogía con la que se realiza para el montaje de celdas de distribución primaria. Resulta útil contar con un puente grúa para facilitar las tareas de montaje. En instalaciones de interior este puente grúa se deja instalada permanentemente para ser utilizado en futuras ampliaciones o eventuales reparaciones.



Figura 6.5. Maniobras para instalación de charola para cableado de media tensión de la subestación.

Si es posible, resulta óptimo que el vehículo de carga que trae la celda pueda ingresar dentro del radio de acción del puente grúa. De esta forma la celda en cuestión, es levantada por el puente grúa y trasladado por el mismo hasta su ubicación definitiva, donde se ancla al piso.

Las distintas celdas, conformados por sus diversos elementos constitutivos de corte, medición, etc., están soportados por estructuras metálicas de acero que, a la vez que colaboran con el armado y soporte la celda, proporcionan el medio para fijarlos al piso. Posteriormente se montan los módulos de empalme o conexión que interconectan las distintas celdas con otros equipos externos: líneas aéreas, líneas subterráneas, transformadores de potencia, etc.

Durante todo el proceso de montaje es recomendable mantener un ambiente adecuado capaz de garantizar la imposibilidad de que partículas sólidas -de cualquier tipo- ingresen

a equipos o ductos que posteriormente serán llenados con gas SF₆. De este modo se evita la posibilidad que ciertas partículas reaccionen con dicho gas y puedan eventualmente provocar la disminución del poder aislante del mismo. Lo mismo que se indica para las partículas sólidas es totalmente válido para evitar el ingreso de agua y/o humedad, que degradan el gas SF₆.

Una vez armada la Subestación y antes del proceso de realización de las pruebas en obra, se revisan visualmente para prevenir posibles fugas o daños ocasionados a las celdas durante el transporte.



Figura 6.6. Ruta de charola de aluminio en aéreas con gran densidad de construcción.

6.4 Obras civiles y pruebas del sistema.

Como se indicó en los Capítulos precedentes, las subestaciones MV-GIS pueden ser de dos tipos:

- Para uso en intemperie.
- Para uso interior.

Cada proyecto amerita un análisis particular, de la misma forma que se lo hace con una Subestación AIS. Se evalúa el terreno que se dispone, los electroductos aéreos y/o subterráneos para el conexionado de alta tensión y las condiciones ambientales. En general -salvo en condiciones muy especiales de polución- las Subestaciones MV-GIS pueden instalarse indistintamente en intemperie o interior.



Figura 6.7. Maniobras para acondicionar el cuarto general de control de la subestación en anillo.

Por supuesto que cada tipo de instalación plantea distintas variantes por sus necesarias instalaciones complementarias asociadas, tales como los sistemas de servicios auxiliares, comando y control, protecciones, mediciones, etc.

Independientemente del tipo de instalación -intemperie o interior- hay elementos comunes a considerar. Los más importantes son facilitar las tareas de montaje y mantenimiento y permitir una fluida circulación vehicular y peatonal en sus alrededores.



Figura 6.8. Maniobras para canalización del cableado de media tensión de la subestación.

No debe olvidarse que las Subestaciones MV-GIS se van conformando como si se tratara de un “mecano” (juguete que permite realizar variadas construcciones) y, por lo tanto, su obra civil debe cumplir con tal requisito. Fundamentalmente, permitirá agregar y sacar campos (celdas) y/o elementos de los mismos sin necesidad de cortes innecesarios de energía para toda la Subestación.

Un elemento fundamental para lograr el cometido mencionado lo constituyen los puentes grúa de recorrido longitudinal al conjunto de celdas que componen la Subestación. Estas grúas que son fundamentales para instalaciones en interior pueden reemplazarse por grúas de pluma convencionales en las instalaciones de intemperie. En este último caso, se deberá prever la superficie necesaria para el desplazamiento de la grúa, que en muchos casos constituye un serio problema cuando se trata de terrenos escarpados o de áreas reducidas. Este tipo de arreglos generalmente se utilizan en MV-GIS de distribución primaria debido a sus dimensiones y no es tan común en MV-GIS de distribución secundaria.

Otro elemento a tener en cuenta especialmente en el diseño de las obras civiles lo constituye la salida de cables subterráneos de alta tensión. En la actualidad se utilizan mayormente cables unipolares de aislamiento seco de XLP (Elastómero reticulado), cuyo radio de curvatura es función de su tensión de servicio (kV) y su sección nominal (mm²). El módulo de empalme o conexión de cables del campo (celda) correspondiente, normalmente permite la salida vertical y hacia abajo. No obstante se puede solicitar que esté direccionado en cualquier otro sentido, según las necesidades de cada caso particular.

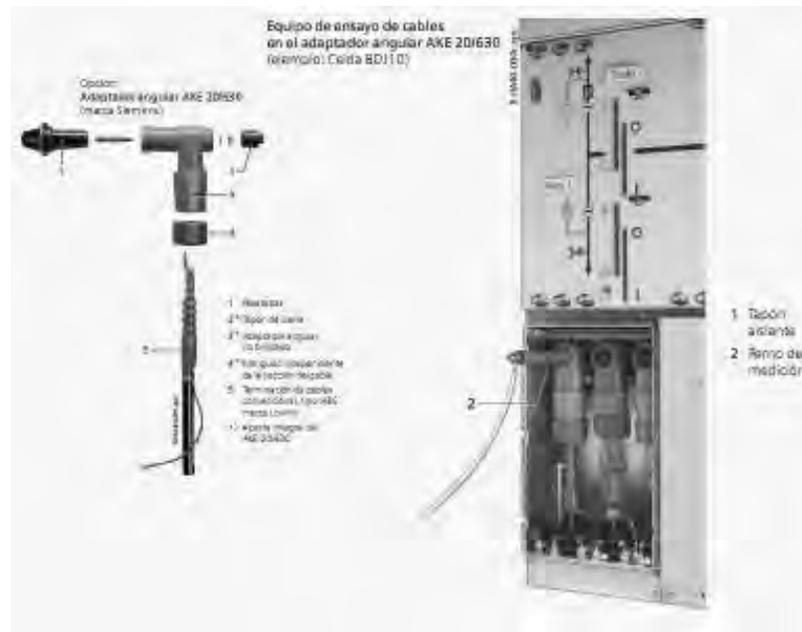


Figura 6.9. Detalle de la conexión del cable XLP a las celdas.

Para el caso más común de la salida vertical y hacia abajo de los cables subterráneos de alta tensión, hay que considerar que bajo el piso de la sala donde se ubica la Subestación

MV-GIS los cables de alta tensión deben tener la posibilidad de cambiar de dirección; por ejemplo: pasando de un eje vertical a uno horizontal. En este caso, el radio de curvatura del cable considerado determinará la altura del piso o canal de cables situado inmediatamente inferior al piso donde se ubica la Subestación.



Figura 6.10. Pruebas finales del sistema en anillo.

Cuando las necesidades obligan a considerar más de un cable de alta tensión por fase (2, 3,...) es posible que la mejor solución sea llevar, mediante módulos prolongadores horizontales y verticales, el módulo de empalme o conexión hasta una posición horizontal ubicada en el piso inferior mencionado.



Figura 6.11. Pruebas de planta de emergencia de 2000 kW.

Normalmente, cuando se trata de subestaciones de interior y tensiones hasta 100kV, el edificio se desarrolla en tres pisos: planta baja, planta alta y subsuelo. En el presente proyecto no fue necesario grandes aéreas de construcción debido a las dimensiones reducidas de las celdas. En la figura 6.10 puede apreciarse el arreglo de 9 celdas 8DH10 Siemens y puede observarse que ocupan un área muy reducida comparada con las subestaciones seccionadoras que se utilizaban años atrás.



Figura 6.12. En la imagen se observan las dimensiones reales de una celda 8DH10 Siemens además de apreciarse la diferencia de tamaño con respecto una gabinete seccionador clásico aislado en aire (AIS).

El ancho del pasillo que media entre las distintas celdas componentes de la Subestación MV-GIS y sus tableros de comando y control y protecciones enfrentados y en correspondencia, debe proyectarse de tal modo de permitir la máxima facilidad para desarrollar tareas de mantenimiento. Por ese pasillo circularán equipos tales como el carrito del equipo de evacuación y llenado de gas SF₆ y el carrito extractor del contacto móvil de los interruptores cuando éstos están dispuestos en posición horizontal. La experiencia indica que considerar un ancho no inferior a 2.50m resulta óptimo.

También tienen importancia las distancias siguientes:

- Eje de módulo de empalme o conexión de cables subterráneos a pared trasera del edificio. Debe permitir fundamentalmente el conexionado de los cables de alta tensión a los módulos respectivos de la MV-GIS y la realización de los ensayos de los cables. Esto se agrava cuando se trata de cables de alta tensión con aislamiento

en aceite que deben llevar asociados a sus terminales equipos de compresión y compensación del aceite aislante. Se sugiere adoptar en todos los casos una distancia no inferior a 1,50 m.

- Pared de entrada a primer celda: Debe permitir el movimiento de equipos de montaje y de ser posible la entrada parcial del vehículo que transporta los distintos campos completos de la GIS hasta una zona en que los pueda maniobrar el puente grúa.
- Pared final del edificio hasta último campo celda: Debe permitir las futuras ampliaciones que determine el estudio eléctrico del usuario, de modo que no haya que hacer más obras civiles con la Subestación en funcionamiento.



Figura 6.13. Pruebas del sistema de monitoreo del sistema eléctrico en anillo en 23kV.

Para Subestaciones MV-GIS que se instalan a la intemperie, el diseño de la obra civil deberá considerar los mismos tópicos que para una Subestación AIS: canales de cables, drenajes de aguas, iluminación, etc.

6.5 Detalles finales de la instalación

El plano IE-05 es una representación isométrica de la trayectoria del cableado de la nueva subestación a través de los diferentes edificios del terreno donde se realizó la instalación, dicha trayectoria sirvió como guía para la instalación de la charola que es la canalización del cable de XLP de alta tensión.

Plano IE-05

6.6 Mantenimiento

Las MV-GIS requieren un mantenimiento mínimo debido a su envolvente hermética, sumado a que el gas SF_6 es un gas inerte sin envejecimiento y que además no ataca a los materiales con los cuales está en contacto y tampoco se altera por ellos.

Las pérdidas anuales de SF_6 se garantizan como menores al 1 % por módulo. Estas pérdidas pueden ser compensadas con cargas adicionales que se realizan con la Subestación en servicio. Los órganos de maniobra -interruptores, seccionadores, palancas externas- deben recibir un mantenimiento similar al de los equipos convencionales instalados en una Subestación AIS.

Cada usuario, según sus costumbres, determina la forma y el momento para hacer el mantenimiento, pero es común considerar que en condiciones normales solo debe procederse a “verificaciones de rutina”. Resulta importante destacar que las celdas 8DH10 requieren mínimo mantenimiento y que ésta es una de las ventajas que presentan frente a las AIS. Por lo tanto, las prácticas de mantenimiento que se aplican a las AIS no son de aplicación en las MV-GIS.

Para las verificaciones de rutina existen diversos equipos e instrumentos, además de los que forman parte intrínseca de las celdas como son los indicadores de densidad/presión. Entre los equipos más comunes se citan los siguientes:

- Medidor de humedad y punto de rocío del gas SF_6 .
- Medidor de aire en el gas SF_6 .
- Medidor de productos de descomposición del gas SF_6 .
- Detector de fuga de gas SF_6 .
- Equipo de recarga y evacuación de gas SF_6 .

En el capítulo 2 se trataron las características que debe poseer este gas para ser considerado apto para su uso. También es importante disponerse en depósito garrafas de gas SF_6 para eventuales reposiciones. Su almacenamiento no significa ningún problema especial, pero siempre se debe tener presentes las reglas de higiene y seguridad industrial de aplicación en el sitio de la instalación, fundamentalmente en lo que hace a la ventilación del local.

CONCLUSIONES

El diseño de subestaciones aisladas en gas en México está teniendo un gran desarrollo debido al decremento de los precios y al mejor entendimiento de este tipo de subestaciones y la tecnología que conlleva. El uso del SF₆ como dieléctrico es un tema que se descubrió desde el siglo pasado pero es hasta estas últimas décadas que se han mejorado los procesos de fabricación de las celdas que contiene el SF₆ llegando algunos fabricantes incluso a garantizar hasta 25 años sus celdas sin necesidad de mantenimiento alguno.

En lo que respecta al diseño y puesta en marcha de la Subestación en arreglo anillo de media tensión se concluye que el proyecto responde al objetivo principal ya que se tiene un arreglo del sistema eléctrico más confiable puesto que al fallar una zona del sistema dicha zona puede ser alimentada por el otro derivado del anillo, también se logró disminuir el costo del suministro de energía ya que la acometida de la compañía suministradora es en media tensión (23kV) lo cual implica un mejor tarifa para el cliente. Otra ventaja importante es que en base a la experiencia en la operación de la Subestación se ha observado que las acometidas en media tensión tienden a ser más estables que las acometidas en baja tensión. En lo que respecta a la capacidad de crecimiento de la carga se tiene proyectado aproximadamente 20 años de vigencia de la subestación sin la necesidad de realizar grandes cambios en el diseño original.

BIBLIOGRAFIA

1. A.T. Johns
Distribution Switchgear IEEE POWER AND ENERGY SERIES 46
Prentice Hall
2002
2. FREUNA, Arthur
Overcurrent Protection
Mac Graw-Hill
1981
3. G. SLADE, Paul
The Vacuum Interrupter, Theory, Desing and Application
CRC Press
2001
4. HARPER, Enrique
Elementos de diseño de Subestaciones Eléctricas
Limusa
2004
5. MCDONALD, John
Electric Power Substations Engineering
CRC Press
1998
6. VIQUEIRA, Jacinto
Redes Eléctricas tomo I y II
Representaciones y servicios de Ingenieria
1973
7. SIEMENS General Part 8DJ & 8DH Catalog HA 40.1

Referencias

- [1] "F-GAS AND SF6 RESTRICTIONS". [en línea]
<http://es.wikipedia.org/wiki/Hexafluoruro_de_azufre> [consulta: 02 enero 2010]
- [2] "PHYSICS IN SPEECH". [en línea]
<http://www.phys.unsw.edu.au/PHYSICS_!/SPEECH_HELIUM/speech.html> [consulta: 10 enero 2010]
- [3] "INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE", Working Group 1, Climate Change 2007, Chapter 2.10.2. [en línea] <<http://www.wikipedia.org>> [consulta: 10 enero 2010]
- [4] "ATMOSPHERIC LIFETIMES OF LONG-LIVED HALOGENATED SPECIES". [en línea] <<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/sci;259/5092/194.>> [consulta: 12 enero 2010]
- [5]"MAUNA LOA AND GLOBAL SF6". [en línea]
<<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/insitu/cats/conc/mlosf6.html>> [consulta: 12 enero 2010]
- [6] "POLYMER". [en línea] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>> [consulta: 8 enero 2010]
- [7] SOSA, E. J. 2002. "Apuntes: Subestaciones eléctricas de alta tensión aisladas en gas" Apuntes, Octubre 2002
- [8] "CLIMATE CHANGE 2001: WORKING GROUP I: THE SCIENTIFIC BASIS". Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. [en línea]
<http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/248.htm.> [consulta: 13 enero 2010]
- [9] "RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FOR INDUSTRIAL PLANTS", ANSI/IEEE 141 - 1993
- [10] "Recommended PRACTICE FOR PROTECTION AND COORDINATION OF INDUSTRIAL PLANTS AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS ANSI/IEEE 242 - 2001
- [11] "PROGRAMA PARA EL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POWER TOOLS 6.0 FOR WINDOWS".
- [12] "GUIDE FOR TRANSFORMER THROUGH FAULT CURRENT DURATION" C.57.109- 985, ANSI/ IEEE, IEEE
- [13] "NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEDE-2005"