

## CAPITULO III

### TEORÍA DEL FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE FUSIBLES.

#### 3.1. Conceptos a Considerar en el Diseño de un Fusible.

Para diseñar un fusible eléctrico, es necesario considerar una serie de conceptos teóricos y prácticos, que permitirán comprender las etapas que componen el proceso físico durante el funcionamiento de un fusible.

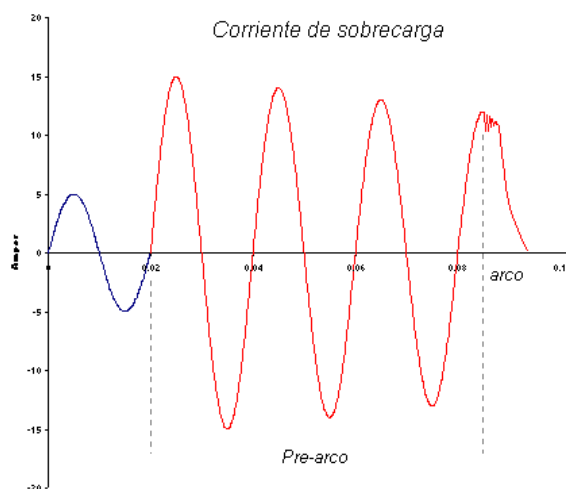
Un fusible conectado en un determinado circuito, puede encontrarse con tres regímenes que caracterizan la condición de trabajo. Para estas etapas existe un factor en común que las caracteriza, el cual corresponde a la cantidad de corriente que circula por el elemento fusible.

El fusible presenta un comportamiento resistivo dentro de un circuito eléctrico, generalmente de bajo valor, y como tal ocasiona un consumo de potencia y energía la que finalmente es transformada en calor (energía absorbida), según la ley de Joule. Este calor se desarrolla en torno al elemento fusible, y gracias a la buena capacidad de absorción de energía que posee la sílice, este calor es disipado al medio que rodea al fusible (energía disipada). Además, existe un valor de energía necesaria para provocar la fusión del elemento fusible y por consiguiente, la interrupción de la corriente que lo circula. Esta diferencia entre energías es la que caracteriza a cada régimen operativo.

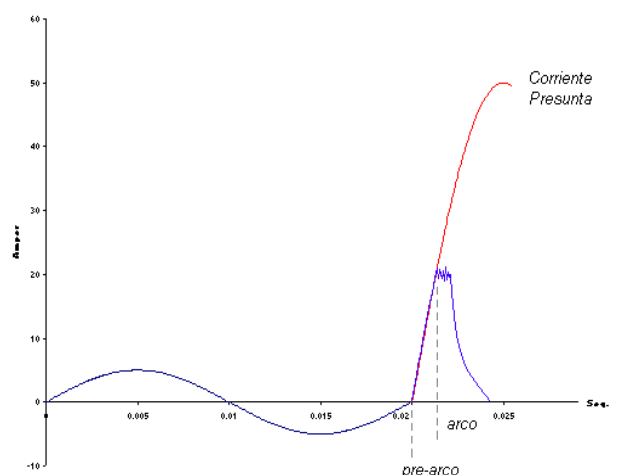
La primera condición bajo la cual puede estar trabajando un fusible es el régimen permanente. Durante este régimen, la energía térmica debida a la circulación de la corriente, menos la cantidad de energía disipada al medio que rodea al fusible, es menor a la energía necesaria para fundir el elemento fusible. Este régimen se conoce como condición normal de operación.

El régimen de sobrecarga está caracterizado por la interrupción de la corriente que circula por el fusible en un tiempo prolongado (régimen no-adiabático) (Figura 3.1a). La energía generada por el fusible producto de esta corriente de sobrecarga, menos la cantidad de energía que se disipa al medio por las paredes del cuerpo, es mayor que la energía térmica necesaria para provocar la fusión del elemento fusible.

La tercera condición corresponde al régimen de cortocircuito, donde la corriente que circula por el fusible es de gran magnitud (Figura 3.1b), y la energía térmica generada por esta corriente es enteramente utilizada para fundir el elemento fusible, sin disipar al medio que lo rodea (régimen adiabático).



**Fig. 3.1a.** Corte de un fusible en régimen de sobrecarga.



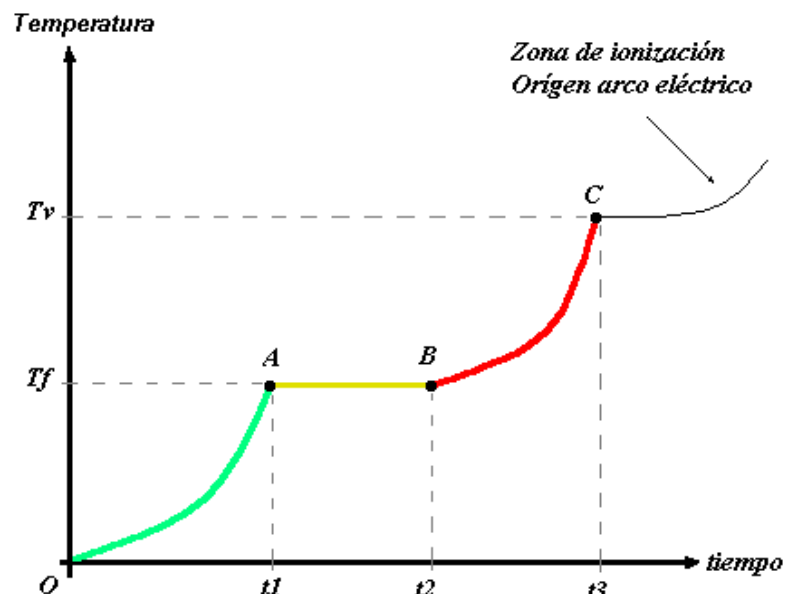
**Fig. 3.1b.** Corte de un fusible en régimen de cortocircuito.

### 3.2. Proceso Físico del Corte de un Fusible en Régimen Adiabático.

Todo fusible eléctrico abarca dos etapas importantes en el proceso de operación. Estas etapas son consecutivas y poseen singulares comportamientos, así como también distintas ecuaciones que las gobiernan. Estos períodos corresponden a la etapa de **pre-arco** y la etapa de **arco**.

El período de pre-arco se puede dividir en tres distintas etapas de operación, las cuales se distinguen por las variaciones de temperatura, los cambios de estado en el material y por las ecuaciones que las rigen.

En el gráfico de la figura 3.2, se muestran las tres etapas que conforman el período de pre-arco en la operación de un fusible bajo una condición adiabática.



**Fig. 3.2.** Gráfico de la etapa de pre-arco en condición adiabática.

La figura 3.2, muestra la variación de la temperatura en cada instante, originada por el paso de una corriente de cortocircuito por el elemento fusible, donde los términos involucrados en el gráfico se explican a continuación:

- $T_f$**  : Temperatura de fusión del elemento fusible.
- $t_1$**  : Tiempo necesario para alcanzar la temperatura de fusión del elemento.
- $t_2$**  : Inicio del estado líquido.
- $T_v$**  : Temperatura de vaporización del elemento fusible.
- $t_3$**  : Inicio del arco eléctrico.

Para detallar el proceso físico del corte de un fusible en la etapa de pre-arco, es necesario definir y aclarar los términos utilizados para describir el proceso:

**Fusión:** es el cambio de una sustancia del estado sólido al líquido, normalmente por la aplicación de calor.

**Ebullición:** es el cambio de estado que ocurre cuando una sustancia pasa del estado líquido al estado de vapor. Para que ello ocurra debe aumentar la temperatura en toda la masa del líquido.

**Vaporización:** es el cambio de estado que ocurre cuando una sustancia pasa del estado líquido al estado de vapor. La diferencia con el anterior es que en la vaporización el cambio de estado ocurre solamente en la superficie del líquido.

Cuando circula una corriente de falla por el elemento fusible, se produce un rápido incremento de la temperatura. Este gran flujo de electrones al moverse aceleradamente, adquieren una cierta cantidad de energía cinética. Debido al choque contra las partículas fijas de los átomos (resistencia eléctrica), liberan dicha energía la cual aumenta la amplitud de su vibración para finalmente transformarse en calor.

Cuando el material se encuentra en su temperatura de fusión (punto **A**), el calor generado es absorbido por el propio material y no produce variación de temperatura, quedando en un equilibrio térmico durante su transformación.

En el punto **A** del gráfico se inicia el proceso de fusión del material, encontrándose en su estado sólido y al cabo del tiempo **t2** (punto **B**) se encuentra totalmente líquido.

La temperatura sigue incrementándose hasta llegar a la temperatura de ebullición (punto **C**) en la cual hierve la totalidad de la masa del líquido hasta alcanzar el estado gaseoso. En el tiempo **t2** a **t3**, se produce la vaporización del líquido, es decir, empieza a hervir vaporizándose desde su superficie hasta la totalidad de su masa.

En definitiva, si un sólido es calentado suficientemente se obtiene un líquido. Si se continúa aumentando la temperatura se obtiene un gas y si se continúa calentando, al gas llegará una temperatura que los átomos se ionizarán y se obtiene un plasma.

Cuando una partícula de movimiento rápido, como un electrón, una partícula alfa o un fotón, colisiona con un átomo de gas, éste expulsa un electrón, dejando un ion cargado. Los iones convierten en conductor al gas. Otro modo de convertir un gas en plasma consiste en hacer pasar electrones de alta energía a través del gas.

### 3.2.1. Análisis del Período OA en la Etapa de Pre-arco.

Durante el período de calentamiento **OA**, la elevación de la temperatura en un instante de tiempo está dada por la siguiente igualdad:

$$V \cdot \gamma \cdot \delta \cdot dT = i^2 \cdot R \cdot dt$$

Siendo los términos:

**T** : Temperatura (° K)

**$\gamma$**  : Peso específico (Kg/cm<sup>3</sup>)

**$\delta$**  : Calor específico (J/° K•Kg)

**dT** : Diferencial del aumento de temperatura (° K)

**dt** : Diferencial de tiempo (seg.)

**V** : Volumen del elemento fusible (cm<sup>3</sup>)

**i** : Valor instantáneo de la corriente (Amp.)

**R** : Resistencia del elemento fusible ( $\Omega$ )

**$\rho$**  : Resistividad específica ( $\Omega$ •cm.)

**$\rho_0$**  : Resistividad a 0° C ( $\Omega$ •cm.)

**$\rho_1$**  : Resistividad a Temperatura de fusión en estado sólido ( $\Omega$ •cm.)

**$\rho_2$**  : Resistividad a temperatura de vaporización en estado líquido ( $\Omega$ •cm.)

**$\alpha$**  : Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura (° K<sup>-1</sup>)

**S** : Sección del elemento fusible (cm<sup>2</sup>)

**L** : Longitud del elemento fusible (cm)

Si:  $V = S \times L$  ;  $\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha T)$  y  $R = \frac{\rho \times L}{S}$  entonces:

$S \times L \times \gamma \times \delta \times dT = i^2 \times \frac{L \times \rho}{S} \times dt$  ; simplificando términos queda:

$$S^2 \times \gamma \times \delta \times dT = i^2 \times \rho_0(1 + \alpha T)dt \quad ; \text{ordenando la ecuación se obtiene:}$$

$$i^2 \times dt = \frac{S^2 \times \gamma \times \delta \times dT}{\rho_0(1 + \alpha T)} \quad ; \text{integrando el primer término entre } 0 \text{ y } t,$$

y el segundo entre 0 y Tf queda lo siguiente:

$$\int_0^t i^2 \times dt = \int_0^{Tf} \frac{S^2 \times \gamma \times \delta \times dT}{\rho_0(1 + \alpha T)}$$

$$\int_0^t i^2 \times dt = \frac{S^2 \times \gamma \times \delta}{\rho_0} \times \int_0^{Tf} \frac{dT}{1 + \alpha T} \quad ; \text{aplicando el método por sustitución:}$$

$$u = 1 + \alpha T \quad \text{y} \quad du = \alpha \times dT \quad ; \text{entonces:}$$

$$\frac{1}{\alpha} \times \int_0^{Tf} \frac{du}{u} = \frac{1}{\alpha} \times \text{Ln}(1 + \alpha Tf) \quad ; \text{finalmente la ecuación queda:}$$

$$\int_0^t i^2 \times dt = \frac{S^2 \times \gamma \times \delta}{\alpha \times \rho_0} \times \text{Ln}(1 + \alpha Tf)$$

### 3.2.2. Análisis del Período AB en la Etapa de Pre-arco.

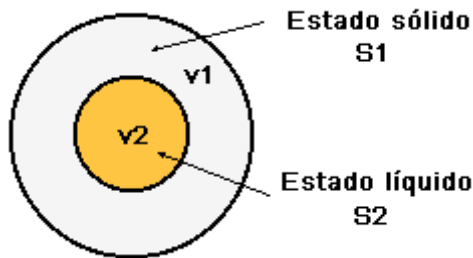
Alcanzada la **Tf** comienza la fusión completa del material iniciándose desde el centro hacia el exterior. La cantidad de volumen fundido en un instante de tiempo **dt**, esta dado por la siguiente expresión:

$$h \times \gamma \times dv = i^2 \times R \times dt$$

Donde:

- h** : Calor latente de fusión (J/Kg)
- dv** : Diferencial de volumen (cm³)

Debido a la diferencia de temperatura entre el centro y el exterior del material, se consideran dos resistencias de distinto valor en paralelo:



$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}$$

$$r_1 = \frac{\rho_1 \times L}{S_1} \quad ; \quad r_2 = \frac{\rho_2 \times L}{S_2}$$

Reemplazando en **R** se obtiene:

$$R = \frac{1}{\frac{S_1}{L \times \rho_1} + \frac{S_2}{L \times \rho_2}}$$

Si **V** es el volumen total del elemento fusible, entonces:

$$V = L \times S \quad ; \quad v_2 = L \times S_2 \quad ; \quad V - v_2 = L \times S_1$$

$$S_1 = \frac{V - v_2}{L} = \frac{V - v_2}{V} \times S = \left(1 - \frac{v_2}{V}\right) \times S$$

$$S_2 = \frac{v_2}{L} = \frac{v_2}{V} \times S \quad ; \text{ Reemplazando en R queda:}$$

$$R = \frac{1}{\frac{\left(1 - \frac{v_2}{V}\right) \times S}{L \times \rho_1} + \frac{\frac{v_2}{V} \times S}{L \times \rho_2}} = \frac{1}{\frac{S}{L} \times \left(\frac{1 - \frac{v_2}{V}}{\rho_1} + \frac{\frac{v_2}{V}}{\rho_2}\right)} = \frac{\frac{L}{S}}{\rho_2 \times \left(1 - \frac{v_2}{V}\right) + \rho_1 \times \frac{v_2}{V}}$$

$$R = \frac{\frac{L}{S}}{\left(\rho_2 - \frac{\rho_2 \times v_2}{V} + \frac{\rho_1 \times v_2}{V}\right)} = \frac{\frac{L}{S}}{\left(\rho_2 - \frac{v_2}{V} \times (\rho_2 - \rho_1)\right) \times \frac{1}{\rho_1 \times \rho_2}}$$

$$R = \frac{\frac{L}{S}}{\frac{1}{\rho_1} \times \left[1 - \frac{v_2}{V} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right]} = \frac{\frac{L \times \rho_1}{S}}{1 - \frac{v_2}{V} \times \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}$$

Reemplazando R en la ecuación se obtiene:

$$h \times \gamma \times dv = i^2 \times \left(\frac{\frac{L \times \rho_1}{S}}{1 - \frac{v_2}{V} \times \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}\right) \times dt \quad ; \text{ Ordenando la ecuación, queda:}$$

$$i^2 dt = \frac{h \times \gamma \times dv \times \left[1 - \frac{v_2}{V} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right]}{\rho_1 \times \frac{L}{S}} \quad ; \text{ multiplicando por } \frac{L \times S}{V} = 1$$

$$i^2 \times dt = \frac{h \times \gamma \times dv}{\rho_1 \times \frac{L}{S}} \times \frac{L \times S}{V} \times \left[1 - \frac{v_2}{V} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right]$$

$$i^2 \times dt = S^2 \times \frac{h \times \gamma}{\rho_1} \times \left[1 - \frac{v_2}{V} \times \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right] \times \frac{dv}{V}$$

Integrando entre 0 y t el primer término, y el segundo término entre 0 y V, se obtiene:

$$\int_0^t i^2 \times dt = S^2 \times \frac{h \times \gamma}{\rho_1} \times \int_0^V \left[1 - \frac{v_2}{V} \times \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right] \frac{dv}{V}$$

Separando la segunda integral:

$$\int_0^V \frac{dv}{V} - \int_0^V \frac{v_2}{V} \times \frac{dv}{V} + \int_0^V \frac{v_2}{V} \times \frac{\rho_1}{\rho_2} \times \frac{dv}{V} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{\rho_1}{2\rho_2}$$

Finalmente la ecuación que rige el período AB queda como se muestra a continuación:

$$\int_0^t i^2 \times dt = S^2 \times \frac{h \times \gamma}{2 \times \rho_1} \times \left[ 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right]$$

### 3.2.3. Análisis del Período BC en la Etapa de Pre-arco.

En éste período la temperatura del líquido sigue incrementándose, provocando la vaporización desde la superficie, y luego la ebullición de todo el líquido hasta convertirse en una atmósfera gaseosa.

La ecuación que caracteriza el período BC en el corte de un fusible en condición adiabática es la que se muestra a continuación.

$$\int_0^t i^2 \times dt = S^2 \times \frac{\gamma \times \delta}{\rho_2} \times \int_{T_f}^{T_v} \frac{1}{1 + \alpha T} \times dT$$

$$\int_0^t i^2 \times dt = S^2 \times \frac{\gamma \times \delta}{\rho_2 \times \alpha} \times \text{Ln} \left( \frac{1 + \alpha \times T_v}{1 + \alpha \times T_f} \right)$$

Reuniendo las tres ecuaciones de cada período en una sola, se determina la ecuación que representa la etapa total de la etapa de pre-arco (período **OA**) en régimen adiabático, por lo tanto, ésta corresponde a la sumatoria de los tres períodos anteriores:

$$\int_0^t i^2 \times dt = S^2 \times \left[ \underbrace{\frac{\gamma \times \delta}{\rho_0 \times \alpha} \times \text{Ln}(1 + \alpha \times T_f)}_{k1} + \underbrace{\frac{h \times \gamma}{2 \times \rho_1} \times \left( 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}_{k2} + \underbrace{\frac{\gamma \times \delta}{\rho_2 \times \alpha} \times \text{Ln} \left( \frac{1 + \alpha \times T_v}{1 + \alpha \times T_f} \right)}_{k3} \right]$$

**constante de Mayer (K)**

La constante de Mayer, descubierta por el médico alemán Julius Robert von Mayer, es un valor que representa una serie de parámetros físicos de un determinado material. Cada metal posee una constante de Mayer, por lo tanto, solamente depende de las propiedades físicas del material. Conociendo este valor, es posible determinar el tiempo que tarda en fundir el elemento fusible, en condición adiabática.

El valor de  $K$  es expresado en  $\frac{J}{\Omega \cdot cm^4}$ , por lo tanto la integral que representa al período de pre-arco queda como:

$Amp^2 \cdot seg. = \frac{J}{\Omega}$  ; y esto es igual a la cantidad de energía por unidad de resistencia eléctrica.

El tiempo total correspondiente al período de pre-arco (Melting) es representado por la siguiente ecuación:

$t = \frac{S^2 \times K}{I^2}$  ; sabiendo que la densidad de corriente ( $D$ ) se define como la cantidad de corriente ( $I$ ) por unidad de superficie ( $S$ ), la ecuación queda como sigue.

$$t = \frac{K}{D^2} \quad (3.2)$$

### 3.2.4. Forma de Calcular la Constante de Mayer para la Plata (Ag).

Parámetros físicos de la plata (Ag):

<b>Tf</b>	: 961.78 (°C) ó 1193.93 (°F)
<b>Tv</b>	: 2162 (°C) ó 2435.15 (°F)
$\gamma$	: 0.0105 (Kg. / cm. <sup>3</sup> )
<b>h</b>	: 103 (J/gr.)
$\delta$	: 237 (J / °K.*Kg.)
$\alpha$	: $400 * 10^{-5}$ (° K <sup>-1</sup> )
$\rho_0$	: $1.6 * 10^{-8}$ ( $\Omega$ *cm.)
$\rho_1$	: $9.237 * 10^{-8}$ ( $\Omega$ *m)
$\rho_2$	: $1.718 * 10^{-7}$ ( $\Omega$ *m)

Conociendo estos parámetros físicos del metal, se calculan en forma independiente las constantes para cada etapa del pre-arco.

$$k1 = \frac{0.0105 \times 237}{1.6 * 10^{-6} \times 400 * 10^{-5}} \times \ln(1 + 400 * 10^{-5} \times 1193.93) = 6.8187 * 10^8$$

$$k2 = \frac{103.000 \times 0.0105}{2 \times 9.237 * 10^{-6}} \times \left( 1 + \frac{9.237 * 10^{-8}}{1.718 * 10^{-7}} \right) = 9.0017 * 10^7$$

$$k3 = \frac{0.0105 \times 237}{1.718 * 10^{-5} \times 400 * 10^{-5}} \times \ln \left( \frac{1 + 400 * 10^{-5} \times 2435.15}{1 + 400 * 10^{-5} \times 1193.93} \right) = 2.24648 * 10^7$$

Sumando las constantes de cada período, se determina la constante de Mayer para este material en particular.

$$K = k1 + k2 + k3 = 7.943 * 10^8 \left[ \frac{J}{\Omega \times cm^4} \right]$$

En la tabla 3.2.4 se muestran los parámetros físicos más importantes y la constante de Mayer, para cada uno de los metales más utilizados en la fabricación de fusibles eléctricos.

Tabla 3.2.4

	Tf (°C)	Tv (°C)	P.esp. (Kg/dm <sup>3</sup> )	Calor.esp. (J/Kgr)	Calor lat. F.	C.Variación °K <sup>-1</sup>	Rho 0°C	Rho1	Rho2	Cte. Mayer
Plomo	327	1620	11.4	159	23.2	4.30x10 <sup>-3</sup>	2.20x10 <sup>-7</sup>	7.88x10 <sup>-5</sup>	2.01x10 <sup>-4</sup>	0.28x10 <sup>8</sup>
Estaño	231.9	2270	7.27	213	59.6	4.60x10 <sup>-3</sup>	1.26x10 <sup>-7</sup>	4.19x10 <sup>-5</sup>	1.60x10 <sup>-4</sup>	0.41x10 <sup>8</sup>
Hierro	1535	2750	7.8	444	272	6.20x10 <sup>-3</sup>	1.20x10 <sup>-7</sup>	1.47x10 <sup>-4</sup>	2.37x10 <sup>-4</sup>	1.29x10 <sup>8</sup>
Zinc	419.5	907	6.84	388	111	4.20x10 <sup>-3</sup>	5.96x10 <sup>-8</sup>	2.33x10 <sup>-5</sup>	3.55x10 <sup>-5</sup>	1.79x10 <sup>8</sup>
Alpaca	1085	2105	8.38	386.2	201.86	3.00x10 <sup>-4</sup>	2.90x10 <sup>-7</sup>	4.08x10 <sup>-5</sup>	4.97x10 <sup>-5</sup>	2.08x10 <sup>8</sup>
Bronce	925	2155	8.15	343	194.66	6.00x10 <sup>-4</sup>	1.55x10 <sup>-7</sup>	2.66x10 <sup>-5</sup>	3.81x10 <sup>-5</sup>	2.57x10 <sup>8</sup>
Aluminio	658	2057	2.7	900	388	4.20x10 <sup>-3</sup>	2.80x10 <sup>-8</sup>	1.38x10 <sup>-5</sup>	3.02x10 <sup>-5</sup>	3.99x10 <sup>8</sup>
Oro	1063	3080	19.3	129	64.9	3.40x10 <sup>-3</sup>	2.44x10 <sup>-8</sup>	1.35x10 <sup>-5</sup>	3.03x10 <sup>-5</sup>	6.00x10 <sup>8</sup>
Plata	960.8	2193	10.5	237	103	4.00x10 <sup>-3</sup>	1.60x10 <sup>-8</sup>	9.50x10 <sup>-6</sup>	1.74x10 <sup>-5</sup>	8.02x10 <sup>8</sup>
Cobre	1080	2310	8.9	385	205	4.20x10 <sup>-3</sup>	1.80x10 <sup>-8</sup>	1.20x10 <sup>-5</sup>	2.13x10 <sup>-5</sup>	10.00x10 <sup>8</sup>

3.3. Análisis Matemático del Tiempo de Fusión en Régimen Adiabático para una Lámina de Plata.

Para verificar la exactitud de la ecuación 3.2, se efectuará un análisis comparativo con los valores obtenidos en el ensayo de laboratorio y los tiempos calculados teóricamente. En la hoja de reporte presentada en la figura 3.3a, están todos los datos necesarios para efectuar el cálculo del tiempo de fusión del elemento fusible en un régimen adiabático.

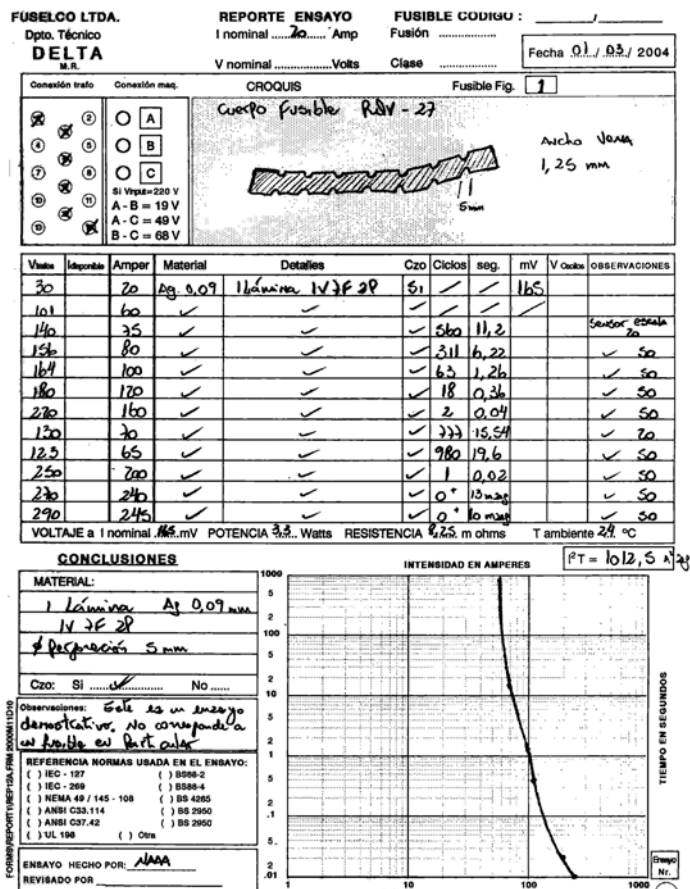
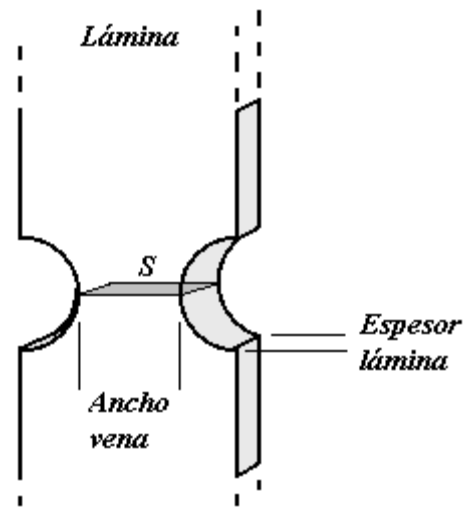


Fig. 3.3a. Reporte de laboratorio para ensayo de una lámina de plata.

Para efectuar el cálculo del tiempo de fusión, es necesario conocer la geometría empleada en el diseño del elemento fusible. Para este ensayo en particular se utilizó una lámina de plata (Ag) de 0.09 mm de espesor, con una geometría de 1 vena, 7 filas y 2 perforaciones. Considerando un ancho de la vena de 1.25 mm, es posible entonces calcular primeramente la superficie de la vena.





**Fig. 3.3b.** Dibujo explicativo de la lámina fusible utilizada en el ensayo.

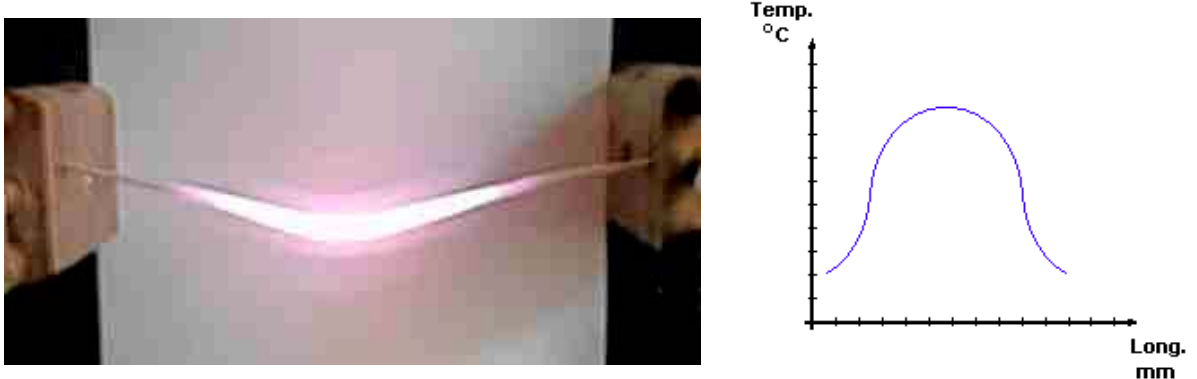
$$S = 1.25 \times 0.09 = 0.1125 \text{ mm}^2 = 1.125 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Una vez determinada la zona del elemento fusible involucrada en el proceso de fusión, es decir, la superficie de la vena, y con los valores de la intensidad de corriente observados en la hoja de reporte, es posible realizar una comparación entre los tiempos de pre-arco obtenidos del laboratorio y los valores calculados teóricamente para corrientes en régimen adiabático de 160 y 200 amperes.

	Resultado <b>Teórico</b>	Resultado <b>Práctico</b>
$t = 8 \cdot 10^8 \times \left( \frac{0.001125}{160} \right)^2 = 0.0395 \text{ segundos} \cong 0.04 \text{ segundos}$		
$t = 8 \cdot 10^8 \times \left( \frac{0.001125}{200} \right)^2 = 0.0253 \text{ segundos} \cong 0.02 \text{ segundos}$		

### 3.4. Origen del Arco Eléctrico en la Operación de un Fusible.

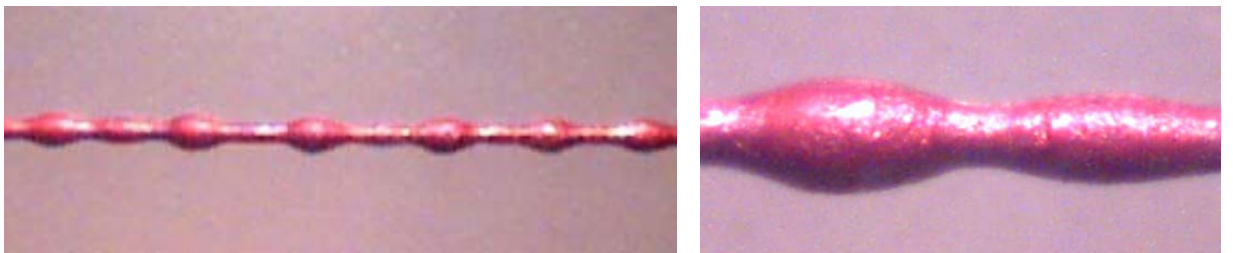
Si un determinado elemento fusible de sección uniforme opera en una condición de sobrecarga, la distribución de la temperatura disipada a lo largo del elemento, se puede considerar como parabólica, debido a que la concentración del calor desarrollado es mayor en el centro del fusible. Según lo anterior, se puede deducir que la fusión bajo esta condición de sobrecarga, siempre tendrá lugar en el centro del elemento fusible, lo que originará la aparición de un arco simple.



**Fig. 3.4a.** A la izquierda, un conductor de cobre-plata ( $\phi$  1.4 mm) es circulado por una corriente de 100 A en sobrecarga. El calor se concentra en el centro del elemento fusible. A la derecha, el gráfico que muestra la variación de la temperatura en el fusible.

Considerando el mismo elemento fusible del caso anterior, pero ahora trabajando en una condición de cortocircuito, donde la corriente de falla es mucho mayor que la corriente nominal del fusible, ocurrirá que la distribución de la temperatura es uniforme en todo el elemento, debido a que el tiempo es insuficiente para que se originen pérdidas de calor por conducción hacia los extremos, y la fusión tendrá lugar en toda la longitud produciendo arcos múltiples.

Cuando la totalidad del elemento fusible se encuentra en estado líquido, la combinación de las fuerzas electromotrices y la tensión superficial que existe en el líquido, produce una serie de ensanchamientos y angostamientos periódicos en toda la longitud del elemento fusible los que actúan como estricciones. Este efecto acelera la disrupción en los sectores más angostos.



**Fig. 3.4b.** Efecto generado por la circulación de una corriente de cortocircuito.

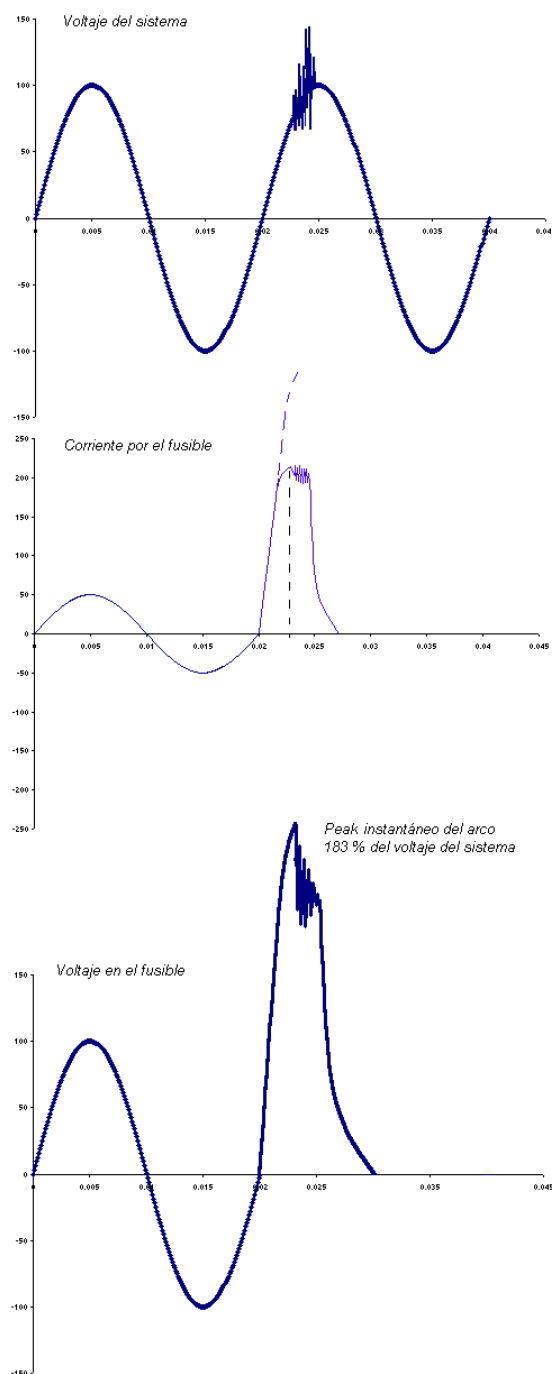
La brusca apertura o interrupción se origina por la sobre presión interna del vapor que se produce en el núcleo del elemento, la cual supera la tensión elástica de la periferia que a su vez se encuentra en estado líquido. Esta sobre presión, es conocida como "componente explosiva de la presión", y puede llegar hasta los  $1000 \text{ kg/cm}^3$ , con una duración de 10 a  $100 \mu\text{s}$ .

La ecuación que representa a un circuito eléctrico durante el arco, se puede definir como sigue.

$$v(t) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + v_f \quad \text{donde:}$$

$v(t)$  : Voltaje de la fuente.  
 $R$  : Resistencia del circuito.  
 $v_f$  : Voltaje del arco en el fusible.  
 $L$  : Inductancia del circuito.

Durante la operación del fusible, el voltaje del arco incrementa su valor de 2 a 2.5 veces el voltaje nominal, mientras que la corriente toma una pendiente decreciente, es decir, la componente  $\frac{di}{dt}$  se hace negativa para mantener la igualdad anterior, lo que origina el efecto de limitación de corriente.



**Fig. 3.4c.** Señales de corriente y voltaje en el instante del arco eléctrico.

Según lo anterior, se puede deducir que para obtener una rápida interrupción de una corriente de cortocircuito, es deseable obtener una gran tensión de arco, pero esto podría afectar a circuitos asociados a la red eléctrica.



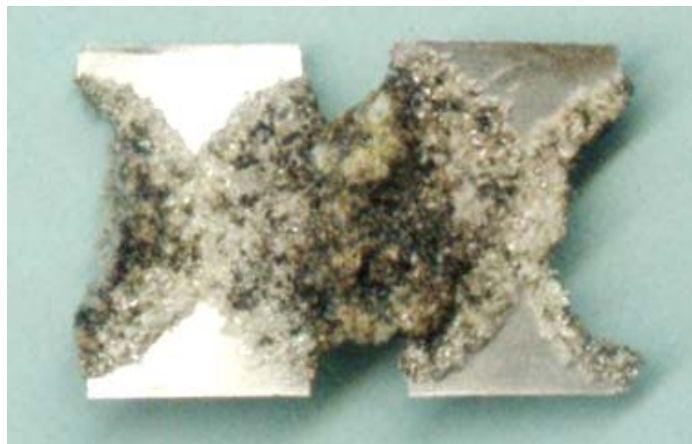
**Fig. 3.4d.** Lámina con estricciones para fusible de media tensión.

Una corriente de cortocircuito elevada, de alrededor de 10 veces  $I_n$ , produce notables deformaciones del elemento, sobre todo en el uso de alambres conductores (Fig. 3.4b). A lo largo del material, en las zonas más angostas aparecen arcos en serie que rápidamente se van uniendo unos a otros, hasta formar un arco total, el cual magnifica la tensión total del arco.

El uso de láminas permite que en cada estricción se produzca un arco, controlando el peak inicial de la tensión de arco, debido a la longitud de la estricción y la acción de la sílice.

Un fusible de alta capacidad de ruptura debe ser capaz de interrumpir un circuito reactivo, sin producir una tensión de arco peligrosa. La limitación de corriente, solamente es válida si la etapa de pre-arco es menor que el primer peak de corriente, es decir con cortocircuitos grandes, y esto se consigue con el empleo de láminas con estricciones y rodeada con sílice compactada (arena de cuarzo).

La longitud de cada arco que aparece en las estricciones de la lámina fusible, crece debido a la erosión del elemento y la rápida evaporación producida por el intenso calor del inicio del arco (raíz del arco). Además, el enfriamiento por la transferencia radial de calor desde la zona del arco hacia el cuarzo, contribuye a la permanencia de la tensión del arco.



**Fig. 3.4e.** Lámina erosionada por la acción del arco eléctrico originado en las estricciones.

Debido a la liberación de energía durante el proceso, se genera una onda de presión (componente de presión del arco), siendo su magnitud inferior a la componente explosiva, pero su energía provoca movimientos en los granos de cuarzo circundante y someten al cuerpo del fusible a un esfuerzo considerable que podría destruirlo.

El metal del elemento fusible, fluye en forma de líquido y vapor desde la zona de erosión y junto con el cuarzo fundido generan un canal en el cual se desarrolla el

arco. Al solidificarse esta mezcla, se produce un compuesto vítreo conocido como “fulgurita”, el cual es un buen aislante eléctrico.



**Fig. 3.4f.** Trozo de fulgurita en el interior de un fusible de 750 V dc.

Durante el arco, se libera gran cantidad de energía dentro del cuerpo, debiendo el fusible absorber esta sin sufrir daño exterior.

Si se considera un circuito reactivo puro en corriente alterna, como es en la mayoría de los cortocircuitos ( $XL \gg R$ ), la energía que debe contener el fusible en el momento del inicio del arco, es aportada por la fuente de alimentación,  $\int i \cdot v(t) \cdot dt$ , y por el conjunto de inductancias que posee el circuito,  $1/2 \cdot L \cdot i_0^2$ , siendo  $i_0$  la corriente de inicio del arco o término del pre-arco.

La energía que proporciona la fuente, será mayor si  $v(t)$  y la corriente es máxima en el instante del arco.

Si se consideran valores altos de corriente, de tal manera que el fusible limite, la energía máxima se producirá cuando la fusión del elemento fusible ocurra cerca del peak de tensión de alimentación y esto solo se producirá para un cierto rango de corrientes presuntas.

En relación con la inductancia del sistema, la energía que ésta entrega aumentará si  $i_0$  se incrementa, y esto ocurre mediante la reducción de la inductancia  $L$ .

Debido a la naturaleza de la característica de limitación de corriente que posee el fusible, existirá una corriente presunta para la cual el efecto de disminución de  $L$  sea mayor que el aumento de  $i_0$ , produciendo un máximo en la energía almacenada en  $L$ .

Según lo anterior, se puede deducir que existe una corriente presunta, donde la energía que soporta el fusible es máxima. Este valor se denomina “Corriente Crítica”, y es uno de los valores especificados por las normas para los ensayos de capacidad de ruptura, siendo designado como  $I_2$ .

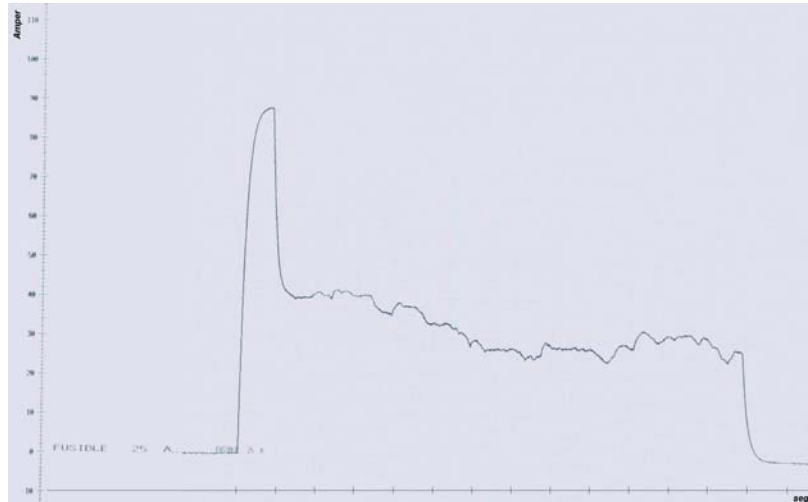
A medida que la corriente presunta es mayor, la energía del arco disminuye hasta llegar a la máxima corriente que puede ser interrumpida por el fusible ( $I_1$ ). El ensayo con este valor determina la habilidad del fusible para soportar las altas presiones disruptivas con corrientes inferiores a la crítica.

La energía del arco disminuye, pero con valores cercanos a la mínima corriente de fusión, la energía del arco crece a valores superiores. Este fenómeno, con corrientes bajas, se produce por la transición de arcos múltiples a simples.

Cuando se produce un arco simple, la tensión de arco inicial no es suficiente para causar una reducción significativa en la corriente, y la tensión crece a medida que la longitud del arco aumenta por la erosión del elemento fusible.

El proceso anterior es relativamente lento y si la tensión del arco no llega a un valor suficiente para extinguir el arco antes que se funda totalmente, el arco se establece y

el fusible no desconecta. También, la temperatura del cuarzo disminuye su capacidad de enfriamiento durante el arco.



**Fig. 3.4g.** Fusible de 25 A en condiciones de sobrecarga. El arco de corriente se mantiene debido a la baja tensión de arco inicial.

Muchos fusibles limitadores de corriente para alta tensión, no pueden interrumpir corrientes por debajo de la mínima corriente de interrupción especificada por el fabricante, ya que con bajas corrientes, la tensión de arco inicial es menor con relación a la tensión aplicada, haciendo difícil la extinción del arco.

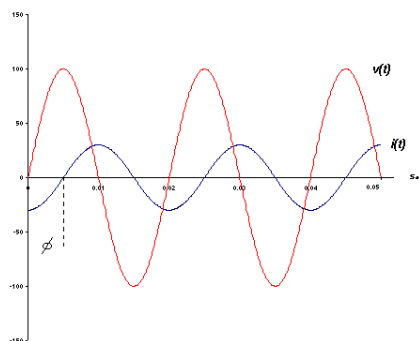
Se consideran en los ensayos de capacidad de ruptura las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ , además de los ensayos con corrientes inferiores a 5 veces  $I_n$ .

En una condición de resistencia nula del circuito (cortocircuito), se produce la condición más desfavorable, considerando que el componente resistivo absorbe parte de la energía aportada por la fuente y la inductancia.

El factor de potencia es importante con corrientes de sobrecarga, ya que el corte definitivo en estos casos se produce cuando la corriente pasa por cero, y en un circuito inductivo ocurre cuando la tensión está cerca de un máximo, dificultando el corte. Considerando un sistema que opera con un factor de potencia de 0.85, cuando sucede una falla gran parte de la resistencia del circuito se reduce, disminuyendo al factor de potencia a 0.25 o menos. Esto produce una asimetría en la corriente de falla.

En general, un bajo factor de potencia en cortocircuito y además el lugar de la señal del voltaje de alimentación, incrementan el grado de asimetría en la corriente.

En la práctica, en fallas por sobrecarga, generalmente el  $\cos \phi$  es más alto que en los cortocircuitos. En el caso de fusibles no limitadores de corriente, el  $\cos \phi$  es muy importante, puesto que estos fusibles para producir su corte deben pasar por un cero de corriente.



**Fig. 3.4h.** El paso por cero de la corriente se produce cuando la tensión es máxima en un circuito inductivo.