

PROTECCIONES.

I.-Sobrecorrientes en la salida.

I.1.-Consideraciones generales.

Todo equipo electrónico de control de potencia tiene definido el valor máximo de la corriente de carga que puede entregar en condiciones normales de operación.

Cualquier circunstancia que haga que la corriente de carga supere ese nivel máximo de diseño debe considerarse una falla que produce sobre carga.

Se deben considerar dos tipos de sobre corrientes:

A.- Sobre corrientes de carga: Son las sobre corrientes que se producen durante la operación del circuito

electrónico de potencia, cuando la corriente controlada por los dispositivos electrónicos de control de potencia supera el valor máximo considerado en el diseño.

B.-Sobre corrientes de encendido ("inrush currents"): Son las sobre corrientes transitorias que pueden ocurrir durante el proceso de energización inicial del circuito electrónico de potencia.

A.- Sobre corrientes de carga.

I.2.-Clasificación de las fallas por sobre corriente en operación estacionaria por su intensidad.

1.- Falla “moderada” (sobrecarga limitada).

Se produce cuando la impedancia de carga cae, por cualquier motivo, por debajo del menor valor esperado en el diseño y, como consecuencia, los valores de corriente pico, rms y promedio sobrepasan los considerados como máximos en el diseño, pero no alcanzan los valores que causan la "destrucción inmediata" de los dispositivos afectados.

2.- Falla "grave" (sobrecarga no limitada, cortocircuito).

Se produce cuando la impedancia de carga ha colapsado, por cualquier motivo y, como consecuencia, la corriente entregada puede crecer hasta alcanzar un valor pico que causa la "destrucción inmediata" de los dispositivos afectados.

Por supuesto el término "destrucción inmediata" tiene una dimensión temporal que debe ser definida en función del equipo afectado: una máquina puede quedar fuera de servicio después de soportar la sobrecarga catastrófica por minutos (y posiblemente ser reparable), mientras que un semiconductor puede destruirse irreparablemente (evaporarse literalmente) en un centenar de microsegundos o menos.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta es que los componentes semiconductores son mucho menos resistentes que los componentes pasivos (inductancias, resistencias, cables y condensadores) del equipo, así que en caso de falla catastrófica normalmente los primeros elementos circuitales destruidos serán los dispositivos semiconductores de control de potencia.

I.3.-Niveles de protección contra sobre corrientes en la carga.

1.- Protección normativa.

Todo equipo electrónico de potencia debe cumplir con la normativa nacional correspondiente en lo referente a dispositivos de protección de sobre-corriente convencionales (fusibles, interruptores térmicos, etc.) que resulten aplicables según su potencia nominal. En Venezuela se debe cumplir el Código Eléctrico Nacional en sus distintos niveles.

En todo caso es preciso resaltar que la normativa nacional define las protecciones obligatorias necesarias para lograr dos objetivos:

a.- Proteger al personal humano contra accidentes producidos al manipular equipos o instalaciones eléctricas.

b.- Evitar que fallas en los equipos conectados al sistema eléctrico nacional puedan causar daños a los equipos de la compañía distribuidora de la electricidad ("del medidor de consumo hacia arriba").

En ambos casos se asume implícitamente que estas protecciones actúan cuando los equipos donde se generó la falla ya han sido dañados. Son por lo tanto "protecciones a terceros", no al equipo propiamente dicho.

En este nivel de protección se suele encontrar dos alternativas:

a.- Interruptores mecánicos que físicamente abren el circuito en caso de falla, cuando la corriente supera durante un cierto tiempo el valor de activación.

La acción puede ser electromagnética, en la cual el campo producido por la corriente nominal de disparo produce una fuerza suficiente para mover el conjunto de contactores que abren el o los circuitos, o térmica, cuando la energía térmica de la corriente nominal de disparo es suficiente para calentar un elemento bimetálico que se deforma y dispara los contactores. Los contactores pueden tardar en actuar centenares de milisegundos.

b.-Fusibles de propósito general. El calentamiento producido por la corriente nominal es suficiente para derretir el elemento fusible si se aplica por el tiempo necesario.

En general los fusibles para circuitos de corriente alterna de voltaje medio o alto tardan unos 100 a 200ms en actuar, los fusibles para circuitos AC de baja tensión tardan entre 30 y 100ms.

Los fusibles para circuitos DC de velocidad media tardan en actuar entre 40 y 60ms, y los de alta velocidad entre 30 y 40ms.

En todo caso interrumpir una corriente DC es complicado si el circuito es de alta inductancia, así que los fusibles DC pueden no cumplir su objetivo en esas condiciones.

El tiempo de respuesta de contactores y fusibles es también función de la intensidad de la falla tanto en el valor de la sobrecorriente como en la velocidad de variación de la misma.

En general las normas legales sobre protecciones de sobre corriente se refieren a las acometidas del sistema eléctrico, y su cumplimiento corresponde a los diseñadores de la edificación donde se instalarán los equipos; sin embargo dadas las múltiples razones que hacen necesario desconectar los equipos de la fuente primaria de energía, usualmente la línea AC, casi todos los equipos de potencia cuentan con interruptores electromecánicos en su canal de alimentación que además proporcional cierto nivel de protección a la

instalación eléctrica en caso de fallas internas del equipo.

Los equipos médicos tienen su propia normativa de seguridad que, por supuesto, se aplica a sus subsistemas electrónicos de potencia (fuentes de alimentación, actuadores de motores, etc.).

1.4.- Protección interna del equipo.

En todo equipo bien diseñado el valor de la corriente máxima se calcula de forma que sea menor que la corriente máxima que efectivamente pueden manejar los componentes empleados en el equipo; la diferencia entre la corriente máxima nominal del equipo y la corriente máxima del componente de menor capacidad de corriente que esté en el camino de la corriente de carga representa el margen de seguridad del equipo frente a sobre cargas, y es su primera línea de defensa.

Este margen debe ser aprovechado para detectar la situación de sobre carga y actuar para remediarla, bien

tomando acciones dentro del propio equipo, bien mediante dispositivos externos de protección.

1.4.1.-Protección electrónica.

a.-Auto-protección por apagado de los componentes electrónicos de control de potencia.

Todo sistema electrónico de potencia que controle el flujo de la corriente de carga con dispositivos controlados en encendido (tiristores) o con dispositivo completamente controlados debe contener un circuito de supervisión y protección electrónica que detecte la aparición de sobre-corrientes y bloquee los circuitos de disparo.

El nivel de detección debe calcularse para que la protección actúe cuando la corriente de carga ha superado el valor máximo de diseño del equipo, pero antes de que se alcance el nivel máximo de corriente especificado para el componente con menor capacidad de corriente.

Debe existir una separación suficiente entre el valor máximo de operación y el de detección para evitar falsas alarmas debidas al ruido eléctrico.

La auto protección electrónica debe tener la más alta prioridad para interrumpir directamente la aplicación de las señales de disparo a los dispositivos electrónicos de control de potencia semi o totalmente controlados, sin necesidad de que actúe el control central para validar la interrupción.

Los circuitos que forman el lazo de protección deben ser independientes de los que forman el lazo de control y regulación, incluso a nivel de fuentes de alimentación, como protección adicional en caso de una falla del controlador central.

Adicionalmente la actuación de la protección electrónica debe generar una señal que informe al control central de la ocurrencia de la falla, y debe mantener el bloqueo

hasta que el operador autorizado "limpie" la señal de falla y permita el reinicio de operaciones.

Puede ser interesante incluir una señal de aviso que se active cuando se opera sobre la carga máxima pero por debajo del nivel de alarma; esta información puede indicar que el equipo está sub-dimensionado para la función que tiene asignada.

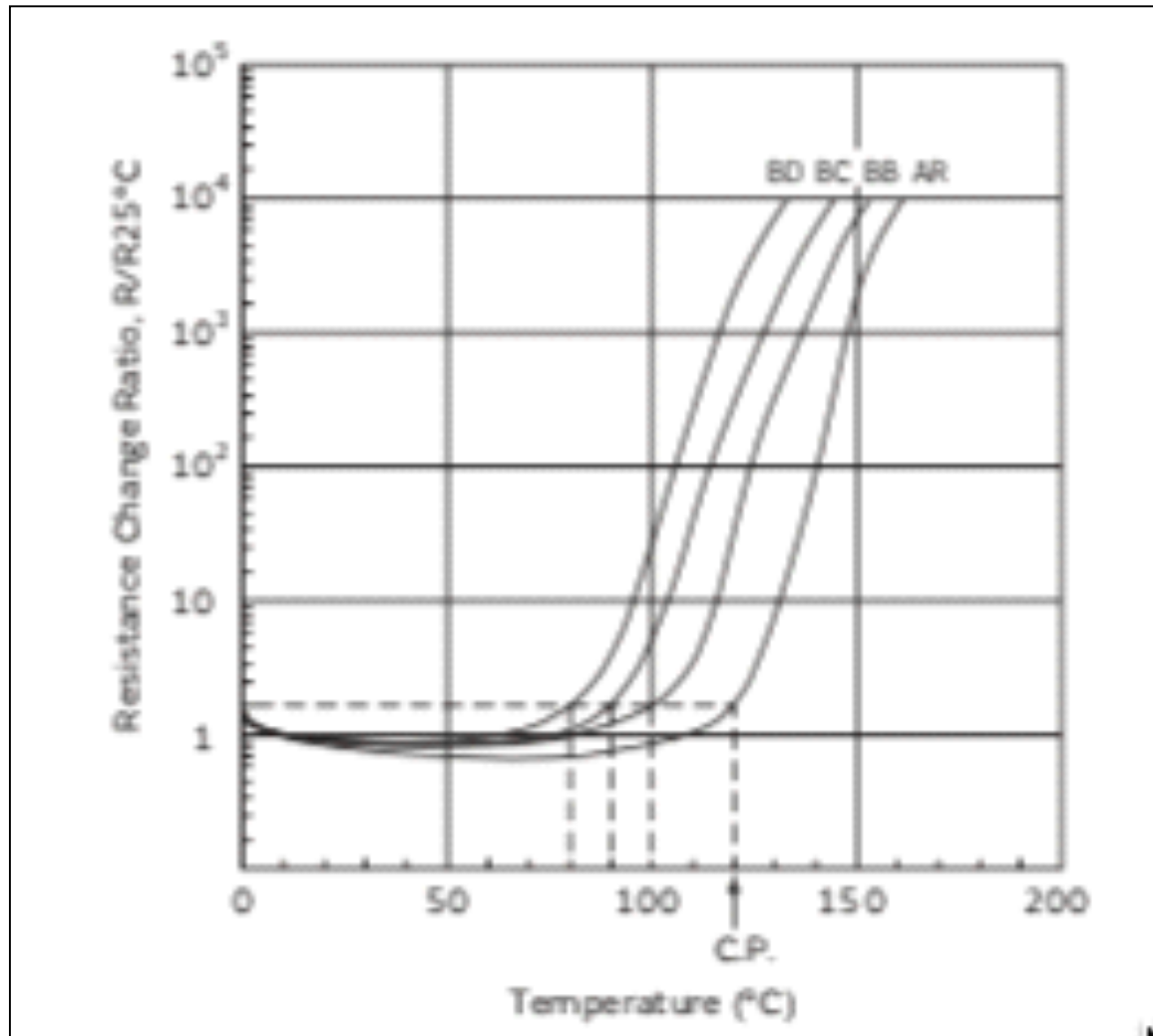
La protección electrónica debe operar antes de que se quemem los fusibles o actúen los interruptores de sobre corriente electromecánicos o térmicos incluidos en el equipo o en la instalación eléctrica a la cual está conectado el equipo.

Si los dispositivos electrónicos de control de potencia son completamente controlados y su velocidad de conmutación de apagado es suficiente, la protección electrónica podrá interrumpir la falla antes de que se alcance el valor de corriente que cause daño a los dispositivos incluso si la falla es del tipo catastrófico. Esta capacidad se suele conocer como protección contra corto circuito a la salida.

En algunos casos la protección electrónica puede ser ayudada con un termistor tipo PTC, calibrado de forma que esté en su estado de baja impedancia, en equilibrio térmico con el ambiente a la temperatura nominal de operación de la fuente y con la corriente nominal máxima de salida.

Si la corriente crece por encima de este valor, aumenta la potencia disipada, lo que aumenta la resistencia, e inicia un lazo de realimentación positivo que se opone al aumento de la corriente.

El aumento de la resistencia debe ser lo suficientemente grande para mantener la corriente de salida dentro del rango nominal; esta situación no puede ser permanente, porque eventualmente se sobrecargará al termistor, pero puede limitar los picos transitorios, y dar tiempo a que actúen otros sistemas de protección de respuesta mas lenta.

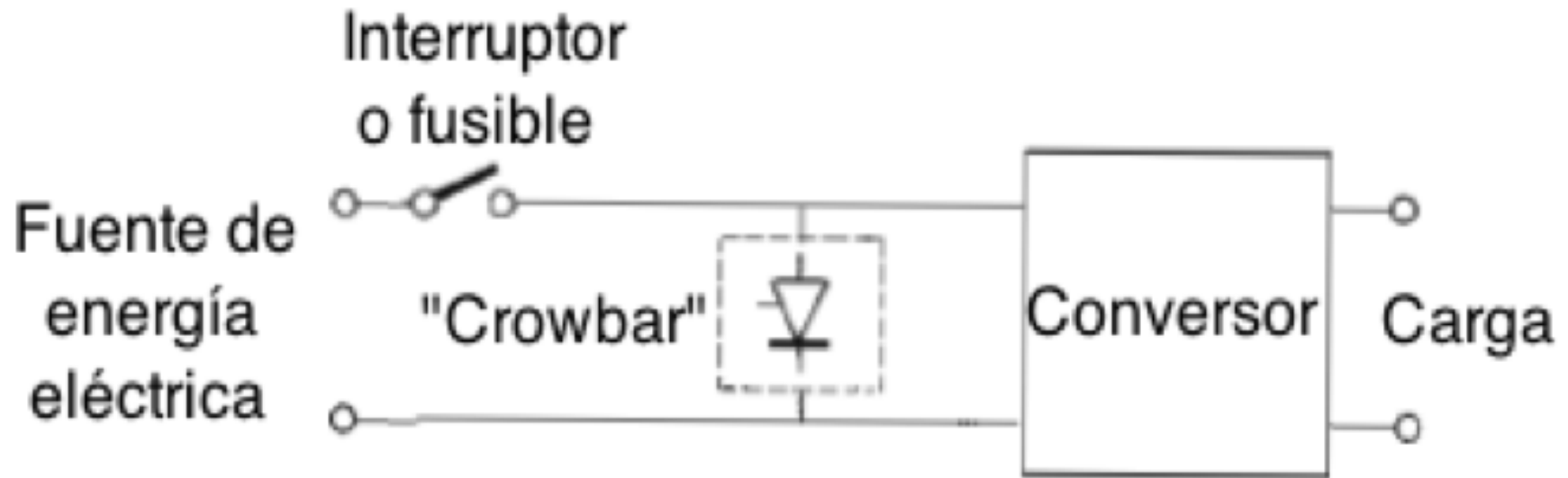


Característica resistencia/temperatura de termistores PTC ("posistores"). Cortesía de muRata.

En el caso de circuitos con tiristores, operando en apagado natural, no se puede interrumpir la conducción de los dispositivos que ya están encendidos, por lo que la autoprotección electrónica es adecuada solo cuando la falla es "moderada", esto es, si la corriente prospectiva de falla es lo suficientemente baja como para no causar la destrucción de los tiristores en un semi período de la falla; en este caso la auto-protección puede evitar el encendido de los siguientes tiristores en la secuencia de operación, lo que es suficiente para evitar daños; si la falla es "grave", todavía existe la posibilidad de que los tiristores en conducción sufran daño, pero la protección electrónica usualmente evitará que la falla afecte a la totalidad de los tiristores y equipos asociados.

Si el circuito de potencia esta formado por diodos no existe la opción de la auto-protección electrónica.

b.- Protección asistida por tiristor auxiliar (protección "crowbar").



Configuración de protección asistida por tiristor.

En esta configuración se conecta un tiristor en paralelo con la entrada del conversor a proteger; en caso de detectarse una falla de sobre corriente en la carga el sistema de protección dispara este tiristor, lo que interrumpe la alimentación al circuito protegido.

Por supuesto esta acción corto circuita la línea de alimentación y toda la corriente de falla prospectiva circula a través del tiristor de protección, que debe ser capaz de soportarla hasta que el conmutador electromecánico o el fusible limpien la falla. Este problema puede reducirse incluyendo un termistor tipo PTC en serie con el conmutador electromecánico o el fusible.

Por supuesto la protección "crowbar" es la única auto-protección electrónica aplicable en circuitos con diodos de potencia.

Esta protección puede ser efectiva para proteger los semiconductores de conversores de baja potencia para los cuales puede ser difícil encontrar fusibles adecuados

En todo caso las protecciones electrónicas no son absolutamente seguras por cuanto:

- 1.-No puede funcionar si la falla en el circuito de potencia se origina a consecuencia de una falla en el sistema de control que produce disparos fuera de secuencia.

2.-El canal de medición de la sobre corriente puede fallar.

1.4.2.- Protección con fusibles.

Cuando no es posible la protección electrónica o se desea cubrir la posibilidad de que esta falle, es posible establecer una última línea de defensa mediante fusibles rápidos, con la intención de que la sobre corriente destruya al fusible rápido antes de alcanzar un nivel suficiente para destruir al semiconductor.

El primer paso para determinar si una posible falla será o no catastrófica para el diodo o tiristor considerado es calcular el valor de la corriente prospectiva de falla, esto es, cual sería el valor de la corriente que circularía

durante la falla en el supuesto de que esta no va a ser interrumpida por el fallo de algún elemento en el circuito.

Para esto se debe determinar cual será la tensión de alimentación durante la falla y cual será la impedancia remanente en el circuito durante la falla.

En primera aproximación, y para considerar el peor caso, si el equipo está conectado a la red AC se asume que la tensión durante la falla será la máxima tensión de la línea de alimentación, que la falla será un cortocircuito en la salida del conversor, y que la impedancia que limitará la corriente será básicamente la impedancia de la línea AC, que normalmente puede considerarse similar

a la impedancia de cortocircuito del secundario del transformador de servicio al equipo.

Si el valor pico de la corriente prospectiva de falla es significativamente mayor que la corriente I_{FSM} del diodo o tiristor considerado, se puede asumir que la falla será catastrófica y que el semiconductor será destruido durante la misma.

En estas condiciones, si se desea evitar la destrucción del semiconductor la única posibilidad será buscar un fusible rápido capaz de protegerlo contra la sobre corriente al ser destruido primero.

Fusible.

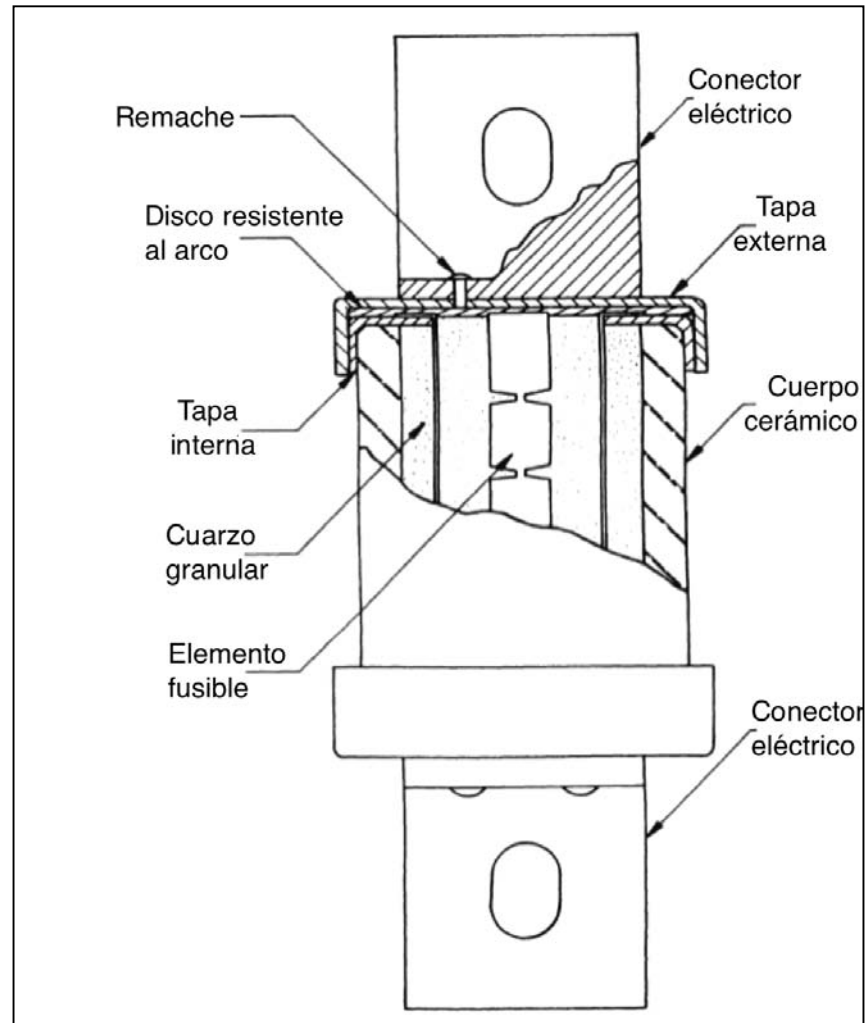
Dispositivo constituido por un soporte adecuado y un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que, calentado por efecto Joule cuando la intensidad de corriente supere por cualquier causa un determinado valor que pudiera hacer peligrar la integridad de la instalación, se funda, interrumpiendo la circulación de la corriente.

Los fusibles fueron reportados en la literatura técnica por primera vez en 1774, y desde entonces se han desarrollado multitud de variantes.

Tipos de fusibles:

Desde el punto de vista de la protección de semiconductores los fusibles se pueden considerar divididos en dos categorías:

- 1.- Fusibles estándar o de propósitos generales, con una velocidad de respuesta moderada, limpian la falla en varios ciclos de la red y, en general, son inútiles en la protección de dispositivos semiconductores frente a fallas catastróficas, aunque pueden ser útiles para proteger circuitos de diodos contra fallas moderadas.
- 2.- Fusibles rápidos ("fast fuses" o "semiconductor fuses"). Actúan con rapidez suficiente para que sea posible que interrumpen la falla antes de que se dañe el dispositivo que se trata de proteger.

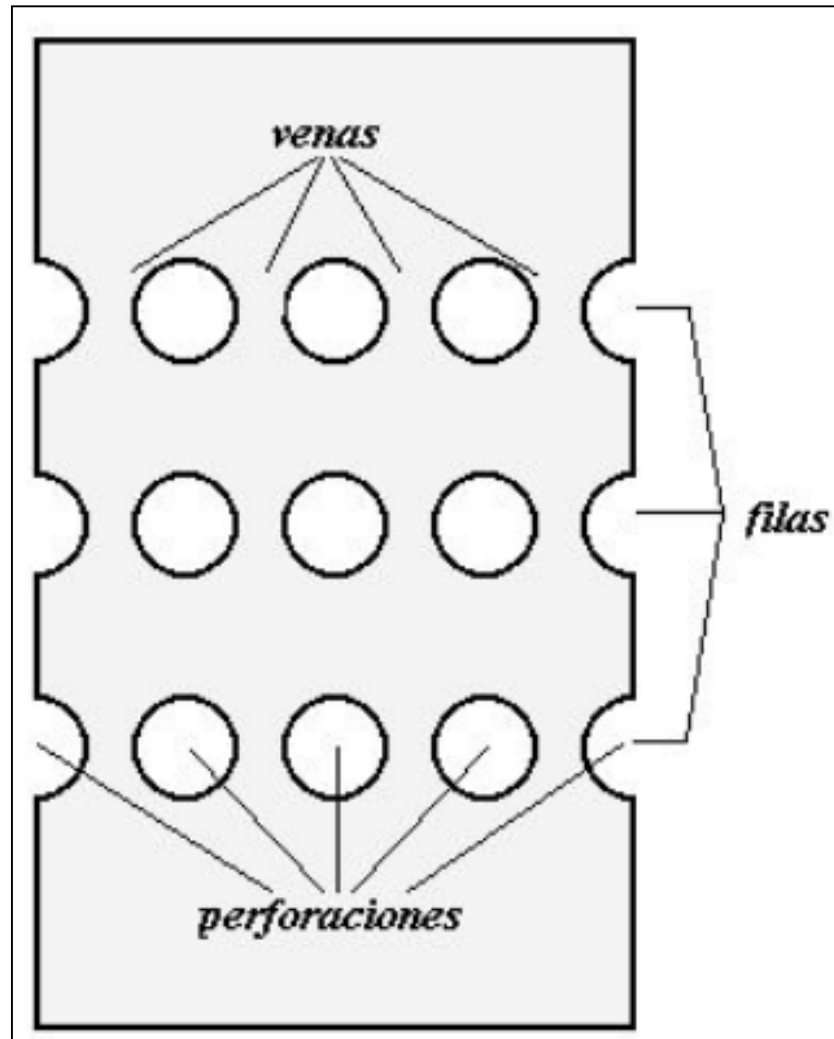


Corte esquemático de un fusible rápido con un arreglo único de elementos fusibles en serie.

Aunque se los llame "fusibles de semiconductores", los fusibles rápidos (o extra-rápidos) no están contruidos con semiconductores.

Su elemento fusible esta formado por una o varias cintas de metal con características adecuadas de punto de fusión (usualmente plata), encerradas en un cuerpo de cerámica resistente; todo el espacio no ocupado por los elementos fusibles se rellena con cuarzo granulado.

Hay dos formas de fabricación. En la primera la tira presenta una serie de estrechamientos ("cuellos") que separan segmentos de ancho completo ("alas"); en la segunda a intervalos se perforan un número de orificios circulares ("perforaciones") formando una fila a lo ancho de la tira; las perforaciones quedan separadas por zonas estrechas ("venas").



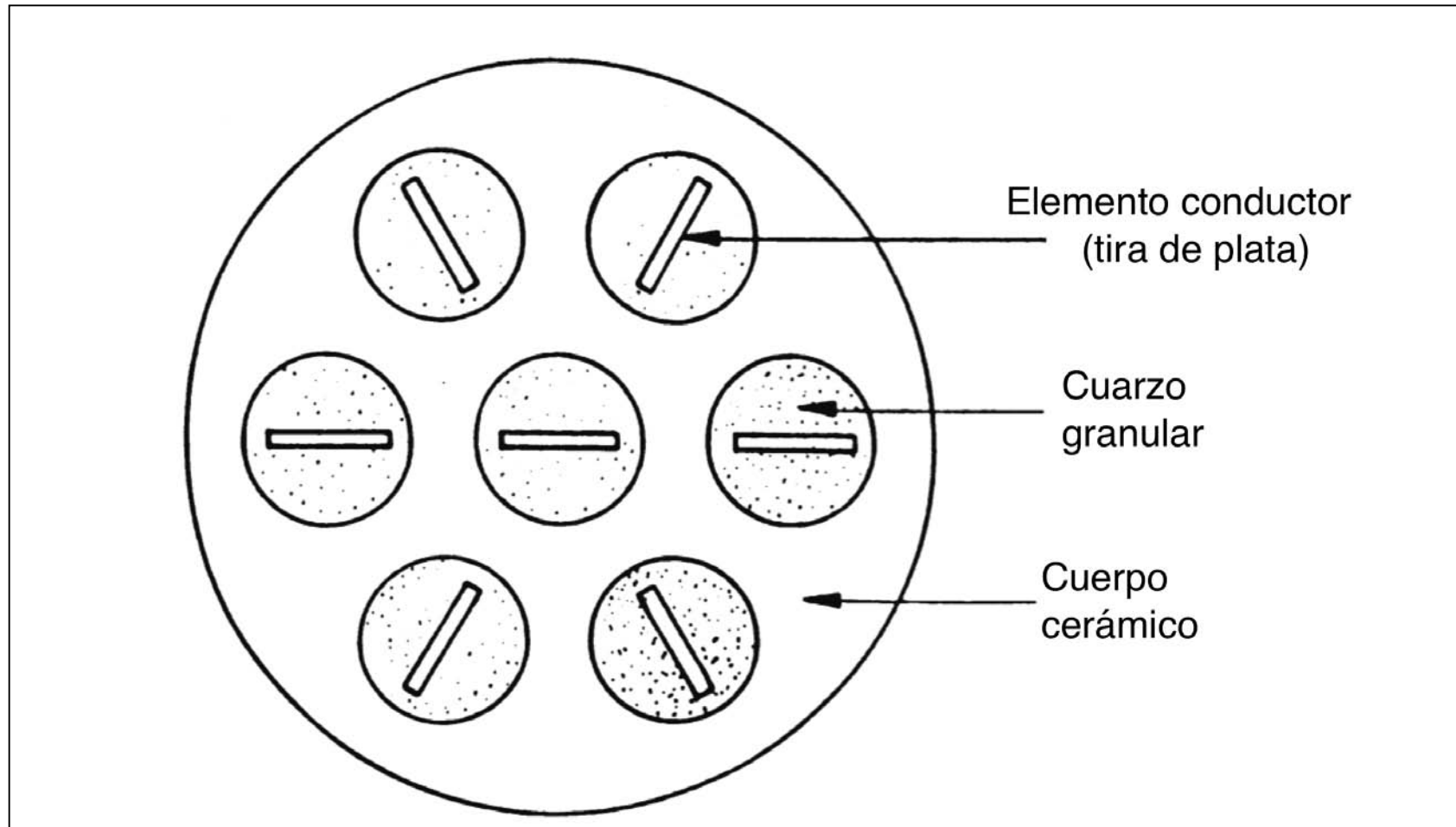
Esquema de un elemento fusible con perforaciones y venas.

Cada tira tiene una capacidad determinada de soportar corriente, definida en base a sus dimensiones de ancho y espesor, la longitud, y el número de estrechamientos ("cuellos" o filas de orificios) se define en base a la tensión de arco que se debe soportar.

Si se requiere mayor capacidad de corriente se pueden conectar varias tiras básicas en paralelo dentro del cuerpo del fusible.



Fusible rápido para aplicaciones de alta tensión (12kV), 24 láminas fusibles en dos arreglos circulares concéntricos, uno interno (izquierda) y otro externo (derecha).

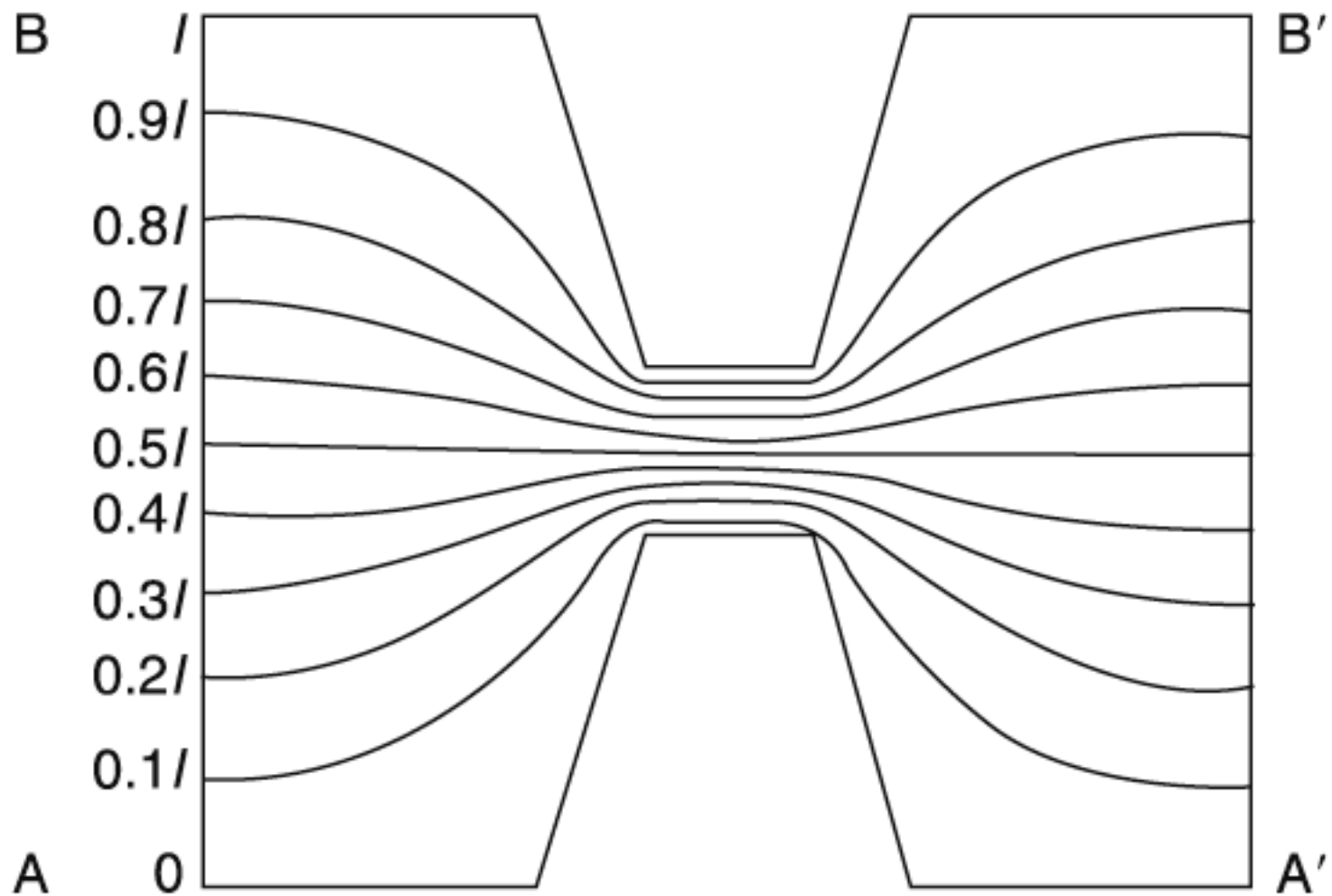


Vista frontal de un arreglo paralelo de siete tiras de elementos fusibles en serie.

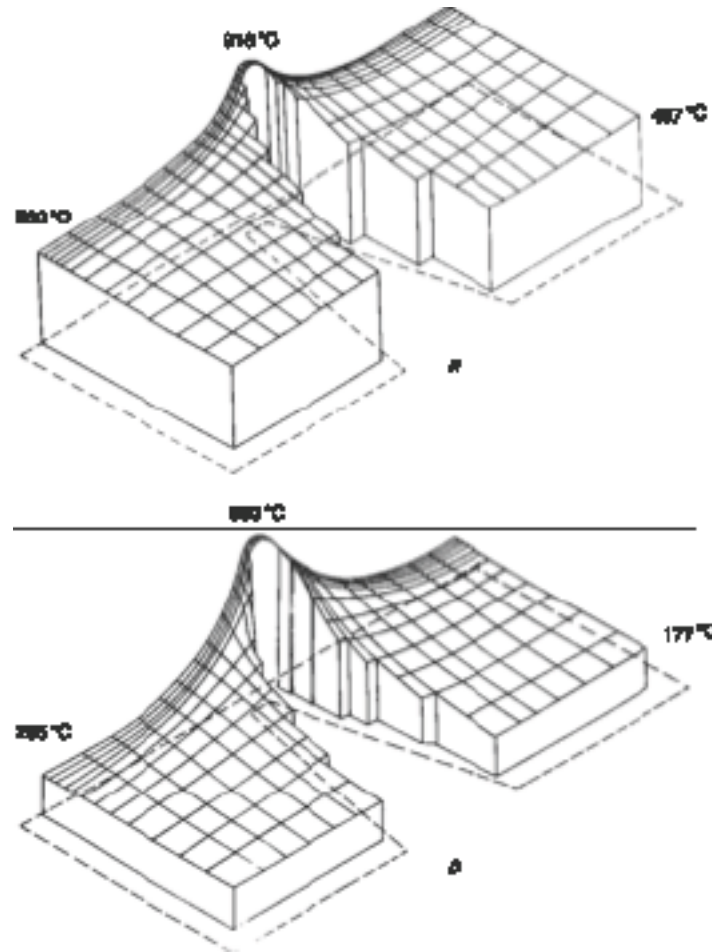
En cualquiera de los dos casos la forma de operación es la misma:

En condiciones normales, cuando la corriente no excede el valor de la corriente nominal máxima del fusible, la circulación de corriente por el elemento fusible lo calienta por efecto Joule, pero el área del elemento fusible está calculada para que se alcance equilibrio térmico por debajo de la temperatura de fusión.

Debido a los cuellos o los orificios, la temperatura de equilibrio térmico no es uniforme en toda el elemento: la densidad de corriente es mayor en las zonas de ancho reducido ("cuellos" o "venas"), que por lo tanto se calientan mas que las zonas de ancho completo ("alas"), donde la densidad de corriente es menor y que por lo tanto se calientan menos.



Distribución de la corriente en uno de los elementos serie del fusible (un "cuello" entre dos "alas").

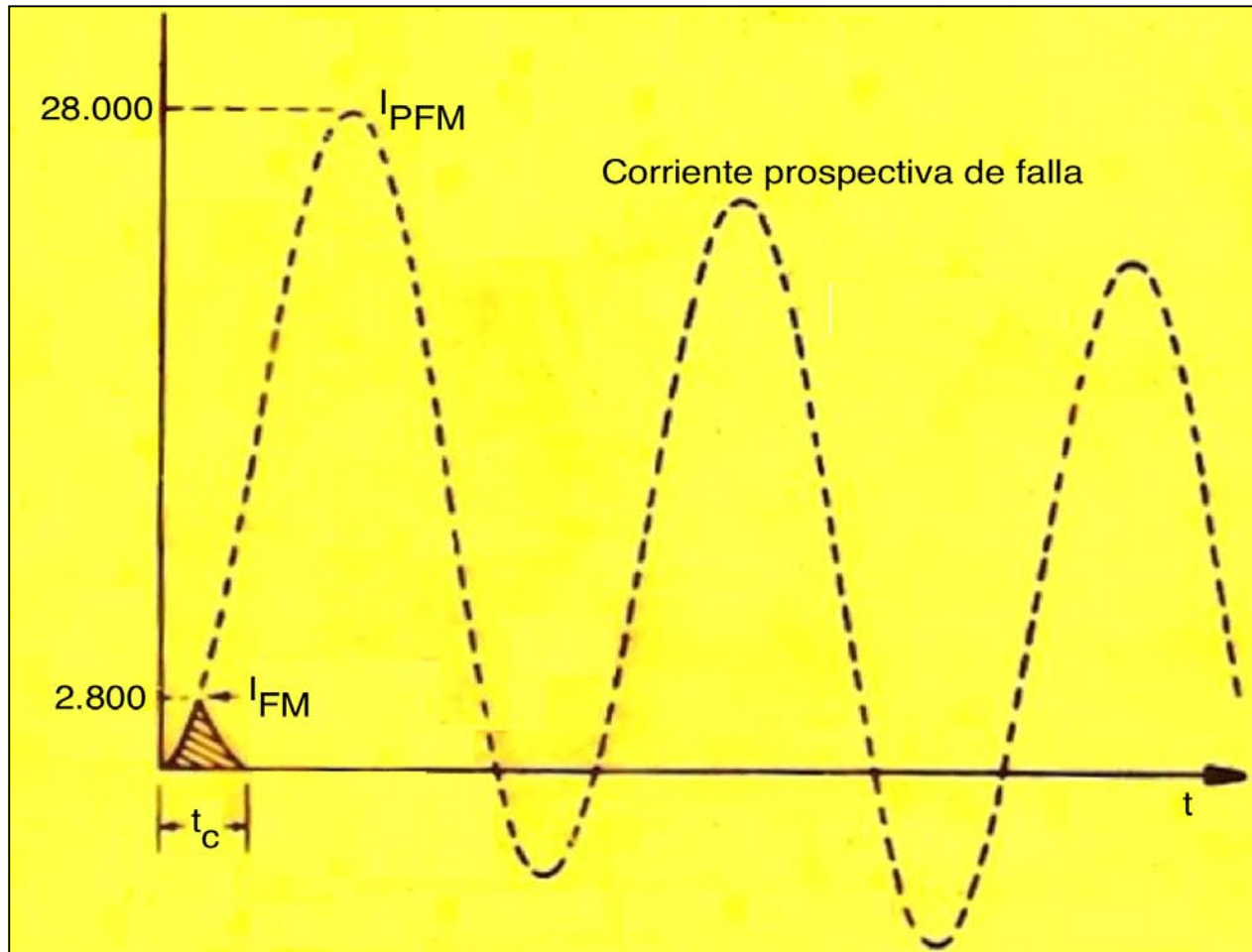


Distribución de la temperatura en un elemento
(a) Corriente en el elemento 900A.
(b) Corriente en el elemento 1200A.

Cuando se produce una falla catastrófica, la corriente comienza a subir a gran velocidad, y se dispara la disipación de calor en el elemento fusible, los cuellos se sobrecalientan rápidamente, el exceso de calor no tiene tiempo de dispersarse hacia las alas y los cuellos se funden, iniciándose el arco.

El tiempo transcurrido desde el inicio de la falla hasta el comienzo del arco es t_m , el tiempo de fusión ("melting") del fusible.

Cuando se inicia el arco la corriente de falla alcanza su valor máximo, I_{FM} ; a partir de este momento la corriente empieza a reducirse exponencialmente hacia cero.



Respuesta de un fusible rápido a un cortocircuito.

I_{FM} es la corriente máxima que circula en el fusible en el momento de la ruptura.

La máxima corriente que puede circular en caso de una falla catastrófica, llamada corriente prospectiva de falla máxima, I_{PFM} , se calcula considerando la tensión nominal y la impedancia de la línea cortocircuitada; el valor pico correspondiente, I_{PFM} , es el valor máximo que tendría la corriente de falla de no existir el fusible rápido.

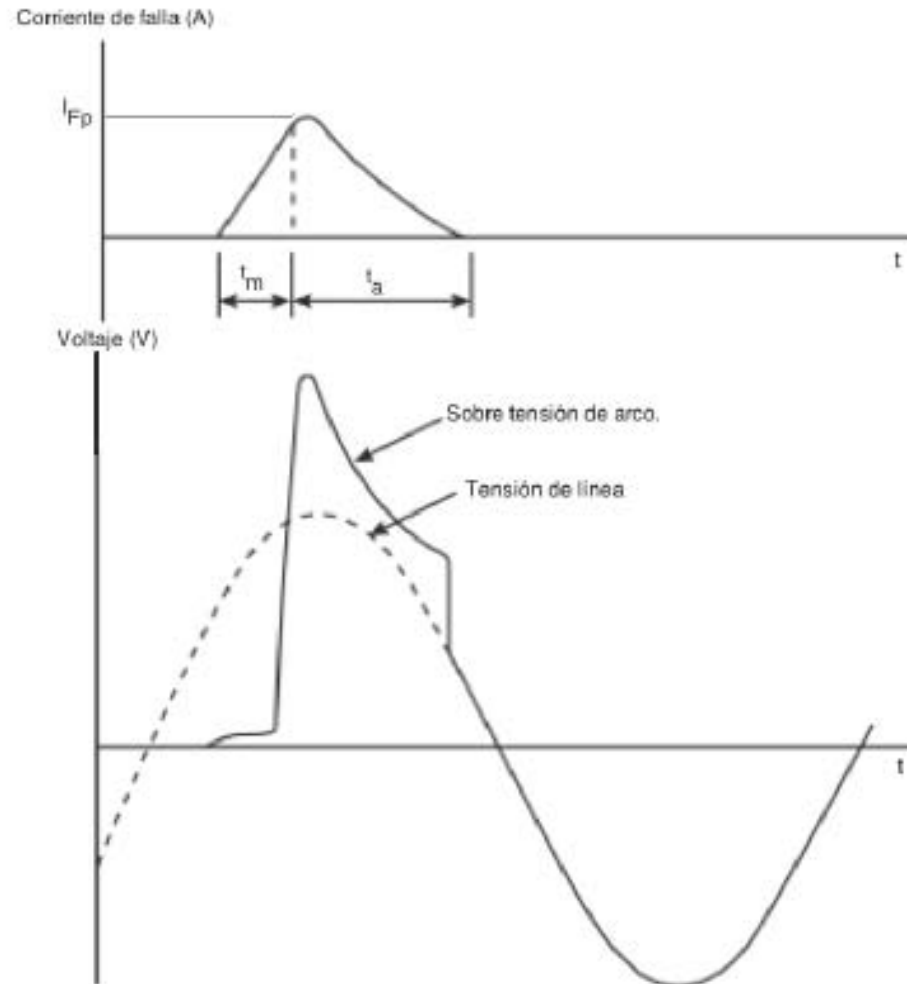
Si la alimentación es AC, se asume que durante el intervalo de crecimiento la forma de onda de corriente es básicamente sinusoidal, esto es, que no se produce distorsión de la tensión de línea debido al sobre corriente de falla.

Como en general se trabaja con circuitos que tienen valores de inductancia elevada, la corriente no puede interrumpirse instantáneamente, por lo que, al final del

intervalo t_m , al producirse la fusión de los cuellos saltan arcos eléctricos que generan una tensión que se suma a la tensión de línea, produciendo una sobretensión que puede ser dañina a los mismos dispositivos que se trata de proteger con el fusible, lo que impone la necesidad de garantizar cual es el valor de la tensión de arco de cada fusible.



Arco eléctrico producido al cortar un conductor en presencia de corriente circulante.



Corriente y voltaje durante la limpieza de falla
 t_m : Tiempo de fusión del fusible ("melting time")
 t_a : Tiempo del arco

La arena de cuarzo granulada que presiona por todas partes a la cinta conductora tiene por objetivo minimizar la duración de los arcos eléctricos que se forman: al producirse la fusión de los cuellos, la arena inmediatamente ocupa el espacio vacío entrando en la zona del arco, donde la arena se sobrecalienta, se funde y forma una escoria que corta el arco y termina de limpiar la falla.

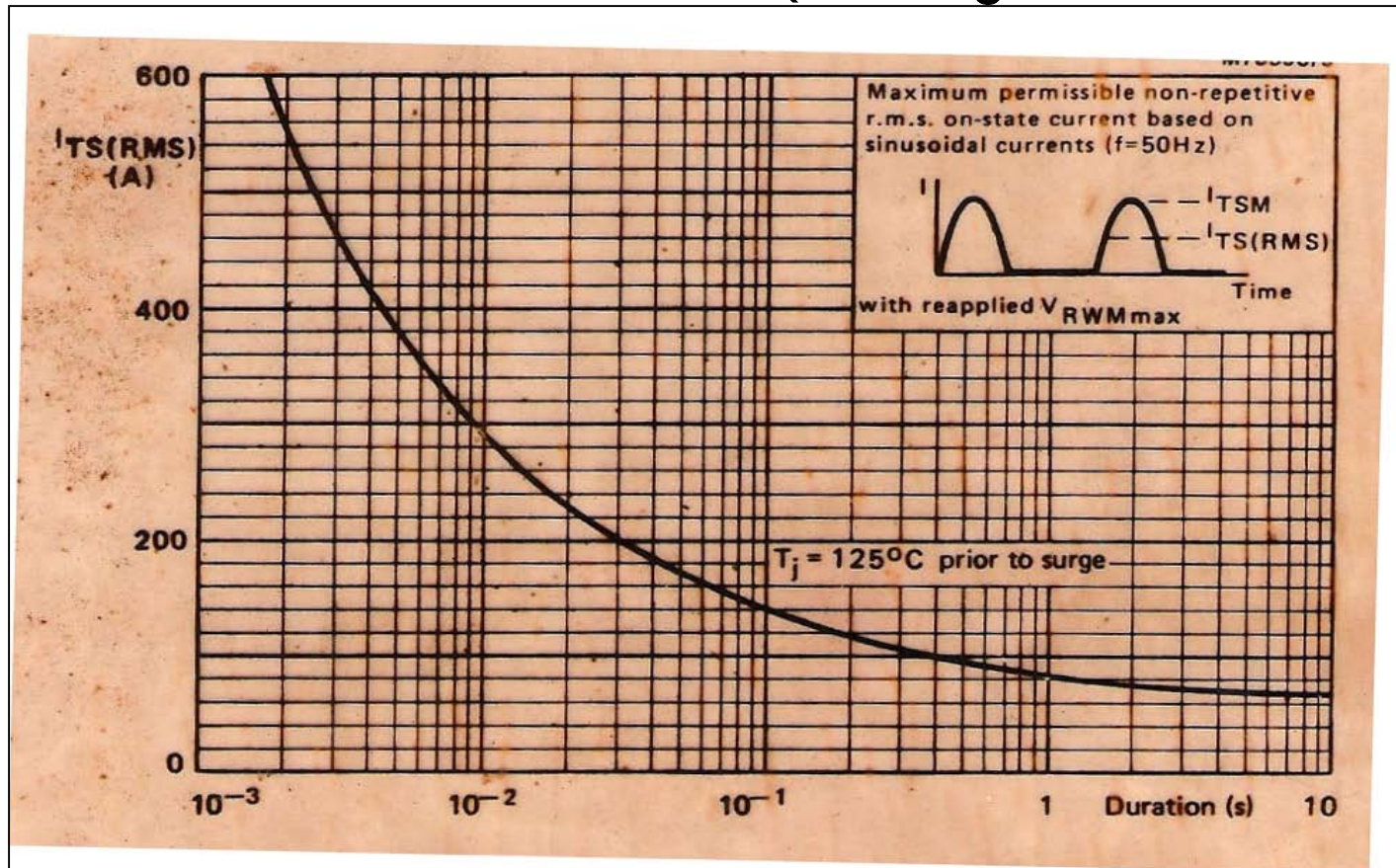
El tiempo total de limpieza de falla, t_c ("clearing time"), es la suma del tiempo de subida, t_m , y el de bajada, t_a .



Partes no fundidas de elementos fusibles después de una falla, mostrando la escoria formada por la fusión de la arena con el metal conductor (plata).

Especificaciones básicas del fusible rápido:

1.- Corriente rms continua (“rating de corriente”)



Respuesta de un fusible rápido a una sobrecarga limitada

Es la corriente que puede soportar el fusible rápido sin fundirse. Dado que el fusible rápido está pensado para actuar solo en caso de falla catastrófica, es usual que se seleccione un fusible con una capacidad de corriente rms continua superior al límite definido para que actúen las protecciones contra falla moderada.

Si estas no existen, el fusible rápido se puede usar para cumplir ambas funciones, seleccionando un valor capacidad de corriente rms igual al que se desea como límite a la falla moderada.

2.- Voltaje de trabajo (“rating de voltaje”).

Es el valor de la tensión de arco que se produce cuando el fusible interrumpe la corriente de falla.

Esta tensión se debe sumar a la tensión pico prospectiva de falla, y la suma de las dos debe ser menor que la tensión pico no repetitiva de los dispositivos que estén en el circuito que protege el fusible, para asegurar que no se produzcan fallas por sobre tensión a consecuencia de la acción del fusible al limpiar la falla de sobre corriente.

Variables características de la acción del fusible rápido al limpiar la falla de sobre corriente:

I_p o I_{PFM} = Corriente de cortocircuito prospectiva (rms):
máximo valor esperado del primer semiciclo de la corriente de falla de no operar el fusible.

t_m = Tiempo de fusión (melting time): tiempo que transcurre desde el comienzo de la corriente de falla hasta que se inician los arcos por fusión de los cuellos del fusible.

t_a = Tiempo de arco (arcing time): tiempo que transcurre desde que empiezan hasta que se eliminan los arcos eléctricos producidos por la fusión de los cuellos del fusible.

t_c = Tiempo de despeje (clearing time): tiempo total transcurrido desde el comienzo de la corriente de falla hasta el final de los arcos eléctricos.

\hat{i} o I_{FM} = Pico de corriente durante la falla (peak let-through current): valor máximo alcanzado por la

corriente de falla en el momento que se inician los arcos eléctricos.

I^2t = Valor de la integral de la corriente de falla (let-through current): valor de la integral de la corriente de falla durante el tiempo de despeje, que se usa para cuantificar la energía liberada durante la falla.

Cálculo de la energía de falla de fusibles rápidos.

Para definir si un fusible rápido es adecuado en una aplicación dada, es necesario calcular la cantidad de energía asociada con la destrucción del fusible y compararla con la cantidad de energía que produciría la destrucción del semiconductor que se desea proteger.

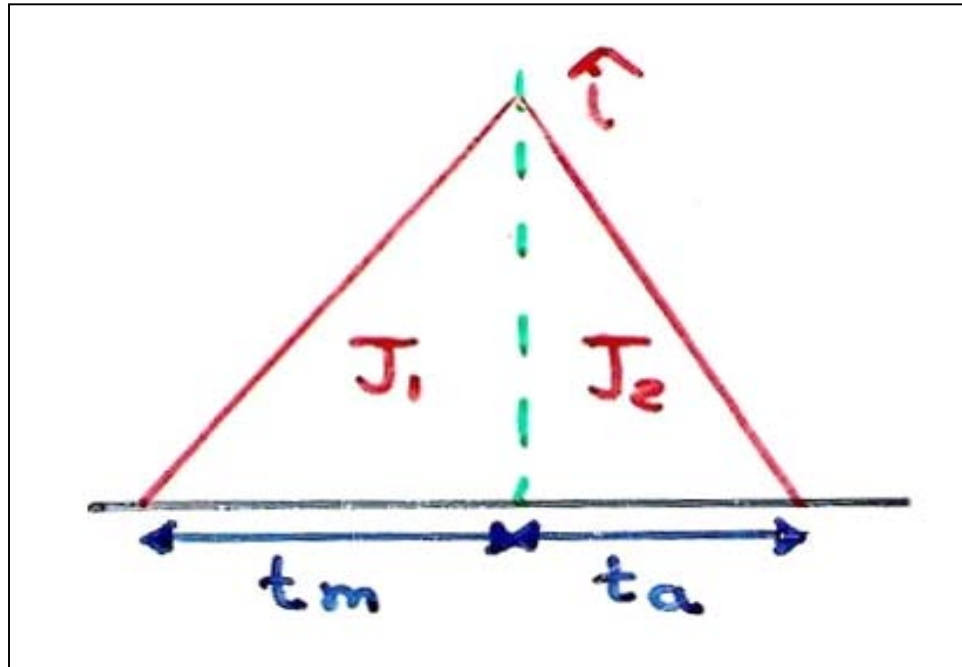
Si la cantidad de energía que destruye al fusible es menor que la cantidad necesaria para destruir al semiconductor, el fusible fallará primero, salvando al semiconductor.

Si la cantidad de energía que destruye al fusible es mayor que la que destruye al semiconductor, el semiconductor fallará primero, salvando al fusible, y el intento de protección del semiconductor habrá sido inútil.

La comparación de las energías relativas se hace comparando el valor del I^2t del dispositivo semiconductor, dado por el fabricante, con el I^2t del fusible en la falla considerada.

Matemáticamente calcular el I^2t del fusible requiere integrar la forma de onda sinusoidal de la corriente creciente hasta el valor de la corriente de ruptura, y la forma de onda exponencial del decaimiento de la corriente hasta cero.

Para propósitos prácticos se puede obtener un resultado razonablemente preciso aproximando ambos segmentos con rectas, y calcular el área de los dos triángulos que quedan así definidos.



Aproximación triangular a la corriente de falla del fusible.

i corriente pico de falla, t_m tiempo de subida de la corriente de falla, t_a tiempo de bajada de la corriente de falla, J_1 , J_2 , energía asociada con la correspondiente etapa de la falla.

Cálculo según la aproximación triangular.

1.- Primer triángulo (corriente de falla creciente):

$$i(t) = \frac{t}{t_m} \hat{I}$$
$$J_1 = \int_0^{t_m} i(\tau)^2 d\tau = \frac{\hat{I}^2 t_m}{2}$$

2.- Segunde triángulo (corriente de falla decreciente):

$$i(t) = \hat{I} - \frac{t}{t_a} \hat{I}$$

$$J_2 = \int_0^{t_2} i(\tau)^2 d\tau = \frac{\hat{I}^2 t_a}{2}$$

$$t_c = t_m + t_a$$

$$J_{total} = J_1 + J_2 = \frac{\hat{I}^2 t_m}{2} + \frac{\hat{I}^2 t_a}{2} = \frac{\hat{I}^2 t_c}{2} = (I^2 t)$$

$$t_c = \frac{2(I^2 t)}{\hat{I}^2}$$

Para seleccionar un fusible rápido.

1.- Se debe buscar un fusible tal que:

a.- La i_{rms} nominal del fusible sea mayor que la máxima corriente rms calculada en el circuito.

b.- El voltaje de arco del fusible debe ser menor que el valor V_{RSM} del dispositivo semiconductor.

Si no se encuentra un fusible rápido que cumpla estas condiciones simultáneamente, no es posible proteger al dispositivo semiconductor.

Si se encuentra un fusible que cumpla con estas condiciones previas, hay que proceder con el resto de

los cálculos para determinar si la protección será posible.

2.- Se calcula el valor rms de la corriente de cortocircuito prospectivo en la aplicación, tomado en cuenta la tensión de alimentación y la impedancia de la línea de alimentación, y asumiendo que la falla se convierte en condición de operación permanente.

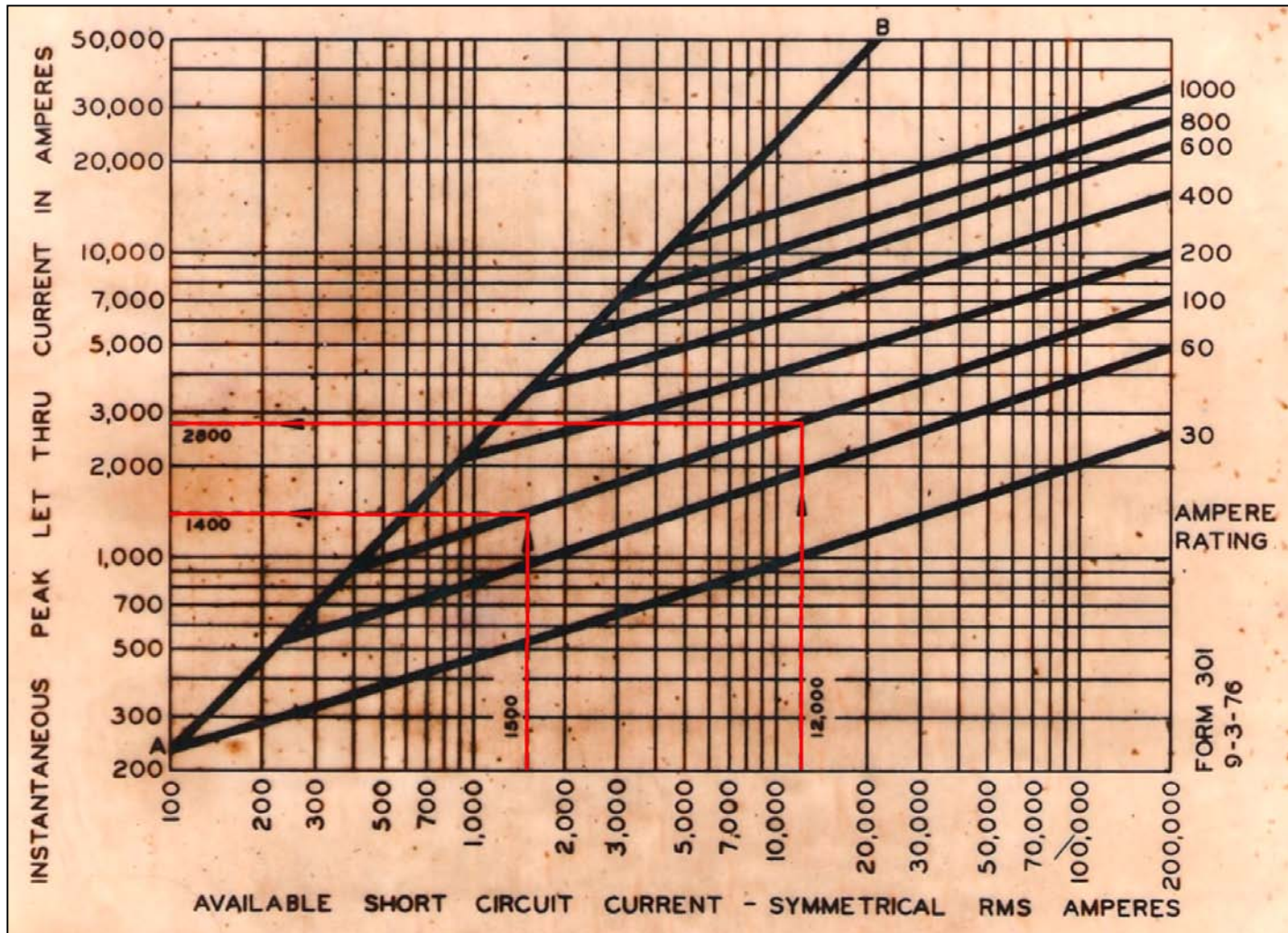
3.- Se determina en las curvas del fusible cual es el valor de la corriente de falla, \hat{i} , que inicia la fusión del fusible (la llamada "peak let-through current").

En el ejemplo se considera el caso de un fusible rápido de 100A nominales bajo dos condiciones distintas de falla, una relativamente grave, con una corriente

prospectiva de falla de 12.000Arms, y otra mas leve, de 1.200Arms.

Para esto sobre la gráfica de corriente pico de inicio de arco, \hat{i} ("peak let thru current") vs. corriente prospectiva de falla se marca el valor rms de la corriente prospectiva de falla calculado y desde este punto se traza una recta vertical hasta cortar la línea correspondiente al valor de la corriente rms nominal del fusible candidato.

A continuación se une ese punto con una línea horizontal con el eje vertical y se lee el valor de la corriente pico de inicio de arco, \hat{i} ("peak let thru current").



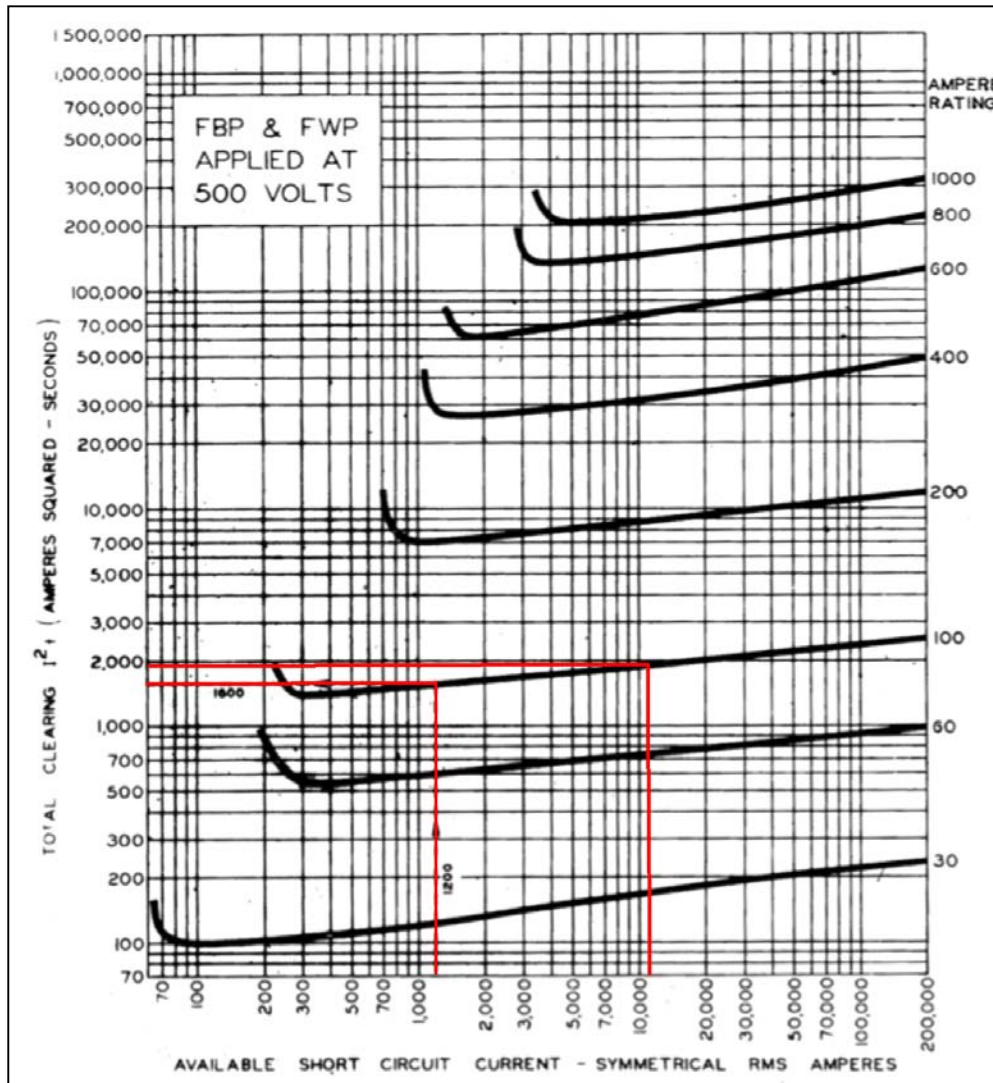
Curva de corriente pico de falla vs. inicio de arco, \hat{i} , en función de la corriente de cortocircuito disponible.

En el ejemplo la corriente de 12.000Arms produciría una corriente \hat{i} de unos 2.800A y la de 1.200Arms unos 1.400A.

4.- Conocido el valor de \hat{i} , en la curva I^2t vs corriente de cortocircuito disponible se determina el valor de I^2t del fusible en el caso considerado.

Para esto sobre la gráfica de i^2t vs corriente prospectiva de falla se marca el valor rms de la corriente prospectiva de falla calculado y, desde este punto, se traza una recta vertical hasta cortar la línea correspondiente al valor de la corriente rms nominal del fusible candidato.

A continuación se une ese punto con una línea horizontal con el eje vertical y se lee el valor del i^2t del fusible en esas condiciones de corriente de falla.



Curva para determinar el i^2t del fusible.

En el ejemplo, la corriente de falla de 1.200Arms produce un i^2t de unos 1.600A²s, y la de 12.000Arms unos 2.000 A²s.

5.- Calcular el tiempo de despeje, t_c .

6.- Calcular el valor de I^2t del dispositivo para t_c .

7.- Comprobar que el valor del I^2t del fusible sea menor que el I^2t del dispositivo.

Si esta condición no se cumple, no es posible proteger al dispositivo semiconductor.

8.- Finalmente, comprobar si el fusible rápido seleccionado puede actuar también como fusible de protección “lento”.

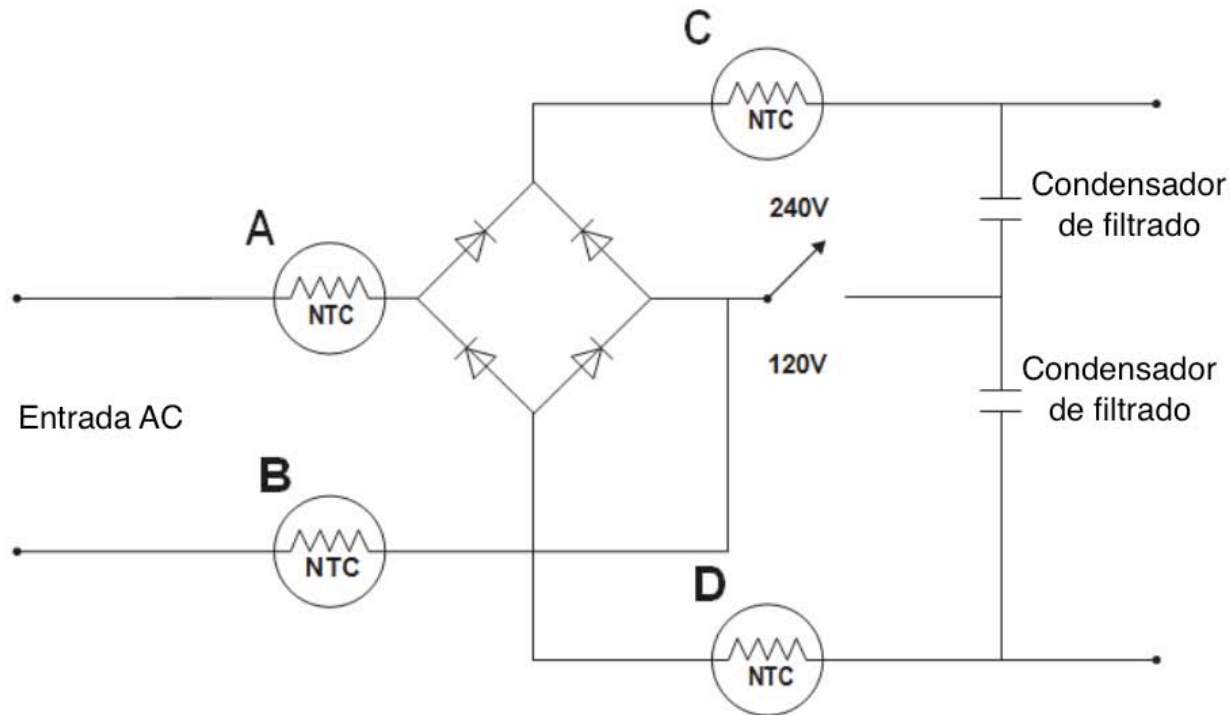
II.- Sobre corrientes de encendido.

En muchos circuitos electrónicos de potencia la impedancia de entrada en el momento del encendido puede ser muy baja (por ejemplo en los convertidores AC/DC con filtro capacitivo), por lo que la corriente de entrada inicial, aún en condiciones "normales", puede ser muy superior a la corriente de entrada en condiciones estacionarias.

En algunos casos es posible definir una secuencia de encendido que evite este problema, pero en el caso general solo hay dos alternativas:

- 1.- Sobre dimensionar los componentes afectados, calculándolos no para el valor máximo en condiciones de operación sino para el valor máximo de la corriente de avalancha de encendido ("inrush current").
- 2.- Incluir un elemento resistivo en serie con la entrada que limite la corriente inicial a un valor no mayor que el máximo de operación, y cortocircuitar ese elemento limitador cuando termine la transitoria de encendido.

Una de las formas mas simples de hacer esto de modo totalmente automático es colocar un termistor tipo NTC como la resistencia limitadora.



Posiciones alternativas de los termistores NTC como limitadores de corriente de arranque.

En esta aplicación el termistor se selecciona para que su valor a la máxima temperatura ambiente considerada en el diseño proporcione la resistencia inicial necesaria para limitar el valor del pico de corriente al nivel deseado.

Una vez energizado el circuito, el calentamiento resultante de la disipación de potencia en el termistor reduce el valor de la resistencia hasta que, en condiciones estacionarias de operación, se alcanza el equilibrio térmico en el termistor, y el valor de la resistencia en serie se estabiliza en un valor mucho menor, idealmente insignificante.

Como ejemplo se puede considerar el termistor NTC MS32 10015 de AMETHER, con una resistencia a temperatura ambiente de 10W; una vez caliente la

resistencia cae a 0,06W si la corriente se estabiliza en 15A, o a 0,22W, si la corriente se estabiliza a 7,5A.

Es necesario asegurarse de que la energía disipada por la circulación de la corriente nominal mínima a través del termistor sea suficiente para que el auto-calentamiento mantenga la resistencia del termistor en un nivel suficientemente bajo.

De lo contrario se pueden producir ciclos en los cuales el termistor se enfría, su resistencia aumenta (posiblemente interfiriendo con la operación normal del circuito), aumenta la disipación, aumenta la temperatura, baja la resistencia, se reduce la disipación y se recomienza el ciclo.

Para evitar esta posibilidad y, en general, en circuitos de muy alta potencia donde sea necesario alcanzar la máxima eficiencia posible, se suele conectar los terminales de un relé normalmente abierto en paralelo con el termistor; el relé se cierra una vez que la corriente se ha estabilizado en su valor nominal, cortocircuitando el termistor y eliminando toda su resistencia.

La versión electrónica, colocando un tiristor (si la corriente es DC) o un TRIAC (si la corriente es AC) en paralelo con el termistor en vez del relé también es funcional, aunque las pérdidas residuales son mayores.