

Guía de seguridad eléctrica en el laboratorio

La presente guía de seguridad pretende establecer unas normas mínimas de comportamiento durante la realización de las prácticas para evitar accidentes derivados del manejo inapropiado de los circuitos eléctricos así como del correspondiente material eléctrico. El alumno debe **estudiar** y **comprender** estas normas para realizar las prácticas además de **comprometerse** a utilizarlas durante las mismas.

Objetivos:

- 1º) Evitar daños personales
- 2º) Evitar averías de los instrumentos de medida
- 3º) Evitar el deterioro de los componentes del circuito

Conceptos previos acerca de seguridad eléctrica:

Los seres vivos también son conductores de la corriente eléctrica y si se exponen a contactos con cables o estructuras sometidas a tensión existe la posibilidad de que la corriente circule a través del cuerpo humano produciéndose una **electrocución**. Para que se produzca ésta se deben cumplir simultáneamente las condiciones siguientes:

- 1º) que el cuerpo humano sea conductor: esto se produce siempre y se incrementa con la humedad;
- 2º) que el cuerpo humano forme parte de un circuito eléctrico (**contacto eléctrico**): recuerde que el suelo puede estar a un potencial y que podemos cerrar un circuito apoyándonos en una estructura sometida a un potencial diferente al del suelo;
- 3º) que el cuerpo humano esté sometido a una **tensión peligrosa**.

Los **contactos eléctricos** pueden ser de dos tipos: contactos directos y contactos indirectos.

Se produce un **contacto directo** cuando el cuerpo humano toca cualquier elemento conductor que forme parte de un circuito eléctrico: terminales de conductores o de componentes eléctricos, conductores no aislados. Para evitar contactos directos se debe establecer una distancia de seguridad y procurar no rebasarla durante ningún movimiento que sea necesario. Evidentemente no se deben tocar elementos metálicos en tensión (partes activas).

Los **contactos indirectos** se producen cuando el cuerpo humano toca cualquier elemento metálico (envolvente) que encierre el circuito y que por error o defecto se encuentre bajo tensión con respecto a tierra. Para evitar este tipo de contactos se utilizan las tomas de tierra y los interruptores diferenciales. Por lo tanto conviene comprobar con un voltímetro si existen tensiones con respecto a tierra de algún elemento metálico que aunque no deba formar parte del circuito se encuentre en las inmediaciones de éste.

Reglas de trabajo a respetar:

1. Considerar que todos los circuitos, sus partes componentes, y el instrumental a utilizar está bajo tensión hasta que se asegure que el total aislamiento de la red y se compruebe que los elementos almacenadores de energía (especialmente los condensadores) están descargados.
2. Se debe introducir siempre un interruptor entre la red o fuente de energía y el circuito objeto de la práctica. Se debe asegurar que dicho interruptor está abierto antes de realizar cualquier manipulación del circuito, mediciones incluidas.
3. Toda conexión debe ser firme de tal manera que no pueda soltarse durante la realización de la práctica. También debe evitarse que cualquier elemento susceptible de movimiento dé lugar a desconexiones o interacciones no deseadas con el circuito. Si una conexión no es correcta ésta puede dar lugar a la formación de arcos y a la producción de quemaduras.
4. Antes de conectar el circuito al interruptor de enlace con la red o fuente de energía debe verificarse que los instrumentos de medida se hayan conectados perfectamente de tal manera que sea imposible el desprendimiento de las puntas de prueba durante la realización de la práctica.

5. Siempre que se vaya a cambiar un instrumento o su punto de conexión se debe interrumpir el suministro de energía al circuito y asegurarse de la descarga de los condensadores que pueda contener. Si ha de modificar la escala de un instrumento es conveniente que mantenga una mano en el bolsillo: la carcasa del instrumento suele estar conectada a tierra y puede, sin darse cuenta, apoyarse en algún punto sometido a tensión cerrándose circuito a través de su cuerpo.

6. Los instrumentos de medida son delicados y, por lo tanto, antes de utilizar cualquier osciloscopio se debe determinar si la toma de tierra del enchufe de alimentación está conectado internamente a cada pinza de referencia de las puntas de prueba. Si esto es así es posible que se produzcan cortocircuitos a través de la masa del osciloscopio y para evitarlo deben tomarse las siguientes medidas: 1º) aislar mediante un transformador la masa del osciloscopio de la tierra del laboratorio; y 2º) utilizar una única pinza de referencia durante las medidas. También hay que tener especial cuidado cuando se realizan lecturas con el multímetro en modo amperímetro o en modo ohmetro: en el primer caso tenemos que tener en cuenta que la intensidad de corriente que circula no sea superior a la admisible (suele haber 2 tomas, una de 10 A y otra de 0,2 A); en el caso del ohmetro hay que asegurarse de que el circuito a analizar se encuentra desconectado de toda fuente de tensión.

7. Recuerde que las tensiones superiores a los 20V son potencialmente peligrosas.

8. No se abrirá nunca el secundario de un transformador de intensidad sin haber abierto primero el primario.

9. Los instrumentos de medida soportan unas magnitudes eléctricas máximas: se debe comprobar previamente que no se van a sobrepasar dichos límites de funcionamiento.

10. Para cada componente el fabricante se suele especificar unos valores máximos de tensión, intensidad y potencia permisibles, sobrepasados los cuales se deteriora el componente. Antes de conectar el circuito se debe verificar que en ningún caso se sobrepasarán dichos valores, lo que conlleva la realización previa del análisis del circuito. Además hay componentes que deben conectarse según una determinada polaridad como es el caso de los condensadores electrolíticos: si los conecta a una tensión de polaridad contraria pueden explotar con el consiguiente riesgo para las personas que se encuentren en su inmediatez.

PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Todas las manipulaciones se harán sin tensión, para lo que se procederá como sigue, teniendo en cuenta que para evitar problemas utilizaremos unas **regletas de conexión** provistas de un interruptor luminoso, sobre las que se realizarán las conexiones del circuito en cuestión.

1. **Antes** de conectar cualquier elemento se harán dos comprobaciones imprescindibles aunque sean redundantes:
 - 1ª) el **interruptor** estará **apagado** (posee una luz de encendido), y
 - 2ª) su enchufe **se desconectará** de la toma de tensión de red (a pesar de la luz siempre conviene no fiarse).
2. Una vez realizadas TODAS las conexiones se comprobará que se ajustan al **esquema del circuito** que se desea probar.
3. A continuación se comprobará que **todas las uniones son firmes** (en caso contrario cualquier movimiento puede desprender el terminal de un cable que suelto puede caer y hacer contacto con cualquier alumno).
4. Se comprobará que TODOS los instrumentos están encendidos y en las escalas adecuadas a la medición a realizar.
5. Los instrumentos deben estar en posición de **fácil lectura** y se debe tener a mano una libreta para realizar las anotaciones (esto parece una tontería pero no será la primera vez que la hoja de anotaciones se ha dejado debajo de una parte del circuito y al ir a cogerla se entra en contacto con un punto en tensión).
6. **Puesta en tensión del circuito:** se conecta la regleta a la red y se activa el interruptor de encendido. Se anotan las medidas sin contactar con el circuito.
7. **Desconexión del circuito:** Se apaga el interruptor y se desconecta la clavija de alimentación de la regleta de conexiones. Si hay condensadores se deben descargar a través de una resistencia (de $1k\Omega$, p.ej.). A partir de ese momento el circuito se encontrará sin tensión y ya podremos volver a manipularlo.

PROTECCIÓN

CONTRA EL ARCO

ELÉCTRICO EN BAJA TENSIÓN



JUAN ANTONIO CALVO SÁEZ

Perito Industrial Eléctrico. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria. Técnico de Prevención del Centro de Seguridad y Salud en el Trabajo de Cantabria.

ÍNDICE

1.- Generación de arcos eléctricos

2.- Cortocircuito y arco eléctrico

2.1.- Efectos térmicos

2.2.- Efectos de presión

3.- Protección frente al cortocircuito

3.1.- Protección por limitación

3.2.- Protección frente a los efectos térmicos

3.3.- Protección frente a los efectos electrodinámicos

3.4.- Protección en los conductores eléctricos

1.- GENERACIÓN DE ARCOS ELÉCTRICOS

La generación de arcos eléctricos en las instalaciones y en el interior de los cuadros eléctricos acarrea situaciones de extrema gravedad. Las estadísticas muestran que aproximadamente el 60 % de los accidentes eléctricos son debidos a dichos arcos, al intervenir o trabajar en las instalaciones.

Los arcos de defecto se generan cuando se reduce el aislamiento entre conductores a distintos potenciales, lo cual puede ser debido a:

- Cargas eléctricas elevadas que por efecto del calor degradan los aislamientos.
- Cuerpos extraños (animales, polvo, agua, etc.) en el interior de los equipos.
- Cortocircuitos al trabajar con tensión, en el interior del cuadro.
- Sobretensiones en la red o atmosféricas.

Las consecuencias de los arcos de defecto son:

- Daños a las personas.
- Destrucción parcial o total de los cuadros eléctricos.

2.- CORTOCIRCUITO Y ARCO ELÉCTRICO

Se define un cortocircuito como una conexión accidental de resistencia despreciable entre dos puntos a distinto potencial, ya sea por contacto o por fallo del aislamiento, que da lugar a una co-

rriente (corriente de cortocircuito) generalmente elevada, del orden de kiloamperios (KA).

Cuando se produce un cortocircuito al ponerse en contacto los conductores o pletinas en tensión de una instalación, a través de un cable desnudo, una barra, una herramienta, las puntas de prueba de un tester, etc., la elevada intensidad que se produce provoca el aumento de temperatura de los materiales (Efecto Joule) en las barras o pletinas con tensión,

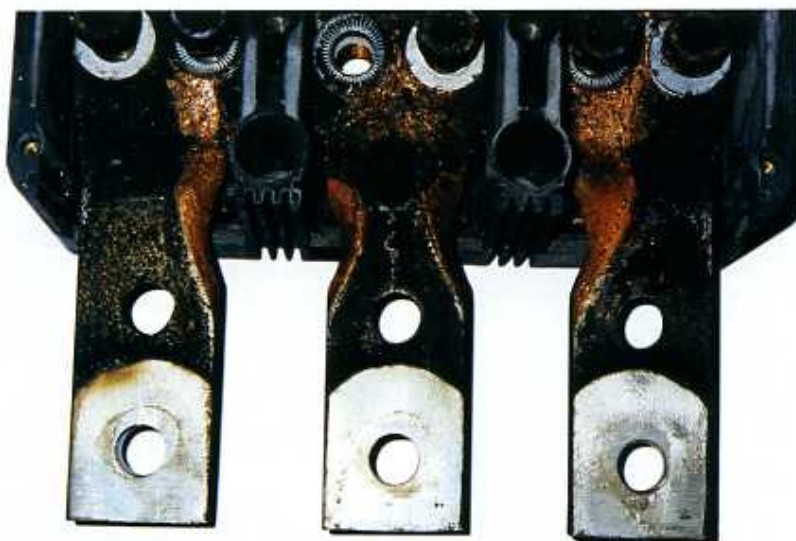


Figura 1.- Daños producidos por un arco eléctrico en unas pletinas (comenzó monofásico y acabó trifásico).

así como la aparición de puntos calientes e incandescentes, que por efecto termoiónico hacen que los electrones circulen a través del aire creando el llamado arco eléctrico, que puede avanzar a una velocidad aproximada de 1,5 veces la del sonido y cuya elevada temperatura afecta tanto a la instalación como a los operarios expuestos.

entre partes con tensión que con una atmósfera normal, se considera que tienen una separación de aislamiento adecuada o incluso sobredimensionada).

Los cortocircuitos, que se producen, normalmente, por defectos en la instalación o por la intervención de un trabajador, dan lugar a la circulación de corrientes eleva-

Siendo:

U_a = Tensión del arco (entre 50 y 300 voltios).

I_{cc} = Corriente del cortocircuito (entre 10 y 50 KA).

R_a = Resistencia del arco (de 5 a 6 m Ω).

t = Tiempo en segundos (entre 2 ms y 1 segundo).

La temperatura que genera el arco eléctrico en baja tensión, puede alcanzar los 4.000 °C, lo que provoca que se pueda fundir cualquier material.

Asimismo, en los terminales de la aparatada eléctrica o en puntos de conexión defectuosos (debidos a falta de apriete, suciedad, etc.), el calor desarrollado ($Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$) puede elevarse hasta el punto de incandescencia, lo que por efecto termoiónico puede provocar un arco eléctrico (Figura 3).

El mantenimiento por termovisión permite controlar y evitar los puntos calientes de una instalación eléctrica.

El arco eléctrico se desplaza en dirección contraria a la generación de la energía eléctrica, y si el arco dura más de 10 milisegundos, los efectos son muy destructivos.

El arco eléctrico puede avanzar a una velocidad aproximada de 1,5 veces la del sonido y su elevada temperatura afecta tanto a la instalación como a los operarios expuestos.



Figura 2.- Quemaduras producidas por un arco eléctrico en baja tensión.

El arco eléctrico en baja tensión se produce por efecto termoiónico, al existir una diferencia de potencial y un punto incandescente que emite electrones a través del aire. Puede darse tanto entre fases, como entre fase y masa metálica, y se inicia en monofásico y puede acabar en trifásico (Figura 1).

Los efectos del arco eléctrico, son térmicos, de presión (el cebado de un arco se traduce en una explosión-ruido impresionante) y de ionización del aire (que puede provocar arcos o reencendidos

das, que se convierten, generalmente, en arcos eléctricos con una temperatura elevada que puede afectar a los operarios con graves quemaduras (Figura 2). Se procurará, por lo tanto, que la energía del cortocircuito, y por consiguiente la del arco eléctrico, sea lo más reducida posible.

2.1.- EFECTOS TÉRMICOS

La energía del arco eléctrico (E_a) viene dada por la fórmula: $E_a = U_a \cdot I_{cc}^2 \cdot t = R_a \cdot I_{cc}^2 \cdot t$ (en julios) o $Q = 0,24 \cdot R_a \cdot I_{cc}^2 \cdot t$ (en calorías).



El arco eléctrico en baja tensión se produce por efecto termoiónico, al existir una diferencia de potencial y un punto incandescente que emite electrones a través del aire.

Para evitar que se desplace el arco eléctrico, se deberá compartimentar, por ejemplo, con barras generales (Figura 4), de tal manera que al desplazarse el arco se encuentre con un obstáculo perfectamente cerrado y quede confinado hasta su extinción.

2.2.- EFECTOS DE PRESIÓN

El arco eléctrico origina en el aire una onda de presión elevada:

$$P = 1,5 \cdot \frac{I_{cc}^2}{d} = \text{KN/m}^2; 1\text{bar} = \frac{1 \text{ KN/m}^2}{1000}$$

Siendo:

P = Presión en KN/m^2

I_{cc} = Corriente del cortocircuito en KA

t = tiempo en segundos

d = amplitud del arco en metros

Esta presión es capaz de abrir puertas, por lo que los gases producidos por el arco pueden afectar a los operarios que se encuentran en las cercanías.

Ejemplo:

$I_{cc} = 40 \text{ KA}$

$t = 0,5 \text{ segundos}$

$d = 0,1 \text{ metros}$

$s = 0,1 \text{ m}^2$

$$P = 1,5 \cdot \frac{40 \cdot 0,5}{0,1} = 300 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 0,3 \text{ atm}$$

$$P = \frac{F}{S}; F = P \cdot S = 300 \cdot 0,1 \text{ m}^2$$

$$= 30.000 \text{ N} = 30 \text{ Tn}$$

Debemos disponer por lo tanto en los cuadros eléctricos de baja tensión, tal y como existe en los de alta, salidas de gases (clapetas de apertura) para la evacuación al exterior de los mismos (parte superior o posterior), con el fin de disminuir la presión ejercida por el arco eléctrico y evitar que la fuerza generada por dichos gases afecte a las puertas de acceso o a los operarios.

3.- PROTECCIÓN FRENTE AL CORTOCIRCUITO

3.1.- PROTECCIÓN POR LIMITACIÓN

Hay que procurar que tanto la corriente de cortocircuito como su tiempo de circulación alcancen los valores más bajos posibles.

La corriente de cortocircuito desarrolla unos efectos térmicos (A^2s) y unos esfuerzos mecánicos

$$(F_2 = I_p^2 \cdot \frac{L}{d}, \text{ en monofásico o } F_3$$

$= 0,8 \cdot F_2, \text{ en trifásico}), \text{ que pueden provocar roturas en los puntos de sujeción o posteriores cortocircuitos.}$

La energía y el calor producidos por el arco eléctrico se expresan como:

$$E_a = U_a \cdot I_{cc} \cdot t \text{ en Julios y } Q = 0,24 \cdot R_a \cdot I_{cc}^2 \cdot t \text{ en calorías.}$$

Por su parte la I_{cc} que depende

del transformador, viene dada por las expresiones:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_t}; I_{cc} = \frac{I_n \cdot 100}{U_{cc} (\%)}$$

siendo la primera la expresión teórica (con Z_t impedancia del transformador) y la segunda la expresión práctica en función de los datos que vienen en el propio transformador.

En esta última expresión la intensidad nominal (I_n) vendrá en



Figura 3.- Efectos del arco eléctrico (antes y después del corto).

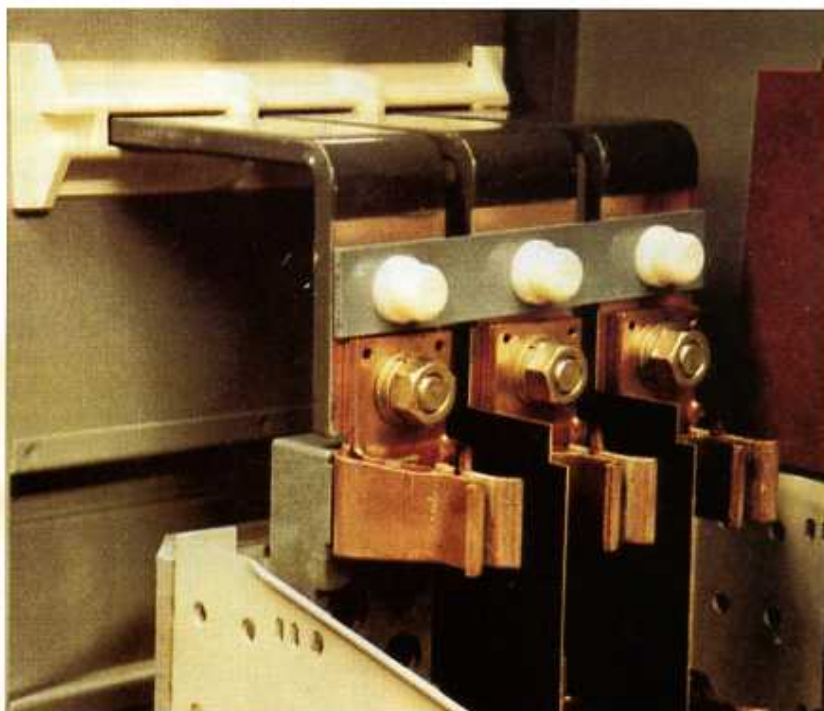


Figura 4.- Protección contra arcos eléctricos. Compartimentado del embarrado general.

función de la potencia del transformador (S) y de la tensión nominal en baja tensión (U_n).

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} U_n}$$

así por ejemplo, para un transformador tipo con una $S = 500$ KVA, una intensidad nominal de 720 A, y una U_{cc} de un 4 %, nos daría una intensidad de cortocircuito $I_{cc} = 18$ KA.

En el caso de tener varios transformadores en paralelo la I_{tcc} resultante será $n \cdot I_{cc}$, siendo n el número de transformadores.

Al objeto de disminuir los efectos térmicos y electrodinámicos de la corriente de cortocircuito y por consiguiente, la temperatura del arco eléctrico debemos utilizar protecciones que limiten los valores de la intensidad y del tiempo,

haciéndolos lo menores posibles. Estas protecciones pueden ser a base de automáticos limitadores (Figura 5) que especifiquen las curvas de limitación de la corriente de cortocircuito.

La fuerte capacidad de limitación de los interruptores automáticos se obtiene gracias a la perfecta combinación entre los siguientes elementos:

- Una parte móvil ligera para reducir la inercia.
- Un bucle de corriente que genera una fuerte repulsión.
- Un refuerzo del campo electromagnético para acelerar la apertura de los contactos.
- Materiales de los contactos que aseguran una buena conductividad y una alta durabilidad.
- Una cámara de corte que asocia la alta capacidad de absorción de energía con la rapidez de fraccionamiento del arco y el enfriamiento de los gases resultantes (Figura 6).

Todo esto permite reducir el volumen del interruptor mejoran-

Debido a que los cortocircuitos dan lugar a la circulación de corrientes elevadas, que se traducen, generalmente, en arcos eléctricos con temperaturas muy altas, se procurará que la energía del cortocircuito, por consiguiente la del arco eléctrico, sea lo más reducida posible.



Figura 5.- Automático limitador.

do la relación entre el poder de corte (P.d.c.) y el volumen.

El empleo de interruptores limitadores (Figura 7), permite atenuar considerablemente los efectos de los cortocircuitos.

Limitar la corriente de cortocircuito, significa cortar la corriente eléctrica antes de que ésta obtenga el valor máximo ($I_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc}$) en un tiempo inferior a una semionda ($t < 5$ milisegundos), lo que limita, en definitiva, la energía A^2s del cortocircuito ($E = R \cdot I_{cc}^2 \cdot t$; haciendo $R=1$, tendremos: $I_{cc}^2 \cdot t = \text{Energía en } A^2s$).

3.2.- PROTECCIÓN FRENTE A LOS EFECTOS TÉRMICOS

Los efectos térmicos se producen por el valor eficaz de la corriente de cortocircuito (I_{cc} y A^2s). Su limitación influirá en la gravedad del accidente al disminuir la energía del arco.

En la figura 8 aparece un ejem-

plo práctico de limitación de una corriente de $I_{cc} = 36$ KA, en una instalación eléctrica de 400 V, protegida con un automático de $I_n = 100$ A, que ha limitado la corriente de 36 a 10 KA.

Ejemplo: Para una $I_{cc} = 36$ KA, tendremos, $I_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc} = 90$ KÅ por lo que la corriente limitada pasa de 90 a 17 KÅ. Una I_p de 17 KÅ equivale a 10 KA eficaces, con lo que la limitación real para la I_{cc} será de 36 a 10 KA.

3.3.- PROTECCIÓN FRENTE A LOS EFECTOS ELECTRODINÁMICOS

La corriente de cortocircuito crea unas fuerzas de atracción o repulsión en los conductores que afectan tanto a las pletinas como a los propios conductores.

Estos efectos dependen del

En los terminales de la aparatenta eléctrica o en puntos de conexión defectuosos el calor desarrollado puede elevarse hasta el punto de incandescencia, lo que por efecto termoiónico puede provocar un arco eléctrico.

valor cresta de la corriente de cortocircuito I_p :

$$I_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc}$$

$$F = 0,2 \cdot I_p^2 \cdot \frac{L}{a}$$

Siendo: L la longitud de los soportes; a, la separación entre conductores; y viniendo expresadas: F en newtons e I_p en KA.

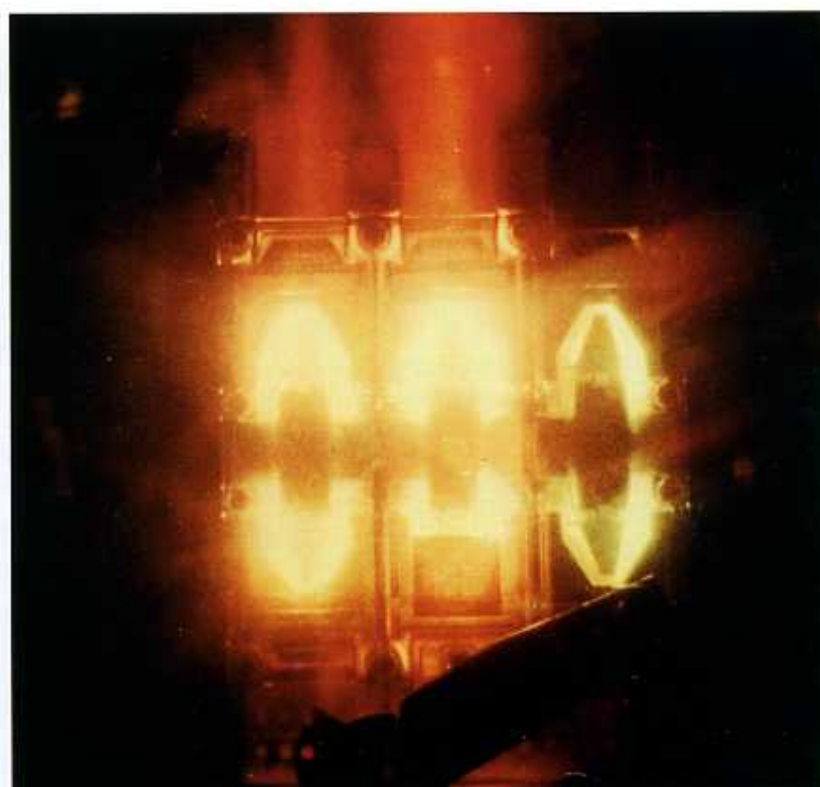


Figura 6.- Arco eléctrico controlado por un automático, abriendo una corriente de cortocircuito.

Para los valores del ejemplo anterior: I_p limitada = 17 KA, I_p sin limitación = 90 KA, para $L = 50$ cm y $a = 10$ cm, tendremos:

- Sin limitación:

$$F = 0,2 \cdot 90^2 \cdot \frac{50}{10} = 8.100 \text{ N}$$

- Con limitación:

$$F = 0,2 \cdot 17^2 \cdot \frac{10}{50} = 289 \text{ N}$$

3.4.- PROTECCIÓN EN LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS

En caso de cortocircuito, los conductores eléctricos están sometidos a una elevada corriente que puede afectarles gravemente en su aislamiento, incluso provocando su destrucción o incendio. Por lo que la limitación tiene un papel importante.

Energía del cortocircuito:
 $A^2s = I_{cc}^2 \cdot t = K^2s^2$

Siendo:

S = Sección en mm^2

t = Tiempo en segundos

K una constante que toma los valores: 115 para termoplástico-cobre y 135 para termoestable-cobre

$$S = \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{t}}{K}$$

Dado que los tiempos de apertura de los automáticos no vienen indicados, nos dan sus A^2s limitada para I_{cc} . En la tabla de la figura 9, se indican los esfuerzos térmicos admisibles de los conductores eléctricos en A^2s .

Ejemplo:

Para una instalación con: $I_{cc} =$

50 KA, $I_n = 63$ A y conductor de cobre (Z1), tenemos:

$A^2s = 10^5 \cdot A^2s =$ Energía limitada.

$A^2s = 2 \cdot 10^6 \cdot A^2s =$ Energía no limitada.

Limitar la corriente de cortocircuito, significa cortar la corriente eléctrica antes de que ésta obtenga el valor máximo en un tiempo inferior a una semionda.

Lo que implica por los datos de la tabla de la figura 9 : Sección conductor admisible $s \geq 4 \text{ mm}^2$. Y si no fuera limitada $s \geq 25 \text{ mm}^2$. Por lo que la limitación de corriente nos permite emplear conductores de sección menor.

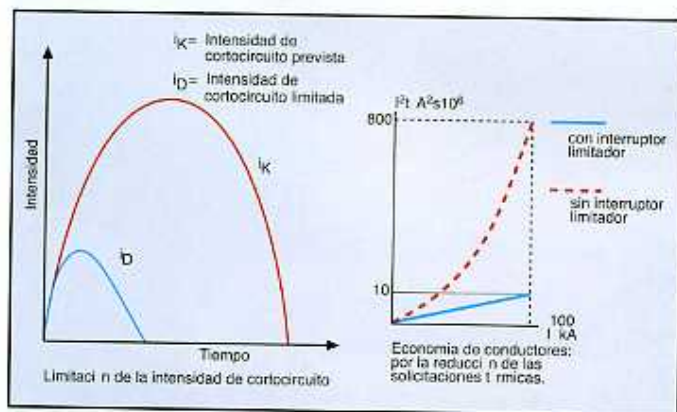


Figura 7.- Poder de limitación de los interruptores automáticos.

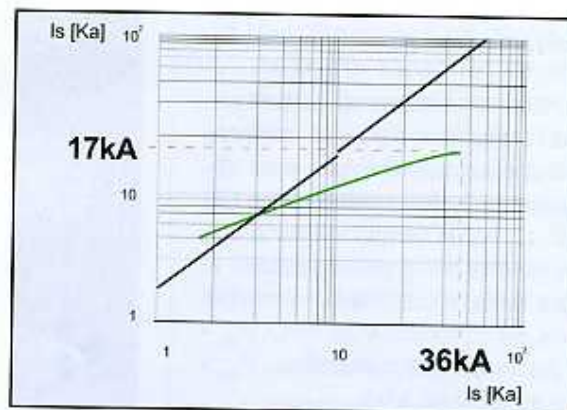


Figura 8.- Curvas de limitación de automáticos "L".

S (mm ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
PVC	Cu	2,9•10 ⁴	8,2•10 ⁴	2,1•10 ⁵	4,7•10 ⁵	1,3•10 ⁶	3,4•10 ⁶	8,2•10 ⁶	1,6•10 ⁷
	Al					5,4•10 ⁵	1,3•10 ⁶	3,3•10 ⁶	6,6•10 ⁶
PRC	Cu	4,1•10 ⁴	1,3•10 ⁵	2,9•10 ⁵	6,5•10 ⁵	1,8•10 ⁶	4,6•10 ⁶	1,3•10 ⁷	2,2•10 ⁷
	Al					7,5•10 ⁵	1,9•10 ⁶	4,7•10 ⁶	9,2•10 ⁶

Figura 9.- Esfuerzo térmico admisible por los cables según su aislamiento (A^2s).