

Motores eléctricos

Las protecciones para motores existen en distintas formas ya que hay una gran cantidad de diseños y se pueden hacer en forma individual o en distintas combinaciones. Cada una tiene sus propias particularidades por lo que resulta difícil que sea en forma general.

Los fundamentos básicos de la protección de motores eléctricos establecen que se debe permitir operar por encima, pero sin exceder demasiado sus límites térmicos y mecánico para sobrecargas y condiciones de operaciones anormales proporcionando la máxima sensibilidad para fallas.

En el caso de motores arriba de 600 v se establece que cada motor se debe proteger contra sobrecargas peligrosas y fallas en el arranque, por medio de un dispositivo térmico que sea sensible a la corriente. Si la sobre corriente es por falla, se deben usar posibles o interruptores con la capacidad adecuada.

Para motores de hasta 600 V cada motor se deba a proteger contra sobrecargas peligrosas y fallas en el arranque, por medio de un dispositivo protector contra sobrecargas y Sobrecorriente. Para motores de 600 V o mayores se pueden adoptar las protecciones que a continuación se presentan.

Protección de motores

La protección de motores se puede realizar por distintos dispositivos de protección, pero es necesario comparar cual es más eficiente. A continuación se describen los dispositivos empleados para la protección de estos equipos.

Tipos de protección

- **Contra falla de fase.**

Para este tipo de falla, se pueden usar relevadores de Sobrecorriente del tipo instantánea no direccionales. Por lo general, estas fallas proporcionan una corriente mayor que la de arranque a rotor bloqueado. El motor representa un elemento de suma importancia en una red eléctrica, de manera que se puede usar un relevador de tipo instantánea, lo cual no representa un problema de coordinación. La contribución del motor al cortocircuito, es relativamente pequeña ($\frac{1}{x''d}$) y decae rápidamente en unos cuantos ciclos, de manera que se pueden aplicar relevadores no direccionales.

Los TC's que alimentan a estos relevadores se deben seleccionar, de manera que la máxima corriente del motor proporcione entre 4 A y 5 A en el secundario. Los relevadores instantáneos de fase, se deben ajustar arriba de la corriente simétrica de rotor bloqueado y debajo de la mínima corriente de falla.

- **Sobrecorriente instantánea de fase**

El propósito de esta protección es detectar condiciones de falla sin retardo alguno. La rápida interrupción de esta falla da como resultado los siguientes puntos:

- Limita los daños en el punto de falla
- Limita la duración de la variación de tensión que acompaña la falla
- Limita la posibilidad de que la falla extienda la presencia de fuego, daño o explosión.

Esta protección se logra con la aplicación de relevadores de Sobrecorriente instantáneo de fase.

- **Sobrecorriente de fase con retardo de tiempo.**

El propósito de esta protección es detectar:

- Fallas para acelerar a velocidad nominal en el intervalo de arranque normal.
- Condiciones de reposo del motor
- Condiciones de falla de baja magnitud

Puede usarse para detectar fallas en la aceleración o variaciones de velocidad en el intervalo de arranque, o cuando existen condiciones de frenado repentino del motor, para la protección de este tipo de fallas se emplean relevadores con retardo de tiempo.

- **Sobrecarga**

Motores de trabajo continuo mayores a 1 HP. En este caso se aplica un factor no mayor del 125% de la corriente a plena carga, para motores con factor de servicio no menor a 1,15 y elevaciones de temperatura no mayor a 40 °C. Se aplica un factor no mayor al 115% de la corriente a plena carga para todos los demás motores. Si los valores indicados anteriormente no son suficientes para arrancar el motor o conducir su corriente de carga, se permite tomar los valores inmediatos superiores, sin exceder los siguientes límites:

El factor es de 140% de la corriente a plena carga para motores con factor de servicio no menor a 1,15 y elevaciones de temperatura no mayor a 40 °C y 130% para los demás motores.

Motores para servicio intermitente. Estos motores se consideran protegidos contra sobrecarga, si los dispositivos para protección contra cortocircuito no rebasan los valores indicados antes. La protección contra sobrecarga deberá de tener un ajuste de tiempo suficiente que permita que circule la corriente de arranque del motor, pero que le permita operar en caso de que se alcance el tiempo de atascamiento máximo permitido al rotor.

Los ajustes máximos permitidos a los dispositivos de protección contra sobrecarga, son indicados en la siguiente tabla, donde se indica el porcentaje de ajuste en función de la corriente a plena carga del motor.

Tabla. Máximo porcentaje de ajuste para protección contra sobrecorrientes.

Sobrecarga en motores	
Consideraciones	Máximo ajuste (%)
Si $FS \geq 1,15$ ó $T \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	140
Todos los demás	130

Donde:

FS.: Factor de servicio.

T: Elevación de temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

Curvas de arranque.

Las curvas características tiempo-corriente de los motores están constituidas por las siguientes partes:

- Corriente a plena carga. Es el valor de la corriente que demanda el motor en condiciones de tensión, potencia y frecuencia nominales. Normalmente este dato aparece anotado en la placa del motor. En caso de que no se conozca, se pueden utilizar datos típicos proporcionados por los fabricantes.
- Corriente de magnetización. Es el valor de la corriente que circula a través de los devanados del motor, cuando este es energizado inicialmente. En forma aproximada se valor alcanza 1,76 veces la corriente a rotor bloqueado para motores de tensión media y alta y 1,5 veces para los motores de tensión baja, con la duración de 0,1 s.
- Tiempo de aceleración. Es el tiempo de transición entre la corriente de arranque y la de plena carga del motor. Depende de la capacidad nominal del motor, del par de arranque y de la inercia de la carga.
- Corriente a rotor bloqueado: es la corriente del motor a velocidad cero. Si no se conoce su valor, se puede utilizar la letra código NEMA para determinarlo.
- Tiempo de atascamiento máximo permitido: el tiempo de atascamiento del rotor, representa en un motor, un punto en la curva límite de calentamiento, definido por i^2t a corriente de rotor bloqueado. Generalmente este valor lo proporciona el fabricante del motor.

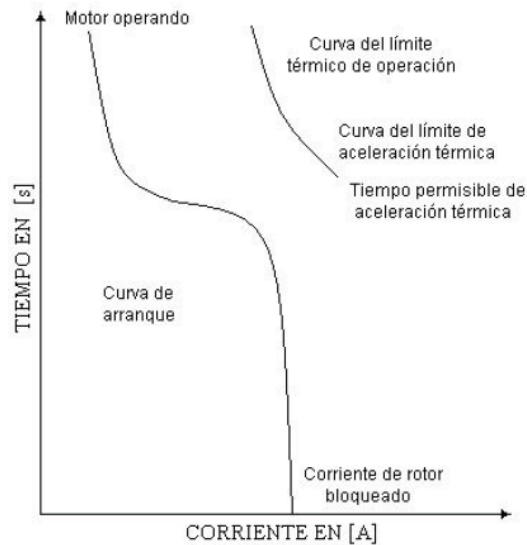


Figura 3.2 Curva de daño y energización de un motor.

Selección de protección en los motores.

Para realizar la selección de la protección se necesita conocer el nivel de tensión en la cual va a operar el dispositivo, en este caso se trata de tensión baja y media, el valor de la corriente de operación del equipo y el valor de cortocircuito que interrumpirá la protección. Basados en estos criterios se seleccionan los dispositivos de protección. Debido a que los motores son de la misma capacidad solo se realizará el cálculo para uno de ellos.

Para el cálculo se considera que 1 kVA=1 HP

Motor de 150 HP de 480 V.

Los datos del motor son los siguientes:

La corriente nominal del motor es:

$$I_n = \frac{150 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 0,48 \text{ kV}} = 180,422 \text{ A para } 0,4 \text{ s en adelante}$$

La corriente a rotor bloqueado es:

$$I_{RB} = 6 \times I_n = 6 \times 180,422 \text{ A} = 1\,082,532 \text{ A de } 0,1 \text{ a } 0,4 \text{ s}$$

La corriente de arranque se calcula como 1,5 veces la corriente a rotor bloqueado.

$$I_{Arr} = 1,5 \times 1\,046\,A = 1\,569\,A \text{ de } 0 \text{ a } 0,1\,s$$

Dado que la tensión está en el nivel de tensión baja se utilizará un interruptor termomagnético y para su ajuste se toma el 150 % de ajuste de la corriente nominal.

Por lo tanto la protección es:

$$180,422\,A \times 1,5 = 270,63\,A$$

Su valor comercial es de: 250 A marca Federal Pacific. La curva de energización y la curva del interruptor termomagnético se muestran en los anexos.

Motor de 250 HP de 2,4 kV.

Los puntos de la curva de energización del motor son los siguientes:

$$I_n = \frac{250\,kVA}{\sqrt{3} \times 2,4\,kV} = 60,141\,A \text{ de } 0,4\,s \text{ en adelante}$$

$$I_{RB} = 6 \times I_n = 6 \times 60,141\,A = 360,844\,A \text{ de } 0,1 \text{ a } 0,4\,s$$

$$I_{Arr} = 1,76 \times I_{RB} = 1,76 \times 360,844\,A = 635,085\,A \text{ de } 0 \text{ a } 0,1\,s$$

Este motor se protegerá por medio de relevador, ya que el nivel de tensión es de tensión media, se utilizará un relevador de Sobrecorriente instantáneo y uno de Sobrecorriente con retardo de tiempo denominado como SEL 351, por lo cual se calcularán a continuación los ajustes.

Para el ajuste del relevador se toma un factor de servicio del motor del 115 %, además de que los relevadores de sobrecorriente son ajustados a un 125 % de la corriente a plena carga, por lo tanto la relación del transformador de corriente (RTC), se calcula a partir de la corriente de ajuste de la protección (lap) lo cual se obtiene con la ecuación.

$$I_{ap} = 1,15 \times 1,25 \times I_n$$

$$I_{ap} = 1,15 \times 1,25 \times 60,141 \text{ A} = 86,452 \text{ A}$$

En este caso el motor de 250 HP se encuentra conectado a la barra 13, en la cual se presenta un corriente de cortocircuito trifásica simétrica de 3,787 kA. El TC debe soportar esta corriente para evitar saturarse, por lo cual se elige el TC de 200:5, ya que $20 \times 200 \text{ A} = 4 \text{ KA}$, que es lo necesario para soportar la falla; por lo tanto:

$$\therefore RTC = \frac{200}{5} = 40$$

Ajuste de los relevadores 50 de fase

Para el ajuste del relevador del 50 de fase se realiza un ajuste para la corriente de arranque del relevador ($I_r = TAP$) de acuerdo a la ecuación:

$$I_r = \frac{1,7 \times I_{RB}}{RTC}$$
$$I_r = \frac{1,7 \times 360,844 \text{ A}}{RTC} = \frac{613,435 \text{ A}}{40} = 15,335 \text{ A}$$

Ajuste de los relevadores 51 de fase.

Los ajustes del relevador 51 se realizan de acuerdo a la ecuación.

$$I_r = \frac{I_{ap}}{RTC}$$
$$I_r = \frac{86,452 \text{ A}}{40} = 2,161 \text{ A}$$

Por lo que la corriente de arranque del relevador (I_r) al arrancar el motor se obtiene de la ecuación:

$$I_{ar} = \frac{I_{RB}}{RTC}$$

$$I_{ar} = \frac{360,844 \text{ A}}{40} = 9,021 \text{ A}$$

A partir de la corriente de arranque de la protección se obtiene el múltiplo de TAP (M) con la ecuación:

$$M = \frac{I_{ar}}{TAP}$$

$$M = \frac{9,021 \text{ A}}{2,161 \text{ A}} = 4,17 \text{ pu}$$

Con el valor anterior y observando el tiempo máximo de arranque del motor de 0,4 s, se selecciona la familia de curvas C3: curva clase C extremadamente inversa, y de esta el dial 0,1 mostrado en la figura B.9 de anexos (proporcionadas por el fabricante para el relevador SEL 351).

Motor de 400 HP de 2,4 KV

Siguiendo el mismo procedimiento del motor de 250 HP, se calculan los ajustes del motor de 400 HP.

$$I_n = \frac{400 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 2,4 \text{ kV}} = 96,225 \text{ A de } 0,4 \text{ s en adelante}$$

$$I_{RB} = 6 \times I_n = 6 \times 96,225 \text{ A} = 577,35 \text{ A de } 0,1 \text{ a } 0,4 \text{ s}$$

$$I_{ART} = 1,76 \times I_{RB} = 1,76 \times 577,35 \text{ A} = 1016,13 \text{ A de } 0 \text{ a } 0,1 \text{ s}$$

$$I_{ap} = 1,15 \times 1,25 \times 96,225 \text{ A} = 138,323 \text{ A}$$

Este motor se encuentra conectado a la barra 10, por lo tanto se elige el TC 400:4 para evitar la saturación.

$$\therefore RTC = \frac{400}{5} = 80$$

Ajuste de los relevadores 50 de fase

La corriente de arranque es:

$$I_r = \frac{1,7 \times 558 A}{80} = \frac{948,6 A}{80} = 11,857 A$$

Ajuste de los relevadores 51 de fase.

La corriente de ajuste del relevador es:

$$I_r = \frac{138,323 A}{80} = 1,729 A$$

Por lo que la corriente de arranque del relevador durante el arranque del motor es:

$$I_{ar} = \frac{558 A}{80} = 6,975 A$$

$$M = \frac{6,975 A}{1,729 A} = 4,03 pu$$

Con el valor anterior y observando el tiempo máximo de arranque del motor de 0,4 s, se selecciona la familia de curvas C3: curva clase C extremadamente inversa, y de esta el dial 0,1

Conductores eléctricos

Protección de conductores eléctricos

De la misma manera que las corrientes de falla afectan al transformador, se debe considerar que estas corrientes elevan la temperatura de los conductores de las líneas; por lo cual es necesario conocer el comportamiento de los conductores durante esta condición.

Las normas eléctricas establecen que para los conductores de más de 600 V el dispositivo de protección podrá ser ajustado al 600% de la ampacidad del conductor; sin embargo, es conveniente incluir la grafica de la curva de daño de los conductores al realizar el análisis de las características de operación tiempo-corriente de los elementos del sistema eléctrico.

Los conductores eléctricos utilizados en los sistemas eléctricos industriales determinados por cuatro factores básicos:

- 1) Eléctricos: perdidas, ampacidad, resistencia, configuración, factores de carga y de coincidencia.
- 2) Mecánicos: carga de ruptura del conductor, flecha, temperatura y presión del viento.
- 3) Económicos: costos de inversión, costos de perdidas, vida útil, material del conductor, costo de operación y mantenimiento, tipo de cambio de dólar y tasa de interés.
- 4) Ambientales: temperatura, viento, contaminación salina y contaminación industrial.

Cuando un conductor va a ser seleccionado se deberán tener en cuenta los factores mencionados.

Curva de daño de conductores eléctricos.

En el caso de los conductores eléctricos la capacidad de conducción de corriente se conoce como la corriente de ampacidad y representa la conducción en estado estable, la capacidad de disipación de calor producido por esta corriente está limitada por el limite de temperatura de aislamiento del conductor, ya que depende del material de que este fabricado el mismo. En la siguiente figura se representa la clasificación de los conductores de acuerdo al tipo de material.

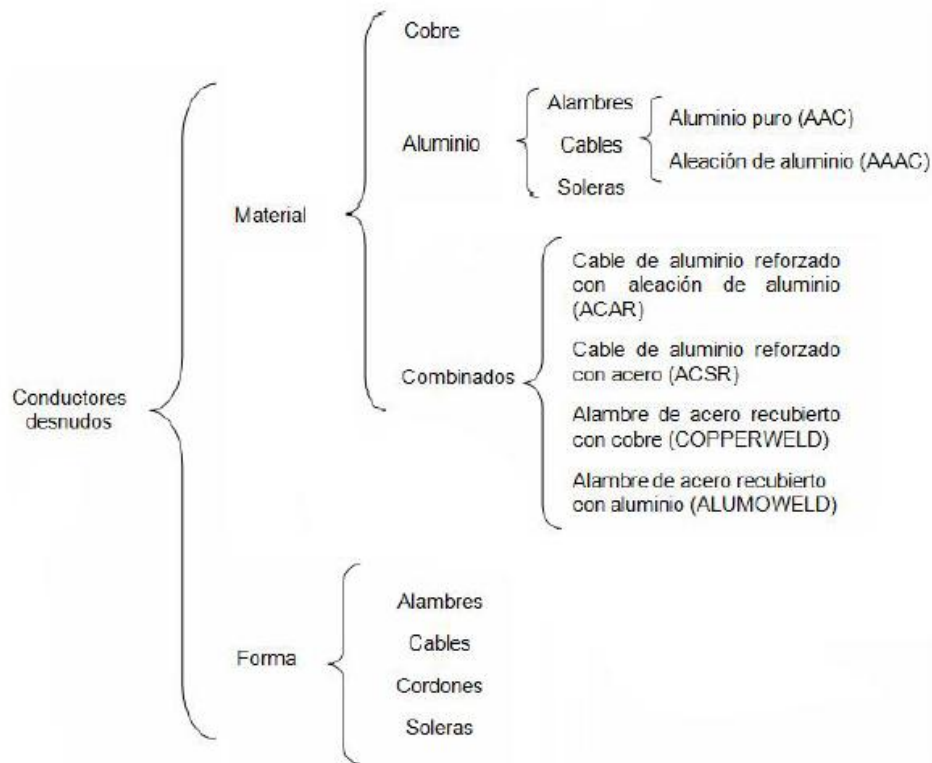


Figura 3.3 Clasificación de conductores desnudos.

Cuando ocurre el cortocircuito en un conductor eléctrico la corriente puede aumentar varias veces la corriente de ampacidad del conductor, si este valor de corriente fuera permanente, entonces la elevación de temperatura sería tal que el aislamiento fallaría por exceso de calor, entonces para relacionar o correlacionar las características de resistencia electromagnética del conductor eléctrico para los valores de corriente en función del tiempo y las características de los dispositivos de protección asociados a cada elemento, se debe trazar la curva de daño del conductor.

Para la protección de los conductores eléctricos dependiendo del nivel de tensión y de la importancia de la instalación pueden usarse como medios de protección desde fusibles hasta interruptores termomagnéticos o electromagnéticos. Para el caso de un interruptor como medio de protección y que representa el caso de mayor atención, la capacidad del interruptor no debe ser mayor de 600% de la ampacidad del cable o conductor.

Para el trazo de la curva de daño se emplea generalmente las curvas proporcionadas por los fabricantes pero en caso de que no se conozcan, se aplican las ecuaciones siguientes:

Para el cobre.

$$\left(\frac{I}{CM}\right)^2 (t)Fac = 0,0297 \log_{10} \left[\frac{(tf) + 234,5}{(t0 + 234,5)} \right]$$

Para el aluminio:

$$\left(\frac{I}{CM}\right)^2 (t)Fac = 0,0125 \log_{10} \left[\frac{(tf) + 228,1}{(t0 + 228,1)} \right]$$

Donde

I = Corriente que circula por el conductor en A.

CM= Calibre del conductor.

t= Tiempo en que circula la corriente, en s.

t₀= Temperatura inicial antes de un cambio de corriente, en °C.

t_f= Temperatura final después de un cambio de corriente, en °C.

Fac= Relación de efecto piel o relación de corriente alterna a corriente directa.

En la tabla se observa el calibre de conductores utilizados en circuitos de distribución aéreos.

Tabla 3.11 Calibres utilizados en circuitos de distribución aéreos.

TENSIÓN ELÉCTRICA PREFERENTE [kV]	CALIBRE [kCM/AWG]	MATERIAL	CAPACIDAD MÁXIMA [A]	APLICACIÓN
13,8	3/0 1/0	Cu Cu	365 275	Troncales Troncales-Ramales

Trazar la curva de daño de un conductor de cobre 1/0 AWG (53.5 mm²) en hoja logarítmica que tiene una ampacidad de 275 A, su temperatura a esta corriente es de 90 °C, la temperatura final estimada limite del aislamiento es de 150 °C, el factor de efecto piel es de 1,10.

$$53,5\text{mm}^2 \left(\frac{1\text{ pulg}}{25,4\text{ mm}} \right)^2 \left(\frac{1\text{CM}}{\frac{\pi}{4} 10^{-6} \text{pulg}^2} \right) = 105\,583,6005\text{ CM}$$

Despejando la corriente que circula por el conductor de la ecuación 3.24 queda:

$$I = \left(\sqrt{\frac{0,0297 \log_{10} \left(\frac{t_f + 234,5^\circ\text{C}}{t_0 + 234,5^\circ\text{C}} \right)}{tFac}} \right) \text{CM}$$

Para trazar la curva de daño del cable 1/0 se considera los tiempos de referencia.

$$t_0 = 0,1\text{ s}, t_f = 10\text{ s}$$

$$I_{0,1} = \left(\sqrt{\frac{0,0297 \log_{10} \left(\frac{150^\circ\text{C} + 234,5^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C} + 234,5^\circ\text{C}} \right)}{(0,1 * 1,10)}} \right) 105\,583,6005\text{CM} = 14\,892,17053\text{ A}$$

$$I_{10} = \left(\sqrt{\frac{0,0297 \log_{10} \left(\frac{150^\circ\text{C} + 234,5^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C} + 234,5^\circ\text{C}} \right)}{(10 * 1,10)}} \right) 105\,583,6005\text{CM} = 14\,89,2,17053\text{ A}$$

En la figura 3.4 se observa la curva de daño del conductor de cobre 1/0 AWG.

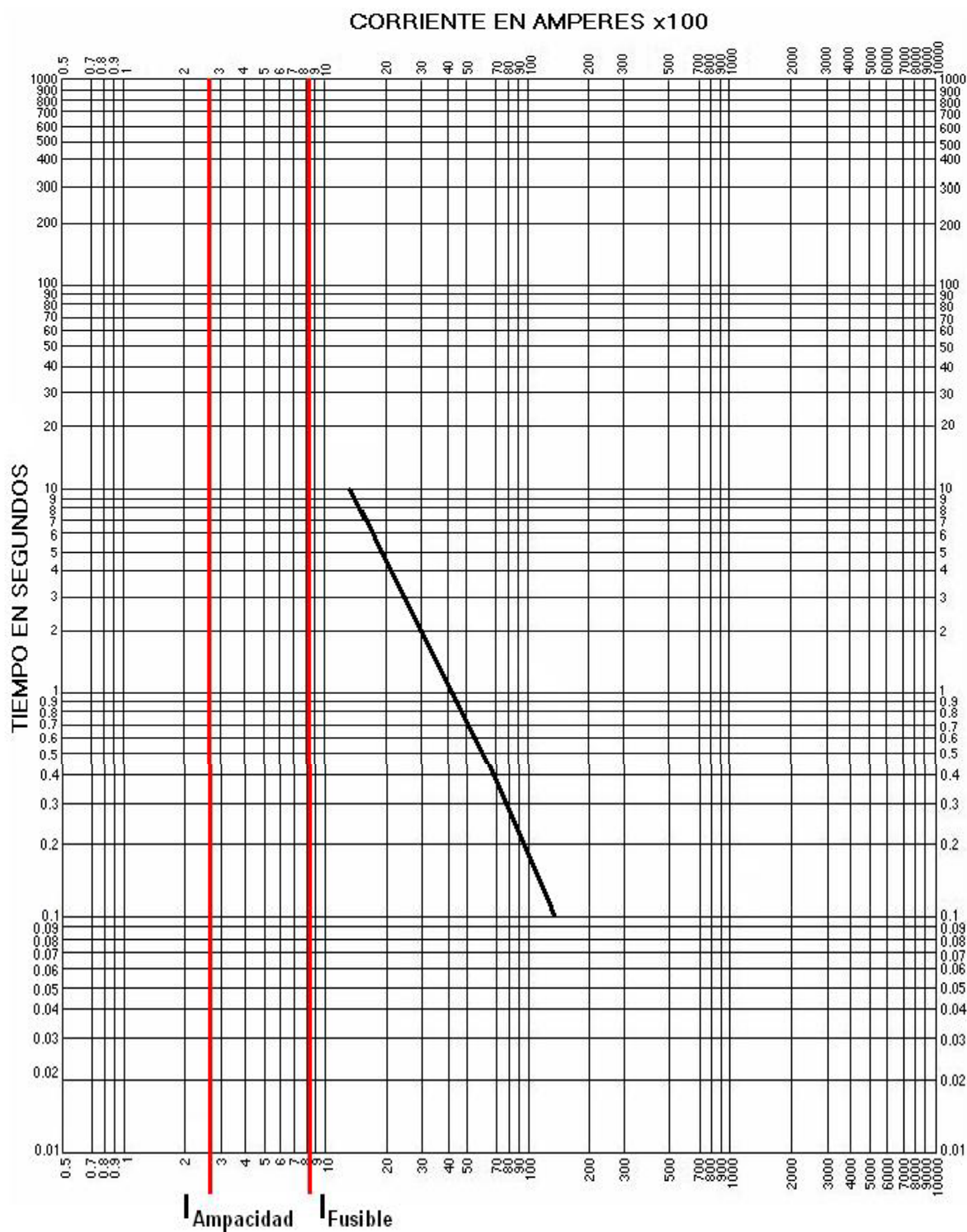


Figura 3.4 Curva de daño de un conductor de cobre 1/0 AWG.

Selección de protección de conductores eléctricos.

La protección de los conductores 1/0 AWG y 3/0 AWG se realiza trazando la curva de daño del conductor y la curva de su ampacidad en hojas logarítmicas, la ampacidad de los conductores se toma de la norma NOM-001-SEDE-2005.

La protección con fusibles se realizara al 300% de la corriente de su ampacidad por lo que la protección debe ser siempre este porcentaje, se se llegara pasar este porcentaje la protección del conductor con fusible estaría sobrada.

$$I_{fus} = 275 \times 3 = 825 \text{ A} \quad (\text{Para el conductor de cobre 1/0 AWG}).$$

$$I_{fus} = 355 \times 3 = 1\,065 \text{ A} \quad (\text{Para el conductor de cobre 3/0 AWG}).$$

Para elegir la curva del fusible que permita proteger correctamente a los conductores de cobre 1/0 AWG y 3/0 AWG se usa una de las curvas que se encuentran dentro de los límites de la corriente de ampacidad y la curva de daño eléctrico del conductor. La curva del fusible que se escoge para proteger al conductor 1/0 AWG y 3/0 AWG es la que se encuentra enseguida de la curva de la corriente del fusible.

De esta manera se puede llevar a cabo la selección del fusible deseado para los ejemplos con el cual se requiere de un fusible de 825 A para el conductor de cobre 1/0 AWG se utiliza el de 160 A, ya que este opera con una corriente de 650 A.