

CAPITULO 2

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PROTECCIONES

2.1. Introducción

La protección de un equipo eléctrico puede ser tan simple como un fusible o tan compleja como los modernos relés de tipo numérico, que hacen uso de enlaces de radio o carrier para transmitir la información de un punto a otro. Por esta razón, una definición de Sistema de Protecciones debe ser lo suficientemente amplia como para incluirlas a todas.

Definición: Sistema de Protecciones es el conjunto de elementos y de sus circuitos de control asociados que se encuentran interconectados o dependientes entre sí, cuya función es proteger a un equipo o a un conjunto de equipos. Este conjunto de elementos operará bajo condiciones predeterminadas, usualmente anormales, desconectando un elemento del SEP o emitiendo una señal o ambas cosas. Bajo la perspectiva de esta definición y tratando de referirse siempre a los casos más generales, los componentes de un sistema de protecciones, tal como se muestra en la Figura 2.1, son los siguientes:

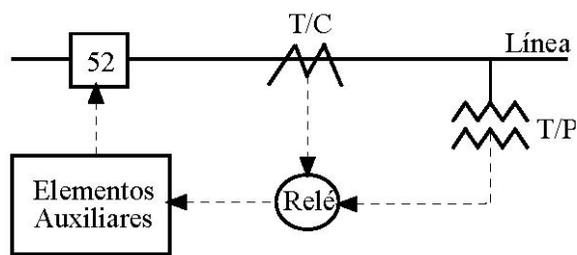


Figura 2.1.- Componentes de un Sistema de Protecciones

2.1.1. Transformadores de medida (TT/MM)

Los transformadores de medida son los elementos que permiten obtener la información acerca de las condiciones de operación de un sistema de potencia, en la forma de señales secundarias de corriente o de tensión proporcionales a las magnitudes primarias. Bajo este término común se agrupan los transformadores de corriente (TT/CC) y de potencial (TT/PP), para diferenciarlos de los transformadores comunes.

2.1.2. Relés de protección

Son los elementos que reciben la información de los transformadores de medida y que son capaces de discriminar entre una condición normal y anormal. Cuando el relé detecta una condición anormal inicia su acción (“opera”), generalmente a través de contactos que se cierran o se abren y que, en forma directa o indirecta, habilitan los circuitos de apertura o desenganche de los interruptores de potencia.

2.1.3. Interruptores de potencia

Dispositivos que cumplen con la función de aislar o desconectar los equipos, ya sea por operación de las protecciones o de las personas que manejan el sistema eléctrico. Se denominan interruptores de potencia para diferenciarlos de otros dispositivos que no son capaces de interrumpir un circuito en condiciones de falla por no tener la capacidad de ruptura necesaria, aún cuando están diseñados para aislar partes del circuito.

2.1.4. Circuitos de control

Conjunto de elementos que interconectan a los tres componentes anteriores. Entre estos elementos se puede mencionar: alambrados; regletas de conexiones; switches; relés auxiliares; lámparas de señalización; dispositivos anunciadores; etc. Se analizarán a continuación, las principales características de los distintos elementos que componen los sistemas de protecciones.

2.2. Transformadores de medida (TT/MM)

2.2.1. Objetivos

Los transformadores de medida cumplen con varios objetivos tal como se indica a continuación:

- **Aislarse del circuito de Alta Tensión:** Puesto que no existen ni serían prácticos instrumentos o relés para conexión directa a la alta tensión, se usan transformadores que cumplen con la función de entregar corrientes o voltajes en baja tensión con el objeto de proteger tanto a los instrumentos como a las personas que los operan.
- **Disponer de magnitudes normalizadas:** Los secundarios de los TT/MM entregan valores normalizados de modo de facilitar la utilización de instrumentos u otros dispositivos que por tener un bajo nivel de aislamiento resultan pequeños y económicos.
- **Efectuar medidas a distancia:** Al disminuir los niveles de las magnitudes a medir y al estar aislados de la alta tensión, se hace posible instalar los elementos de medida y protección a distancias mas o menos alejadas del punto de ubicación de los TT/MM. Sin embargo, esta distancia no puede ser mayor de unos 100 a 150 m, puesto que los conductores comienzan a ser una carga apreciable que compromete la exactitud de las medidas. Con la aparición de los relés de estado sólido y de los transductores electrónicos de medida, las distancias mencionadas han podido superarse largamente.
- **Realizar aplicaciones en protecciones y medidas:** Interconectando adecuadamente los secundarios de los TT/MM, se pueden obtener otras magnitudes de gran utilidad en la aplicación de algunas protecciones y medidas. A modo de ejemplo, se pueden mencionar los dos circuitos que se muestran en las Figuras 2.2 y 2.3, que permiten obtener voltajes y corrientes de secuencia cero, respectivamente.

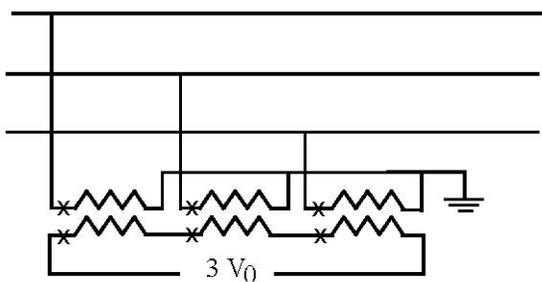


Figura 2.2.- Obtención de Voltaje de secuencia cero

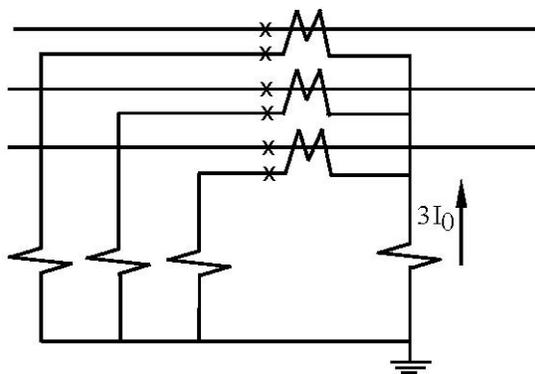


Figura 2.3.- Obtención de Corriente de secuencia cero

- **Proteger instrumentos:** Esta aplicación es particularmente válida en el caso de los TT/CC destinados a medidas, ya que al ocurrir un cortocircuito se aprovecha un bajo índice de saturación del núcleo para provocar un elevado error negativo en la corriente secundaria, de modo que ésta no se eleve muy por encima de los valores nominales. Se protegen de esta manera las bobinas de corriente de instrumentos tales como: Amperímetros; wáttmetros; fasímetros; etc.

2.2.2. Transformadores de potencial (TT/PP)

Son los transformadores de medida utilizados para reducir las tensiones primarias del SEP (normalmente del orden de los kV) a tensiones secundarias de rangos normalizados (115-120 volt), en forma directamente proporcional. En realidad, esta función puede ser cumplida también por otro tipo de elemento, denominado “Dispositivo Capacitivo de Potencial”, que se estudiará más adelante.

El transformador de potencial (T/P; Figura 2.4) es muy similar a un transformador de potencia ya que ambos tienen la finalidad de cambiar el nivel de la tensión. Un transformador de potencia está destinado a servir una carga sin exceder un aumento de temperatura especificado. El transformador de potencial se define, en cambio, en términos de la máxima carga (o burden) que es capaz de entregar sin exceder los límites de error de razón y de ángulo especificados; esto significa que la carga que es capaz de servir, sin exceder los valores permitidos de aumento de temperatura, puede llegar a ser hasta diez veces superior a su burden nominal.

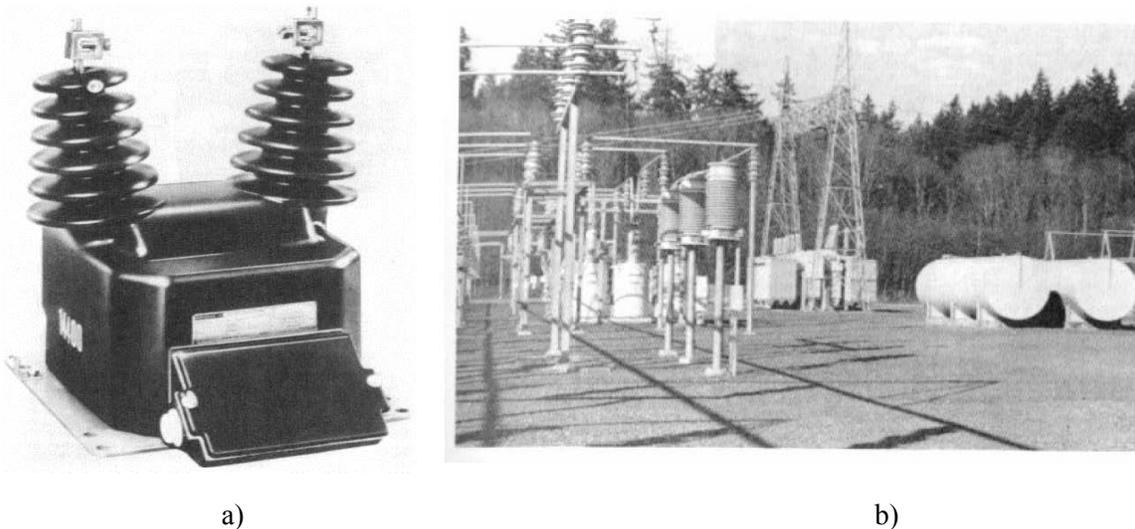


Figura 2.4.- Transformador de Potencial: a) Para uso en sistemas de media tensión (15 kV), b) Para 115 kV

a. Circuito equivalente y diagrama fasorial

La Figura 2.5 muestra el circuito equivalente y el diagrama fasorial de un T/P, referidos al primario.

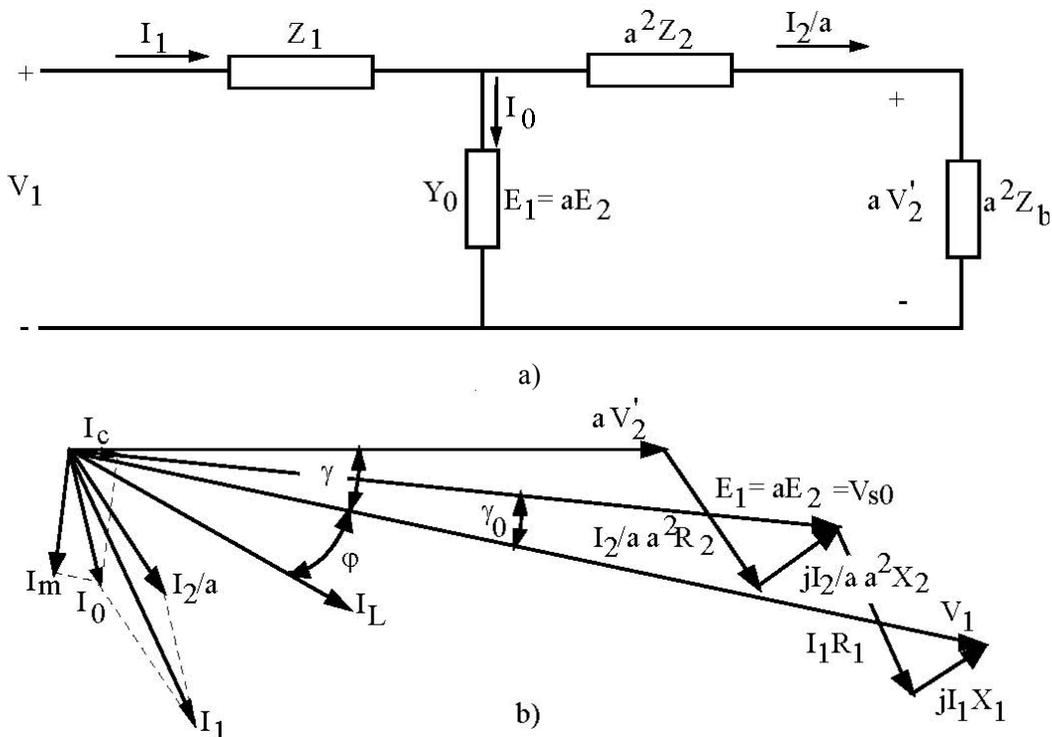


Figura 2.5.- Transformador de potencial: a) Circuito equivalente y b) Diagrama fasorial

A partir del diagrama fasorial de la Figura 2.5 b), se puede inferir que la exactitud de un transformador de potencial, queda determinada por las caídas de tensión en los enrollados, primario y secundario. Cuando el secundario está en circuito abierto, las caídas de tensión son causadas por la corriente de excitación que circula por el primario y en estas condiciones, la tensión secundaria es V_{s0} y existe una diferencia angular entre esta tensión y la del primario, de γ_0 grados.

Cuando el T/P tiene conectada una carga (burden) en el secundario, es necesario considerar las caídas de voltaje originadas por la corriente de carga, tanto en el primario como en el secundario. Así entonces, se tendrá la caídas de tensión asociadas a la corriente de excitación, que pueden considerarse pequeñas y constantes ya que se trabaja con densidades de flujo en el núcleo que están muy por debajo del punto de saturación y las caídas de tensión debidas a la corriente de carga. Por lo tanto, las variaciones de la carga, influyen en la exactitud del T/P.

b. Cargas normalizadas y clases de precisión

La exactitud depende de la carga y por ello, las normas (ASA, VDE) especifican éstas. Ellas se han elegido para incluir el rango normal de servicio. La Tabla 2.1 muestra los diferentes tipos de cargas normalizadas establecidas por ASA a 60 Hertz. Es necesario hacer notar; sin embargo, que estas normas establecen que los volt-amperes y factor de potencia de las cargas deben ser los mismos en todas las frecuencias.

Tabla 2.1.- Cargas normalizadas según ASA

Designación	Volt-Amperes a 120 Volt	Factor de Potencia	Resistencia (Ohm)	Inductancia (Henry)	Impedancia (Ohm)
W	12,5	0,10	115,2	3,04	1152
X	25,0	0,70	403,2	1,09	576

Y	75,0	0,85	163,2	0,268	192
Z	200,0	0,85	61,2	0,101	72
ZZ	400,0	0,85	30,6	0,0503	36
M	35,0	0,20	82,3	1,07	411

La carga que representa un instrumento o un relé determinado puede aproximarse, pero pocas veces será la misma que una de las características especificadas en la tabla anterior. Estas sirven como referencia para la exactitud del T/P.

A continuación y antes de analizar las clases de precisión, es necesario definir algunos términos que se emplean en esta clasificación, los que son válidos para todos los transformadores de medida.

- **Relación verdadera (RV):** Es la razón entre las magnitudes de la tensión o corriente del primario y las respectivas del secundario.
- **Relación marcada (RM) o relación nominal:** Es la razón entre la tensión o corriente nominales del primario y las respectivas del secundario.
- **Factor de corrección de la relación (FCR):** Es la razón entre la relación verdadera y la relación marcada.
- **Factor de corrección del transformador (FCT):** Es la razón entre la potencia verdadera y la indicada por un wáttmetro conectado a través del transformador de medida. Permite considerar tanto el error de razón como el de ángulo de fase.

Las normas ASA (C 57.13), clasifican a los TT/PP en 3 clases designadas como 0,3; 0,6 y 1,2. Estas cifras indican el porcentaje de error máximo que puede tener la razón del transformador al tener conectada una carga secundaria normalizada para cualquier voltaje comprendido entre el 90 y el 110% de la tensión nominal, a la frecuencia nominal y desde funcionamiento en vacío hasta el correspondiente a plena carga. En la Tabla 2.2 se establece esta clasificación con los límites para FCR y FCT. Los límites de FCT de la tabla 2.2 han sido establecidos para un margen del factor de potencia del circuito primario, comprendido entre 0,6 y 1, ambos inductivos.

Tabla 2.2.- Errores de razón y ángulo, según clase de precisión

Clase de exactitud	Límites de FCR y FCT	Error de ángulo
0,3	0,997-1,003	± 15 min
0,6	0,994-1,006	± 30 min
1,2	0,988-1,012	± 60 min

Se puede demostrar que la relación entre el ángulo de desfase γ (considerado positivo cuando aV'_2 adelanta a V_1 , tal como se muestra en la Figura 2.5 b) y los factores de corrección, se puede expresar según las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = 0,75 \frac{FCT - FCR}{FCT} \text{ (rad)} \quad (2.1)$$

$$\gamma = 2600(FCT - FCR) \text{ (min)} \quad (2.2)$$

La Figura 2.6 muestra gráficamente la relación (2.2) para las clases 0,3; 0,6 y 1,2.

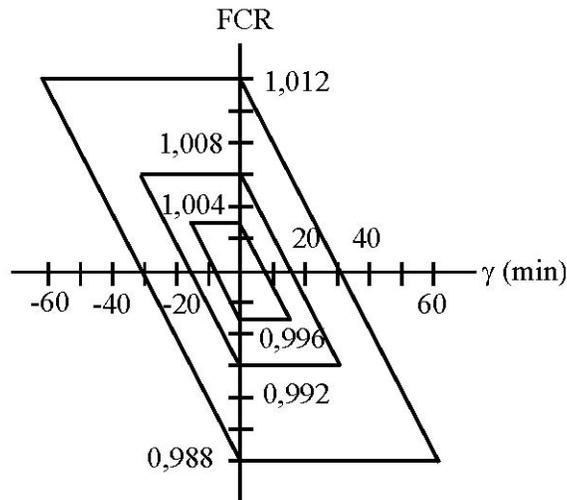


Figura 2.6.- Paralelogramos de clases de precisión de TT/PP según ASA

c. Protecciones de los TT/PP

En general, el funcionamiento de los TT/PP no presenta grandes problemas de operación, ya que las variables que pudieran afectarlo tales como: cambios de temperatura de los enrollados, forma de onda o variaciones de los voltajes y de la frecuencia, los afectan poco o no cambian de manera importante como para hacerlo.

Por otra parte y debido a que pueden estar expuestos a fallas internas, usualmente se protegen con fusibles rápidos ubicados en el lado de alta tensión pero sólo hasta el rango de los 66 kV. Con voltajes mayores los fusibles no tendrían la capacidad de ruptura necesaria. Por tal razón, los TT/PP siempre deben estar protegidos en el secundario, ya sea con fusibles o con interruptores automáticos, los que deben ser instalados tan cerca del Transformador de Potencial (T/P) como sea posible.

Debido a su diseño especial un T/P puede llegar a suministrar una corriente secundaria considerablemente mayor que la nominal sin llegar a sobrecalentarse. Sin embargo, un cortocircuito en el alambrado secundario producirá una corriente muchas veces mayor, como consecuencia de la baja regulación requerida para mantener la exactitud. Tal corriente de cortocircuito ciertamente puede causar un sobrecalentamiento excesivo. Aún cuando se pueden instalar fusibles primarios, éstos usualmente no despejan un cortocircuito en el lado secundario debido al bajo valor de corriente primaria que deberían tener, el cual está muy por debajo de los rangos existentes para fusibles de A.T.

d. Polaridad y conexiones

En la utilización de transformadores de potencial es importante considerar tanto la polaridad

de los bornes de conexión como las conexiones que es posible realizar.

d.1. Polaridad

En la práctica, cuando se miden voltajes alternos en forma aislada no interesa mayormente el sentido relativo y no existe un borne “positivo” o de polaridad que se deba considerar. En cambio, cuando se deben comparar voltajes con otros voltajes o corrientes, entonces sí interesa conocer estas designaciones (conexión de wáttmetros y de relés de potencia, por ejemplo). En los transformadores de potencial se usa una terminología similar a los transformadores de potencia acostumbrándose a usar la letra H (mayúscula) para designar los bornes de los enrollados de alta tensión y la letra x (minúscula) para los bornes de los enrollados de baja tensión. Así, H_1 será homólogo con x_1 , o bien H_1 ; x_1 e y_1 serán bornes de igual polaridad de los enrollados: primario; secundario y terciario, respectivamente.

d.2. Conexiones

Los transformadores de potencial, según se usen con propósitos de protección o de medida, suelen conectarse en alguna de las siguientes disposiciones:

– Conexión estrella-estrella (Y/Y)

Se usa generalmente cuando se requiere alimentar relés de distancia para fallas entre fases, los que se deben alimentar con tensiones entre líneas, tal como se muestra en la Figura 2.7.

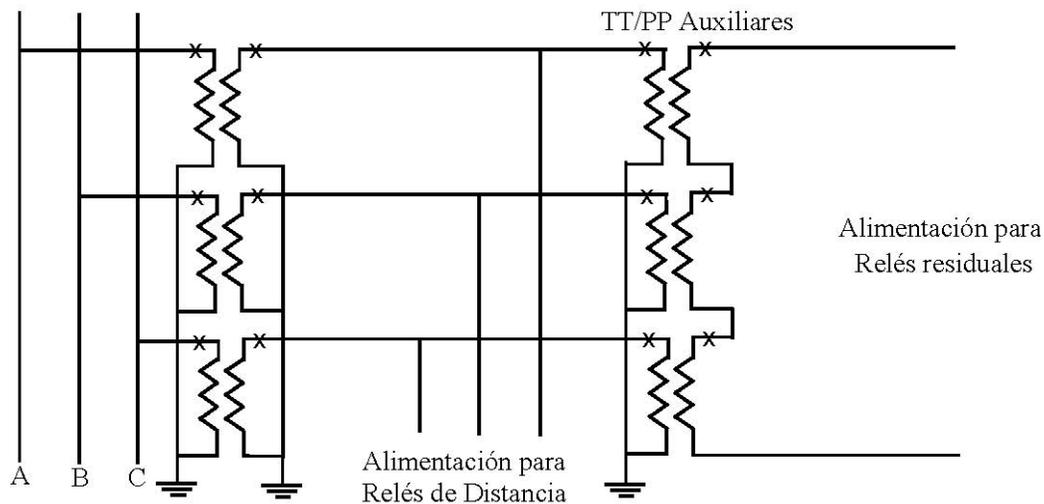


Figura 2.7.- Conexión Y/Y de transformadores de potencial

– Conexión estrella/delta abierta o delta inconclusa

Esta conexión, que ya fue mencionada anteriormente, (Figura 2.2), se utiliza generalmente en protecciones, principalmente para polarizar relés direccionales de tierra. Como sería poco económico obtenerla usando tres TT/PP de alta tensión, generalmente se obtiene de un enrollado secundario adicional de los TT/PP, en el caso que ellos lo tengan.

Otra posibilidad es usar TT/PP auxiliares, como se muestra en la Figura 2.7, que por ser de baja tensión son bastante más económicos. El voltaje residual que se obtiene de esta conexión es

muy útil en protecciones para detectar una condición de falla a tierra. Para que esta conexión funcione bien es absolutamente necesario que el neutro del primario este aterrizado con el fin de permitir la circulación de la corriente de secuencia cero.

– **Conexión delta-delta (Δ/Δ) y delta abierta o en V (V/V)**

Estas conexiones se muestran en las Figuras 2.8 a) y b) y se utilizan cuando sólo se requieren tensiones entre fases. La conexión V/V es bastante utilizada con propósitos de medida, pues se obtiene un sistema de tensiones trifásico con dos TT/PP solamente, lo que la hace más económica.

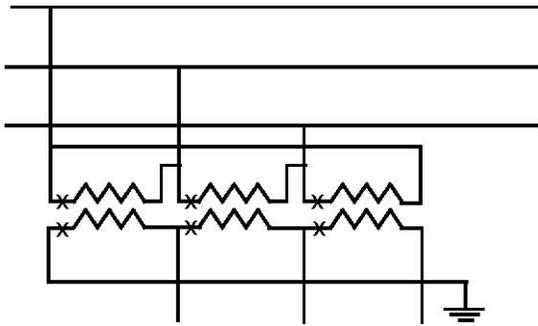


Figura 2.8 a) TT/PP conectados en Δ/Δ

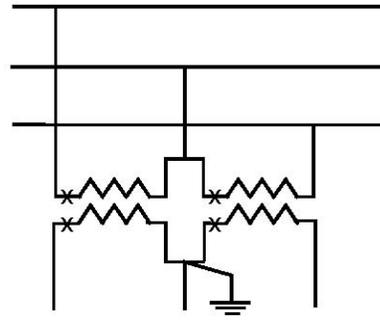


Figura 2.8 b) TT/PP conectados en V/V

2.2.3. Dispositivos Capacitivos de Potencial

Para muy elevadas tensiones, el tamaño de un T/P tiende a crecer enormemente, como también su costo. Una solución alternativa más económica se ha encontrado con la utilización de “transformadores de potencial” de tipo capacitivo, denominados “Dispositivos Capacitivos de Potencial”(DCP).

El dispositivo es básicamente un divisor de voltaje capacitivo. En realidad un divisor de voltaje podría obtenerse por ejemplo con resistencias, pero en este caso el voltaje de salida se vería seriamente afectado por la carga. El divisor capacitivo, en cambio, puede ser compensado con una inductancia conectada en serie con el punto de división. Si la inductancia fuera ideal, esta solución no tendría regulación y podría suministrar cualquier valor de salida, pero como no es ideal, en la práctica limita la salida que puede obtenerse. Por otra parte, si el divisor redujera el voltaje al valor secundario requerido (por ejemplo 63,5 V fase-neutro), los condensadores deberían ser muy grandes. Una mejor solución se obtiene con un divisor de voltaje que entregue un voltaje de salida de valor mas alto, el que puede ser reducido a valores normales usando un T/P más barato. Son varios los cambios que puede sufrir este circuito básico. La inductancia puede ser una unidad separada, o puede ser parte de la reactancia de fuga del transformador. La Figura 2.9 muestra dos tipos de DCP.

Los dos dispositivos son semejantes y la diferencia principal consiste en el tipo de divisor de tensión utilizado, que a su vez afecta a su carga nominal. El primero utiliza como divisor de tensión un condensador de acoplamiento compuesto de varios condensadores en serie y un condensador auxiliar (Figura 2.9 a). El dispositivo tipo bushing (Figuras 2.9 b) y c) utiliza el acoplamiento capacitivo de un bushing de alta tensión, de un interruptor o de un transformador, especialmente construido. El aislador está provisto de una derivación capacitiva, conectada a un electrodo cilíndrico y concéntrico cuyo detalle se muestra en la Figura 2.9.c).

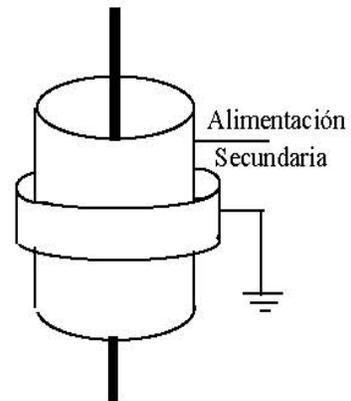


Figura 2.9.- DCP: a) Con condensador de acoplamiento; b) Tipo bushing; c) Detalle del condensador cilíndrico

En términos generales existen dos tipos de dispositivos capacitivos de potencial:

Clase A: Llamados también en fase o resonantes, a la cual pertenecen los dos tipos anteriores. Los DCP de esta clase se usan comúnmente en protecciones.

Clase C: denominados fuera de fase o no resonantes, los que generalmente no son apropiados para la protección con relés.

a. Dispositivos capacitivos de potencial clase A

a.1. Características de funcionamiento

La Figura 2.10 muestra un diagrama esquemático del DCP clase A, que incluye el divisor de tensión. No se muestran los medios para ajustar la magnitud y ángulo de fase de la tensión secundaria, los que varían según el fabricante. El DCP necesita un T/P auxiliar que consta de dos enrollados de 115 Volt, uno de los cuales posee una toma de 66,4 Volt. Estos enrollados se combinan con los de las otras fases de un circuito trifásico, de modo que se forme la conexión en estrella para los relés de fase y una delta inconclusa para el relé de tierra.

La Figura 2.11 muestra el circuito equivalente de un DCP referido al primario del T/P auxiliar, sin considerar la rama de excitación, es decir, se ha despreciado la corriente de excitación del transformador y en donde R_{ft} y X_{ft} son las, resistencia y reactancia de fuga del T/P auxiliar y Z_b es la impedancia de la carga. El Diagrama Fasorial de la Figura 2.12 muestra que V_1 y aV_2 están desfasados un ángulo α pequeño (error angular). Existe un error de razón debido a la rama de excitación no considerada y a variaciones de la carga.

En general estos dispositivos pueden ser ajustados de modo que para la impedancia de carga nominal, el voltaje secundario esté en fase con el voltaje primario y la razón de transformación sea igual a la nominal. Se establece también que la carga debe ser puramente resistiva, por lo que es

necesario corregir el factor de potencia de las cargas, que son normalmente de tipo inductivo.

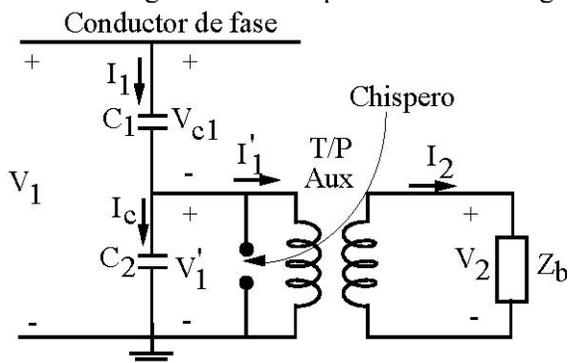


Figura 2.10.- Diagrama esquemático de un DCP Clase A

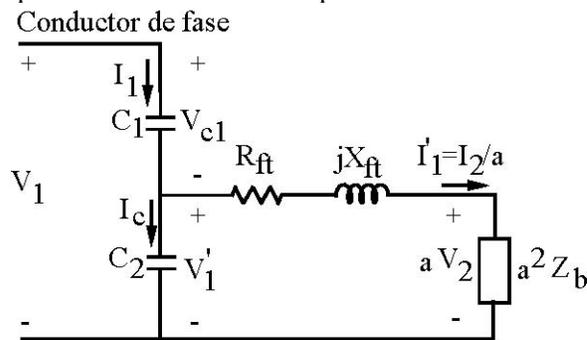


Figura 2.11.- Circuito Equivalente de un DCP Clase A, referido al primario de T/P Auxiliar

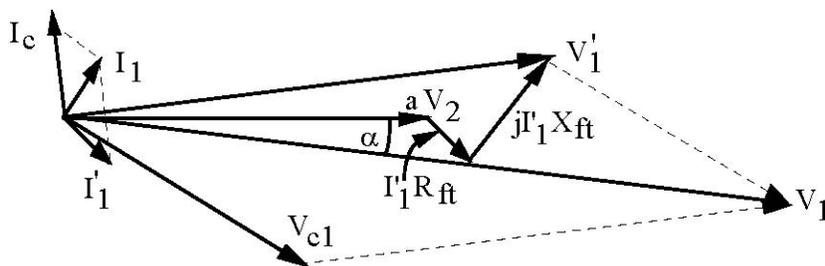


Figura 2.12.- Diagrama fasorial de un DCP clase A

Los distintos fabricantes eligen diversas formas para posibilitar los ajustes. A manera de ejemplo, el DCP General Electric KA 105 de tipo boquilla tiene las siguientes características:

- Reactancia variable del T/P auxiliar, para ajuste del desfase
- Taps en el T/P auxiliar, para ajuste de la razón de transformación
- Condensador variable en paralelo con la carga, para ajuste del factor de potencia

Algunos DCP poseen resistencias conectadas en paralelo con la carga, con el fin de mantener plena carga aplicada aunque ésta sea inferior a la nominal. Otros tienen condensadores de capacitancia variable en serie con la carga, para conseguir un desfase de 30° cuando los consumos se interconectan en delta.

Los ajustes que pueden efectuarse permiten trabajar con errores máximos como los que se indican en las Tablas 2.3 y 2.4.

Porcentaje del Voltaje primario nominal	Error máximo de la razón (%)	Error máximo del ángulo (Grados)
100	± 1	± 1
25	± 3	± 3
5	± 5	± 5

Tabla 2.4.- Error de razón y ángulo en función de la carga

Porcentaje de la carga nominal	Error máximo de la razón (%)	Error máximo del ángulo (Grados)
100	± 1	± 1
50	± 6	± 4
0	± 12	± 8

En lo que se refiere a las potencias nominales, éstas se indican en la Tabla 2.5, tanto para los Dispositivos Capacitivos de Potencial tipo boquilla, como para los de tipo condensador de acoplamiento.

Tabla 2.5.- Cargas nominales de DCP

Voltaje nominal del sistema (kV entre fases)	Carga nominal tipo Boquilla (watt)	Carga nominal tipo Condensador (watt)
115	25	150
138	35	150
161	45	150
230	80	150
287	100	150

a.2. Determinación de la razón de transformación

La Figura 2.13 muestra el circuito equivalente aproximado de un DCP, referido al primario del T/P, donde se ha supuesto compensado el factor de potencia (carga resistiva pura) y que la impedancia de fuga del T/P auxiliar es puramente reactiva. A partir del circuito se puede demostrar que:

$$\dot{V}_1 = a\dot{V}_2(1 + X_{c1}/X_{c2}) + j\dot{I}'_1[X_t(1 + X_{c1}/X_{c2}) - X_{c1}] \quad (2.3)$$

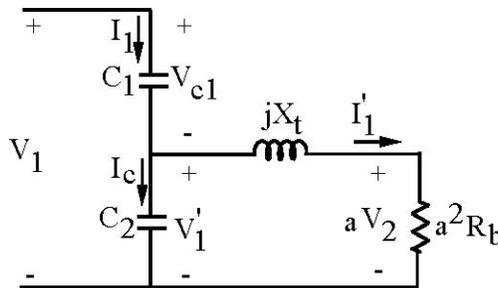


Figura 2.13.- Circuito equivalente aproximado de un DCP

Para que V_1 y V_2 queden en fase es necesario que la parte imaginaria de (2.3) sea cero, de donde:

$$X_t = \frac{X_{c2}}{1 + X_{c2}/X_{c1}} \quad (2.4)$$

Como $X_{c2} \ll X_{c1}$; $(1 + X_{c2}/X_{c1})$ es prácticamente igual a la unidad y entonces $X_t \approx X_{c2}$, lo que justifica la designación como resonante a este dispositivo ya que si por alguna razón se cortocircuita la carga, se produce el fenómeno de resonancia en paralelo, lo que puede traer como consecuencia una sobretensión en estas reactancias, la que puede incluso ser mayor que la existente en X_{c1} . Ante esta eventualidad, se dispone un chispero en el primario del T/P auxiliar, tal como se muestra en la Figura 2.10.

Bajo las consideraciones hechas y a partir de (2.3) la relación de transformación del DCP puede escribirse según la ecuación (2.5), donde se puede apreciar que ella se puede variar cambiando la razón de transformación del T/P o el valor de la capacitancia C_2 .

$$\frac{V_1}{V_2} = a \left(1 + \frac{X_{c1}}{X_{c2}}\right) = a \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \quad (2.5)$$

b. Dispositivos capacitivos de potencial clase C

Estos dispositivos tienen menor facilidad de ajuste que los de clase A y para ellos se especifica que el desfase entre el voltaje secundario y primario puede ajustarse para cualquier valor entre 30° y 120° de adelanto (secundario adelantando al primario). La razón se puede ajustar a la nominal, estando fija la carga siempre que la tensión varíe entre 75 y 100% de la nominal. Al cambiar la carga debe nuevamente ajustarse. Su potencia máxima es de 75 watt y el T/P auxiliar tiene un solo enrollado secundario de 115 volts nominales con una derivación de 66,4 volts. Esta clase se construye como dispositivo tipo condensador de acoplamiento.

2.2.4. Transformadores de corriente (TT/CC)

a. Consideraciones generales

Son los transformadores de medida destinados a entregar una corriente secundaria proporcional a la que circula por su enrollado primario. Este enrollado está conectado en serie con el circuito de potencia que se pretende medir. En cualquier caso, su impedancia es despreciable comparada con la del circuito de potencia, aún si se considera el efecto de la impedancia del circuito secundario transferido.

Se construyen como elementos monofásicos, cuyo primario tiene muy pocas espiras (normalmente una sola). El núcleo puede ser de material ferromagnético o de aire. En el primer caso poseen una potencia de salida importante, por lo que son aptos para usar con relés electromecánicos; sin embargo, no existe una proporcionalidad total entre las corrientes de los enrollados primario y secundario, debido a las características no lineales de los materiales utilizados en el núcleo. Los TT/CC con núcleo de aire tienen baja potencia de salida por lo que sólo se pueden usar con relés del tipo estático, sin embargo, la corriente secundaria es siempre proporcional a la corriente primaria debido a lo cual se les llama "Acopladores lineales".

Según las características constructivas de la bobina primaria, los TT/CC se clasifican en:

- **Tipo bobinado:** La bobina primaria se enrolla con una o más vueltas al núcleo de hierro. Las bobinas primarias y secundarias se encuentran aisladas entre sí y también están aisladas del

- núcleo, tal como se muestra en la Figura 2.14.
- **Tipo barra:** Consiste en un conductor fijo, aislado, en forma de barra o tubo, como bobina primaria que atraviesa el núcleo de hierro, en general de forma toroidal al que se ha enrollado la bobina secundaria (Figura 2.15).
 - **Tipo ventana:** Es aquel que consta solamente de una bobina secundaria enrollada alrededor de un núcleo de hierro y en el cual la bobina primaria no forma parte del T/C propiamente tal (Figura 2.16).

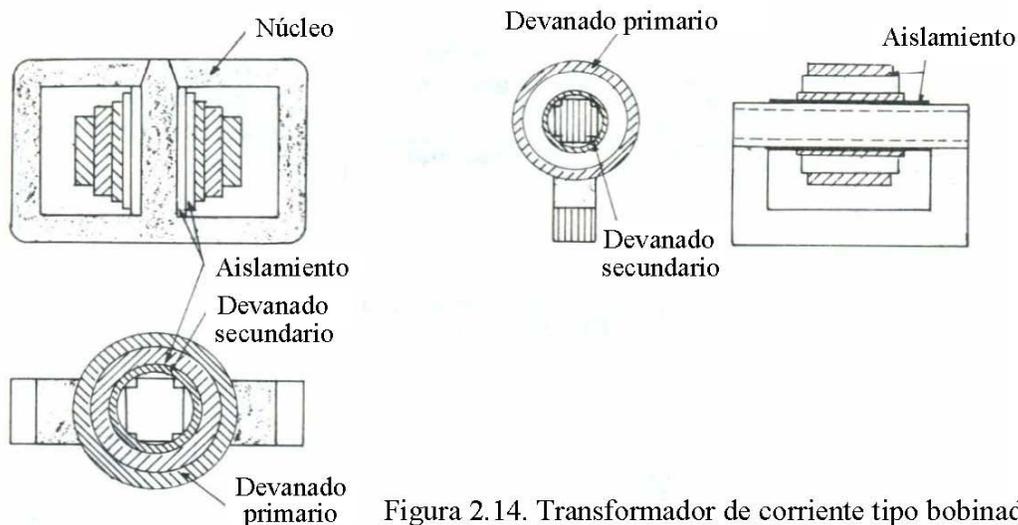


Figura 2.14. Transformador de corriente tipo bobinado

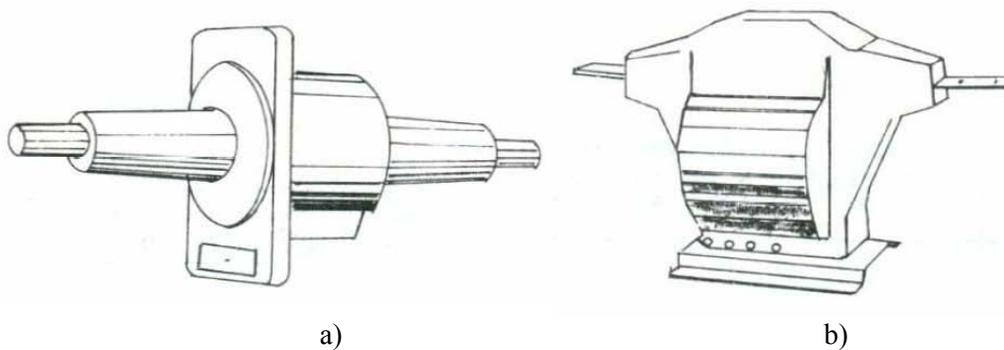


Figura 2.15.- Transformador de corriente; a) Tipo tubular para tensiones entre 6,6 y 23 kV; b) Tipo barra plana, aislado con resina sintética, para media tensión

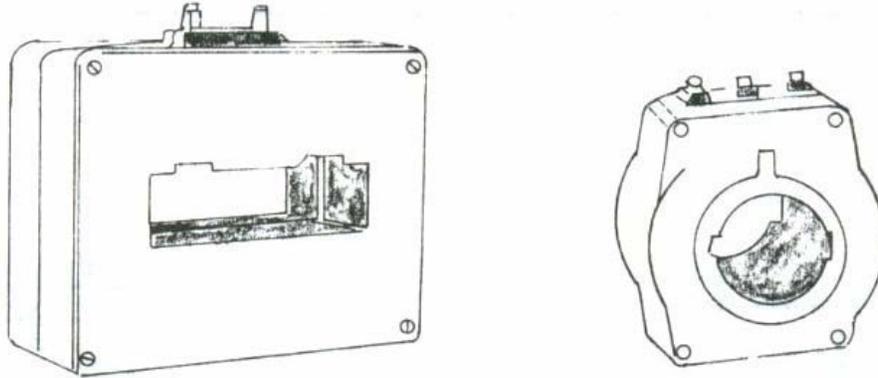


Figura 2.16. Transformadores de corriente tipo ventana

- **Tipo bushing:** Tiene un núcleo de hierro toroidal al cual se ha enrollado la bobina secundaria pero no tiene bobina primaria. Va montado en el bushing de los transformadores de potencia y la bobina primaria la forma el cable conductor del circuito de potencia.

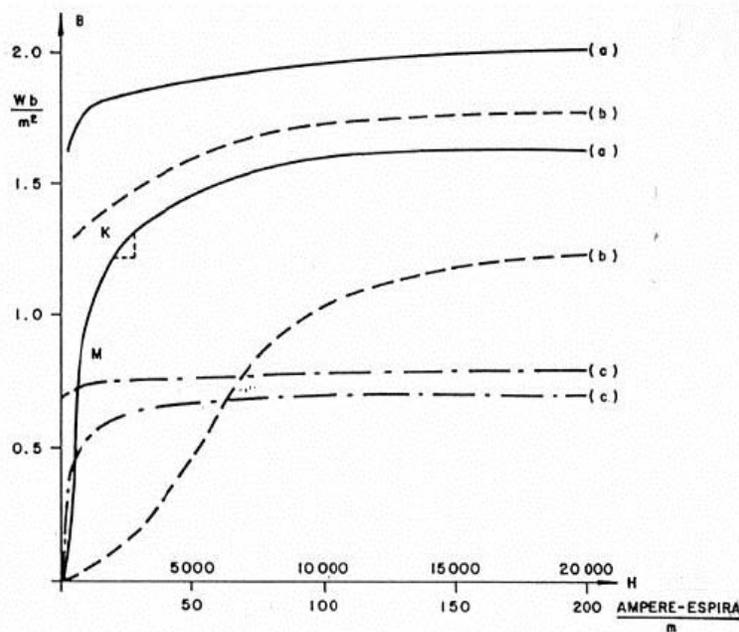


Figura 2.17.- Características de materiales magnéticos usado en transformadores de corriente
La Figura 2.17 muestra diferentes curvas de magnetización de materiales utilizados en el núcleo de los transformadores de corriente, que corresponden a:

- (a) Acero silicoso laminado en frío
- (b) Acero silicoso laminado en caliente

- (c) Acero con alto contenido de Níquel

b. Circuito equivalente y diagrama fasorial

La Figura 2.18 muestra el circuito equivalente aproximado de un T/C y su diagrama fasorial se muestra en la Figura 2.19, ambos referidos al primario. Z_e es la impedancia de fuga o equivalente del T/C, normalmente de valor pequeño, Z_0 es la impedancia de excitación y Z_b es la impedancia de la carga o burden.

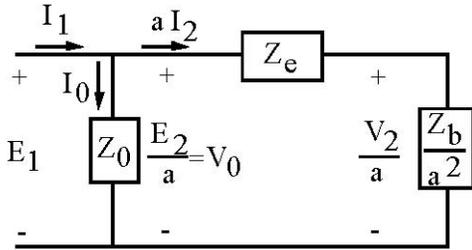


Figura 2.18.- Circuito equivalente aproximado de un transformador de corriente

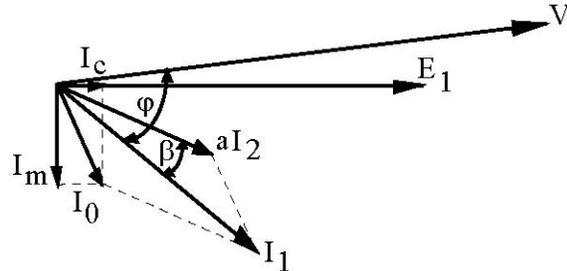


Figura 2.19.- Diagrama fasorial de un transformador de corriente

A partir de la Figura 2.18 se puede escribir:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + a\dot{I}_2 \quad (2.6)$$

Tal como se indica en el diagrama fasorial y donde “a” es la razón de transformación, definida como:

$$a = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (2.7)$$

En un transformador de corriente interesa que el error de razón “a” y de ángulo “β” sean mínimos, por lo que, de las expresiones y figuras anteriores, se observa que es necesario disminuir la corriente de excitación I_0 . Por esta razón, si se considera que tanto Z_e como Z_b son parámetros constituidos por elementos no saturables, el análisis del comportamiento de un T/C se efectúa a través de su característica de excitación

La magnitud de la corriente de excitación I_0 de un transformador, depende del tipo de material del núcleo y del flujo que deba tener para satisfacer el burden requerido lo que, en última instancia, determina la sección del núcleo. En los transformadores de corriente, la carga representa una caída de voltaje por impedancia, que en la figura corresponde a $aI_2 Z_b/a^2$, la que, si se desprecia la caída en Z_e , es igual a $I_0 Z_0$, lo que determina el valor de I_0 y por lo tanto del flujo, además de determinar el valor de Z_0 como función de la característica de excitación.

Para que la razón real de corrientes sea lo más ajustada posible a la razón inversa de vueltas, I_0 debe tender a cero, o bien: $Z_0 \gg (Z_e + Z_b/a^2)$. Como resultado de estas consideraciones se puede concluir que:

- El núcleo debe ser de muy buena calidad para trabajar a niveles bajos de saturación y con pocas pérdidas.
- No se debe trabajar con cargas superiores a la nominal ya que si la impedancia de la carga es muy

- alta, aumenta la corriente de excitación y consecuentemente el error de razón y de ángulo.
- No se debe trabajar con el secundario en circuito abierto porque en este caso, el voltaje desarrollado será limitado solamente por la impedancia de magnetización. En estas condiciones: $I_1=I_0$, lo que trae como consecuencia la saturación, altas pérdidas y sobretensión en el núcleo, junto con elevados voltajes máximos en bornes secundarios.

c. Característica de excitación

La Figura 2.20 muestra la característica de excitación de un T/C y en la Figura 2.21 está el circuito empleado para obtenerla. Para fines de estudio se ha exagerado el codo de saturación. En la práctica esta curva es mas redondeada y por eso se acostumbra dibujarla en papel log-log. De esta forma se puede definir con mayor precisión el “punto de saturación”, es decir, el punto donde la relación dV_0/dI_0 deja de ser constante. Esta curva se puede dividir (en forma aproximada), en cuatro zonas:

- El pié de la curva de 0 de 20 Volts, aproximadamente.
- Zona de linealidad, entre 20 y 160 Volts
- Zona del codo de saturación de 160 a 180 Volts
- Zona de saturación, a partir de los 180 Volts.

Para esta curva la zona de linealidad determina una impedancia de aproximadamente 53,33 ohm. A partir de los 180 Volts, la impedancia de excitación empieza a decrecer desde un valor de 36 ohm, debido a la saturación, es decir, en el codo de saturación Z_0 disminuye de 53,33 a 36 ohm aproximadamente.

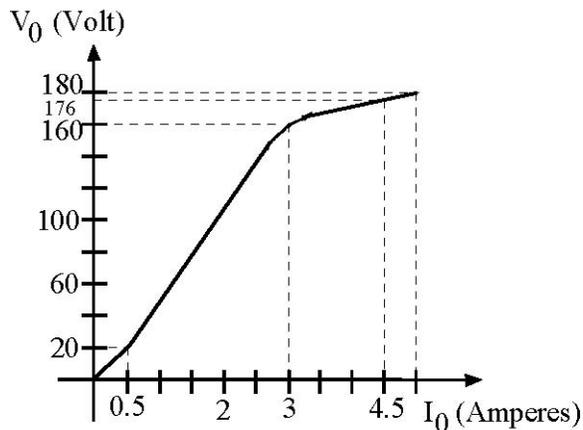


Figura 2.20.- Característica de excitación de un transformador de corriente

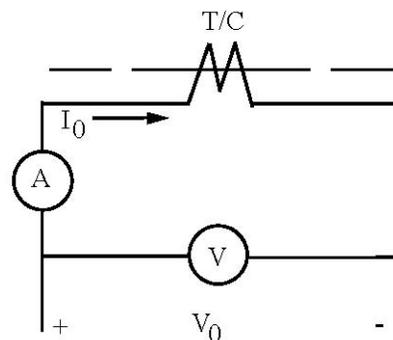


Figura 2.21.- Circuito para obtener la curva de excitación

d. Punto de saturación

Para establecer las características de operación de los TT/CC con corrientes superiores a la nominal, resulta necesario definir su punto de saturación. En este contexto, hay varios criterios y

normas, algunas de las cuales se describen a continuación:

d.1. Criterio de la EEC

La English Electric Corporation (EEC) ha definido al “punto de saturación” de la curva de excitación, como el punto en el cual un incremento de un 10% de la f.e.m. secundaria, produce un 50% de aumento en la corriente de excitación. Este punto puede ser considerado como un límite práctico, sobre el cual no se mantiene la razón de transformación especificada. Según esta definición, si la impedancia de excitación en el límite de la zona lineal, es $Z_0=V_0/I_0$, se tiene que la impedancia de excitación en el punto de saturación, $Z_{0s}=V_{0s}/I_{0s}$ corresponde al 73,33% de Z_0 .

De acuerdo con el gráfico de la Figura 2.20, $Z_0=53,33$ ohm y por lo tanto, $Z_{0s}=39,11$ ohm, en que tanto Z_0 como Z_{0s} corresponden a valores medidos en el secundario

– Efectos de la variación del burden sobre la corriente secundaria

La carga externa conectada al secundario de un transformador de corriente recibe el nombre de Burden. Este se expresa, generalmente, en términos de impedancia y factor de potencia. En algunos casos se expresa también como los Volts-Amperes disipados en la impedancia, a corriente nominal secundaria, con el factor de potencia correspondiente. Las variaciones que puede experimentar el burden conectado al secundario de un T/C, producen importantes efectos sobre su comportamiento. Considerando los resultados determinados según el criterio de la EEC, se puede visualizar el efecto que el burden tiene sobre la corriente secundaria.

De acuerdo con la característica de excitación del T/C de la Figura 2.20, la razón entre las corrientes se mantiene hasta un voltaje secundario de 160 Volts. ¿Hasta qué valores de sobrecorriente se mantiene dicha razón, en función de la carga?. Para este efecto supóngase que, como $Z_e \ll Z_b$, se puede desprejir Z_e y por lo tanto, en la Figura 2.18, $Z_b I_2=160$ Volts, expresados en términos secundarios. Los resultados se muestran en la Tabla 2.6. El valor “n” corresponde a la razón entre la corriente secundaria que puede circular, considerando que se mantiene la relación de transformación del T/C y la nominal secundaria (5 Amperes, en este caso) y puede ser considerado como un “índice de sobrecorriente”. En la tabla se aprecia que a medida que aumenta la carga, la corriente secundaria que puede circular, manteniendo la razón de transformación, disminuye, de la misma forma que lo hace el factor “n”.

Tabla 2.6.- Efecto de la variación del Burden sobre la corriente secundaria

Z_b (Ohm)	I_2 (Amp)	n
1	160	32
2	80	16
4	40	8
8	20	4

– Efectos de la variación del burden sobre la razón de transformación

Para analizar el efecto que la carga ejerce sobre la razón de transformación, se considerará desprejiable el error angular, definiendo el error de razón E_a , a partir de la razón nominal a_N y razón real a_R , según (2.8)

$$E_a = \frac{a_N - a_R}{a_N} \quad (2.8)$$

Por lo tanto, el valor absoluto del error de razón, expresado en función de la corriente primaria I_1 es:

$$E_a \% = \frac{I_0}{I_1} * 100 \quad (2.9)$$

Por otra parte, considerando el circuito equivalente de la Figura 2.18 y despreciando Z_e , se puede determinar I_0 e I_1 , por lo que la expresión (2.9) se puede escribir en función de la impedancia de carga Z_b de la siguiente forma:

$$E_a \% = \frac{Z_b}{Z_b + a^2 Z_0} * 100 \quad (2.10)$$

En la expresión anterior: $a^2 Z_0$ representa la impedancia de excitación referida al secundario, la cual, en este caso es de 53,33 ohm. Si, por ejemplo, $Z_b = 1,0$ ohm, entonces el error de razón será del 1,84%. Si el burden aumenta al doble, el error sube a 3,61%, o sea, prácticamente al doble.

De todo lo anterior y de los supuestos efectuados, que hacen al método algo aproximado, se demuestran las condiciones de compromiso que existen entre el error y el burden.

d.2. Normas alemanas (VDE)

Las normas alemanas VDE, definen una “cifra característica de sobrecorriente” o “índice de saturación”, en la forma que se indica: “El índice de saturación es el múltiplo de la corriente primaria nominal para el cual el error de razón es igual a -10%, para el burden de trabajo y de acuerdo con la saturación del núcleo”. Si el burden de trabajo es igual al nominal, esta cifra se designa por “n” y puede tomar valores tales como: “n < x”; “n = x” ó “n > x”. Normalmente se usa n < 5 para medidas y n > 5 para protecciones.

Aplicando el criterio de la VDE, se encuentra que $a^2 Z_{0s} = 9Z_b$. Por otra parte, combinando (2.9) y (2.10) y utilizando la definición dada anteriormente, el índice de saturación n queda:

$$n = \frac{I_{0s} (Z_b + a^2 Z_{0s})}{5Z_b} \quad (2.11)$$

Por otra parte, estas normas recomiendan utilizar una expresión mas precisa para determinar el índice de saturación, la cual considera la impedancia equivalente Z_e , que se había despreciado en el cálculo anterior. A partir de la definición de n y según el circuito equivalente de la Figura 2.18, se obtiene:

$$n = \frac{V_{0s}}{4,5 (a^2 Z_e + Z_b)} \quad (2.12)$$

En las expresiones (2.11) y (2.12) se ha supuesto que la corriente nominal del primario referida al secundario es de 5 Amperes. Además, Z_e y Z_{0s} son las impedancias respectivas referidas al secundario. En todo caso, la influencia de Z_e es mínima, lo que justifica despreciarla en algunos cálculos y por otra parte, es posible sumar directamente los módulos de las impedancias sin alterar mayormente los resultados.

Para los fines que se persiguen, ambos métodos dan resultados bastante aproximados, aunque los conceptos involucrados son distintos. Debe notarse que en estas expresiones no se considera la impedancia de los conductores secundarios, la que debería incluirse en la impedancia del burden si su valor resulta ser importante.

d.3. Punto “knee” según ANSI

El American National Standard Institute (ANSI, C57.13-1978), define lo que denomina el punto “knee” (rodilla) o punto efectivo de saturación como el punto en que la curva de excitación es tangente a la línea trazada a 45° de la horizontal.

En la Figura 2.22, la recta trazada en línea de segmentos, desde el punto “A” es el lugar geométrico de la intersección de esta tangente con cada una de las curvas correspondientes a las distintas razones del T/C. Por esta razón, al punto “A” se le denomina “ANSI knee”

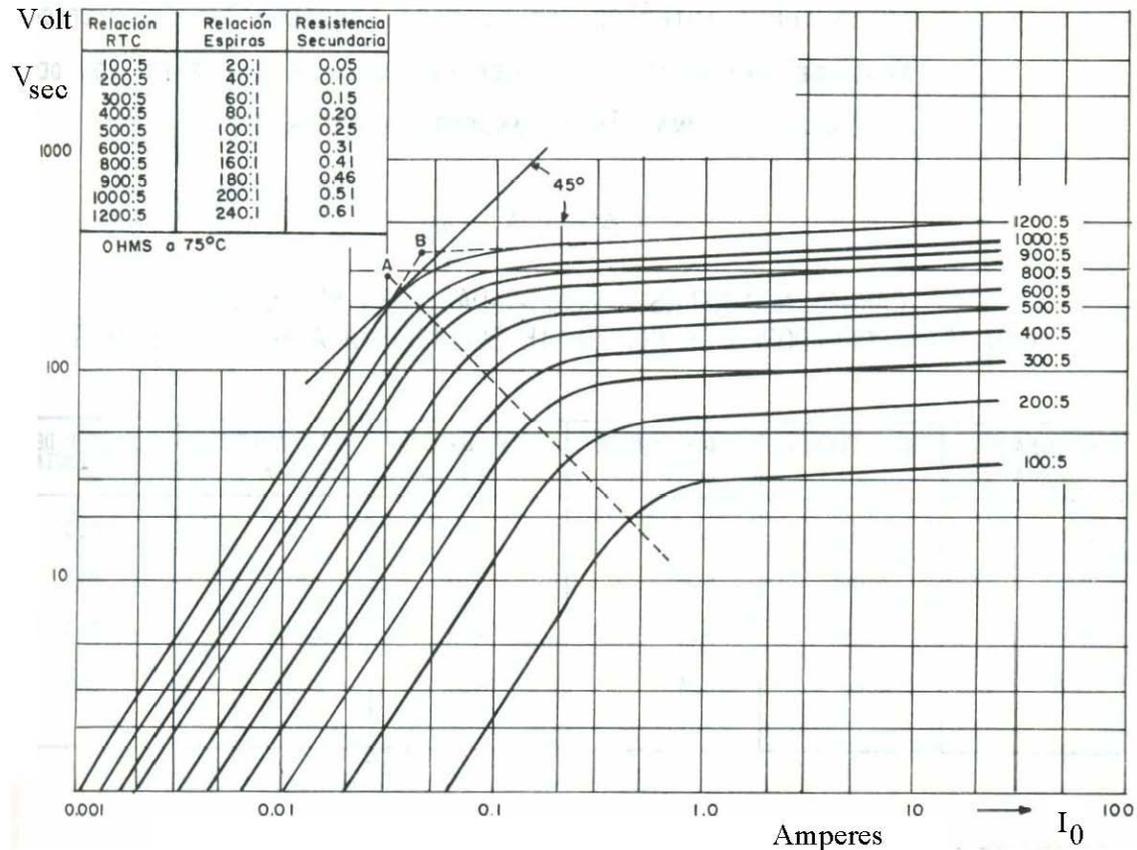


Figura 2.22.- Curvas de excitación típicas para un transformador de corriente Clase C, de multirazón

d.4. Punto “knee” según IEC

La International Electrotechnical Commission (IEC), define el punto “knee” (rodilla) o punto efectivo de saturación como la intersección de las rectas trazadas extendiendo las partes saturada y no saturada de la curva de excitación.

En la Figura 2.22, corresponde al punto “B”, que por esta razón, se denomina “IEC knee”, el que como se aprecia, determina un valor de voltaje más elevado que el “ANSI knee”; es decir, según la IEC, el límite de la zona considerada lineal es superior al determinado por ANSI.

e. Burden normalizados

Como se dijo, el burden de un transformador de corriente corresponde a la carga conectada en los terminales del devanado secundario. El término burden se usa para diferenciar la carga del transformador de corriente, de la impedancia que presenta el circuito de potencia.

El burden nominal de un transformador de corriente corresponde a la máxima carga que se le puede conectar en forma permanente, sin exceder los valores máximo de error de razón y ángulo indicados por el fabricante.

La Tabla 2.7 indica valores de burden normalizados.

Tabla 2.7.- Burden Standard para Transformadores de Corriente con 5 A Secundarios

Designación Del Burden	Resistencia [Ω]	Inductancia [mHy]	Impedancia [Ω, a 60 Hz]	Volt-Amp (con 5 A sec.)	Factor de Potencia
Burden para Relés					
B-1	0,5	2,3	1,0	25	0,5
B-2	1,0	4,6	2,0	50	0,5
B-4	2,0	9,2	4,0	100	0,5
B-8	4,0	18,4	8,0	200	0,5
Burden para Instrumentos					
B-0,1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
B-0,2	0,18	0,232	0,2	5,0	0,9
B-0,5	0,45	0,580	0,5	12,5	0,9
B-0,9	0,81	1,040	0,9	22,5	0,9
B-1,8	1,62	2,080	1,8	45,0	0,9

f. Precisión del T/C utilizado en protecciones

El comportamiento de un relé de protección depende de la clase de precisión que el T/C mantenga no sólo a corriente nominal sino que también para las corrientes de falla. El grado de precisión para altas corrientes depende de la sección transversal del núcleo y del número de vueltas del secundario. Mientras mayor sea la sección transversal del T/C, mayor es el flujo magnético que puede desarrollarse antes de alcanzar el punto de saturación.

La saturación del T/C genera un alto error en la razón de transformación. Por otro lado, un gran número de vueltas en el devanado secundario requiere de un menor flujo magnético para inducir la corriente secundaria que debe circular a través del relé.

Al respecto, existen diversas formas de determinar el comportamiento de un T/C, tanto en forma analítica como por aplicación de las normas. A continuación se considerarán algunas de ellas.

f.1. Cálculo directo

Se hace uso de la fórmula clásica del transformador, es decir, la ecuación (2.13), que corresponde a la expresión general de tensión inducida en la bobina de un transformador de N espiras, con núcleo de sección A, a una densidad de flujo máxima B_{max} y frecuencia f, despreciando la resistencia óhmica y la ecuación (2.14) que relaciona la tensión secundaria correspondiente a la suma de las caídas debidas a la circulación de corriente I_2 por las impedancias de carga Z_b , de fuga Z_e y de los conductores Z_L :

$$V_{sec} = 4,44 f N A B_{max} \quad (2.13)$$

$$V_{sec} = I_2 (Z_b + Z_e + Z_L) \quad (2.14)$$

De donde se puede obtener:

$$B_{max} = \frac{I_2 (Z_b + Z_e + Z_L)}{4,44 f N A} \quad (2.15)$$

Si el B_{max} resultante es mayor que el valor correspondiente al del material del núcleo, el T/C no podrá usarse sin que los errores de medida sean mayores que los nominales

f.2. Por aplicación de las normas ASA (ASA C57.13-1954)

Estas normas especifican generalmente, el voltaje máximo que puede obtenerse en bornes secundarios, sin exceder el error especificado. En el caso de las normas ASA (American Standard Association), se consideran los siguientes aspectos:

- **Tipo de T/C:** H, de alta impedancia interna y L, de baja impedancia interna
- **Precisión de sobrecorriente:** 2,5 y 10% de error nominal de razón
- **Tensiones secundarias:** 50-100-200-400-800 Volts.
- **Corrientes nominales secundarias:** 0,1-1,0-5,0 Amperes. Los valores mas bajos se usan cuando la carga secundaria se encuentra alejada de los TT/CC. El valor de uso normal es de 5,0 Amperes.
- **Factor de potencia de la carga:** 0,5 ó 0,9 (Ambos inductivos)

La norma ASA designa a los TT/CC por medio de dos cifras y una letra colocada entre

ellas. (Además de los valores usuales como: razón de transformación, corriente nominal secundaria, etc.)

La primera cifra indica el error máximo de razón que puede producirse siempre que no se exceda el voltaje en bornes secundarios que especifica la segunda cifra. La letra colocada al centro puede ser H ó L.

En los transformadores tipo H, las dos cifras mencionadas son válidas para corrientes secundarias de 5 a 20 veces la nominal (Figura 2.23, T/C tipo 2,5H400). En los transformadores tipo "L", las cifras tienen validez para 20 veces la corriente nominal, solamente (Figura 2.24, T/C tipo 2,5L400).

De las figuras se desprende que en el T/C tipo 2,5H400 es posible obtener la tensión secundaria nominal, para cargas comprendidas entre 4 y 16 ohm, con un error $\leq 2,5\%$ y que en el T/C tipo 2,5L400, la tensión secundaria nominal sólo se puede obtener con 4 ohm y 100 Amp, con el mismo error máximo (En ambos casos la corriente nominal secundaria es de 5 Amp.)

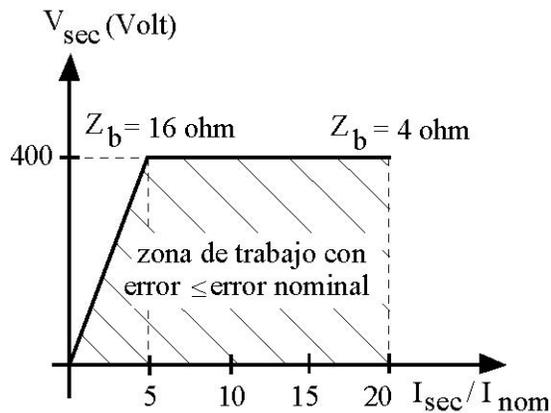


Figura 2.23.- Gráfico para T/C tipo 2,5H400

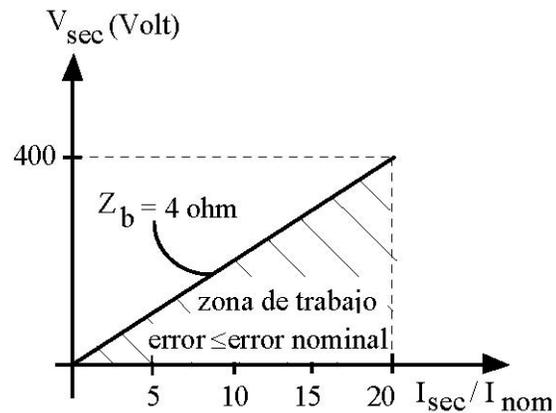


Figura 2.24.- Gráfico para T/C tipo 2,5L400

f.3. Por aplicación de las normas ANSI/IEEE (ANSI/IEEE Standard C57.13-1978) [11],[12]

Las norma ANSI/IEEE C57.13-1978 definen las clases de precisión de los T/C con las letras T y C junto a un número de clasificación. La letra T (clase H, antes de 1968) indica que este error ha sido determinado experimentalmente mientras que la letra C (Clase L, antes de 1968) indica que el error inducido en la razón de transformación puede calcularse. Para los transformadores Clase T, se entregan curvas de sobrecorriente, que relacionan la magnitud de las corrientes primaria y secundaria, para un rango entre 1 y 22 veces la corriente primaria nominal, considerando una curva para cada valor de burden nominal. Para la clase C, el número de clasificación indica el voltaje que debe inducirse en el secundario con una carga normal (burden según lo especificado en Tabla 2.7) y operando con una corriente igual a 20 veces la corriente nominal primaria sin que se exceda en más de un 10% el error en la razón de transformación. Aún más, el error de razón no debiera exceder del 10% para ninguna corriente en el rango de 1 a 20 veces la corriente nominal. En la Figura 2.26 se muestran estas curvas para las clases C100 a C800, que corresponden a los burden B-1 a B-8 dados por la Tabla 2.7, respectivamente.

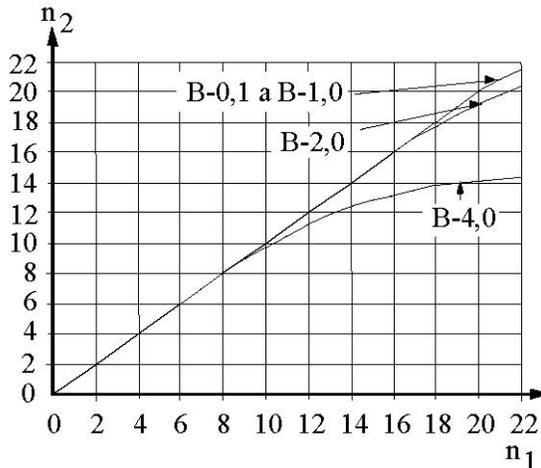


Figura 2.25.- Curvas típicas de relación de sobrecorriente para T/C clase T

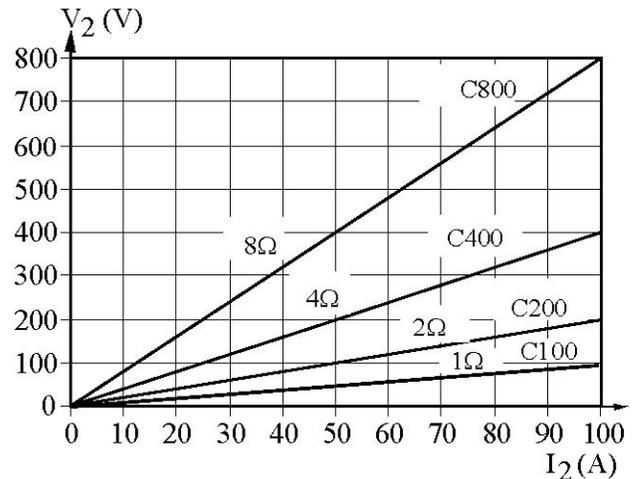


Figura 2.26.- Límites de voltaje secundario para varios T/C clase C

Los transformadores Clase T, agrupan a la mayoría de los transformadores del tipo bobinado, o bien aquellos en los cuales el flujo de dispersión tiene un efecto apreciable en la razón de transformación. Los transformadores Clase C agrupan a los T/C tipo bushing, cuyas bobinas se encuentran uniformemente distribuidas, o cualquier otro tipo de T/C cuyo flujo magnético de dispersión tenga un efecto despreciable en la razón de transformación.

f.4. Clases de precisión según IEC

Las normas IEC distinguen entre T/C para uso en instrumentación y en protecciones. Los T/C a usarse en sistemas de protecciones se designan con la letra P y se especifican las siguientes características:

- **Potencias nominales:** 2,5-5,0-15 y 30 VA
- **Clases de precisión:** 5 y 10%
- **Factores límites de precisión:** 5-10-15-20 y 30.
- **Corrientes nominales secundarias:** 1,0-2,0 y 5,0 Amperes. El valor preferido es de 5,0 Amperes.

Por ejemplo, un T/C designado como **15 VA Clase 10 P 20**; significa que su capacidad permanente es de 15 VA, con un error no mayor del 10%, siempre que su voltaje secundario no sea mayor de 20 veces el nominal. En este caso, con 5 A secundario, el voltaje secundario nominal es de 3 Volt ($15/5$) y por lo tanto el voltaje máximo secundario es de 60 Volt. Por otra parte, el burden permisible es de $0,6 \text{ ohm } (\frac{15}{5^2})$.

g. Clases de precisión para T/C utilizados en medidas

Las normas ASA para TT/CC destinados a ser usado en medidas, han estandarizado (C57.13), un método de clasificación de la precisión. Como ésta depende de la carga, se han designado burden normalizados, los cuales cubren los rangos que se encuentran normalmente en la práctica y que se indican en la Tabla 2.7.

La Tabla 2.8 siguiente, indica los límites de FCR y FCT. Ellos han sido establecidos con el

requisito de que el factor de potencia de la carga esté dentro de los valores fijados en ésta. Si el factor de potencia está fuera de estos límites, el FCT también quedará fuera del margen especificado.

Tabla 2.8.- Clases de precisión para TT/CC usados en medidas

Clases de Precisión	Límites del FCR y FCT				Límites del factor de potencia (en atraso) de la carga	
	100% de la corriente nominal		10% de la corriente nominal		Mínimo	Máximo
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		
1,2	0,988	1,012	0,976	1,024	0,6	1,0
0,6	0,994	1,006	0,988	1,012	0,6	1,0
0,3	0,997	1,003	0,994	1,006	0,6	1,0
0,5	0,995*	1,005*	0,995	1,005	0,6	1,0

* Estos valores también son aplicables para el 50% de la corriente nominal.

Las normas ASA especifican, al igual que en caso de los TT/PP, la relación que existe entre el error angular β y los factores de corrección, FCR y FCT, la que se puede escribir como:

$$\beta = 0,75 \frac{\text{FCR} - \text{FCT}}{\text{FCT}} \text{ (rad)} \quad (2.16)$$

$$\beta = 2600(\text{FCR} - \text{FCT}) \text{ (min)} \quad (2.17)$$

La expresión (2.17) está graficada en la Figura 2.27 para la clase 0,3; considerando un 10% y un 100% de la corriente nominal.

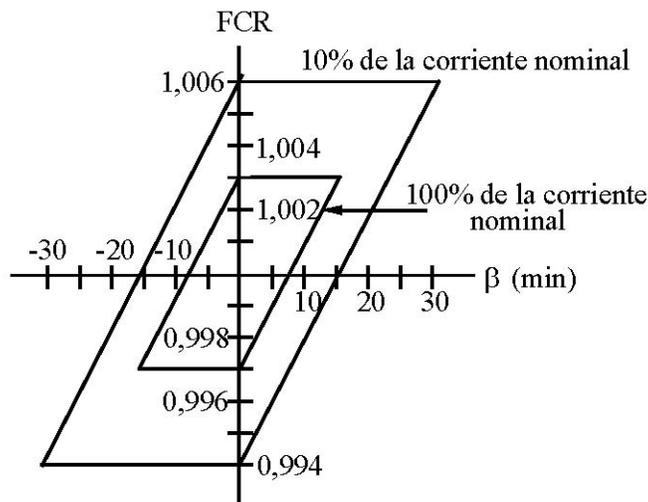


Figura 2.27.- Paralelogramo de la clase de precisión 0,3 de TT/CC usados en medidas

De la Figura 2.27 se puede deducir que para pertenecer a la clase de precisión 0,3 el Factor de Corrección de la Relación y el ángulo de fase, deben quedar dentro de los paralelogramos interior y exterior para el 100% y 10% de la corriente nominal, respectivamente, con la carga secundaria especificada.

h. Especificaciones técnicas de un T/C

Las principales características técnicas que deben ser indicadas al momento de seleccionar un T/C son las siguientes:

h.1. Corriente nominal

La corriente nominal máxima debiera ser igual o mayor a la máxima corriente de operación del circuito en donde se conectará el T/C. La magnitud de la corrientes de inrush también debe ser considerada, específicamente con respecto al efecto que puede tener en instrumentos de medidas o en relés de protecciones.

h.2. Factor de sobrecarga

Es una constante dada por el fabricante, que indica cual es la máxima corriente primaria que puede circular a través del T/C en forma permanente sin exceder la temperatura máxima de los enrollados para una temperatura ambiente de 30° C. El factor de sobrecarga (Rating Factor RF) normalizado es de 1,0-1,33-1,5-2,0-3,0 o 4,0. Por ejemplo un T/C de 100/5 con un RF igual a 1,5 puede operar en forma permanente con 150 A.

h.3. Corriente térmica de tiempo corto. Límite de solicitaciones térmicas

Es el valor efectivo de la máxima corriente que, circulando durante un segundo por el primario de un T/C con uno de sus secundario en cortocircuito, provoca elevaciones de temperatura que no exceden de 250 ó 350°C, según la clase de aislación sea A ó B. Este límite, designado como I_{th} es entregado por el fabricante y se da como un número de veces la corriente nominal del T/C durante un segundo. Para la correcta aplicación de un T/C, y considerando tiempos de duración de la falla de hasta 5 segundos, es conveniente que se cumpla la condición dada por la ecuación (2.18), donde I_{cc} es el valor efectivo de la máxima corriente de cortocircuito en el punto de instalación del T/C y f es la frecuencia del sistema:

$$I_{th} \geq I_{cc} \sqrt{t + 0,05 * 50/f} \quad (2.18)$$

h.4. Límite de solicitaciones mecánicas

Es el valor efectivo de la máxima corriente que puede circular por el primario de un T/C, sin que sus bobinas acusen una deformación permanente. Estos valores rara vez se presentan por lo que este límite no tiene aplicación práctica.

h.5. Límite de solicitaciones dinámicas. Corriente mecánica de tiempo corto

Es la máxima corriente asimétrica de cortocircuito que el T/C es capaz de soportar sin que se dañe físicamente. Este tipo de corriente se especifica solamente en T/C tipo bobinado. Corresponde al valor máximo de la amplitud de la corriente del primer ciclo que circula por la bobina primaria estando el secundario en cortocircuito. Se le denomina también corriente dinámica y se define según (2.19)

$$I_{din} = 1,8 \sqrt{2} I_{th} = 2,542 I_{th} \quad (2.19)$$

h.6. Voltaje nominal

Corresponde a la tensión entre líneas del circuito de potencia donde se va a instalar el transformador de corriente. Los T/C pueden operar hasta con un 10% por sobre el voltaje nominal.

h.7. Tensión de Impulso

El BIL (Basic Impulse Voltage Level) se especifica de acuerdo al voltaje nominal del sistema. La Tabla 2.9 muestra los valores del BIL de los T/C de acuerdo a la tensión nominal del sistema.

Tabla 2.9.- Basic Impulse Nominal Levels para Transformadores de Corriente

Voltaje Nominal del Sistema	Máxima Tensión fase-neutro	BIL and full wave crest
kV	kV	kV
0,60	0,38	10
2,40	1,53	45
4,80	3,06	60
8,32	5,29	75
13,80	8,90	110 ó 95
25,00	16,00	150 ó 125
34,50	22,00	200 ó 150

i. Polaridad y conexiones

Las polaridades relativas del primario y secundario de un T/C se identifican colocando marcas y/o símbolos H_1 , H_2 para los terminales primarios y X_1 , X_2 para los terminales del secundario. Según esta convención, si H_1 y X_1 son bornes de igual polaridad, cuando la corriente primaria “entra” por H_1 , la corriente secundaria “sale” por X_1 .

En cuanto a las conexiones usadas en sistemas trifásicos, se pueden dar varias posibilidades dependiendo de lo que se quiera conseguir. Entre las más utilizadas están las indicadas en los acápites siguientes:

i.1. Conexión estrella: Particularmente apropiada cuando se requiere obtener corrientes de secuencia cero. Figura 2.28.

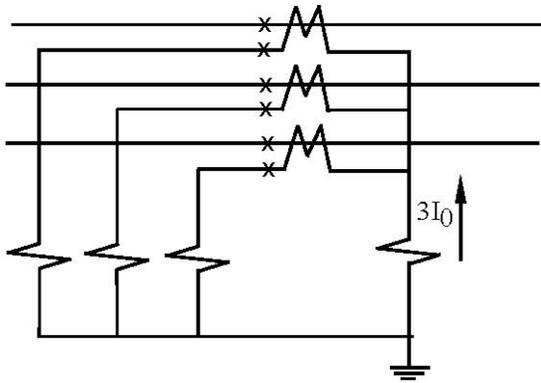


Fig. 2.28.- TT/CC conectados en estrella

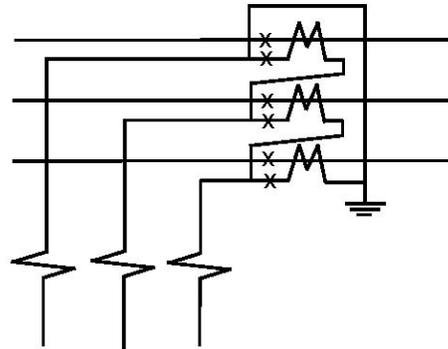


Figura 2.29.- TT/CC conectados en triángulo

i.2. Conexión triángulo: Es útil en aplicaciones a protecciones de distancia. Figura 2.29.

i.3. Conexiones especiales: Utilizan sólo dos transformadores de corriente, por lo que son económicamente más convenientes.

Las Figuras 2.30 y 2.31 muestran estos tipo de conexiones.

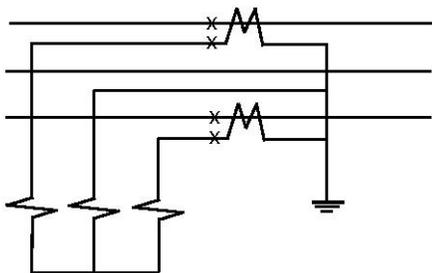


Figura 2.30.- Conexión de dos TT/CC normal

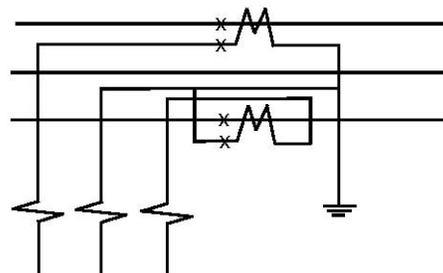


Figura 2.31.- Conexión de dos TT/CC cruzada

j. Aplicaciones

Los TT/CC se usan tanto en medidas como en protecciones. Cuando se usan para medidas, requieren de una alta precisión y de una característica idealizada como la que se muestra en la Figura 2.32, con el fin de que protejan adecuadamente a los instrumentos conectados a sus secundarios cuando existan altas corrientes en el sistema de potencia en que se encuentran, como es el caso de una falla, por ejemplo.

Para uso en protecciones, en cambio, es conveniente que no exista saturación con elevadas corrientes primarias, es decir, que se mantenga una precisión aceptable cuando ocurran fallas en el sistema. Para este caso es conveniente una característica como la de la Figura 2.33.

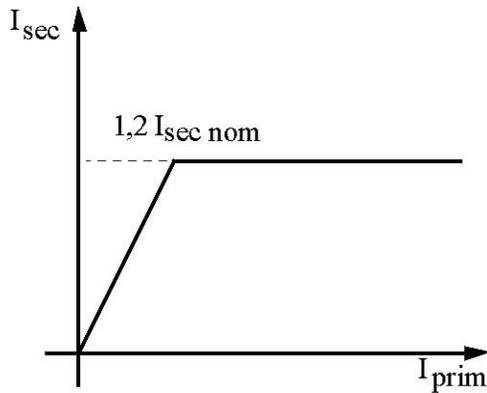


Figura 2.32.- Característica idealizada de TT/CC usados en medidas

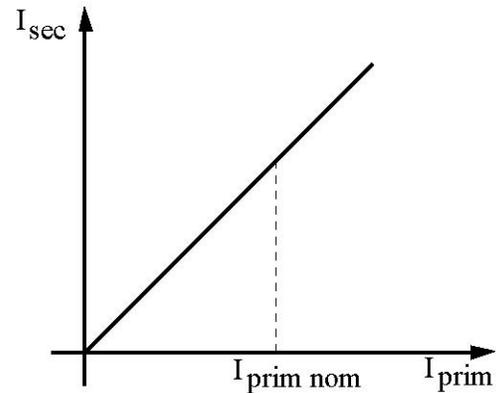


Figura 2.33.- Característica idealizada de TT/CC usados en protecciones

En aplicaciones de medidas donde se requiere una buena exactitud, son igualmente importantes los errores de razón y de ángulo. En protecciones, generalmente, son más importantes los errores de razón. Los errores de ángulo adquieren cierta importancia en aplicaciones de protecciones que necesiten la tensión y la corriente (como en el caso de protecciones de potencia, de distancia) o bien en el caso de las protecciones diferenciales.

2.3. Interruptores y Circuitos de control

Como se dijo anteriormente, tanto los interruptores como los circuitos de control asociados a éstos forman parte del sistema de protecciones y cumplen sus propios objetivos como se verá a continuación.

2.3.1. Interruptores de potencia o de potencia

Son los elementos destinados a interrumpir la continuidad del circuito eléctrico, ya sea voluntariamente por condiciones de operación del sistema, o bien, por la necesidad de aislar un equipo o una parte del circuito que ha fallado. En media y alta tensión la operación de un interruptor obedece a la señal de un relé encargado de vigilar la correcta operación del sistema eléctrico donde está conectado. La apertura de los contactos del interruptor es comandada por un circuito de control, que una vez recibida la señal del relé, energiza el mecanismo encargado de abrir los contactos. Los equipos de control asociados con la operación de interruptores de potencia tienen la misma importancia desde el punto de vista de mantención y de selección que la parte de potencia (contactos principales y auxiliares, cámara de apagado de arco).

El diseño de interruptores es difícil puesto que deben cumplir condiciones extremas de operación, dependiendo de las circunstancias. Deben conducir la corriente en la mejor forma posible cuando están cerrados, sin introducir pérdidas ni calentamiento de importancia. Cuando están abiertos, en cambio, deben impedir totalmente el paso de la corriente sin presentar fugas de importancia.

El principio básico de funcionamiento es bastante simple: Un contacto que se encuentra fijo y un contacto móvil que se separa de éste en forma rápida para crear un espacio no conductor entre ellos. La separación se logra, generalmente, por la acción de un resorte que se comprime con la ayuda de un motor auxiliar. El cambio de estado debe ser muy rápido, aunque no instantáneo, para

no generar sobretensiones excesivas en el SEP.

a. Formación del arco eléctrico

Cuando el interruptor comienza una carrera de apertura, la superficie de contacto comienza a disminuir, con lo cual aumenta la densidad de corriente dando origen a un calentamiento del material. A medida que aumenta la separación de los contactos el aumento de temperatura se hace cada vez más rápido, calentando fuertemente el ambiente en torno al último punto de contacto, con lo cual se produce la ionización del gas circundante lo que permite el paso de la corriente a través del espacio que separa los contactos. Esta circulación de corriente se manifiesta en la forma de un arco eléctrico que es autosostenido por su elevada temperatura. Aunque la corriente alterna pasa por cero en cada semiciclo, la inercia térmica mantiene las condiciones adecuadas para reencender el arco.

Un oscilograma de los contactos de un interruptor en proceso de apertura (Figura 2.34), muestra que la tensión que aparece entre ellos está en fase con la corriente; es decir, el arco es de tipo resistivo y es relativamente constante durante el semiciclo, a pesar de que la corriente varía en forma sinusoidal. La Figura 2.34 muestra que la tensión crece por sobre el valor de encendido V_a , tanto al comenzar el arco (tensión de reencendido V_R) como al extinguirse éste (tensión de extinción V_E) y además que $V_R > V_E$.

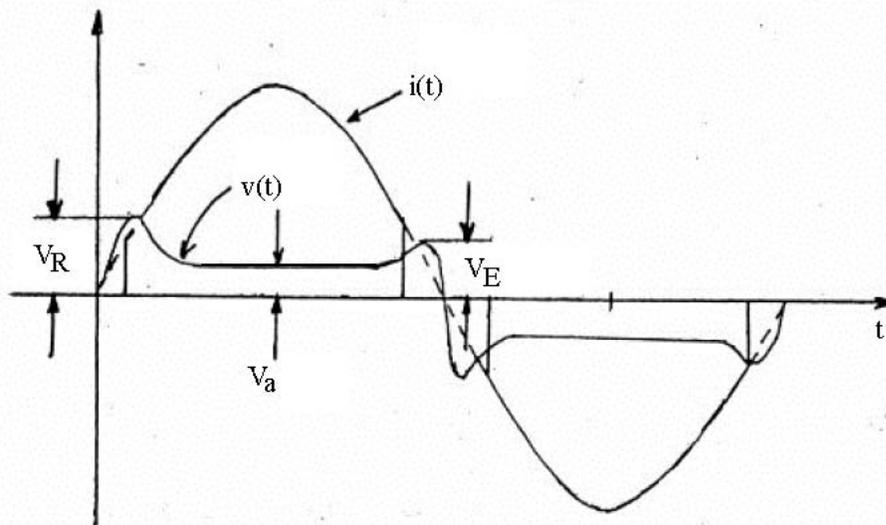


Figura 2.34.- Oscilograma de corriente y tensión entre los contactos de un interruptor en proceso de apertura

Existe un breve lapso al final de cada semiperíodo, en que la corriente se interrumpe debido a que su valor es tal que no logra mantener el grado necesario de ionización y el arco se enfría. Estas pausas de corriente cero va aumentando hasta que en algún momento la tensión impresa por el sistema es menor que V_R y el arco se apaga definitivamente.

El proceso descrito permite decir que la interrupción de circuitos resistivos es relativamente simple. Sin embargo, la interrupción es particularmente difícil en circuitos fuertemente inductivos (ó capacitivos), dado que la tensión impresa por el sistema es máxima cuando la corriente pasa por cero. Según esto, el problema fundamental en el diseño de interruptores es el medio que debe usarse para enfriar el arco y extinguirlo, en el breve lapso en que la corriente pasa por cero.

b. Interrupción de una línea fallada

El circuito de la Figura 2.35 es una representación de esta situación. En este circuito se ha supuesto concentrada la capacitancia C de la línea en un sólo punto; R y L representan la resistencia y la inductancia de los elementos del sistema conectados entre la fuente de alimentación de voltaje v_g y el punto en donde se produce la falla. Inicialmente el interruptor AB está cerrado y el voltaje entre fase y tierra v_c varía sinusoidalmente. Supongamos que se produce un cortocircuito en F en el instante t_1 cuando el voltaje es máximo. El voltaje v_c cae bruscamente a cero (Figura 2.36) y se establece una corriente de cortocircuito atrasada en casi 90° al voltaje, dado que la resistencia R es pequeña comparada con la inductancia L . Tan pronto como el cortocircuito es desconectado por el interruptor, en t_2 , el voltaje sube rápidamente y debido a la inductancia del circuito sobrepasa el valor máximo de v_c y a no ser por la resistencia podría alcanzar a dos veces el valor máximo del voltaje nominal. El voltaje oscilará entonces en forma amortiguada hasta recuperar la forma de onda normal. Como el borne B del interruptor está conectado a tierra a través de la falla, el voltaje entre los contactos v_R será igual al voltaje v_c .

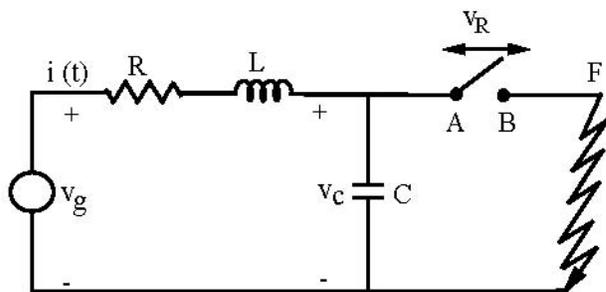


Figura 2.35.- Circuito equivalente de la apertura de una línea en cortocircuito

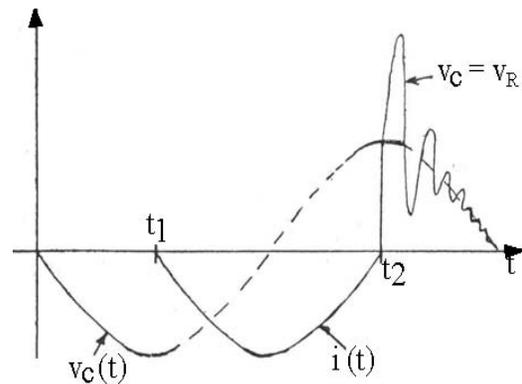


Figura 2.36.- Oscilograma de la apertura de una línea en cortocircuito

c. Apertura de una línea larga en vacío

El sistema posee una gran capacitancia y se puede representar por el circuito equivalente LC de la Figura 2.37, donde se ha despreciado la resistencia de la línea. La Figura 2.38 muestra un oscilograma de esta situación; al abrir el interruptor se establece un arco eléctrico cuyo corte se produce cuando la corriente pasa por cero en $t = t_1$ por ejemplo.

El condensador queda cargado con $V_c = -V_g$ (Valores máximos) y la tensión entre los contactos $v_R = v_g - v_c$ crece desde cero hasta $2V_g$ medio ciclo después según la curva mostrada. Si el arco se vuelve a encender, v_R baja casi hasta cero (tensión de combustión V_a) y al circuito LC se aplica una tensión $V_g + V_R \approx 3V_g$. Existe una oscilación a frecuencia $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ (comparativamente alta) que lleva la tensión en el condensador a $+3V_g$ en el instante en que la corriente vuelve a pasar por cero. Al cortarse el arco, el condensador puede quedar cargado a $+3V_g$, con lo que $v_R = v_g - v_c$ crece hasta hacerse Aproximadamente igual a $-4V_g$ y así sucesivamente, pudiendo hacer que la tensión en el condensador alcance a $-5V_g$. En este análisis se ha supuesto que las reigniciones ocurren en los instantes más desfavorable, es decir, cuando se producen los voltajes transientes más elevados. Es muy importante impedir que el arco se vuelva a iniciar en forma sucesiva, porque las sobretensiones producidas son peligrosas para los equipos del sistema, mientras que si el arco persiste, podría llegar a quemar los contactos de los interruptores.

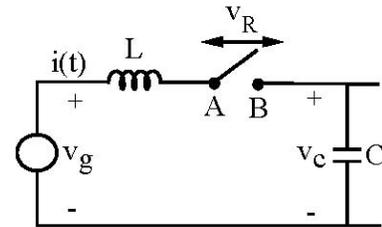


Figura 2.37.- Circuito equivalente a la apertura de una línea en vacío

d. Características de un interruptor

El buen funcionamiento de un interruptor que abre con carga depende de que la rigidez dieléctrica que puede ofrecer al paso del arco, tenga una velocidad de crecimiento adecuadamente elevada con respecto del voltaje establecido por el circuito externo entre los contactos, durante la carrera de apertura. Para cumplir con esta premisa en una aplicación en particular, se requiere especificar una serie de factores que son parte de las características del interruptor. Entre estos factores se destacan:

d.1. Voltaje nominal

Es el valor efectivo máximo de la tensión entre fases, con la cual puede operar el interruptor en forma permanente. Se elige siempre un valor algo superior a la tensión nominal del SEP, por ejemplo: 15 kV, para un sistema de 13,8 kV.

Los valores de tensión están especificados para operación en lugares donde la altura no supere los 3.300 pies (1.000 metros.) sobre el nivel del mar. Un interruptor puede utilizarse con alturas mayores, pero su tensión nominal sufre una degradación o derrateo (derating), según la Tabla 2.10 siguiente:

Tabla 2.10.- Factor de degradación o derrateo de la tensión nominal

Altura en pies	Factor de derrateo
3.300	1,00
4.000	0,98
5.000	0,95
10.000	0,80

Para alturas superiores a los 10.000 pies, es necesario estudiar el problema en particular, ya que la capacidad de interrupción también puede resultar afectada.

d.2. Corriente nominal

Es el valor efectivo de la mayor corriente que los contactos pueden soportar en forma permanente, sin calentarse excesivamente, considerando una altura máxima de 3.300 pies. En el caso de que ésta sea superior, la corriente nominal se degrada de acuerdo a los valores dados por la Tabla 2.11 siguiente:

Tabla 2.11.- Factor de derrateo de la corriente nominal

Altura en pies	Factor de derrateo
3.300	1,0
4.000	0,996
5.000	0,99
10.000	0,96

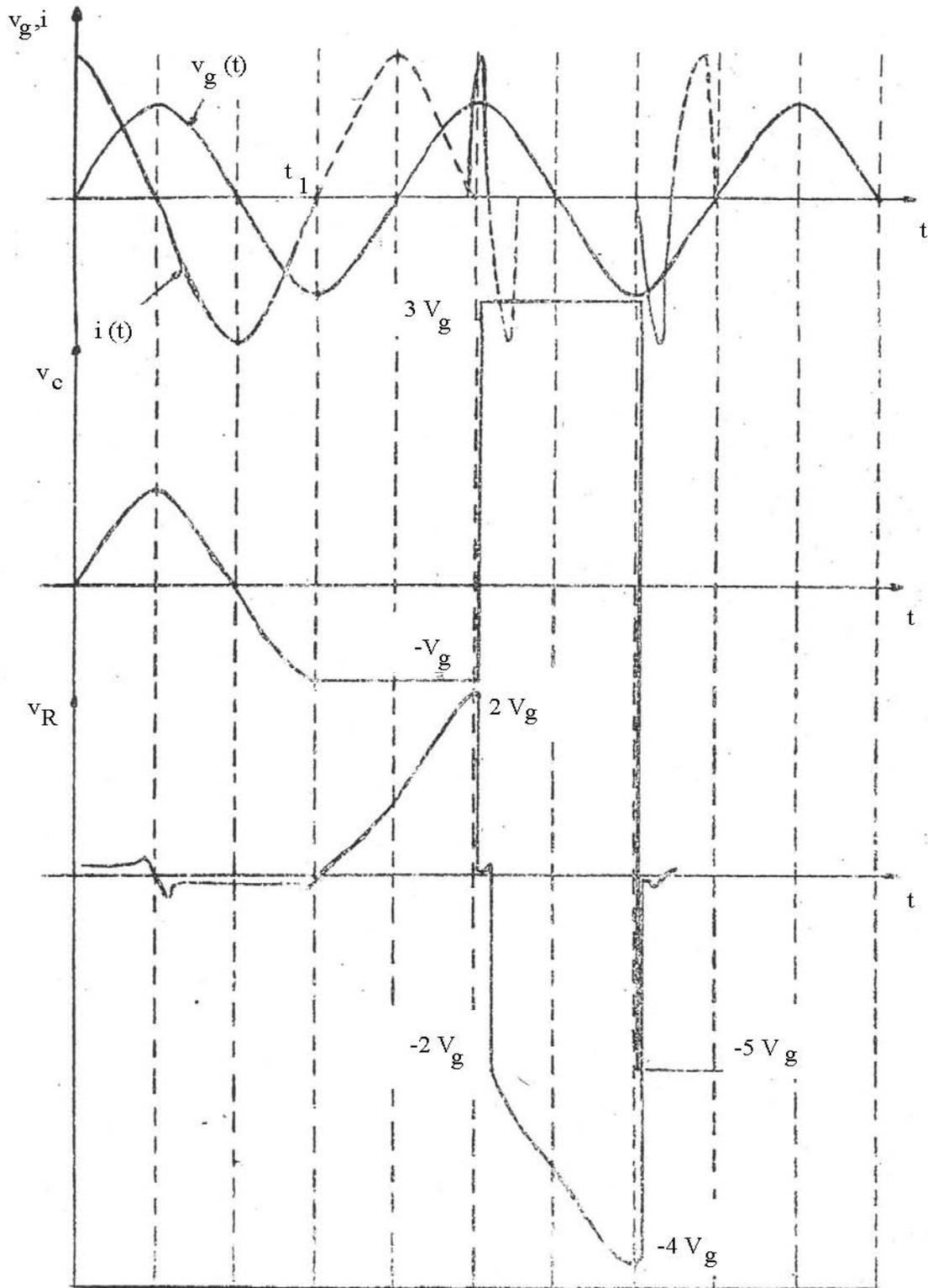


Figura 2.38.- Oscilograma de la interrupción de una línea en vacío

d.3. Corriente de paso momentánea

Es el valor efectivo de la corriente por polo que puede circular durante un lapso determinado. En general su valor es mayor que el de la corriente máxima de interrupción y queda determinado por los límites térmicos y de fuerzas magnéticas desarrollados en el interruptor.

d.4. Corriente de interrupción nominal

Es el valor efectivo de la corriente total por polo que el interruptor puede soportar en el momento de la apertura (incluyendo la componente de corriente continua), si la tensión del sistema es la nominal. Para obtener la corriente de ruptura a una tensión de operación inferior a la nominal, se puede usar la siguiente expresión:

$$I_{VO} = I_{VN} \frac{V_N}{V_O} \quad (2.20)$$

Donde:

I_{VO} : Corriente de interrupción al voltaje de operación

I_{VN} : Corriente de interrupción nominal (a tensión nominal)

V_N : Voltaje nominal (entre líneas)

V_O : Voltaje de operación (entre líneas)

El límite superior es el valor de la corriente máxima de interrupción, el cual no puede ser sobrepasado cualquiera que sea el voltaje de operación.

d.5. Capacidad de ruptura simétrica

Es la potencia aparente trifásica que considera la tensión nominal y la corriente nominal de interrupción. Es constante dentro de cierto rango de tensiones inferiores a la nominal, es decir, los MVA nominales de interrupción simétrica son:

$$MVA_N = \sqrt{3} V_N I_{VN} \quad (2.21)$$

O bien:

$$MVA_N = \sqrt{3} V_O I_{VO} \quad (2.22)$$

Si se considera que la corriente contiene la componente unidireccional (continua), se pueden emplear estas mismas relaciones, introduciendo un coeficiente comprendido entre 1,0 y 1,6; determinando de esta forma los MVA de interrupción asimétricos. Estos coeficientes se pueden obtener también a partir de curvas que son función de la relación X/R en el punto de falla y del tiempo transcurrido hasta que los contactos del interruptor comienzan a separarse.

Algunos ejemplos de interruptores de poder se indican en la Tabla 2.12

Tabla 2.12.- Características de interruptores de poder

Tensión del sistema (kV)	Rangos de Corriente Nominal (A)	Corrientes de Cortocircuito simétrico (kA)	Capacidad cortocircuito (MVA)
66	800-2.000	13,1-21,9	1.500-2.500
132	600-1.600	10,9-15,3	2.500-3.500

d.6. Tiempo de interrupción nominal

Es el intervalo máximo admisible entre la energización del circuito de operación del interruptor y la extinción del arco en los tres polos. Se mide normalmente en ciclos de la onda fundamental de 50 Hz. (Si los interruptores son de procedencia americana, la base puede ser 60 Hz). Por ejemplo, los interruptores antiguos tenían tiempos del orden de 8 ciclos. Un interruptor normal de hoy puede tardar 5 ciclos. En la actualidad hay interruptores que abren en 3, e incluso 2 ciclos. Por ejemplo, un interruptor del tipo HLR de ASEA, de pequeño volumen de aceite, abre en 2,5 ciclos en 50 Hz, o bien, en 3 ciclos en 60 Hz.

En general, los tiempos de apertura de los interruptores van de 0,05 a 0,10 seg. Por ejemplo, un interruptor moderno en base a soplo de aire abre sus contactos en 0,04 seg. y requiere entre 0,01 y 0,02 seg adicionales en extinguir el arco. Este retardo debe tenerse en cuenta cuando se trata de coordinar protecciones en base a tiempos.

e. Tipos de interruptores de poder de alta y media tensión

e.1. Interruptores en aceite

Existe o se introduce aceite aislante durante la apertura de los contactos. Se clasifican en:

– **Interruptores de gran volumen de aceite**

Los contactos fijos y móviles se encuentran alojados en el interior de un estanque metálico lleno de aceite (Figura 2.39). El calor del arco evapora instantáneamente el aceite que lo rodea, de tal modo que se genera hidrógeno a presión, el cual, debido a su gran conductividad térmica y al carácter explosivo que le da la presión, favorecida por un diseño adecuado de la cámara de extinción, contribuyen a ahogar rápidamente al arco. Este tipo de interruptor es muy robusto, sencillo, comparativamente silencioso, fácil de mantener y pueden conectarse T/C tipo bushing de entrada.

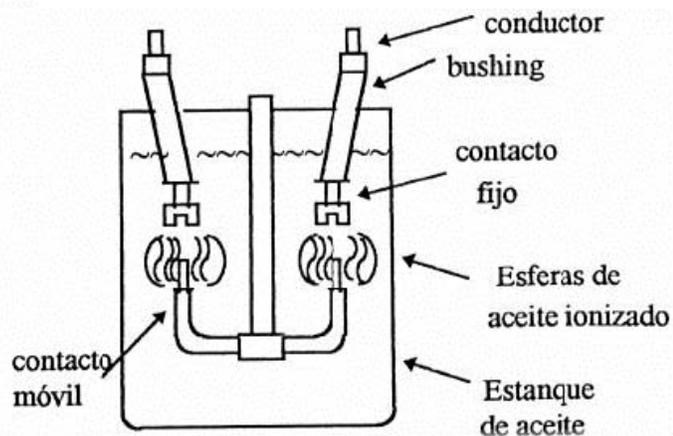
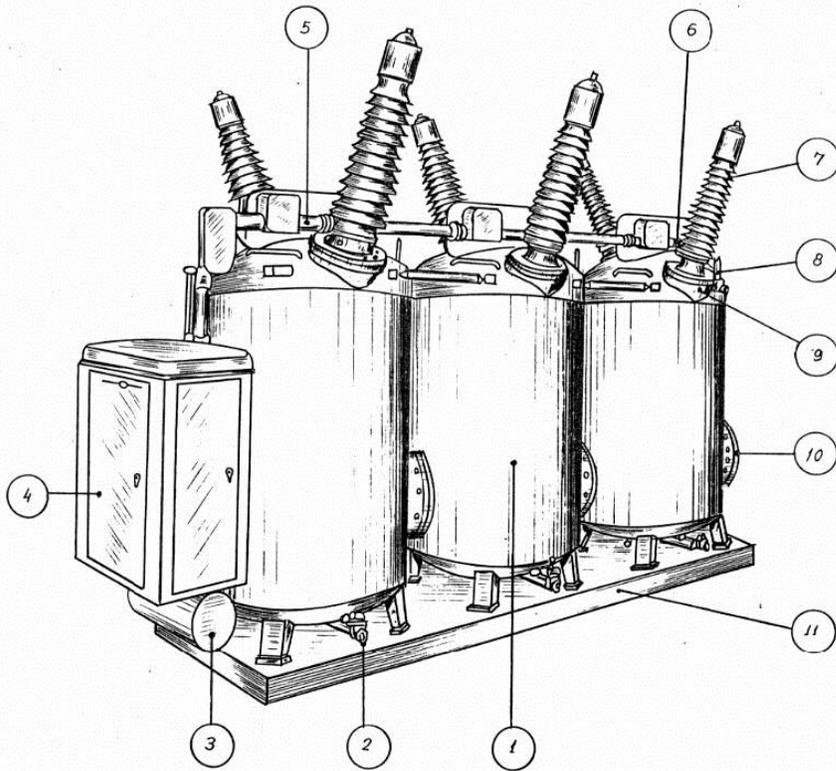


Figura 2.39.- Esquema de un polo de interruptor en aceite

Como inconvenientes o desventajas cabe mencionar, su excesivo peso y tamaño, ya que ocupa una gran cantidad de aceite mineral de alto costo (el estanque puede contener hasta 12.000 litros de aceite), lo que dificulta construir interruptores para tensiones de más de 154 kV, la posibilidad de incendio o explosión, los contactos son grandes y pesados y requieren de frecuentes cambios, la necesidad de inspección periódica de la calidad y cantidad de aceite en el estanque. Por lo tanto no pueden usarse en interiores, ni emplearse en reconexión automática. La Figura 2.40, muestra un interruptor de gran volumen de aceite con tres estanques; uno por polo o por fase.

– Interruptores de pequeño volumen de aceite

En estos interruptores (Figura 2.41 a) se reduce la cantidad de aceite a través de un diseño mas elaborado de la cámara de extinción (Figura 2.41 b). Esta cámara; mas pequeña, puede ser fabricada de material aislante y ponerse a la tensión de la línea, lo que abarata el costo. El aceite es conducido a presión a la zona del arco mediante una bomba que actúa en conjunto con el mecanismo de apertura. En este caso no hay mayores dificultades para colocar cámaras en serie y operar con tensiones tan elevadas como 750 kV.



Detalle de Componentes:

1. Estanque
2. Válvula de Drenaje, para sacar muestras
3. Estanque de aire comprimido
4. Caja del mecanismo de operación
5. Tubos de protección de barras de acoplamiento
6. Resorte de operación
7. Bushing
8. Indicador de nivel de aceite
9. Flange de soporte del bushing
10. Tapa de inspección
11. Fundaciones

Figura 2.40.-
Interruptor trifásico
de gran volumen de
aceite

La cantidad de aceite que requiere este tipo de interruptor es del orden del 2% del anterior, es decir unos 240 litros, como promedio. Como desventajas se pueden mencionar el peligro de incendio y explosión aunque en menor grado comparados a los de gran volumen de aceite, no pueden usarse con reconexión automática, requieren una mantención frecuente y reemplazos periódicos de aceite, es difícil conectar transformadores de corriente y tienen menor capacidad de ruptura.

e.2. Interruptores neumáticos

Uno de los inconvenientes de los interruptores en aceite es el peligro que significa la presencia de un material combustible en las cercanías de una fuente de alta temperatura, como lo es el arco eléctrico. A lo anterior se suma la necesaria mayor preocupación que significa mantener el buen estado del aceite. Por estas razones se usan interruptores que tienen sus contactos en aire.

Entre las ventajas se pueden mencionar, el que no hay riesgos de incendio o

explosión, su operación es muy rápida, pueden emplearse en sistemas con reconexión automática, tienen alta capacidad de ruptura, la interrupción de corrientes altamente capacitivas no presenta mayores dificultades, hay menor daño y más fácil acceso a los contactos, son comparativamente de menor peso.

Presentan sin embargo, algunas desventajas, tales como las siguientes: deben tener una compleja instalación debido a la red de aire comprimido, que incluye motor, compresor, cañerías, etc. y por lo tanto su construcción es más compleja y con mayor costo, requiere de personal especializado para su mantención y son más sensibles a la tensión de reignición del arco.

Se pueden construir como interruptores de aire a presión atmosférica, los que son poco aplicables en sistemas de alta tensión, y de tipo aire comprimido, los que se emplean principalmente en sistemas de alta tensión. A continuación se indican algunos aspectos constructivos y de funcionamiento de cada uno de ellos.

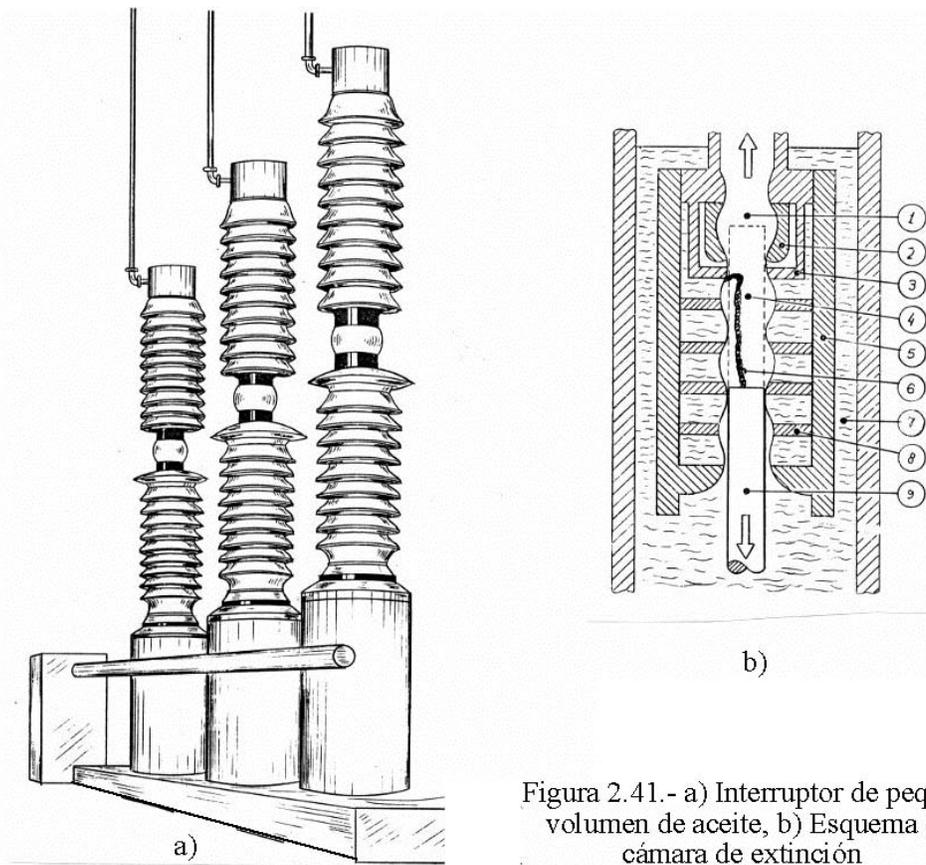


Figura 2.41.- a) Interruptor de pequeño volumen de aceite, b) Esquema de la cámara de extinción

Detalle de componentes en la Figura 2.41 b)

1. Abertura de escape de gases
2. Contacto fijo
3. Anillo apaga chispas
4. Espacio cilíndrico donde se produce el arco
5. Cámara de extinción
6. Arco eléctrico
7. Aceite
8. Discos de material aislante intermedios
9. Varilla móvil

– Interruptores de aire a presión atmosférica

El mecanismo para la extinción del arco consiste exclusivamente en aumentar su longitud, lo que además de ser conseguido por la separación de los contactos, se logra principalmente de dos maneras:

Convección natural: Se disponen los contactos de tal modo que el calor desarrollado en la zona del arco provoque una corriente de aire por convección que lo alargue llevándolo a zonas más frías. Este método es el menos eficiente por lo cual prácticamente no se usa en alta tensión.

Por sopleo magnético: En estos interruptores la corriente eléctrica que forma el arco se hace pasar por bobinas dispuestas de tal modo que por atracción magnética produzcan un alargamiento del arco, haciéndolo describir una trayectoria prefijada a través de un dispositivo “apaga-arco”. La Figura 2.42 muestra en forma esquemática este tipo de interruptores.

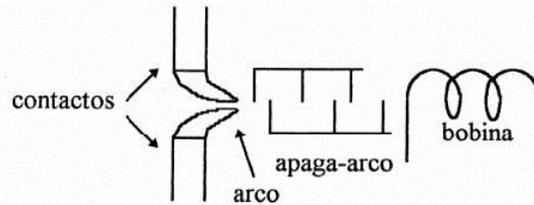


Figura 2.42.- Representación esquemática de un polo de un interruptor de sopleo magnético

– Interruptores de aire comprimido

En este tipo de interruptores, tal como se muestra en la Figura 2.43, por ejemplo, el arco se apaga estirándolo y enfriándolo con ayuda de un chorro de aire que se fuerza a pasar entre los contactos en el proceso de apertura. Las cámaras de extinción están a tensión de la línea y pueden ser unidas en serie para alcanzar cualquier nivel de tensión. Su gran poder de extinción hace que este tipo de interruptor sea el más usado, a tensiones donde no se pueda usar el de gran volumen de aceite. El carácter explosivo de la operación con aire comprimido los hace ser bastante ruidosos. En algunos casos,

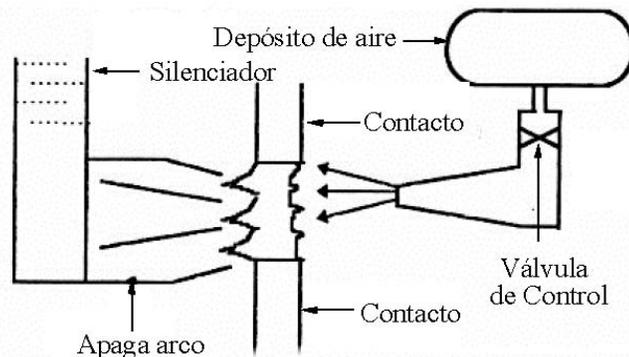
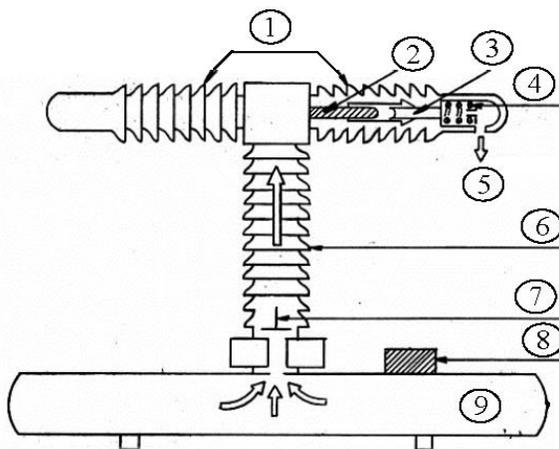


Figura 2.43.- Diagrama esquemático de un interruptor de aire comprimido de chorro transversal

el mecanismo de operación también funciona con aire comprimido.

Las Figuras 2.44 a) y b) muestran esquemáticamente un interruptor de aire comprimido y la sección longitudinal de una cámara de extinción, respectivamente.



Detalle de componentes en la Figura 2.44 a)

- 1. Cámaras de arco
- 2. Contacto fijo
- 3. Contacto móvil
- 4. Resorte de aceleración

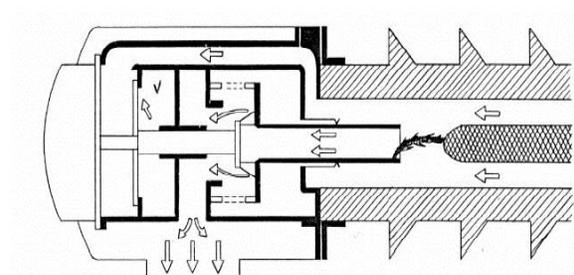


Figura 2.44 a) Esquema de un interruptor de aire comprimido; b) Corte longitudinal de una cámara de extinción

- 5. Escape del aire
- 6. Columna aislante
- 7. Válvula
- 8. Tablero de Control
- 9. Estanque de aire comprimido

El continuo aumento en los niveles de cortocircuito en los sistemas de potencia ha forzado a encontrar formas más eficientes de interrumpir corrientes de fallas que minimicen los tiempos de corte y reduzcan la energía disipada durante el arco. Es por estas razones que se han estado desarrollando con bastante éxito interruptores en vacío y en hexafluoruro de azufre (SF₆).

e.3. Interruptores en vacío

La alta rigidez dieléctrica que presenta el vacío (es el aislante perfecto) ofrece una excelente

alternativa para apagar en forma efectiva el arco. En efecto, cuando un circuito en corriente alterna se desenergiza separando un juego de contactos ubicados en una cámara en vacío, la corriente se corta al primer cruce por cero o antes, con la ventaja de que la rigidez dieléctrica entre los contactos aumenta en razón de miles de veces mayor a la de un interruptor convencional (1 kV por μs para 100 A en comparación con 50 V/ μs para el aire). Esto hace que el arco no vuelva a re-encenderse. Estas propiedades hacen que el interruptor en vacío sea más eficiente, liviano, y económico.

La presencia del arco en los primeros instantes después de producirse la apertura de los contactos se debe principalmente a emisión termoiónica y a emisión por efecto de campo eléctrico. En otras palabras, los iones aportados al arco provienen de los contactos principales del interruptor. Conviene destacar que en ciertas aplicaciones se hace necesario mantener el arco entre los contactos hasta el instante en que la corriente cruce por cero. De esta forma se evitan sobretensiones en el sistema producto de elevados valores de di/dt . La estabilidad del arco depende del material en que estén hechos los contactos y de los parámetros del sistema de potencia (voltaje, corriente, inductancia y capacitancia). En general la separación de los contactos fluctúa entre los 5 y los 10 mm.

La Figura 2.45 muestra un esquema de un interruptor en vacío.

Entre las ventajas, que presenta, se pueden indicar las siguientes: tiempo de operación muy pequeño; en general, la corriente se anula a la primera pasada por cero, la rigidez dieléctrica entre los contactos se restablece rápidamente impidiendo la reignición del arco, son menos pesados y más baratos, prácticamente no requieren mantención y tienen una vida útil mucho mayor que la de los interruptores convencionales.

Como desventajas se pueden mencionar, su baja capacidad de ruptura (de entre 60 a 100 MVA), la posibilidad de generar sobretensiones debido al elevado di/dt .

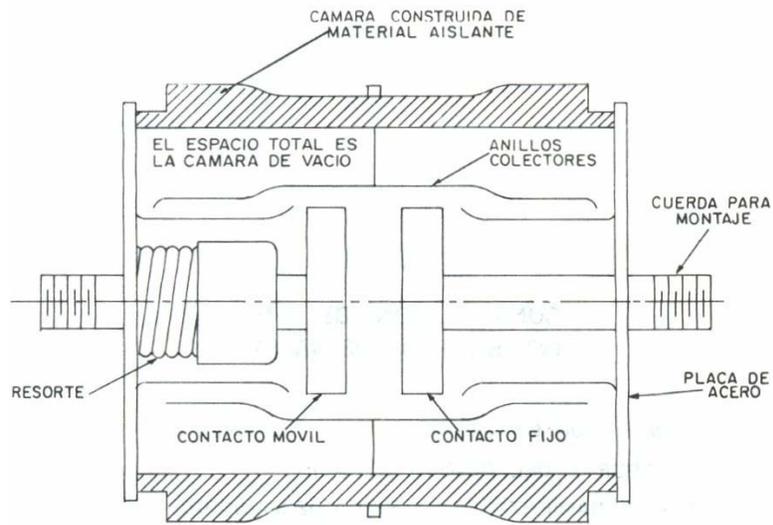


Figura 2.45.- Diagrama esquemático de la sección transversal de un interruptor de alto vacío

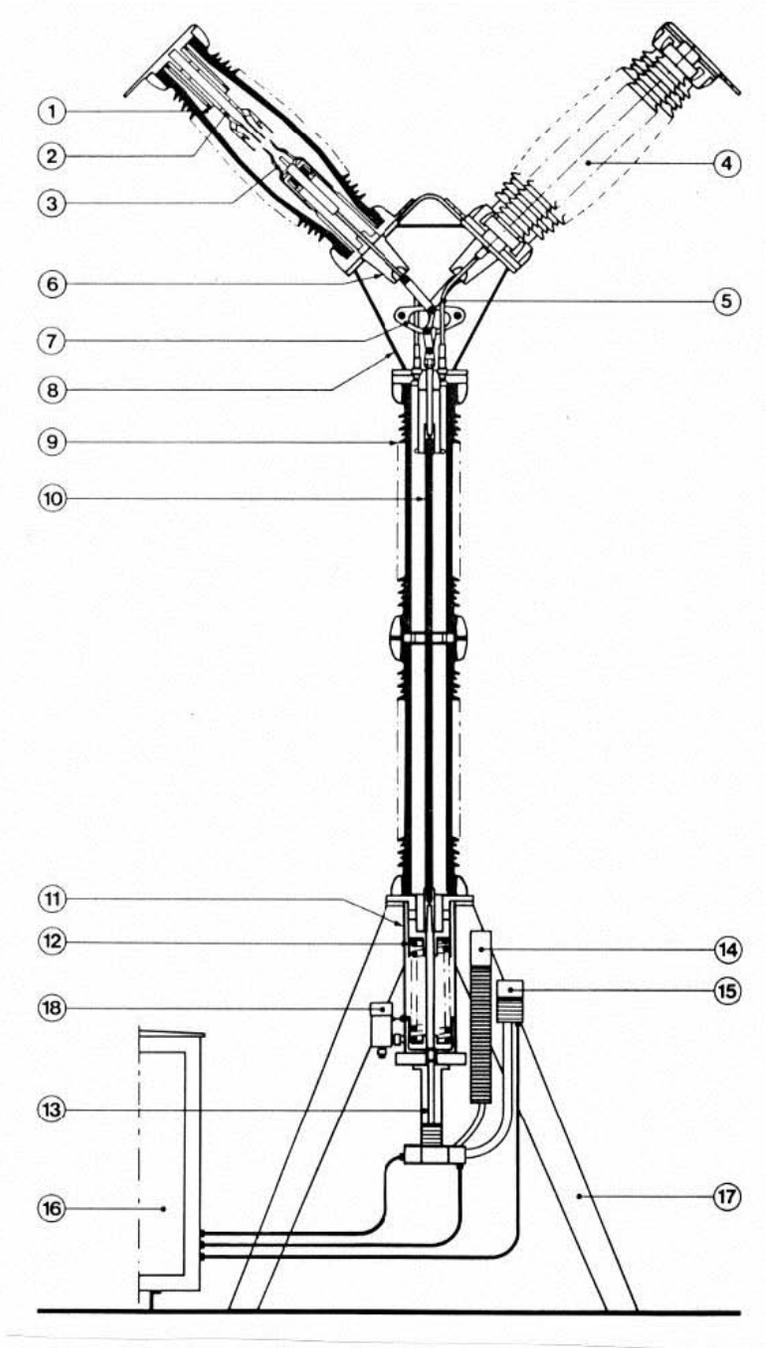
e.4. Interruptores en Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

El hexafluoruro de azufre se usa como material aislante y también para apagar el arco. El SF_6 es un gas muy pesado (5 veces la densidad del aire), altamente estable, inerte, inodoro e ininflamable. En presencia del SF_6 la tensión del arco se mantiene en un valor bajo, razón

por la cual la energía disipada no alcanza valores muy elevados. La rigidez dieléctrica del gas es 2,5 veces superior a la del aire (a presión atmosférica). La rigidez dieléctrica depende de la forma del campo eléctrico entre los contactos, el que a su vez depende de la forma y composición de los electrodos. Si logra establecerse un campo magnético no-uniforme entre los contactos, la rigidez dieléctrica del SF₆ puede alcanzar valores cercanos a 5 veces la del aire. Son unidades selladas, trifásicas y pueden operar durante largos años sin mantención, debido a que el gas prácticamente no se descompone, además de no ser abrasivo.

Dada la alta rigidez dieléctrica que el gas presenta, es un excelente aislante. Por ello resulta ser irremplazable en las subestaciones del tipo encapsulado, donde se utiliza además como medio de aislación para las barras de alta tensión. La subestación encapsulada o GIS (Gas Insulated Switchgear), tiene la gran ventaja de ocupar mucho menos espacio que una subestación convencional (aproximadamente un 50%), lo que muchas veces compensa desde el punto de vista económico el mayor costo inicial. La presión a que se mantiene el SF₆ en interruptores es del orden de 14 atmósferas mientras que en switchgear alcanza las 4 atmósferas. Quizás si la única desventaja de este tipo de interruptor consiste en que no pueden operarse a temperaturas muy bajas (inferiores a 10 °C), para evitar que el gas se licúe, lo que obliga a utilizar calefactores cuando se emplea en el exterior.

La Figura 2.46 muestra un esquema que permite observar las diferentes partes que componen un módulo de un polo del interruptor tipo FA de autosoplado, en SF₆, de Merlin Gerin, utilizado para tensiones que van desde los 72,5 a 765 kV. Según la tensión, un polo del disyuntor FA está constituido por uno o varios módulos, de una o dos cámaras. El módulo incluye, dos cámaras de corte conectadas en serie, dos condensadores de reparto de tensión, montados en paralelo sobre las cámaras de corte, un gato hidráulico para la conexión, etc. La Figura 2.47 muestra los disyuntores FA 1 y FA 2 en servicio.



Detalle de los componentes de la Figura 2.46.

1. Cámara de corte
2. Contacto fijo
3. Contacto móvil
4. Condensador
5. Conducto acoplamiento de las cámaras
6. Dispositivo de guía
7. Conjunto de bielas de mando
8. Cáster
9. Aislador-soporte
10. Biela aislante
11. Caja colocación de resortes
12. Resortes
13. Gato hidráulico
14. Acumulador de aceite a alta presión
15. Estanque auxiliar de baja presión
16. Armario de mando
17. Chasis metálico
18. Manostato

Figura 2.46.- Módulo de un polo del interruptor de autosoplado en SF₆, tipo FA (Merlin Gerin)

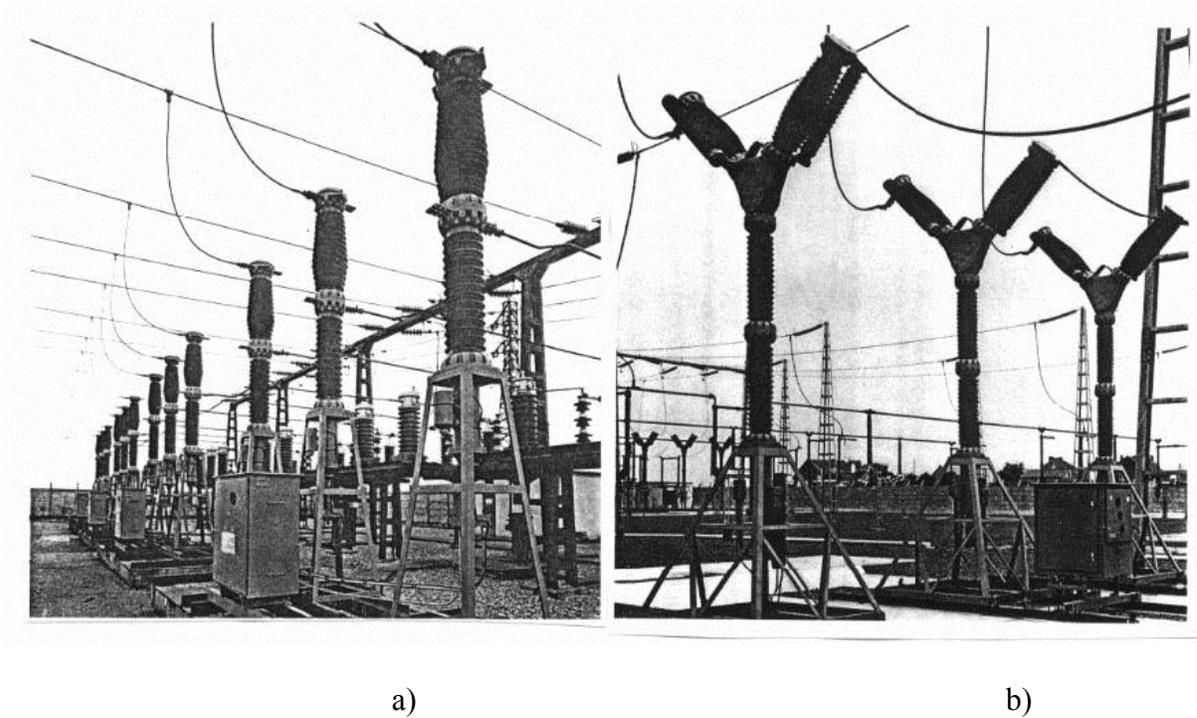


Figura 2.47.- Disyuntores en SF₆, en servicio: a) Tipo FA 1; b) Tipo FA 2

2.3.2. Mecanismos y circuitos de control

a. Mecanismos

Los mecanismos que utilizan los interruptores en su operación, concentran una gran cantidad de energía que se libera en fracciones de segundo. Para contar con la energía necesaria, los interruptores usan mecanismos tales como la compresión de resortes espirales o el uso de barras de torsión, como también la acumulación de aire comprimido a gran presión.

El mecanismo mas común consiste en un tren de palancas que es accionado por un solenoide o un pistón operado por aire comprimido o aceite, mediante el cual se produce el cierre. El sistema de palancas está diseñado para mantenerse en la posición cerrado mediante una lengüeta de desenganche la que al ser activada libera la energía acumulada, abriendo de este modo el interruptor. La energía de reserva se acumula en el proceso de cierre y puede ser bastante grande. Por ejemplo si el cierre de un interruptor de 132 kV se hiciera mediante un solenoide, requeriría una potencia del orden de 50 kW. Por este motivo se usa aire a una presión de 150 a 200 libras/pulgada cuadrada y se emplean alrededor de 6 pies cúbicos en cada operación.

Los interruptores de media y alta tensión tienen como mínimo la energía suficiente para lograr un cierre y una apertura con la energía acumulada en su mecanismo. Por supuesto, la mayoría de los interruptores modernos tienen la capacidad para efectuar más de un ciclo de cierre apertura. En cualquier caso, el interruptor debe terminar su ciclo con una operación de apertura.

b. Circuitos de control

Un interruptor puede ser accionado directamente en forma manual (operación local), o bien,

mediante un electroimán que se puede energizar a distancia (operación remota). Generalmente, se dispone de dos electroimanes con potencias del orden de los 100 a 200 watt que se destinan a liberar la energía almacenada. Se denominan: Bobina de Cierre (BC), con su equivalente en inglés Close Coil (CC) y Bobina de Desenganche (BD), con su equivalente Trip Coil (TC). Estas dos bobinas están diseñadas para trabajar en forma intermitente, puesto que se construyen para que sean capaces de operar hasta con el 60% del voltaje nominal, para asegurar su operación bajo condiciones anormales de voltaje de control.

b.1. Alimentación de los Circuitos de Control

Las principales fuentes de energía eléctrica utilizadas en el control de los interruptores de poder son:

– Bancos de acumuladores

Se denominan también baterías de control y son las que suministran la mayor parte de la energía requerida para el funcionamiento de los diferentes circuitos de control. Se prefiere este tipo de alimentación por su seguridad y eficiencia en lugares donde existen las facilidades para instalar bancos de baterías, o bien, cuando la cantidad de interruptores así lo exige. Las baterías que conforman el banco pueden ser del tipo plomo-ácido o alcalinas, siendo estas últimas bastante más caras que las primeras, aunque tienen una mayor duración. Las tensiones que se usan pueden ser: 48 Volts para instalaciones pequeñas o medianas con capacidades de 70 a 150 Amperes-hora; 125 Volt con capacidades de 200 a 400 Amperes-hora. En forma excepcional, se pueden encontrar bancos de baterías para 220 Volt, con capacidades superiores. Todos los circuitos necesarios para el comando de los interruptores y otros equipos de una instalación, además del sistema de alarmas y señalizaciones que se alimentan de la misma fuente de corriente continua, constituyen el “Circuito de control de C.C.” de la instalación

– Transformadores de servicios auxiliares

Se usan en subestaciones pequeñas que no disponen de baterías de control y cuando se trata de pocos interruptores para transformadores de potencias menores a 4 MVA. Generalmente, se trata de interruptores que tienen sus bobinas diseñadas para operar con corriente alterna. En la práctica se recurre, excepcionalmente, a utilizar interruptores con bobinas para corriente continua que se alimentan a través de un rectificador.

La alimentación se obtiene de transformadores para servicios auxiliares con potencias del orden de 15 kVA, con secundarios en estrella de 400-231 Volt. En algunos casos el control se alimenta de los mismos transformadores de potencial de la Subestación (S/E) que proveen la energía suficiente para hacer efectivas las órdenes, además de suministrar la información necesaria. Ocasionalmente, la energía puede obtenerse de los transformadores de corriente, aunque en este caso se usan exclusivamente para dar desenganche ante fallas, siendo la operación de cierre efectuada manualmente.

b.2. Contactos auxiliares

En cualquier interruptor de poder se consulta la existencia de contactos que están previstos para fines de control. Estos contactos (auxiliares) están diseñados para trabajar con valores de voltaje y corrientes de control (125 Volt C. C. y 10 Amperes, por ejemplo). Los contactos auxiliares que siguen la acción del interruptor, es decir, cierran cuando éste cierra se denominan tipo “a”. Los

contactos que siguen la posición contraria, es decir, abren cuando el interruptor cierra, se denominan tipo “b”. (Figura 2.48)

Otra designación que se suele utilizar se basa en la posición que tienen los contactos cuando el elemento que los acciona está desenergizado, se dice: “como se recibió de fábrica”. En este caso un contacto tipo “a” se denomina “normalmente abierto” (NA) y un contacto tipo “b”, “normalmente cerrado” (NC). Todos estos contactos están adosados al mismo eje de los contactos principales, de modo que su operación coincida exactamente con la del interruptor. En algunos casos, dentro de este mismo conjunto se consulta

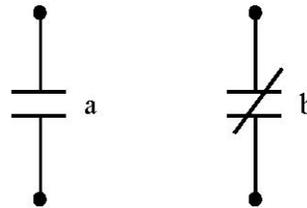


Figura 2.48.- Representación esquemática de contactos auxiliares

la existencia de contactos que tienen un pequeño adelanto en la operación que les corresponde denominados “aa” o “bb” según sea el caso.

b.3. Switch de control

Los switches o llaves de control son los encargados de comandar los interruptores de poder, a través del circuito de control dando órdenes de cierre o de apertura. Generalmente se ubican en los tableros o pupitres de control de las salas de comando, aún cuando pueden también estar ubicados en el mismo interruptor.

La Figura 2.49 muestra el aspecto exterior del switch de control, así como la disposición de los contactos y la Tabla 2.13, el diagrama de secuencia en que los contactos operan. La letra X indica que contacto está cerrado según la posición del switch. Por ejemplo, los contactos 1-1c y 4-4c son simples y cierran al poner el switch en la posición “cerrar”, pero el contacto 3-3c cierra tanto en la posición “cerrar” como “abrir”.

Por construcción, la manilla del switch permanece siempre en la posición central (reposo), pudiendo ser girada hacia la izquierda para dar una orden de cerrar, o bien, hacia la derecha para dar una orden de abrir. La manilla mueve un eje de camos que actúan sobre los contactos que se cierran o abren de acuerdo al diagrama de la Tabla 2.13. Al soltar la manilla, ésta vuelve a la posición central pero en la ventanilla queda una tarjeta que de acuerdo a su color indica la posición a que se movió la manilla la última vez. Si la tarjeta es roja, la manilla se movió a la posición cerrar. Si la tarjeta es verde, la manilla se movió a la posición abrir. Además de esto, se consultan ampollitas de señalización: de color rojo para “cerrado” y de color verde para “abierto”. De este modo se comprueba si el interruptor cumplió con la orden que se le dio. La disposición física de las ampollitas se muestra en la Figura 2.49 y su alimentación se hace a través de contactos auxiliares del interruptor tal como se muestra en la Figura 2.50.

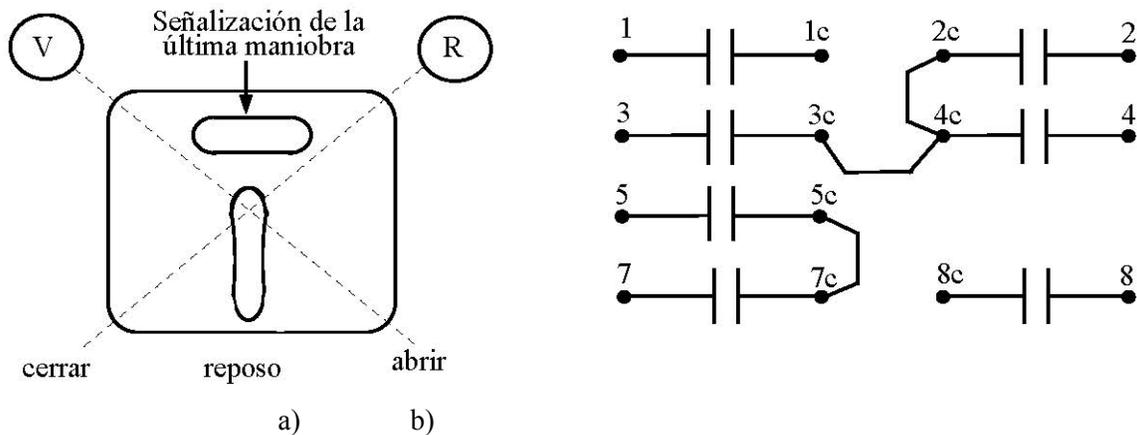


Figura 2.49.- Switch de control; a) Vista superior; b) Disposición de contactos y puentes

Tabla 2.13.- Diagrama de operación de contactos

Contacto N°	Abrir	Normal después de abrir	Normal después De cerrar	Cerrar
1-1c				X
2-2c	X			
3-3c	X			X
4-4c				X
5-5c		X	X	
7-7c			X	X
8-8c			X	X

Además de la señalizaciones anteriores, las protecciones que ordenan la apertura de interruptores poseen sistemas que permiten visualizar cual de ellas operó (unidad de sello y tarjeta, por ejemplo). Los interruptores mismos, cuentan con sistemas de alarma de tipo auditivo ya sea cuando operan o bien para indicar algún tipo de perturbación que no provoque una apertura inmediata.

b.4. Clasificación de los circuitos de control

Se pueden clasificar en dos grandes grupos, de acuerdo con su fuente de alimentación:

– De comando por corriente continua

En la Figura 2.50 se muestra un circuito de este tipo y su funcionamiento es el siguiente:

Cierre del Interruptor: Con el interruptor abierto, la posición de los contactos es la mostrada en la Figura 2.50. En estas condiciones, está encendida la ampollita verde a través de 52/b (bornes 1-2) y apagada la ampollita roja, pues 52/a (bornes 7-8) está abierto. Para cerrar el interruptor se lleva el Switch de control (Swc/52) a la posición “cerrar”, energizándose la bobina de cierre (52/BC) a través de 1-1c y 52/b (bornes 5-6). El interruptor efectivamente se cierra y cambia la posición de todos sus contactos; por lo tanto se cierra 52/a (bornes 7-8), con lo que se enciende la ampollita roja a través de la bobina de desenganche (52/BD) la que de todas formas no opera, puesto que la corriente no es suficiente para que ello ocurra. La ampollita roja encendida indica que el interruptor

efectivamente cerró y que el circuito de desenganche tiene voltaje para una próxima operación de apertura. En el circuito de cierre se abre 52/b (bornes 5-6) por lo que se desenergiza la bobina de cierre, pero el interruptor queda cerrado en forma mecánica. Además se abre 52/b (bornes 1-2) con lo que se apaga la ampollita verde

Apertura del interruptor: Esta se puede hacer energizando la bobina de desenganche, llevando la manilla del Switch de control (Swc/52) hacia la posición “abrir”, lo que cierra los contactos 2 y 3 o por la operación de la protección, cuyos contactos se han designado por P. En cualquiera de los dos casos se cortocircuita la ampollita roja (que se apaga) y se energiza la bobina de desenganche 52/BD a través del contacto 52/a (bornes 7-8) y el interruptor se abre, con lo que se enciende la ampollita verde, a través del contacto 52/b (bornes 1-2)

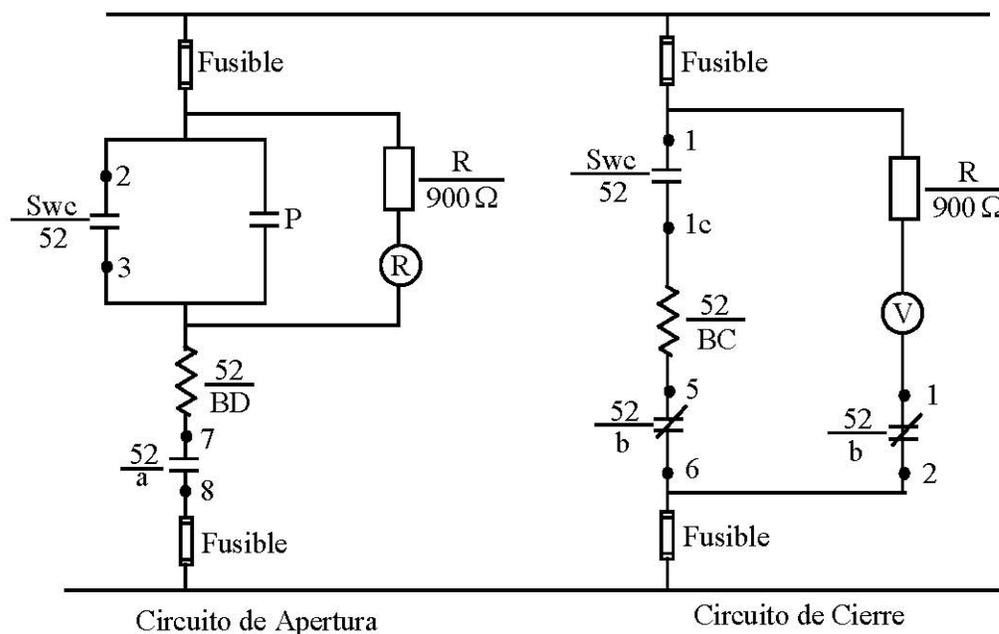


Fig. 2.50.- Diagrama elemental de control de un interruptor de poder

El desenganche es eléctricamente libre porque no depende de si el Swc/52 (bornes 1-1c) está cerrado o no. En el caso en que 1-1c se encuentre cerrado (el operador mantiene la orden de cierre del interruptor), la apertura se hace de todas maneras, pues 52/b (bornes 5-6) está abierto. Sin embargo, este esquema tiene el problema de que si se mantiene la orden de cerrar, una vez que el interruptor ha abierto, se producirán sucesivos cierres y aperturas, dando origen al denominado “bombeo” del interruptor. Para evitar este problema se hace uso de un circuito que cuenta con un relé antibombeo (94), tal como el que se muestra en la Figura 2.51, donde por simplicidad se han eliminado las ampollitas indicadoras.

En el esquema se aprecia que si se mantiene la orden de cierre contra la falla, el interruptor no vuelve a cerrar debido a que el circuito de la bobina de cierre queda interrumpido por el contacto 94/b (bornes 1-2) del relé de antibombeo, de modo que para cerrar nuevamente el interruptor, se debe inhabilitar el relé 94 abriendo el contacto 1-1c del Switch control y volviéndolo a cerrar. Este circuito no es necesario en los interruptores de soplo de aire, ya que las bobinas de cierre que comandan las válvulas de aire comprimido necesitan ser desenergizadas para que sea posible efectuar una nueva orden de cierre.

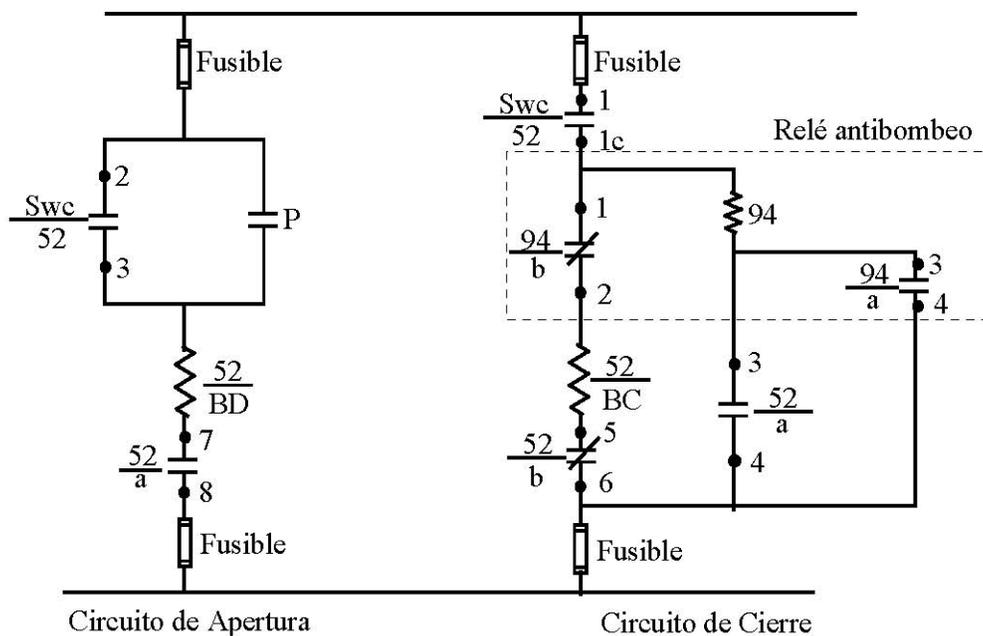


Figura 2.51.- Circuito de control de interruptor con relé antibombeo

– De comando por corriente alterna

Se usa en subestaciones inferiores a 4 MVA, que no dispongan de baterías de control. Las soluciones más usada son:

Trip serie: Mediante el uso de la corriente circulante por el propio interruptor controlado, ya sea directamente si la tensión y la corriente lo permiten o, como es más común, a través de TT/CC. La Figura 2.52 muestra el circuito de control de interruptores tipo trip serie directo para el relé de sobrecorriente IAC 51C (General Electric). El sistema funciona de la siguiente manera: En condiciones normales, la corriente de carga circula por la bobina del relé 51 y por X_1 a través del contacto cerrado X que se mantiene en esta posición debido a la corriente que circula por X_1 . El contacto X a su vez cortocircuita las bobinas de sello y tarjeta del relé y de apertura del interruptor. Si existe una corriente muy alta que haga operar el relé 51 se cierra 51/a que cortocircuita la bobina X_2 ; en esta circula una corriente debido a la tensión inducida por la corriente que circula por la bobina X_1 . La corriente inducida en X_2 es tal que hace aumentar la reluctancia del circuito magnético a la izquierda de la bobina X_1 , por lo que el flujo producido por X_1 se cierra a través del núcleo situado a la derecha. Así entonces, se abre X y la corriente pasa por la bobina de sello y tarjeta (51/SyT) y de desenganche del interruptor (52/BD) lo que hace que se cierre el contacto de la bobina de sello y tarjeta SyT/a dando otra vía de circulación a la corriente en X_2 y se abra al interruptor. Aunque ahora no hay corriente en el secundario del T/F de corriente el interruptor queda abierto.

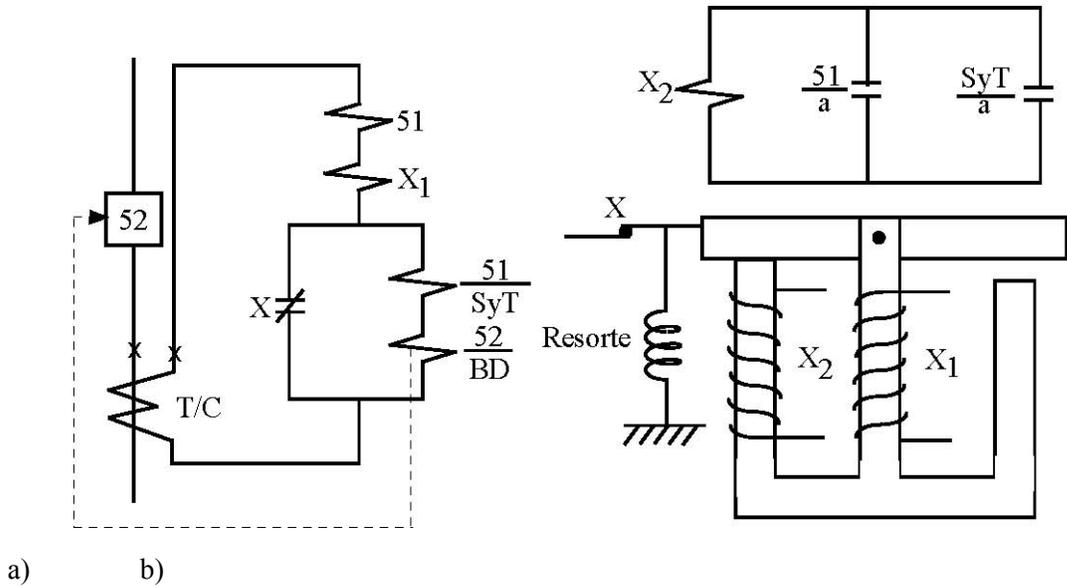


Figura 2.52.- a) Circuito de control tipo trip serie b) Diagrama esquemático del relé auxiliar X

Mediante el uso de energía obtenida antes o después del interruptor controlado: La Figura 2.53 muestra un circuito de control en que la energía se obtiene de transformadores de servicios auxiliares ubicados antes (aguas arriba) del interruptor controlado. El funcionamiento de este circuito es semejante a los ya estudiados. Se debe hacer notar que para el circuito de control se usa energía de C.A. rectificadas. El condensador de disparo C permite disponer siempre de la energía necesaria para la apertura, ya que para fallas cercana al punto en que se obtiene la energía, la tensión puede ser muy pequeña.

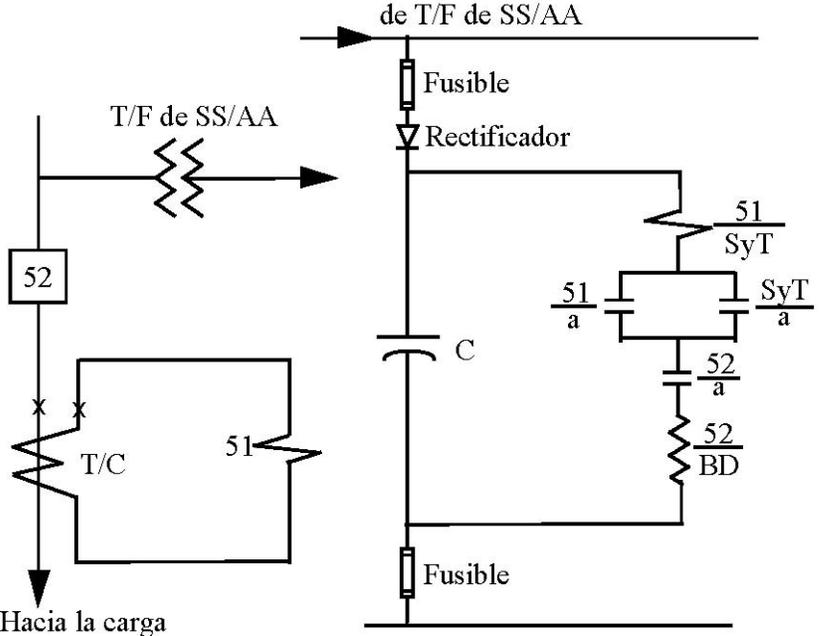


Figura 2.53.- Control de un interruptor de poder usando energía en C. A.

Otros esquemas utilizados

La Figura 2.54 muestra dos esquemas que usan energía proveniente de fuentes de corriente alterna para el control. Ella se puede obtener desde transformadores de corriente (Figura 2.54 a) o de transformadores de potencial (Figura 2.54 b). Los transformadores de potencial se conectan entre fases, para obtener un voltaje suficiente en el caso de fallas monofásicas.

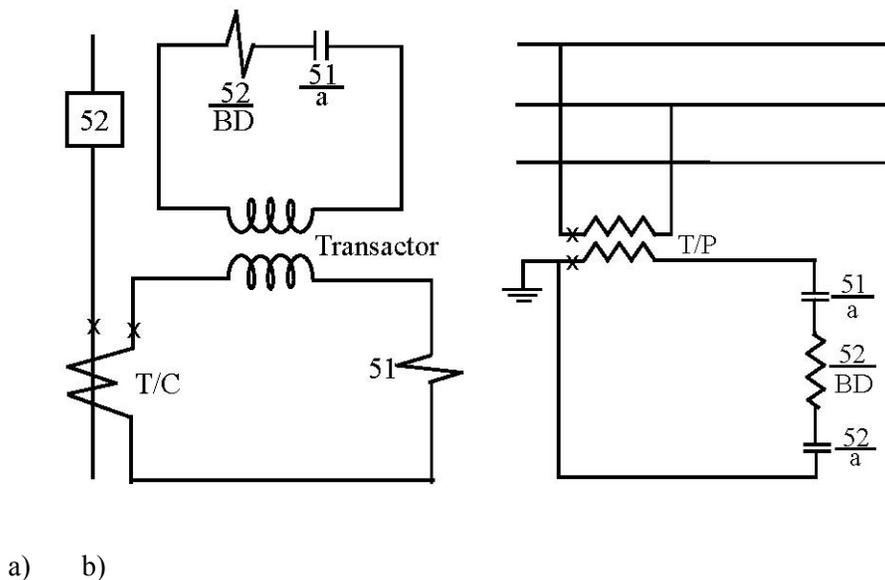


Figura 2.54.- Circuitos de control alimentados por C. A. proveniente de: a) Transformadores de corriente; b) Transformadores de Potencial

2.3.3. Reconexión automática de interruptores

Considerando que estadísticamente se ha demostrado que la gran mayoría de las fallas son de tipo transitorio, especialmente cuando se trata de líneas aéreas y que es conveniente reducir lo mas posible la duración de las interrupciones del servicio, se ha previsto efectuar reconexiones operando automáticamente los interruptores, cuando su apertura obedece a una falla. Es decir, cuando se abren por operación de las protecciones. En ningún caso por apertura manual. El equipo necesario para esta operación, es un conjunto de relés, generalmente temporizados, que forman parte del circuito de control del interruptor.

Debe tenerse presente que no siempre las reconexiones son posibles, especialmente entre distintas secciones de un sistema interconectado donde pueda perderse el sincronismo entre las partes. También cabe mencionar que se utiliza la reconexión monopolar en sistema de gran potencia y elevada tensión. Para lograrlo se requiere contar con interruptores especialmente diseñados que puedan abrir o cerrar cada polo en forma independiente. La reconexión automática se usa especialmente en líneas de transmisión radiales para aumentar la continuidad de servicio. El tiempo de reconexión del interruptor debe especificarse de acuerdo a las características de operación del sistema eléctrico. Por ejemplo en sistemas de distribución urbana la reconexión puede ser lenta, no así en sistemas industriales o en líneas de transmisión. En sistemas de transmisión, cuando es posible hacerlo, los tiempos de reconexión deben ser muy rápidos de manera de evitar pérdidas de sincronismos o problemas de estabilidad. También al calcular el tiempo de reconexión se debe considerar la desionización del arco de manera de eliminar la posibilidad de reencendido. Este tiempo muerto depende del nivel de tensión y para sistemas sobre 115 kV es de alrededor de 8 ciclos. El diagrama de operación de un interruptor operado con reconexión automática se muestra

en la Figura 2.55.

Al usar un interruptor de potencia en un sistema con reconexión automática la capacidad de ruptura del disyuntor debe modificarse de acuerdo al ciclo de trabajo con que se utilizará el interruptor. El cálculo de la nueva capacidad de ruptura debe efectuarse tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- El ciclo de trabajo no debe tener más de 5 aperturas.
- Toda operación dentro de un intervalo de 15 minutos se considera parte de un mismo ciclo de trabajo.
- El interruptor debe usarse en un sistema cuya corriente de cortocircuito no exceda el valor corregido de la corriente de interrupción para la tensión nominal y el ciclo de trabajo especificado.

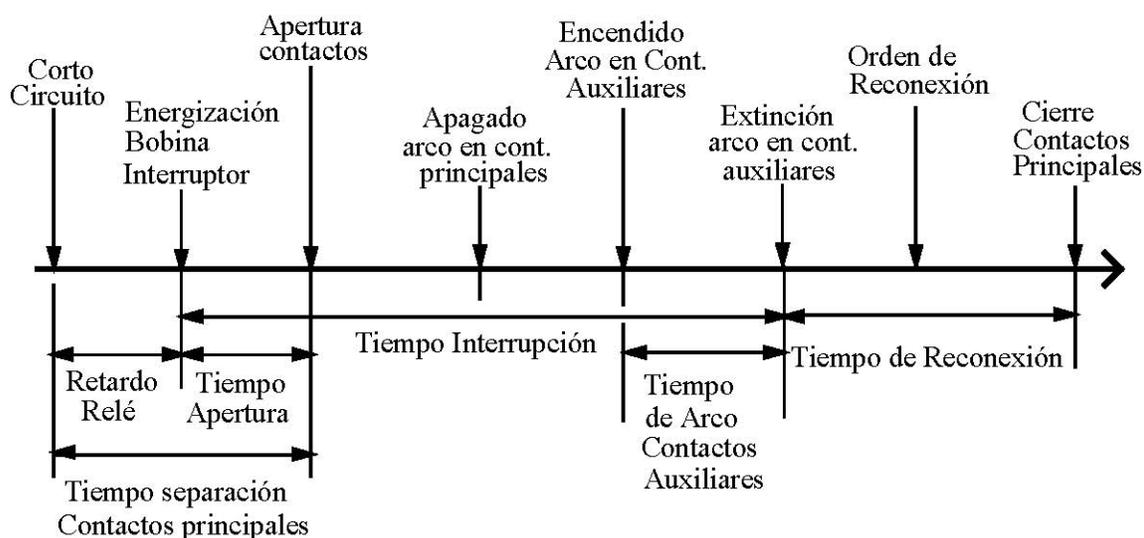


Figura 2.55.- Ciclo de trabajo de un Interruptor Automático trabajando en reconexión automática

Los interruptores especialmente diseñados para operar con reconexión automática se llaman “Restauradores” o “Reconectores”. El reconector es un aparato que al detectar una condición de sobrecorriente abre sus contactos, y una vez que ha transcurrido un tiempo determinado cierra sus contactos nuevamente, energizando el circuito protegido. Si la condición de falla sigue presente, el restaurador repite la secuencia cierre-apertura un número determinado de veces (por lo general son 4 como máximo). Después de la cuarta operación de apertura queda en posición de abierto definitivamente. Cuando un reconector detecta una situación de falla abre en un ciclo y medio. Esta rápida operación de apertura disminuye la probabilidad de daño a los equipos instalados en el circuito en falla. Uno o uno y medio segundos después cierra sus contactos, energizando nuevamente el circuito. Después de una, dos, y hasta tres operaciones rápidas el restaurador cambia a una operación de características retardada. Este cambio de característica a una más lenta permite coordinar este dispositivo con otros equipos de protección.

2.4. Relés

Los relés de protección para sistemas de potencia están constituidos por una o más unidades detectoras de falla o “Unidades de Medida”, cuya función es recibir la información del equipo primario y discriminar si existe o no una condición anormal. Para este efecto compara la magnitud eléctrica medida con otra llamada de referencia, que le ha sido proporcionada con anterioridad a

través de sus elementos de “ajuste”. En el caso de detectar una condición anormal, emitirá la orden correspondiente a través del resto de los elementos que componen el relé: Unidades auxiliares, contactos, resistencias, condensadores, alambrados, etc., a objeto de desconectar el sector o equipo comprometido, despejando la falla.

2.4.1. Tipos de relés según su función

Existe una gran variedad de aplicaciones, por lo cual existe una gran diversidad de tipos que desempeñan una función en particular. Desde este punto de vista se pueden clasificar en:

- **Relés de protección:** Detectan las anomalías y dan inicio o permiten la desconexión de un equipo o un grupo de equipos de poder. Ejemplo: Relés de sobrecorriente; relés direccionales; relés diferenciales; relés de distancia, etc.
- **Relés auxiliares:** Operan en respuesta a la energización de un circuito y asisten a otros relés o dispositivos en alguna función. Normalmente trabajan en dos condiciones: energizado o desenergizado (ON-OFF). Su operación generalmente es del tipo instantánea, aunque también existen relés temporizados. Ejemplo: Relés de sello y tarjeta, relés multiplicadores de contactos, etc.
- **Relés de regulación:** Operan cuando la magnitud que supervisan, se sale de márgenes aceptables predeterminados, dando instrucciones a través de otros dispositivos para que se restaure la magnitud en particular a sus límites usuales. Ejemplo: Reguladores automáticos de voltaje de unidades generadoras, sincronización automática de máquinas sincrónicas, etc.
- **Relés de verificación:** Su función es verificar una condición en particular, en relación a un cierto límite prescrito e iniciar acciones diferentes a la desconexión de equipos. Ejemplo: relés de bloqueo de sincronismo, relés de límite de carrera, etc.

2.4.2. Clasificación de los relés según el tiempo de operación

El tiempo de operación de un relé se mide entre el instante en que se hace presente la causa de su operación y el cambio de posición de sus contactos. El término “cambio de posición de sus contactos” se debe a que hay relés que al estar desenergizados tienen sus contactos cerrados y al operar los abren, como hay otros que tienen posiciones opuestas o bien disponen de ambos tipos de contactos. Esta es una manera general de expresarse, ya que el relé puede ser de tipo electrónico y su salida ser un rectificador controlado sin que ello signifique que vaya a abrir o cerrar contactos, sino más bien habilitar un circuito a su nueva forma de operación. Desde este punto de vista, los relés se pueden clasificar en:

- **De alta velocidad:** En que el tiempo de operación es inferior a 1/20 seg. (2,5 ciclos considerando la frecuencia usual de 50 Hertz como base)
- **Lentos o de baja velocidad:** Operan en tiempos mayores de 1/20 seg.

En la práctica se denominan relés instantáneos a los que operan en menos de 10 ciclos y de alta velocidad a los que operan en menos de dos ciclos. Al resto se les considera temporizados y entre ellos se distinguen los de tiempo definido y los que responden a una curva de tiempo versus la magnitud de medida.

2.4.3. Componentes y unidades de un Relé

Un relé desarrolla la función para la cual está diseñado, a través de ciertos elementos o unidades como las que se describen a continuación:

- **Elementos de ajuste:** Tienen como función la de poder dar diferentes niveles de operación y obtener características especiales de funcionamiento. Estos elementos son generalmente resistencias, reactancias, condensadores, bobinas con derivaciones o taps, etc.
- **Elementos auxiliares:** Son elementos auxiliares internos del relé que se usan para adecuar las señales externas de modo de adaptarlas a la unidad de medida del relé. Por ejemplo, transformadores de corriente auxiliares, shunt para transformar una señal de corriente en voltaje.
- **Unidad de medida:** Esta unidad es la que recibe en último término, la información acerca del equipo protegido, en la forma de corrientes y voltajes reducidos y determinando por comparación la existencia de una condición anormal.
- **Elementos de señalización y sello:** Se agrupa aquí a los elementos internos del relé que permiten señalar su operación (generalmente en forma visual: caída de una tarjeta, encendido de una señal luminosa, etc.) y los que permiten aumentar la cantidad de potencia que puede manejar el relé. (Contactos auxiliares).

En general, un relé puede tener a lo menos el elemento de ajuste y la unidad de medida, agregándose los otros según sea la función que cumple dentro del esquema de protección o el tipo de relé.

2.4.4. Componentes de la unidad de medida

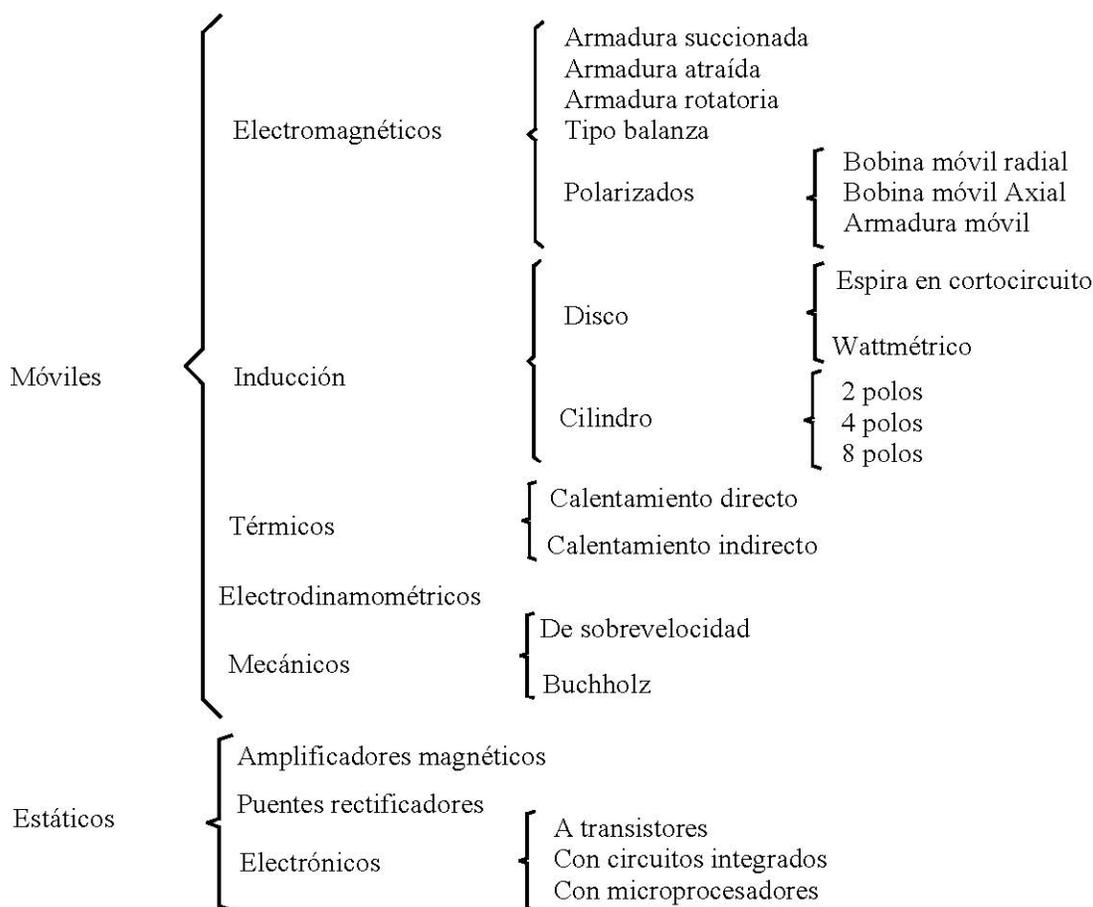
De todos los componentes anteriores, la unidad de medida es la mas importante, de modo que podría considerarse al resto como auxiliares. Los elementos que la componen son los siguientes:

- **Elementos de excitación:** Por lo general son bobinas y sirven de intermediarios entre la información y el elemento comparador.
- **Elemento comparador:** Es el encargado de transformar las magnitudes informativas (corrientes y/o voltajes) en flujos, fuerzas electromotrices, fuerzas magnetomotrices, torques, etc., compararlas y entregar una respuesta, ya sea en forma de movimiento (relés móviles) o de señales (relés estáticos).
- **Elemento antagónico:** Es aquel cuya función permanente es la de oponerse a la acción o respuesta del elemento comparador, tratando de mantener en reposo a los elementos móviles o de dar retardo de tiempo a la operación de éstos. Otros objetivos son el evitar operaciones falsas por efectos extraños (Armónicas, transientes, golpes, interferencias, etc.), dando estabilidad a la operación y, por otra parte, permitiendo la vuelta del sistema móvil al estado de reposo, una vez cumplida su función.
- **Elemento de respuesta:** Es el que recoge la señal de salida del comparador y actúa de acuerdo con ella, provocando acciones en el circuito de control externo a través del cual opera el relé. En los relés móviles generalmente es un contacto, mientras que en los de estado sólido puede ser un tiristor, transistor, o bien un relé auxiliar instantáneo.

2.4.5. Clasificación de los relés según el principio de funcionamiento del elemento comparador

2.1. Existe una gran variedad de elementos comparadores, que pueden resumirse en el Cuadro

Cuadro 2.1.- Clasificación general de relés



En la actualidad, todavía se prefieren los relés de tipo electromecánico, para ciertas aplicaciones. Ello se debe al alto grado de desarrollo que han alcanzando con el tiempo, a su alta confiabilidad y bajo costo, así como también a los criterios conservadores en lo que respecta a protecciones, en la mayoría de las empresas eléctricas. Sin embargo, cada vez más se imponen los relés de estado sólido, especialmente los del tipo con circuitos integrados y microprocesadores. La razón del éxito de estos últimos, es que a un costo un poco mayor, entregan muchas mas prestaciones por la versatilidad de la electrónica, incorporando incluso medidas de voltajes, corrientes, energía, como también guardando en memoria valores previos a la falla. Los problemas que presentaban los antiguos relés electrónicos, como su alta sensibilidad a las interferencias y a los armónicos, se han ido resolviendo así como su costo ha ido disminuyendo, de modo que son cada vez más aceptados por los proyectistas y por los usuarios.

2.4.6. Características generales de los relés

Analizaremos a continuación, en forma general, los diferentes tipos de relés según el principio de funcionamiento del elemento comparador.

2.4.6.1. Relés de Comparador móvil

a. Relés electromagnéticos

Funcionan bajo el principio de atracción magnética que ejerce sobre un núcleo móvil de material ferromagnético, el campo producido por la bobina de un electroimán

a.1. Característica de funcionamiento

Para estudiar su funcionamiento consideraremos el relé tipo bisagra (armadura atraída) de la Figura 2.56. El núcleo es de material magnético de alta permeabilidad ($\mu_{Fe} > \mu_0$) y existe un pequeño entrehierro ($x+d$). Por lo tanto, se puede despreciar el flujo de dispersión y considerar $H_{Fe} = 0$ en el núcleo (o $R_{Fe} = 0$) y de esta forma, la fuerza eléctrica queda:

$$F^e = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i^2}{(x+d)^2} \quad (2.23)$$

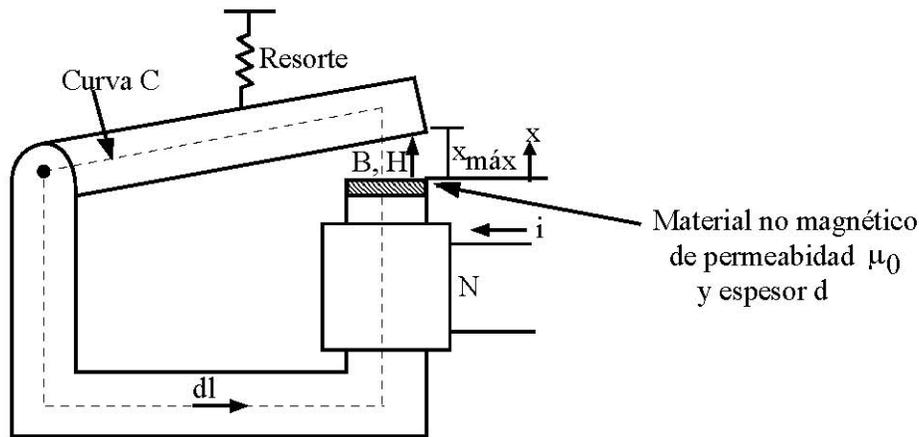


Figura 2.56.- Relé tipo armadura atraída

Es decir, la fuerza eléctrica es proporcional al cuadrado de la corriente (si no existe saturación) y actúa en sentido contrario a x (tiende a cerrar la parte móvil). Por lo tanto, la ecuación de la fuerza neta ejercida sobre el elemento móvil es:

$$F = F^e - F_R \quad (2.24)$$

Donde F_R es la fuerza de oposición ejercida por el resorte, la que para pequeños desplazamientos se puede suponer constante, es decir: $F_R = K_2$

Además F^e se puede considerar independiente de la longitud del entrehierro por lo que se puede escribir como:

$$F^e = K_1 i^2 \quad \text{con } K_1 = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2(x+d)^2} \quad (2.25)$$

Si el relé se alimenta con corriente continua, de valor I se tiene:

$$F^e = K_1 I^2 \quad (2.26)$$

Si se alimenta con una corriente alterna sinusoidal $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$, donde I es el valor eficaz entonces, se aprecia que la fuerza eléctrica tiene 2 componentes (Ecuación 2.27):

$$F^e = K_1 (\sqrt{2} I \sin \omega t)^2 = 2 K_1 I^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) \quad (2.27)$$

- $K_1 I^2$: independiente del tiempo
- $K_1 I^2 \cos 2 \omega t$: pulsatoria, con doble frecuencia de la alterna aplicada y de valor medio cero. Esta no contribuye al torque medio pero se manifiesta como una vibración mecánica que produce ruido. Para superar este problema y hacer mas constante la fuerza, se coloca una espira en cortocircuito en el núcleo. Por lo tanto, en general se puede escribir:

$$F = K_1 I^2 - K_2 \quad (2.28)$$

La ecuación (2.28), permite graficar la fuerza F como función de la corriente I , tal como se muestra en la Figura 2.57, donde: $I_0 = \pm \sqrt{K_2/K_1}$; I_0 es la corriente mínima de operación (pick-up).

En la Figura 2.57 se puede observar que la fuerza es positiva independientemente del sentido de la corriente a partir de $I = I_0$. La zona indicada con líneas de segmentos no tiene sentido físico.

Razón de reposición: Se define como la razón entre la corriente mínima de operación (pick-up) y la corriente máxima de desoperación o reposición (drop-out). Para visualizar esto en este tipo de relé, se puede escribir de nuevo la ecuación (2.24), incluyendo (2.23), de la siguiente forma, con el fin de hacer notar el efecto que tiene el entrehierro en el valor de la fuerza neta:

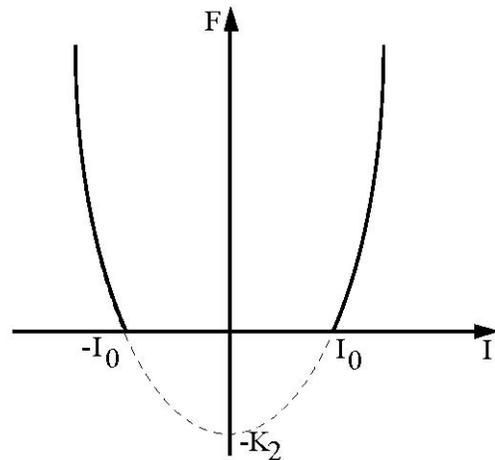


Figura 2.57.- Curva de operación de un relé de tipo electromagnético

$$F = K \frac{I^2}{(x + d)^2} - K_2 \quad (2.29)$$

La corriente mínima de operación I_0 se tiene cuando $F=0$ y $x = x_{m\acute{a}x}$, es decir de (2.29)

$$I_0 = (x_{m\acute{a}x} + d) \sqrt{K_2/K} \quad (2.30)$$

La corriente máxima para que el relé se desopere I_d se tiene en (2.29); cuando $F=0$ y $x=0$

$$I_d = d \sqrt{K_2/K} \quad (2.31)$$

Por lo tanto, la razón de reposición de este relé es:

$$RR = \frac{I_0}{I_d} = \frac{x_{m\acute{a}x} + d}{d} = \frac{x_{m\acute{a}x}}{d} + 1 \quad (2.32)$$

Como $x_{m\acute{a}x} \gg d$, la razón de reposición es normalmente $\gg 1$, lo que significa que una vez operado, la corriente debe disminuir bastante su valor para que el relé se desopere. Esto explica

también el uso del material no magnético en el entrehierro ya que en caso contrario, la razón de reposición tendería a infinito.

Por su sencillez y economía, los relés electromagnéticos son muy usados como relés auxiliares. Tienen gran rapidez de operación, pero en algunos casos se les puede dotar de algún retardo en la operación, utilizando medios tales como: mecanismos de relojería, amortiguadores hidráulicos o neumáticos, etc.

a.2. Tipos constructivos

Corresponden a este tipo varias unidades que son de uso común, tales como: Las de armadura atraída o Hinged Relay (Figura 2.56) que se emplean en los relés de las series MG y SG de la Westinghouse; las de armadura succionada o émbolo o Plunger Relay (Figura 2.58), presentes en las unidades instantáneas de los relés de sobre corriente General Electric, English Electric etc. y las de armadura rotatoria (Figura 2.59), utilizadas en relés de tipo REG de Brown Boveri.

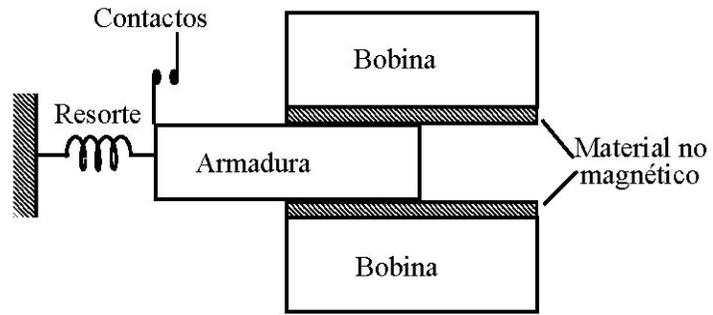


Figura 2.58.- Relé tipo armadura succionada

Existe un cuarto tipo de constructivo, de tipo balanza, el que se muestra en la Figura 2.60, el cual permite comparar dos magnitudes eléctricas. De esta forma, uno de los polos se alimenta de modo que produzca un torque resistente (polo de retención) y el otro, con una magnitud que tienda a producir operación (polo de operación). Estos últimos elementos son utilizados en las unidades direccionales de los relés de sobrecorriente de este tipo.

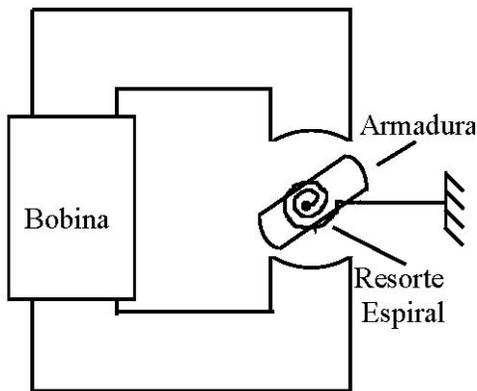


Figura 2.59. Relé tipo armadura rotatoria

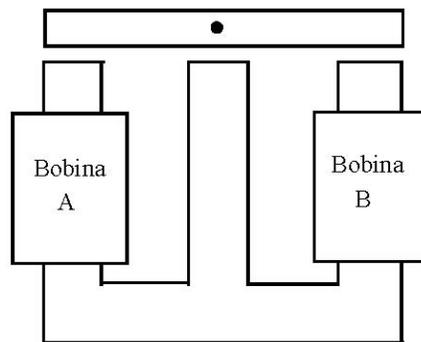


Figura 2.60.- Relé tipo balanza

Unidades de medida polarizadas: Son unidades electromagnéticas especiales, en las cuales el sentido del movimiento depende de la polaridad de la magnitud de excitación. Una parte del flujo necesario para producir el torque, es proporcionado por un imán

permanente de manera similar al de un galvanómetro D'Arsonval. Por el hecho de contar con un flujo adicional, estas unidades son de bajo consumo (0,1 a 0,5 miliwatt) y de alta sensibilidad. Por ello resultan apropiados para trabajar con fuentes de baja potencia como shunts o rectificadores. La Figura 2.61 muestra diferentes formas constructivas que estos dispositivos pueden tomar. Desde luego, estos elementos son apropiados para trabajar con corriente continua o rectificada y su torque de operación será proporcional a la corriente de excitación. Sin embargo, en algunos dispositivos, se emplean dos magnitudes eléctricas, es decir, se tienen bobinas tanto en la parte fija como en la parte móvil (Figura 2.61 d), por lo cual se designan como magnitudes de polarización y operación respectivamente a la corrientes (tensiones) aplicadas a ellas. En este caso, el torque de operación es proporcional al producto de las corrientes en las bobinas, es decir:

$$T_{op} = K I_{op} I_{pol} \quad (2.33)$$

que cuando las corrientes de operación y retención son iguales, es semejante a la ecuación (2.25) y por lo tanto, su característica de funcionamiento corresponde a la mostrada en la Figura 2.57.

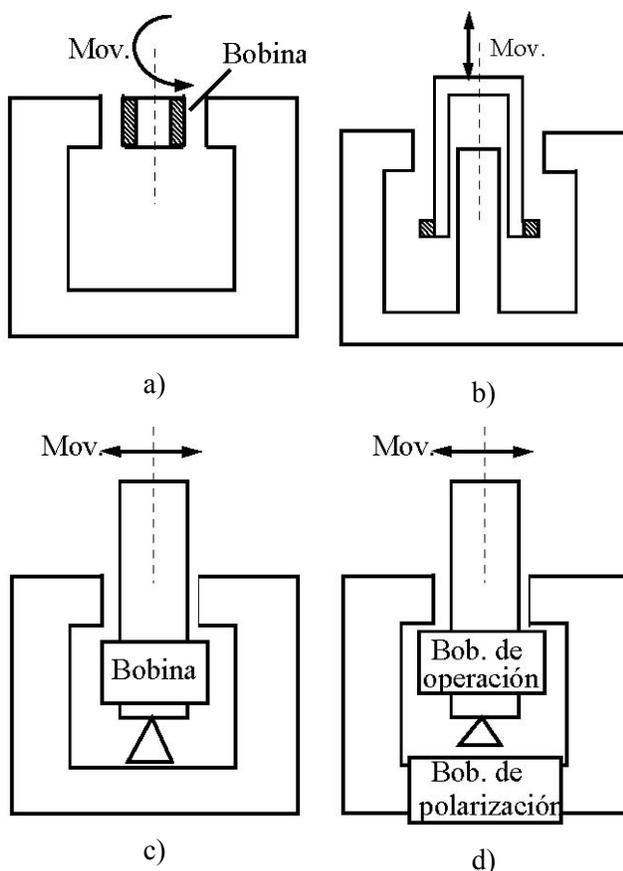


Figura 2.61.- Elementos comparadores polarizados: a) Bobina móvil radial, b) Bobina móvil axial; c) Armadura móvil y d) con dos magnitudes eléctricas

b. Relés de inducción

El funcionamiento de este tipo de relés consiste en hacer actuar dos flujos magnéticos variables en el tiempo, desfasados y con distinto punto de aplicación, sobre un elemento móvil que puede girar alrededor de un eje. Debido a esto, sólo son aplicables en Corriente Alterna.

b.1. Funcionamiento y determinación del torque

Sea un relé de tipo disco de inducción cuyo elemento móvil es un disco metálico (generalmente de aluminio), tal como el que se muestra en la Figura 2.62. Si en el instante considerado, los flujos ϕ_1 y ϕ_2 aplicados perpendicularmente en los puntos a y b del disco están aumentando; según la ley de Lenz, las corrientes inducidas tendrán los sentidos indicados y en consecuencia, las fuerzas f_1 y f_2 ejercidas en los mismos puntos, producirán un torque que hará girar el disco.

De acuerdo con la Ley de Laplace, la fuerza f que se origina al interactuar un campo magnético de densidad de flujo b con una corriente i , que circula en un conductor de largo L , en cuadratura con el campo es:

$$f = L i b \tag{2.34}$$

Por lo tanto, en el disco de la Figura 2.62 se tiene que:

$$f_1 = K_1 i_2 \phi_1 \quad \text{y} \quad f_2 = K_1 i_1 \phi_2 \tag{2.35}$$

Si los flujos ϕ_1 y ϕ_2 varían sinusoidalmente en el tiempo y el primero adelanta al segundo en α° , es decir, $\phi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$ y $\phi_2 = \Phi_2 \sin (\omega t - \alpha)$; donde Φ_1 y Φ_2 son los respectivos valores máximos de los flujos, las corrientes i_1 e i_2 en las trayectorias de resistencia r serán proporcionales a las tensiones inducidas y por lo tanto se puede escribir:

$$i_1 = -\frac{K_2}{r} \frac{d\phi_1}{dt} = -\frac{K_2}{r} \Phi_1 \omega \cos \omega t \tag{2.36}$$

$$i_2 = -\frac{K_2}{r} \frac{d\phi_2}{dt} = -\frac{K_2}{r} \Phi_2 \omega \cos(\omega t - \alpha) \tag{2.37}$$

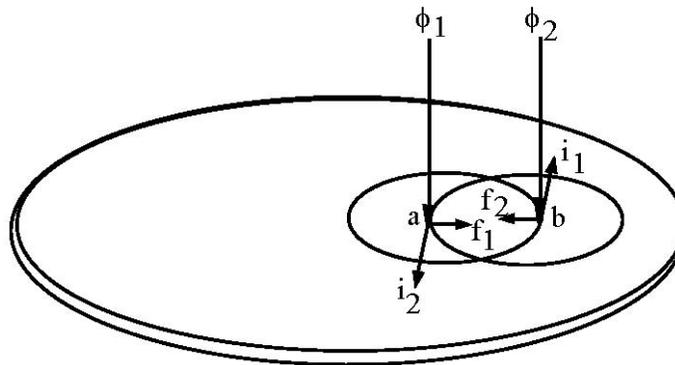


Figura 2.62.- Disco de Inducción

de esta forma:

$$f_1 = -\frac{K_1 K_2}{r} \omega \Phi_1 \Phi_2 \cos(\omega t - \alpha) \sin \omega t \quad (2.38)$$

$$f_2 = -\frac{K_1 K_2}{r} \omega \Phi_1 \Phi_2 \cos \omega t \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.39)$$

y la fuerza resultante $f = f_2 - f_1$ se puede escribir como:

$$f = \frac{K_3 \omega}{r} \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (2.40)$$

La expresión (2.40) recibe el nombre de ley de Ferraris y es aplicable a todos los elementos comparadores tipo disco de inducción, donde K_1 , K_2 y K_3 son constantes de proporcionalidad.

Al analizar esta expresión se puede concluir que la fuerza es independiente del tiempo (es constante) y su magnitud es proporcional a la frecuencia y al producto de los flujos máximos e inversamente proporcional a la resistencia r del disco. Por otra parte, el sentido y magnitud de la fuerza dependen del valor de α , es decir del ángulo de desfase entre los flujos ϕ_1 y ϕ_2 . Así por ejemplo, si el flujo ϕ_1 adelanta 90° a ϕ_2 , la fuerza tenderá a mover el disco en el sentido de f_2 .

Como se dijo, esta fuerza da origen a un torque de operación T_{op} , que se puede escribir como:

$$T_{op} = \frac{K_3 \omega d}{r} \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (2.41)$$

Como d (distancia entre el centro del disco y el punto de aplicación de las fuerzas) es una constante se puede escribir:

$$T_{op} = K \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (2.42)$$

b.2. Formas constructivas

El torque necesario para el movimiento del elemento móvil puede obtenerse de varias maneras, lo cual hace que los relés adopten diferentes formas constructivas:

Tipo disco de inducción

El elemento móvil es un disco, generalmente de aluminio o cobre, que puede girar en el entrehierro de un circuito magnético. Según la forma en que se consiguen los flujos ϕ_1 y ϕ_2 se distinguen los siguientes tipos constructivos:

– De espiras en cortocircuito

Como se muestra en la Figura 2.63, consiste en una bobina y dos espiras en cortocircuito (polo partido), para conseguir un flujo auxiliar, desfasado del principal. Cada espira puede ser un anillo metálico o bien una bobina que se cortocircuita exteriormente a través de otra protección (unidad direccional, por ejemplo). Este tipo permite entrehierros pequeños, lo que da como resultado, mayores niveles de torque, debido a que prácticamente no hay flujos de pérdida. Ejemplo de este tipo constructivo es el relé de sobrecorriente IAC de la General Electric.

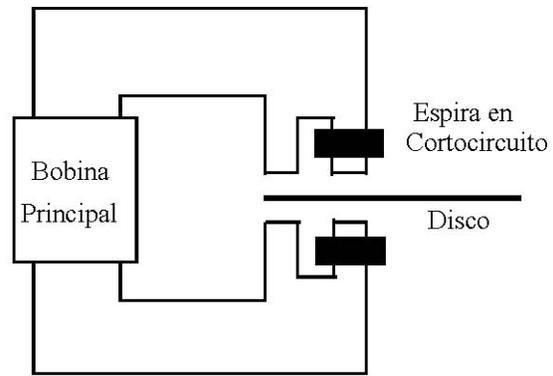


Figura 2.63.- Relés tipo disco de inducción con espiras en cortocircuito

– Wattmétrico

Su estructura es muy similar a la de un medidor de energía tal como se muestra en la Figura 2.64. Se utilizan en este caso, dos electroimanes que, en forma independiente, producen flujos que actúan sobre el disco. Tiene mayor entrehierro que el anterior, por lo que es menos sensible. Sin embargo, tiene la ventaja de que el polo superior y los inferiores pueden excitarse con magnitudes eléctricas diferentes.

Tipo cilindro (copa) de inducción

El estator de esta unidad es similar al de un motor de inducción pero de polos salientes. En la Figura 2.65 se muestra una unidad de 4 polos, pero existen también unidades con dos y ocho polos, cada una apta para una aplicación en particular. La unidad tiene un núcleo de hierro central sobre el cual se ubica un cilindro de aluminio de paredes delgadas que tiene una forma similar a la de una copa. La carrera de la copa está limitada por topes y por los contactos. Un resorte en espiral proporciona el torque de reposición. El torque depende de las dos cantidades de operación y del ángulo que existe entre ellas, al igual que en los tipo disco de inducción. La inercia de la copa es reducida debido a su pequeño diámetro y el torque es alto por lo reducido del entrehierro. De esta forma, se logran altas velocidades de operación, pudiendo llegar a valores tan bajos como $\frac{1}{2}$ ciclo (10 mseg.). Se usa en la mayoría de los relés rápidos. Otras características de estos elementos son, su torque constante (no vibratorio), su elemento móvil sin conexiones eléctricas, su buena razón de reposición y el poco efecto que tienen sobre él los fenómenos transitorios.

Al disponer de varios polos se pueden combinar sus efectos para lograr que el relé responda a la resultante de varias magnitudes eléctricas. En general, el flujo que produce la operación tiene su origen en un enrollado alimentado por corriente, el flujo de retención

puede originarse en un enrollado de voltaje. Además, se puede agregar un enrollado de polarización, el cual puede estar alimentado por voltaje o por corriente. Los relés GCX y GCY de la General Electric, son de este tipo.

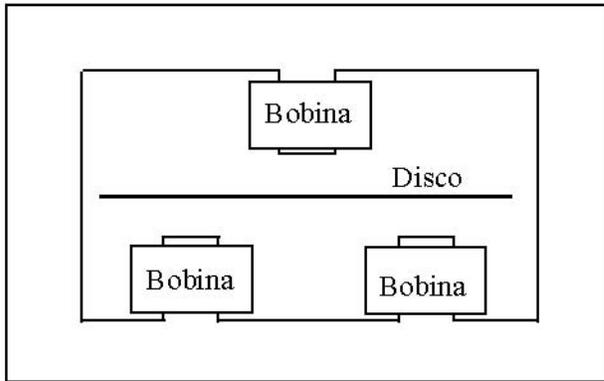


Figura 2.64.- Relés tipo disco de inducción Wattmétrico

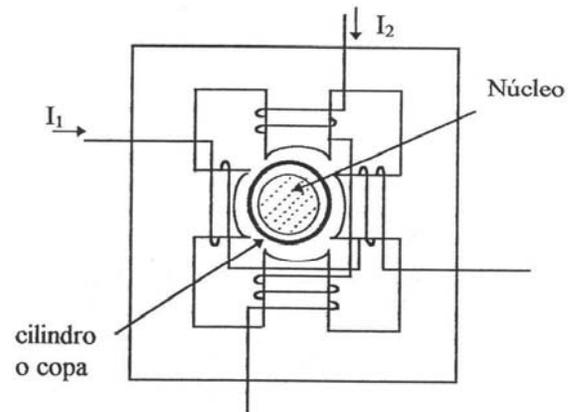


Figura 2.65.- Relé tipo copa de inducción de 4 polos

c. Relés térmicos

La mas simple de estas unidades opera bajo el principio del par bimetalico que puede tener la forma de una cinta recta o de una espiral con un extremo fijo y el otro libre. Cuando la temperatura cambia, el extremo de la cinta o espiral se mueve a causa de la diferencia del coeficiente de dilatación que tienen los dos metales. Este movimiento se utiliza para accionar un microswitch o un trinquete que accione un mecanismo de disparo de un interruptor. Sin embargo, este tipo es el menos utilizado en protecciones de sistemas eléctricos de potencia. Existen otros tipos de relés, en los cuales el elemento comparador puede ser una resistencia dependiente de la temperatura (RTD), una termocupla, etc.

d. Relés electrodinamométricos

Son similares en su principio de funcionamiento a los instrumentos electrodinamométricos, por lo cual cuentan con un electroimán fijo con un entrehierro donde se dispone una bobina móvil. El torque producido en el elemento móvil es proporcional al producto de los flujos de las partes fija y móvil. Estas unidades pueden aplicarse tanto en corriente continua como en corriente alterna, sin embargo, se utilizan muy poco en la práctica debido a su complejidad y elevado costo.

e. Relés mecánicos

Sus elementos de medida son puramente mecánicos, teniendo por ello, una gran variedad de formas constructivas. De entre ellos, se pueden citar los siguientes:

– Relés de sobrevelocidad

Son de tipo centrífugo y en general se han desarrollado según el principio del regulador de Watt, usado en máquinas de vapor.

– Relés Buchholz y de presión súbita

Se usan en transformadores de poder y funcionan en base al hecho de que al producirse fallas internas, se generan pequeños arcos eléctricos, incluso en fallas incipientes, los que originan gases provenientes de la descomposición del aceite. Si, por otra parte, la cantidad de gases es grande, se producen verdaderas corrientes de aceite en el interior y en consecuencia, sobrepresiones. Estos relés operan debido a la presencia de algunas o todas estas manifestaciones de falla interna.

El mas completo es el relé Buchholz (Figura 2.66) que se utiliza en transformadores con estanque conservador de aceite, ubicándose en el conducto de comunicación entre el tanque y el conservador. Consta de dos elementos: Una especie de flotador que detecta la presencia de gases y opera una alarma y una válvula que para grandes presiones de los gases, actúa directamente sobre el desenganche del interruptor. El relé de presión súbita se usa en transformadores sellados. Al producirse una gran presión de aceite y gases, se cierra una válvula que comanda un contacto y con ello el desenganche del interruptor de poder.

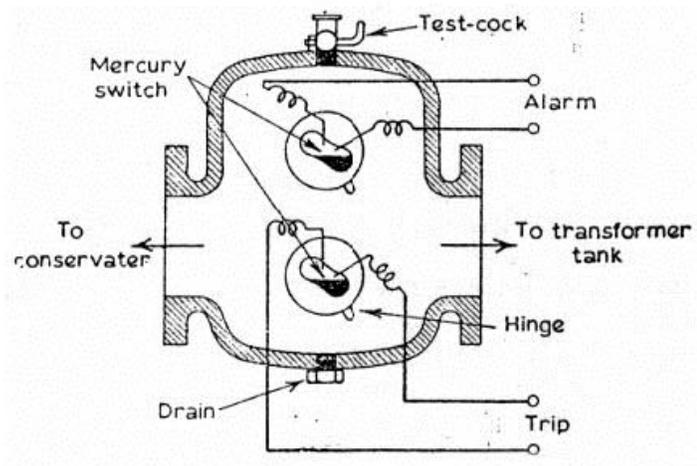


Figura 2.66.- Relé Buchholz

2.4.6.2. Relés estáticos

a. Unidades tipo amplificador magnético

La Figura 2.67 muestra este tipo de unidad, la que funciona en base a un transformador especial, en cuyo núcleo se disponen dos enrollados: Uno para corriente continua (llamado de control), el cual controla el grado de saturación del núcleo y por lo tanto la impedancia que presenta el otro enrollado y por ende la corriente que lo recorre. De este modo se logra controlar la respuesta del elemento. La señal de salida generalmente se aplica a un elemento de respuesta auxiliar de mucha sensibilidad y bajo consumo. A estos tipos de unidades se les conoce también con el nombre de transductores. Son unidades robustas cuya sensibilidad depende en gran medida del elemento de respuesta. Su aplicación es cada vez menor.

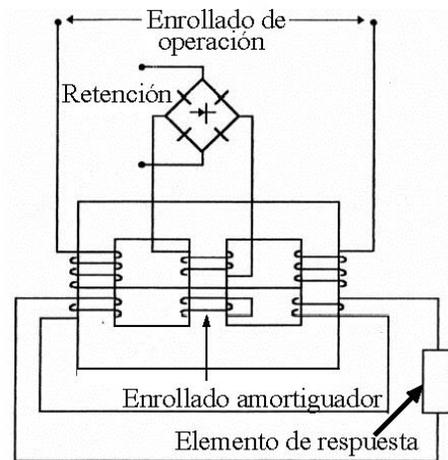


Figura 2.67.- Amplificador magnético

b. Unidades tipo puente rectificador

Estas unidades están basadas en elementos rectificadores semiconductores o diodos que fueron los primeros elementos de estado sólido desarrollados, por lo que son bastante confiables. En la Figura 2.68 puede verse un elemento comparador, en base a dos puentes rectificadores de onda completa conectados en serie. Cada puente está alimentado con una magnitud alterna de excitación. El puente de la izquierda se alimenta con la magnitud de operación. El otro con la magnitud de retención. Con los sentidos dados en la figura, el relé auxiliar operará siempre que $I_{op} > I_R$. Existen varias versiones de relés que hacen uso de unidades en base a rectificadores, como por ejemplo algunos relés de distancia, relés de hilo piloto, etc.

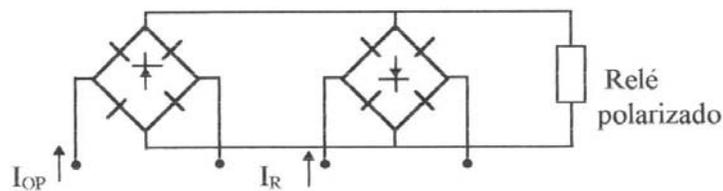


Figura 2.68.- Unidad tipo puente rectificador

c. Unidades de estado sólido

Se ha preferido utilizar el término estado sólido en vez de electrónicos, para referirse a este tipo de unidades, dado que en la actualidad no se usan válvulas electrónicas. El desarrollo de los relés de estado sólido ha estado muy estrechamente ligado al de los elementos electrónicos modernos, de modo que se hará referencia a tres tipos que son los que se usan en la actualidad.

c.1. Unidades a Transistores

Estas unidades hacen uso de componentes de baja potencia, tales como: diodos,

transistores y sus resistencias y condensadores asociados. En general, los relés usan componentes de silicio por su gran estabilidad en un amplio rango de temperaturas. Muchas unidades están basadas en circuitos lógicos del tipo AND, NOT, OR, etc. Cada uno de los circuitos que se conocen en protecciones con elementos electromecánicos tiene su equivalente de estado sólido. Se incluyen a continuación algunos de ellos.

– **Unidad de sobrecorriente instantánea**

En la Figura 2.69 se presenta una unidad de sobrecorriente instantánea. El circuito mostrado es básicamente un detector de nivel de corriente continua.

La corriente de entrada, proveniente del secundario de los transformadores de corriente se transforma en voltaje derivado de la corriente, en el secundario del transformador de entrada. Este voltaje es limitado por el recortador zener Z_1 y la resistencia R_2 . Para niveles bajos de corrientes de entrada, el voltaje es proporcional a la corriente como queda determinado por R_1 y R_3 . El valor mínimo de operación (pick-up) se ajusta mediante R_1 . Un ajuste bajo de R_1 , permite el paso de más corriente a través de R_1 y R_3 y, en consecuencia, menos hacia el “phase splitter”. Este último consta de una malla R-C, un transformador y un puente rectificador. El voltaje de salida de esta unidad se muestra en la parte superior de la Figura 2.69. Cuando este voltaje se iguala con el voltaje del zener Z_2 , el diodo zener conducirá entregando una corriente de base que lleva a Q_1 a saturación es decir, conduce. Q_1 , a su vez dispara a Q_2 , el cual proporciona la corriente de salida a través del diodo D_2 y la resistencia R_9 . Además, Q_2 proporciona realimentación positiva a través de R_7 y D_1 , componiéndose con el efecto del detector de nivel para producir una acción de “resorte”. La corriente de reposición puede ajustarse mediante R_7 . Normalmente se da un ajuste tal que la razón entre operación y reposición sea de alrededor de 0,97; de modo que este ancho de banda junto con la acción de resorte evitan una especie de “chisporroteo” al operar y desoperar el relé.

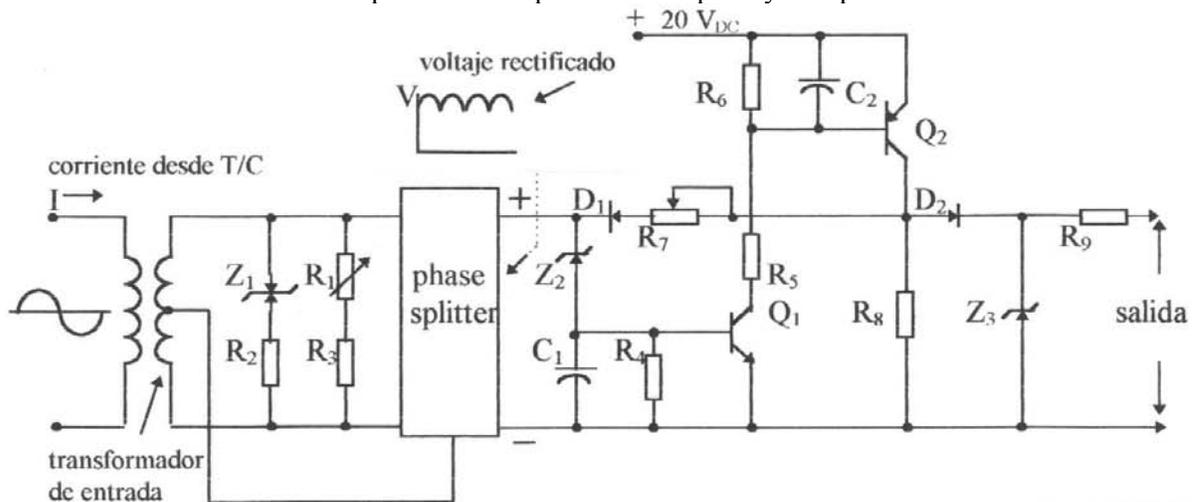


Figura 2.69.- Detector de nivel C.C. como unidad de sobrecorriente instantánea

– **Circuito con indicador y alarma**

Este circuito de luces (Figura 2.70) es el equivalente de estado sólido al de las tarjetas de indicación de los relés electromecánicos. El estado normal es con un uno en la entrada y Q_1 conduciendo. Para que opere, la entrada debe ser cero, con lo cual Q_1 se apaga y C_1 comienza a cargarse a través de R_3 y R_7 . Cuando el voltaje a través de C_1 alcanza el punto de encendido de Q_2 este se enciende, disparando a Q_4 y Q_5 , energizando la luz indicadora y el dispositivo de alarma.

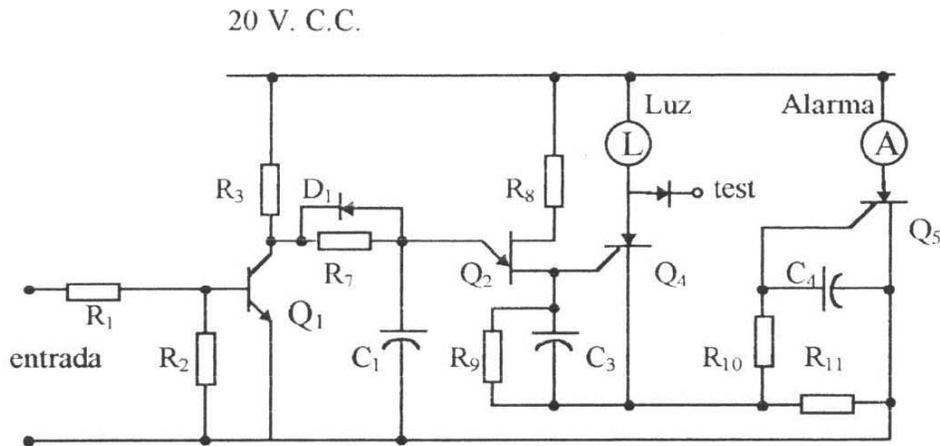


Figura 2.70.- Circuito con indicador y alarma

– **Circuito Lógico típico de temporizador**

En circuitería lógica se usan ampliamente circuitos temporizadores o timers como el que se muestra en la Figura 2.71. Con una entrada presente, Q_1 está conduciendo y cortocircuitando a R_4 - C_1 . Al remover la señal de la entrada, Q_1 deja de conducir permitiendo que C_1 se cargue a través de R_3 y R_4 . Cuando el voltaje de C_1 alcanza el voltaje zener de Z_1 , más el voltaje de D_1 hacen fluir una corriente por la base de Q_2 , con lo cual éste conduce y desaparece el voltaje de salida. Con la adecuada selección de los valores para R_3 , R_4 , C_1 y Z_1 se puede obtener un amplio rango de valores de operación.

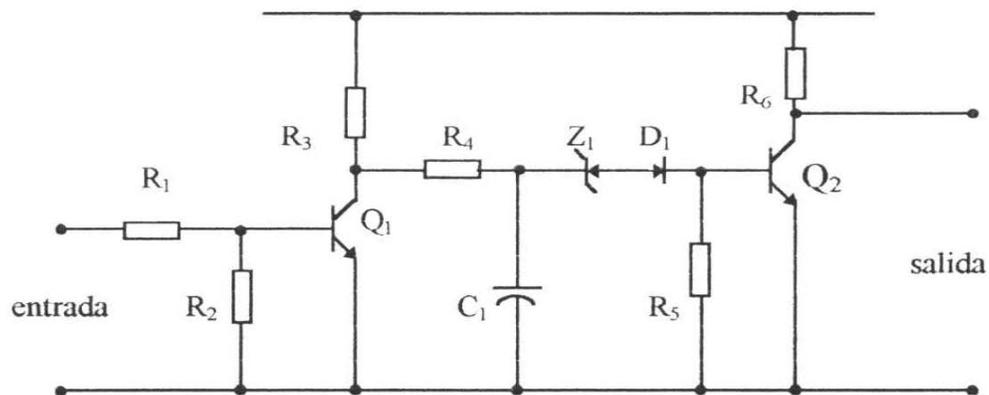


Figura 2.71.- Circuito lógico típico de temporizador

c.2. Unidades con circuitos integrados

El estado actual de la técnica en construcción de relés tiende cada vez mas hacia la utilización de circuitos integrados lineales y digitales para reemplazar a los circuitos a transistores vistos en los párrafos anteriores. A continuación se muestran dos unidades que utilizan estos componentes.

– Relé de sobrecorriente instantáneo

La unidad de sobrecorriente instantánea de la Figura 2.72 está diseñada en base a amplificadores operacionales. La corriente de entrada “i” es convertida a un voltaje proporcional a través de la resistencia shunt R que es filtrado por la acción del filtro pasabajos O_{p1} . El operacional O_{p2} es un amplificador inversor de ganancia ajustable. La señal amplificada es rectificada luego por O_{p3} y O_{p4} . El operacional O_{p5} es un integrador que proporciona una señal senoidal. El operacional O_{p6} es un detector de nivel que entrega una salida lógica (cero ó uno).

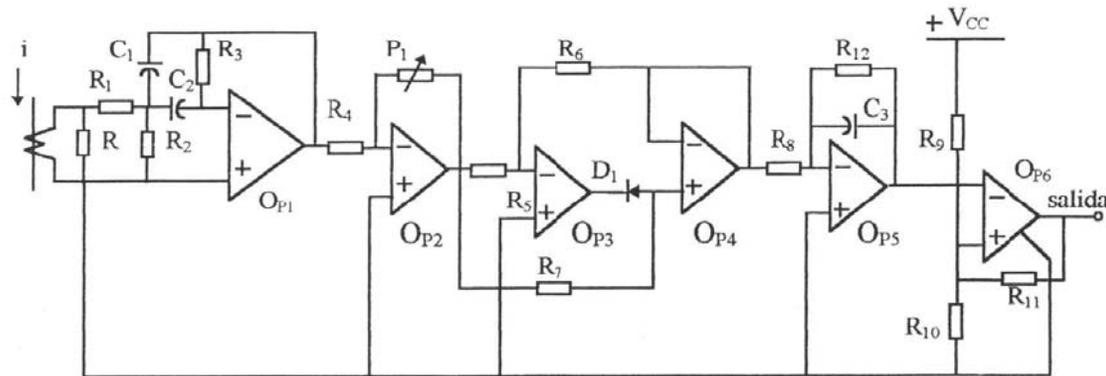


Figura 2.72.- Unidad de sobrecorriente instantánea

– Relé de sobrecorriente de tiempo inverso

El diagrama lógico de la Figura 2.73 muestra un relé de sobrecorriente de tiempo inverso, en el cual la curva de operación cambia según sea el módulo que se le inserte (Inverso, muy inverso, extremadamente Inverso). El relé es del tipo de estado sólido SCO de la fábrica Westinghouse. Sus características son equivalentes a las de un relé del tipo electromagnético de la serie CO, e incluso puede ser instalado en la misma caja de éste. La potencia necesaria para alimentar el relé se obtiene de la corriente de entrada, a través del transformador de corriente a voltaje “T”. El voltaje de salida de referencia, habilita al enrollado de información para la detección de la sobrecorriente.

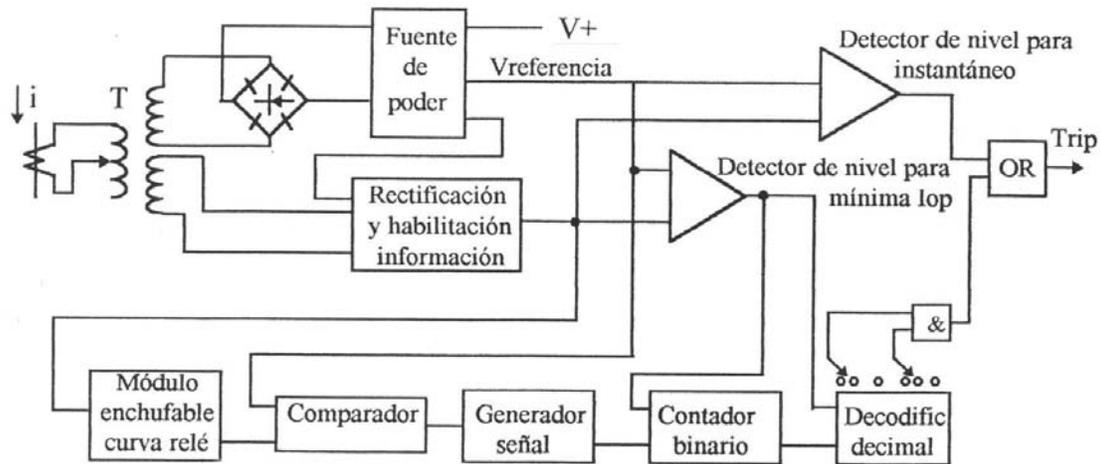


Figura 2.73.- Relé de sobrecorriente de tiempo inverso SCO

c.3. Relés con microprocesador

Con el desarrollo actual de la electrónica han aparecido en el mercado una diversidad de relés en base a microprocesadores, que aunque son mas caros entregan una cantidad de prestaciones que equivalen a disponer de varios relés en uno, e incluso permiten contar con algunas medidas de magnitudes eléctricas. Entre los modelos existentes en el mercado se considerará el relé tipo RACIF de ASEA por su gran versatilidad.

Algunas de las características de estos relés son las siguientes:

- * Son prácticamente libres de mantenimiento.
- * No necesitan alimentación auxiliar.
- * Tienen requerimientos muy bajos de potencia desde los transformadores de medida.
- * Son apropiados para sustituir a los relés del tipo electromecánicos, con la ventaja de tener incorporadas curvas características de tiempo inverso y de tiempo definido, seleccionables por medio de microswitches.
- * La función instantánea puede ser bloqueada o temporizada.
- * Se pueden conectar de modo de operar con cualquier combinación de fallas entre fases y fallas a tierra.
- * Poseen un alto grado de inmunidad contra interferencias eléctricas.
- * Son de diseño compacto, por lo cual ocupan menos espacio.
- * Las curvas características y las funciones de tiempo son realizadas por el microprocesador, usando tablas de datos y lazos de retardo.

En la Figura 2.74, se muestra el diagrama en bloques del relé RACIF de ASEA.

Un microprocesador controla el funcionamiento de la protección. Permanentemente está controlando todas las entradas para comprobar la confiabilidad de la información antes de operar.

La salida es a través de relés auxiliares rápidos. Cuenta también con una salida a través de un opto-acoplador que puede utilizarse para combinar con otras protecciones, por ejemplo, para

bloquear una protección de barras.

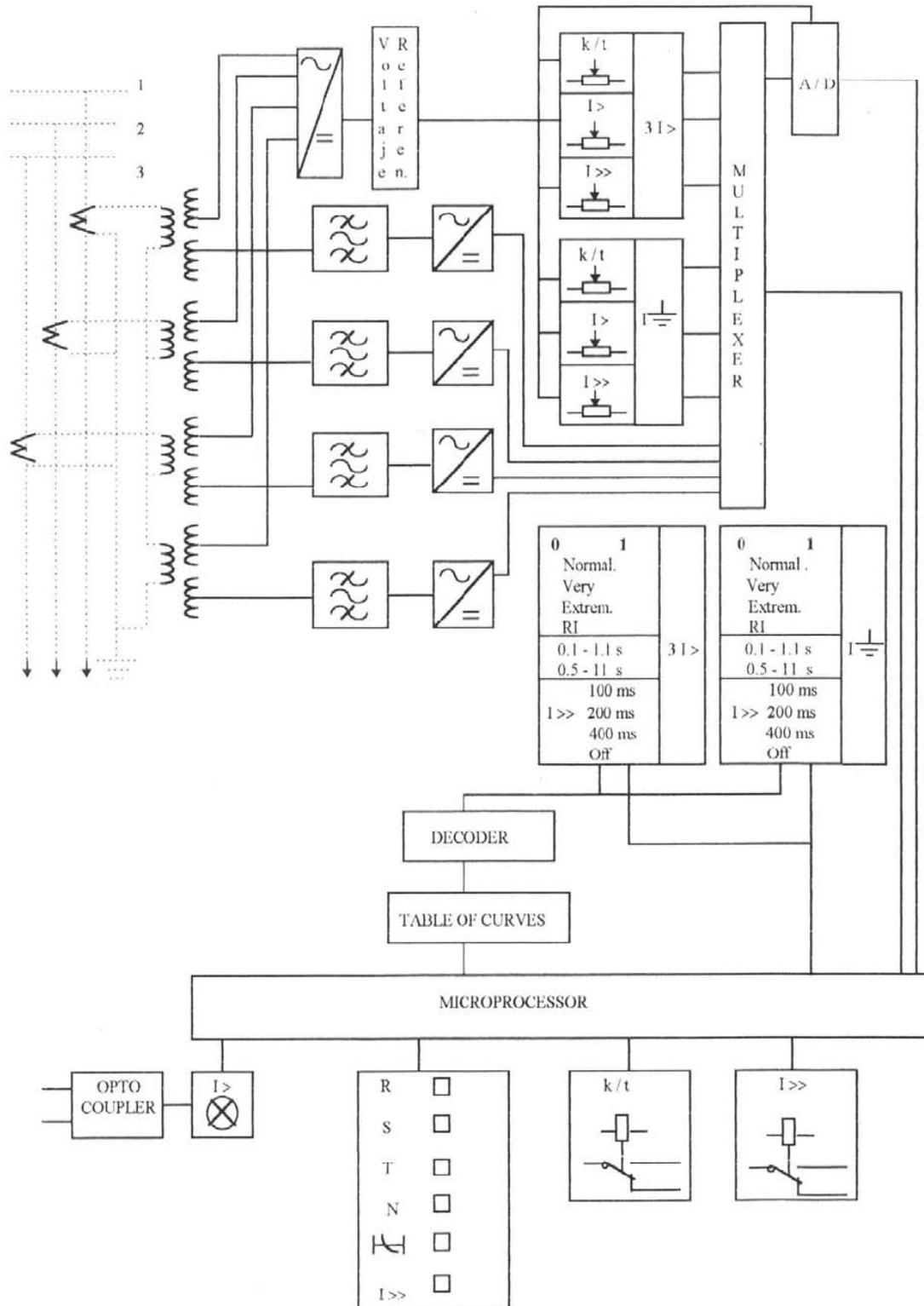


Figura 2.74.- Relé de sobrecorriente trifásico mas tierra, modelo RACIF

2.4.7. Identificación de los Relés de Protección y Dispositivos de Control

Como se dijo, un relé de protección es un equipo cuya función es vigilar o sensar permanentemente una variable eléctrica y comandar la operación de un interruptor en el caso que la amplitud de la variable sen-sada varíe con respecto a un valor predeterminado. Una forma de identificar estos relés y otros equipos primarios de control, de acuerdo a la función que realizan es usando los números definidos en la norma ANSI/IEEE C57-2-1979. Estos números van del 1 al 99 y cada uno de ellos identifica un determinado dispositivo. Algunos de estos números se indican a la Tabla 2.14.

Tabla 2.14.- Números normalizados de algunos dispositivos

Número	Descripción	Número	Descripción
21	Relé de distancia	51	Relé de sobrecorriente temporizado
25	Relé de chequeo de sincronismo	52	Interruptor de Potencia
27	Relé de bajo voltaje	59	Relé de sobre voltaje
30	Dispositivo anunciador	60	Relé de balance de voltaje
32	Relé direccional de potencia	67	Relé direccional de sobrecorriente
40	Relé de pérdida de excitación	79	Relé de reconexión
41	Interruptor de campo	81	Relé de frecuencia
46	Relé de inversión de fases	86	Relé de bloqueo
49	Relé térmico de sobrecarga	87	Relé diferencial (de corriente)
50	Relé de sobrecorriente instantáneo	94	Relé antibombeo

Junto a estos números una letra indica el equipo que se protege o bien complementa la información dada por el número.