

## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO

### 4.1 Qué es el corto circuito y su importancia en el sistema eléctrico.

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos, requiere de minuciosos estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Estudios típicos que se realizan son los flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de corto circuito, etc. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio que se incluye la selección de voltaje, tamaño del equipamiento y selección apropiada de las protecciones.

La mayoría de los estudios necesitan de un complejo y detallado modelo que represente al sistema eléctrico, generalmente establecido en la etapa de proyecto. Los estudios de corto circuito son típicos ejemplos de éstos, siendo esencial para la selección de equipos y el ajuste de sus respectivas protecciones.

Las dimensiones de una instalación eléctrica y de los materiales que se instalan, así como la determinación de las protecciones de las personas y bienes, precisan el cálculo de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de la red. Un estudio de corto circuito tiene la finalidad de proporcionar información sobre corrientes y voltajes en un sistema eléctrico durante condiciones de falla. Pero, ¿qué es y cómo se origina un corto circuito?

#### 4.1.1 Definición.

Un corto circuito es un fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí, caracterizándose por elevadas corrientes circulantes hasta el punto de falla. Se puede decir que un corto circuito es también el establecimiento de un flujo de corriente eléctrica muy alta, debido a una conexión por un circuito de baja impedancia, que prácticamente siempre ocurren por accidente. La magnitud de la corriente de corto circuito es mucho mayor que la corriente nominal o de carga que circula por el mismo. Aún en las instalaciones con las protecciones más sofisticadas se producen fallas por corto circuito.

La corriente de corto circuito se puede entender análogamente como el flujo de agua en una planta hidroeléctrica (ver figura 4.1); esto es, la cantidad de agua que fluye en condiciones normales depende de la carga de las turbinas, en este caso dentro de los límites razonables, no es de mayor importancia que el reservorio (capacidad de almacenamiento de agua) sea grande o pequeño. Este flujo de agua sería comparable al flujo de corriente eléctrica de carga en un sistema de distribución eléctrico, como por ejemplo el de una tienda de autoservicios. Entonces, si la presa se rompe la cantidad de agua que fluirá dependerá de la capacidad del reservorio, y tendrá muy poca relación con la carga de las turbinas. En este caso sí tiene mucha importancia que el reservorio sea grande o pequeño, ya que éste se asocia con la capacidad de potencia eléctrica que puede entregar la empresa que suministra energía al edificio en caso de un corto circuito.

Al igual que el flujo de agua en la planta hidroeléctrica, la corriente eléctrica de carga produce trabajo útil, mientras que la corriente de corto circuito produce efectos destructivos. La magnitud de la corriente que fluye a través de un corto circuito depende principalmente de dos factores:

- Las características y el número de fuentes que alimentan al corto circuito.
- La oposición o resistencia que presente el propio circuito de distribución.

En condiciones normales de operación, la carga consume una corriente proporcional al voltaje aplicado y a la impedancia de la propia carga. Si se presenta un corto circuito en las terminales de la carga, el voltaje queda aplicado únicamente a la baja impedancia de los conductores de alimentación y a la impedancia de la fuente hasta el punto de corto circuito, ya no oponiéndose la impedancia normal de la carga y generándose una corriente mucho mayor.

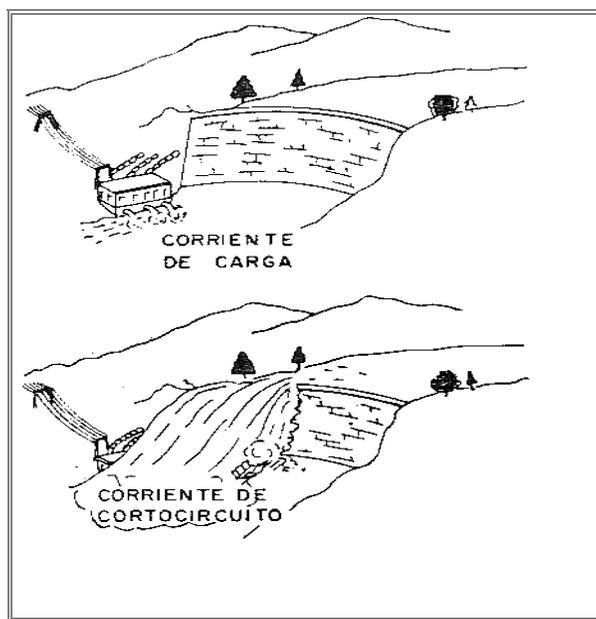


Figura 4.1 Analogía entre las corrientes de carga y corto circuito con el flujo de agua en una planta hidroeléctrica.

#### 4.1.2 Objetivo de un estudio de corto circuito.

El objetivo del estudio de corto circuito es calcular el valor máximo de la corriente y su comportamiento durante el tiempo que permanece el mismo. Esto permite determinar el valor de la corriente que debe interrumpirse y conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de la corriente.

#### 4.1.3 Importancia del estudio de corto circuito.

Un aspecto importante a considerar en la operación y planificación de los sistemas eléctricos es su comportamiento en condiciones normales, sin embargo también es relevante observarlo en el estado transitorio; es decir, ante una contingencia. Esta condición transitoria en las instalaciones se debe a distintas causas y una gran variedad de ellas está fuera del control humano.

Ante ello los equipos y/o sistemas pueden sufrir daños severos temporales o permanentes en condiciones de falla. Por lo tanto, es necesario definir equipos y esquemas de protección adecuados al momento de diseñar las instalaciones, de tal forma que se asegure el correcto desempeño de la red eléctrica, apoyada por los dispositivos de monitoreo, detección y señalización.

Debido a lo indicado, se hace indispensable realizar estudios de corto circuito para determinar los niveles de corriente ante fallas, las cuales permiten obtener información necesaria para seleccionar correctamente la capacidad de los equipos en función de los requerimientos mínimos que deben cumplir y así soportar los efectos de las contingencias. Sin embargo, la presencia de fallas es una situación indeseable en un sistema eléctrico, pero lamentablemente no se pueden prever pues se presentan eventualmente teniendo diversos orígenes, por lo que ante estas condiciones, se debe estar en posibilidad de conocer las magnitudes de las corrientes de corto circuito en todos los puntos de la red.

En general, se puede mencionar que un estudio de corto circuito sirve para:

- Determinar las capacidades interruptivas de los elementos de protección como son interruptores, fusibles, entre otros.

- Realizar la coordinación de los dispositivos de protección contra las corrientes de corto circuito.
- Permite realizar estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de corto circuito en algunos elementos de las instalaciones como son: sistemas de barras, tableros, cables, etc.
- Obtener los equivalentes de Thevenin y su utilización con otros estudios del sistema, como son los de estabilidad angular en los sistemas de potencia y ubicación de compensación reactiva en derivación, entre otros.
- Calcular las mallas de puesta a tierra, seleccionar conductores alimentadores.

Debemos entender que la duración del corto circuito es el tiempo en segundos o ciclos durante el cual, la corriente de falla se presenta en el sistema. El fuerte incremento de calor generado por tal magnitud de corriente, puede destruir o envejecer los aislantes del sistema eléctrico, por lo tanto, es de vital importancia reducir este tiempo al mínimo mediante el uso de las protecciones adecuadas.

Como se mencionó en el capítulo I, las contingencias originadas por un corto circuito son las más comunes en las instalaciones eléctricas de tiendas de autoservicios, por tal motivo la importancia de conocer sus características, como se origina, quien incrementa su valor, como estudiarlo, como protegerse ante esta situación, entre otras, es de gran relevancia en el sistema eléctrico. Si se protege adecuadamente ante adversidades provocadas o no por el ser humano, evitamos cualquier contingencia, como un incendio, una electrocución, fallas en los equipos, etc.

Está comprobado con el paso del tiempo que cuando enfrentas a un enemigo muy persuasivo, pero que sabes como atacarlo, la lucha es más fácil; por ejemplo cuando sucede una epidemia, si no se tiene información sobre la misma, el resultado se manifiesta en daños mortales a las personas, sin embargo cuando se estudia y se da la oportunidad de desarrollar vacunas, cuando el virus se presente, va a estar controlado, pero tal vez no eliminado. Lo mismo sucede con las contingencias eléctricas, en especial con el corto circuito, si conoces todo lo relacionado a él o gran parte, cuando se presente, estará controlado y eliminado en ese momento, pero mientras la cultura sobre las instalaciones eléctricas no cambie, el peligro siempre estará latente.

En la figura 4.3 se observa el incendio que consumió por completo una tienda de autoservicios conocida, ubicada en Quintana Roo el año pasado. “Este incendio se debe a un corto circuito ocurrido en el área de tableros eléctricos, el cual después se propagó hacia la bodega y finalmente en el piso de ventas, consumiendo por completo el establecimiento y algunos otros cercanos a él”, mencionó en su reportaje el periódico Noticaribe.

#### 4.1.4 Fuentes alimentadoras de corrientes de falla.

Las fuentes principales de corrientes de corto circuito son los generadores existentes en el sistema eléctrico y la generación remota de la compañía suministradora de energía eléctrica, los motores y condensadores sincrónicos, así como los motores de inducción, los cuales antes de que suceda la falla representan una carga para el sistema, pero en condiciones de corto circuito, se comportan como generadores durante un tiempo relativamente corto, ya que utilizan para su movimiento la energía almacenada en su masa (energía cinética) y en la de las máquinas acopladas a ellos. En la figura 4.2 se muestra el flujo de corriente de corto circuito de a cuerdo a la aportación de cada elemento mencionado anteriormente.

La corriente que cada una de estas máquinas rotatorias aporta a la falla está limitada por su impedancia y decrece exponencialmente con el tiempo a partir del valor que adquiere inmediatamente después de la falla. Entonces la impedancia que las máquinas rotatorias presentan al cortocircuito es variable. Otro de los factores que influyen sobre la magnitud de la corriente de corto circuito son el momento, tipo y ubicación de la falla.

Para que la compañía suministradora realice la distribución de energía de manera adecuada, necesita de una inmensa cantidad de elementos interconectados. En un sistema típico los generadores no se ven afectados por la aportación de corto circuito proveniente de una planta industrial, solo existe un incremento en su corriente de carga que tiende a permanecer constante.

Si no fuera por la existencia de líneas de transmisión y distribución, así como de transformadores que se ubican en medio del suministrador y el consumidor, la compañía suministradora estaría aportando corriente de falla de forma infinita. Para facilidad de los cálculos de corto circuito, la representación de la compañía suministradora es una impedancia equivalente referida al punto de acometida, además de proporcionar un valor de  $MVA_{cc}$ . Cuando ocurre un corto circuito en el circuito al cual está conectado el generador, éste continúa produciendo voltaje porque la excitación de campo se mantiene y el primomotor sigue moviéndolo a velocidad normal. El voltaje generado produce una corriente de corto circuito de gran magnitud la cual fluye del generador (o generadores) al punto de falla.

El motor síncrono actúa como generador y entrega corriente de corto circuito en el momento de una falla. Tan pronto como la falla se establece, el voltaje en el sistema se reduce a un valor muy bajo. Consecuentemente el motor deja de entregar energía a la carga mecánica y empieza a detenerse. Sin embargo, la inercia de la carga y el rotor impiden al motor que se detenga, en otras palabras, la energía rotatoria de la carga y el rotor mueven al motor síncrono como un primomotor mueve a un generador.

Los motores de inducción presentan el mismo efecto que un motor síncrono en el momento de una falla, la inercia de la carga y el rotor siguen moviendo al motor. Sin embargo, existe una diferencia, el motor de inducción presenta un flujo, el cual funciona similarmente como el flujo producido en el campo de corriente directa en el motor síncrono. Este flujo del rotor no decae instantáneamente y la inercia sigue moviendo al motor, esto origina una tensión en el devanado del estator causando una corriente de corto circuito que fluye hasta el punto de falla mientras el flujo del motor decae a cero.

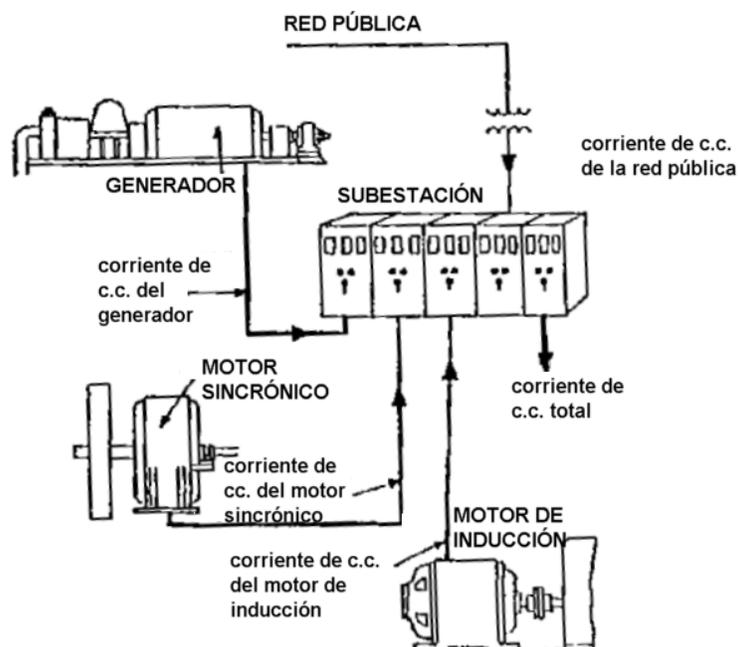


Figura 4.2 Contribuciones de distintas fuentes a la corriente de corto circuito.

## 4.2 Los tipos de fallas más recurrentes en la instalación eléctrica y los diferentes métodos de solución.

No hay duda que las fallas eléctricas por corto circuito y sobrecarga son las más comunes en las instalaciones de centros comerciales, sin embargo la que requiere mayor atención y estudio es la originada por corto circuito, debido a su naturaleza y las consecuencias que trae consigo. Entre las causas más frecuentes por corto circuito a nivel de instalaciones comerciales podemos mencionar las debidas a la ruptura o debilitamiento del aislamiento de conductores y/o equipos y los producidos por agentes ambientales, así como contacto accidental de conductores en líneas áreas por efecto del viento o por movimiento de los postes a causa de temblores o accidentes automovilísticos, o bien simplemente son errores de conexión.

En virtud de que el corto circuito trae consigo un incremento súbito del valor de la corriente, se produce también un incremento inmediato del campo magnético asociado a esa corriente, hay que recordar que el campo magnético es directamente proporcional a la corriente eléctrica.

Típicamente se producen “chispas” y fusión de los conductores en el lugar en que estos se unieron para provocar la falla por corto circuito. En otras palabras, el corto circuito sublima a los cables, es decir pasa de ser sólido a gas sin ser líquido, debido a una emisión descontrolada de electrones, los cuales tienden a salir y por lo tanto aparenta que explota o que saca esas “chispas”, o sea se presenta un arco eléctrico. También se puede desprender material de los conductores a causa de la corriente tan intensa. Estos elementos pueden causar a su vez que se produzca fuego en materiales consumibles o explosiones en atmósferas peligrosas. Además, los aislamientos de los conductores se calientan rápidamente y también pueden incendiarse.



Figura 4.3 Incendio provocado por un corto circuito.

### 4.2.1 Características del corto circuito: asimetría.

Una corriente en régimen normal es una onda senoidal a 60 [Hz] y de amplitud constante, pero cuando sucede un corto circuito, la onda de corriente sigue siendo senoidal con la misma frecuencia pero va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario, ya que el corto circuito es esencialmente de carácter transitorio. Lo anterior se observa en la figura 4.4 en la curva de la corriente total.

El período de ocurrencia de falla por corto circuito se divide en una serie sucesiva de intervalos “casi estacionarios”, los cuales son el período subtransitorio, transitorio y estacionario o permanente. Se tiene que tomar en cuenta el concepto de impedancia para determinar la

corriente correspondiente a cada uno de estos estados o intervalos. Esta impedancia es variable con el tiempo en las máquinas rotativas.

En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus arrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias asociadas a cada uno de los intervalos en los que se divide la falla:

- La reactancia subtransitoria  $X_d''$  que es la reactancia aparente del arrollado del estator en el instante del corto circuito y determina el flujo de corriente en los primeros 30 ciclos (hasta  $\frac{1}{2}$  segundo) aproximadamente.
- La reactancia transitoria  $X'$  que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre  $\frac{1}{2}$  y 2 segundos después de la ocurrencia del corto circuito.
- La reactancia sincrónica  $X_s$ , la cual determina el flujo de corriente cuando se establece el período estacionario.

Dependiendo de la magnitud y defasaje en el tiempo entre las ondas de tensión y de corriente de un sistema en el momento de corto circuito, la corriente de falla puede presentar características de asimetría con respecto al eje normal de la corriente; en general esto ocurre cuando la onda de tensión normal se encuentra en un valor distinto a su pico máximo en el momento de ocurrencia de la falla. Para producir la máxima asimetría el corto circuito siempre debe ocurrir cuando la onda de tensión se encuentre pasando por cero. En un sistema trifásico balanceado, la máxima corriente asimétrica ocurre solamente en una de las fases del sistema (cualquiera de las tres).

La asimetría de la corriente de corto circuito surge debido a que la corriente que fluye tiene dos componentes: el componente de corriente alterna y un componente de corriente directa, tal como ocurre en los circuitos RL de corriente alterna. Esta componente d.c. decrece a medida que pasa el tiempo ya que su energía se disipa en forma de calor por la resistencia del circuito (efecto Joule). Debido a esto, la relación de decrecimiento es inversamente proporcional a la relación entre la resistencia y reactancia del circuito ( $X/R$ ), es decir entre más baja es la relación  $X/R$ , más rápido es el decrecimiento. Por ejemplo, en sistemas de baja tensión, la relación  $X/R$  generalmente es baja, aproximadamente menor a 15, por lo que la componente d.c. decae a cero en un rango entre 1 y 6 ciclos dependiendo del caso. Como se observa en la figura 4.4, el valor máximo de la corriente asimétrica ocurre cerca del medio ciclo a partir del instante del corto circuito.

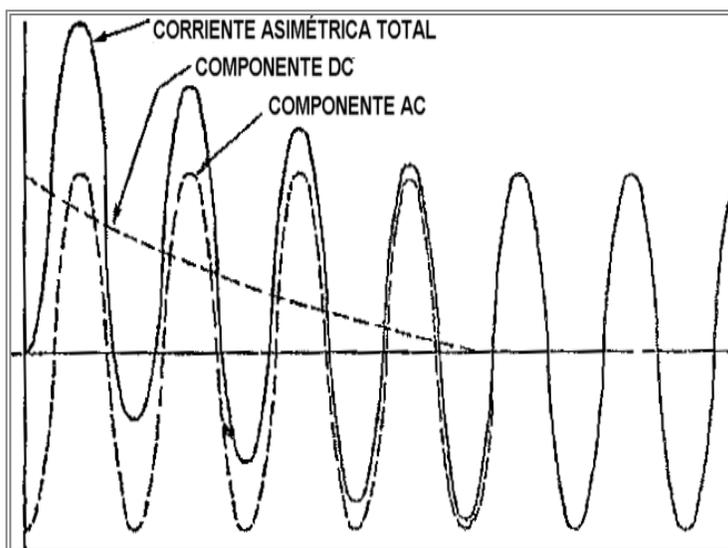


Figura 4.4 Asimetría de la corriente de corto circuito.

Como se dijo anteriormente, las corrientes de corto circuito tienen varias fuentes, las cuales contribuyen en forma diferente dependiendo de su naturaleza (ver figura 4.5). A causa de que las corrientes de las máquinas rotativas decrecen a medida que se reduce el flujo después del corto circuito, la corriente de falla total decae con el tiempo. Considerando solamente la parte simétrica de la corriente, la magnitud es máxima en el primer medio ciclo luego del corto circuito y de un valor más bajo unos pocos ciclos después. Nótese que la componente del motor de inducción desaparecerá completamente luego de uno o dos ciclos, exceptuando los motores más grandes en la cual se puede presentar por más de cuatro ciclos.

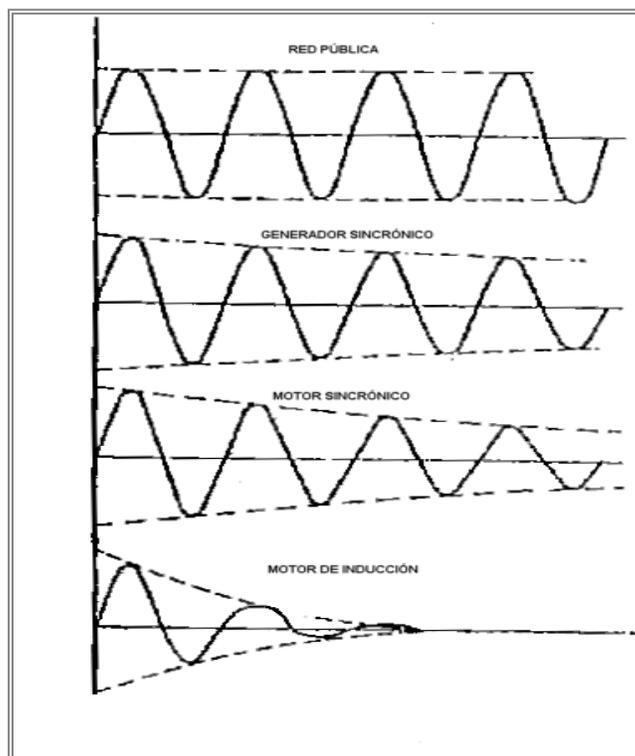


Figura 4.5 Aportación de corriente de falla de diversas fuentes.

Cuando la corriente nominal o capacidad del equipo es expresada como una corriente rms total de primer ciclo (asimétrica) o corriente de cresta de primer ciclo, la actividad de la corriente de corto circuito simétrica calculada es multiplicada por un factor de multiplicación correspondiente encontrado en el estándar aplicable para obtener la actividad de corriente rms total (asimétrica) de primer ciclo adecuada o la actividad de corriente de cresta del primer ciclo, para comparación.

En los sistemas de baja tensión que se tienen longitudes de conductor considerables, la relación X/R puede ser tan reducida que el uso de un factor de multiplicación de 1.25 origine un error importante, motivo por el cual se utiliza este factor. Aunque en consecuencia, es estos sistemas en que se considera la reactancia, conviene determinar la relación X/R que resulta y luego hallar el factor de multiplicación mínimo.

#### 4.2.2 Fallas más comunes en el sistema.

Se sabe que normalmente las corrientes de corto circuito son muy elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla. Las fallas por corto circuito se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Simétricas (balanceadas). En las fallas simétricas la corriente de las tres fases del sistema son iguales en el instante del corto circuito, por ejemplo:

- ❖ Corto circuito trifásico: Sucede cuando se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el corto circuito más severo en la mayoría de los casos.
- ❖ Corto circuito trifásico a tierra: Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema (muy raro).
- Asimétricas (desbalanceadas). Aquí la corriente en las tres fases del sistema no son iguales en el instante de falla. Entre éstas fallas tenemos:
  - ❖ Corto circuito bifásico (fase a fase): Esta falla aparece cuando se ponen en contacto dos fases cualesquiera del sistema.
  - ❖ Corto circuito bifásico a tierra (dos fases a tierra): En ésta sucede lo mismo que en la anterior con la salvedad que también entra en contacto la tierra.
  - ❖ Corto circuito monofásico (fase a tierra): Ocurre al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema. Esta falla es la más frecuente en las instalaciones eléctricas de tiendas de autoservicio.

Para poder entender como se originan estas fallas más a fondo, es necesario echar mano de varias herramientas matemáticas, tales como diagramas unifilares, sistemas en por unidad, las componentes simétricas, diagramas de secuencia, entre otros. Cada herramienta tiene una influencia importante en el estudio de cada falla, así como en los métodos de solución.

#### 4.2.3 Métodos de solución.

Existen diferentes tipos de solución para el análisis de fallas (estudio de corto circuito), entre los cuales se destacan el método de las componentes simétricas que es un método exacto, pero que comúnmente se confunde con el método denominado por unidad. A continuación se describe una lista de los métodos más conocidos.

- Método de las componentes simétricas (método exacto).
- Método porcentual (método por unidad).
- Método de MVA's (método de las potencias).
- Método de la matriz  $Z_{bus}$  (método exacto).
- Método por software.

##### i. Método de las componentes simétricas.

Este método se basa principalmente en el desarrollo de las componentes simétricas y su relación con las redes de secuencia. Se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dibujar un diagrama correspondiente al punto de falla en donde se muestre todas las conexiones de las fases en dicho punto, se indicarán corrientes, voltajes, impedancias considerando su polaridad y direcciones.
- Escribir las ecuaciones que relaciona los voltajes y corrientes conocidas para el tipo de falla en estudio.
- Transformar corrientes y voltajes del punto anterior de fases abc a secuencias 012.
- Examinar corrientes de secuencia para determinar la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia para satisfacer las condiciones del punto 3.
- Examinar los voltajes de secuencia para obtener la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia para satisfacer los puntos 3 y 4.

Después de realizar los puntos anteriores, se obtienen diferentes ecuaciones de cálculo de la corriente de falla en análisis, entonces:

➤ Falla monofásica:

$$I_{a_0} = \frac{E_{a_1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}; \dots\dots\dots (4.1)$$

$$I_a = 3I_{a_0}$$

➤ Falla bifásica:

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1}}{Z_1 + Z_2}; \dots\dots\dots (4.2)$$

$$I_b = -I_c = -j\sqrt{3} I_{a_1}$$

➤ Falla bifásica a tierra:

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}; \dots\dots\dots (4.3)$$

$$I_b + I_c = 3I_{a_0}$$

➤ Falla trifásica:

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1}}{Z_1}; \dots\dots\dots (4.4)$$

$$I_a = I_{a_1}$$

Además de las consideraciones anteriores y de las ecuaciones mencionadas, este método debe en primera instancia definir una potencia base en MVA o kVA y un voltaje base en kV y posteriormente convertir todas las impedancias del sistema a valores en por unidad en dichas bases. Inmediatamente después se debe realizar una reducción de todas las impedancias a una sola en el punto de falla, es decir aplicar el teorema de Thevenin al sistema.

ii. Método por unidad.

Este método como ya se mencionó en ocasiones se confunde con el anterior, debido a que su procedimiento es muy parecido. Se basa principalmente en encontrar valores en por unidad de todos los equipos que se encuentren en el sistema, por lo que el procedimiento se reduce en encontrar la reactancia equivalente del sistema según las leyes de los circuitos eléctricos, las resistencias particulares de cada elemento significativo del sistema.

Para cada punto de falla previsto deberá resolverse la red resultante, no olvidando considerar las reactancias de máquinas rotatorias que sea necesario incluir en la red, dependiendo del número de ciclos en que se desee calcular la corriente de corto circuito. En circuitos de alta y media tensión, es de interés conocer la corriente momentánea (1/2 a 1 ciclo) y la corriente para interrupción (8 ciclos), en tanto que en baja tensión solo la corriente momentánea es de interés.

El método basa sus cálculos en la ecuación general para sistemas en por unidad y es:

$$\text{Valor en por unidad} = \frac{\text{un número}}{\text{número base}} \dots\dots\dots (4.5)$$

Este método es generalmente el más apropiado cuando en el circuito existen diversos niveles de voltaje.

El número base es también llamado valor unidad ya que en el sistema de "por unidad" tiene un valor unitario. Así, una tensión base es también llamado tensión en unidad. El símbolo que se usa para expresar valores en "por unidad" es  $\bar{X}$ , usando también la abreviatura "pu" como subíndice de la magnitud en cuestión  $X_{pu}$ .

iii. Método por MVA's.

Este método es usado en donde se requiera no ser considerada la resistencia de los elementos que integran el sistema, ya que resulta ser un método aproximado. El desarrollo de este método se basa en los siguientes pasos:

- La impedancia del equipo deberá convertirse directamente a MVA de corto circuito por la ecuación 4.6, si la reactancia del equipo está en % o por la ecuación 4.7, si la reactancia está en por unidad.

$$MVA_{cc} = \frac{(MVA_{equipo}) \times 100}{\%X \text{ del equipo}} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$MVA_{cc} = \frac{MVA_{equipo}}{X_{pu} \text{ del equipo}} \dots\dots\dots (4.7)$$

- La impedancia de líneas y alimentadores (cables) deberá convertirse directamente a MVA de corto circuito por medio de la ecuación 4.8, si la reactancia de la línea está en Ohms.

$$MVA_{cc} = \frac{kV^2}{X_{Ohms}} \dots\dots\dots (4.8)$$

Donde se observa que los kV son los correspondientes a los de línea-línea del cable.

- Dibujar dentro de rectángulos o círculos todos los MVA de corto circuito de equipos y alimentadores siguiendo el mismo arreglo que éstos tienen en el diagrama unifilar.
- Cambiar los valores de  $MVA_{cc}$  del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla, considerando que los valores en serie se combinan como si fueran resistencias en paralelo y los valores que estén en paralelo se suman directamente.
- Reducir el diagrama unifilar (ya con los cambios del punto anterior) como si fuera una red de secuencias del método de componentes simétricas.
- Con el valor encontrado en el paso anterior, se calcula la corriente de corto circuito trifásico de la siguiente manera:

$$I_{cc} = \frac{(MVA_{cc}) \times 1000}{\sqrt{3} \times (kV)} \dots\dots\dots (4.9)$$

Donde se observa que los kV son los correspondientes a los de línea-línea en el punto de falla.

Cabe mencionar que, este método solo se aplica a una falla trifásica, ya que para una monofásica el procedimiento se complica demasiado.

iv. Método de la matriz  $Z_{bus}$ .

Este método al igual que el de las componentes simétricas se considera un método exacto. El desarrollo de este método solo se ha aplicado a falla trifásica, pero se puede aplicar a cualquier falla. Se trata de encontrar la matriz de impedancias  $Z_{bus}$  y esto se logra obteniendo la matriz de admitancias  $Y_{bus}$ , entonces el procedimiento es el siguiente:

- Calcular las admitancias de secuencia positiva de las ramas del circuito de impedancias, en por unidad, por la medio de la ecuación:

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \dots\dots\dots (4.10)$$

Donde:  $Z_{ij}$  = Impedancia entre los nodos  $i$  y  $j$ .

- Se forma la matriz de admitancias  $Y_{bus}$ , de secuencia positiva por inspección de la red.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.11)$$

Donde:  $n$  es el número de buses.

Los elementos de la diagonal principal:  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$ ,  $Y_{nn}$ , etc. Se obtienen sumando todas las admitancias que estén conectadas al bus correspondiente. Mientras los elementos fuera de la diagonal principal se obtienen o son todas las admitancias que unen a dos buses pero con signo combinado.

- Se calcula la matriz de impedancias de secuencia positiva  $Z_{bus}$  por medio de la ecuación:

$$Z_{bus} = [Y_{bus}]^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.12)$$

- Se calculan las corrientes de corto circuito en cada bus:

Para el bus  $k$ :

$$I_k = \frac{V_k}{Z_{kk}} ; k = 1, 2, 3, \dots n \dots\dots\dots (4.13)$$

$V_k$  = Voltaje de prefalla ( $E_{a1}$ ) en el bus  $k$ .

- Se calculan los voltajes nodales en todos los buses del sistema cuando ocurre la falla en el bus  $k$ , es decir, para el bus " $n$ " cuando ocurre la falla en el bus " $k$ ":

$$V_n = V_{pn} - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} I_k = V_{pn} - Z_{nk} I_k \dots\dots\dots (4.14)$$

Donde:

$V_{pn}$  = Voltaje de prefalla en el bus " $n$ ".

- Se calculan las corrientes en las ramas al ocurrir la falla (cálculo de corrientes de contribución a la falla):

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{\gamma_{ij}} = Y_{ij}(V_i - V_j) \dots\dots\dots (4.15)$$

Donde:

- $V_i$  = Voltaje en el bus " $i$ " cuando ocurre la falla en el bus " $k$ "
- $V_j$  = Voltaje en el bus " $j$ " cuando ocurre la falla en el bus " $k$ "
- $\gamma_{ij}$  = Impedancia primitiva de la línea entre los buses " $i$ " y " $j$ "
- $Y_{ij}$  = Admitancia de la línea entre los buses " $i$ " y " $j$ "

Si se calculan las corrientes sólo en función de las impedancias:

$$I_{ij} = \frac{(Z_{ik} - Z_{jk}) \times V_k}{(\gamma_{ij})(Z_{kk})} \dots\dots\dots (4.16)$$

Donde:

$Z_{ik}$  se obtiene de la matriz  $Z_{bus}$ .

$Z_k$  se obtiene de la matriz  $Z_{bus}$ .

$Z_{kk}$  se obtiene de la matriz  $Z_{bus}$ .

Como se logra observar, este método es más complicado que los anteriores, de aquí su poca aplicación en los sistemas de baja tensión.

#### v. Método por software.

Este método está restringido al software que se maneje, ya que cada fabricante ocupa distintos parámetros de diseño y configuraciones de su sistema.

Cabe señalar que aún cuando se diseñe muy cuidadosamente un sistema eléctrico, este estará siempre expuesto al daño que puedan causar flujos de corriente en condiciones de cortocircuito tales como sobrecalentamientos y arcos eléctricos destructivos. Para asegurar que los equipos de protección puedan aislar fallas rápidamente y minimizar el daño de cada uno de los componentes del sistema de potencia y el riesgo del personal, el estudio de corrientes de corto circuito debe ser incluido en el diseño de los sistemas eléctricos de baja tensión y también cuando se hagan modificaciones a los sistemas existentes.

### 4.3 Cálculo de la corriente de corto circuito trifásica en el sistema eléctrico.

#### 4.3.1 Justificación.

En una instalación eléctrica de tiendas de autoservicio, es muy común encontrarse con una gama variada de interruptores, algunos de diferente marca que otros, de diferente capacidad nominal y diferente capacidad interruptiva, etc. Por tal motivo, es muy común también encontrarse con errores de selección; pero ¿qué tanto puede afectar una selección inadecuada? La respuesta es similar ya que se pone en peligro a las personas, entonces a continuación, se muestra un pequeño desarrollo de un cálculo de corto circuito trifásico típico.

Se realiza un análisis de la falla trifásica, porque además de estar indicada en el PEC-2005 en su artículo 6.2 inciso VI, los interruptores trifásicos soportan mejor una falla monofásica o bifásica, debido a que los esfuerzos mecánicos y la ionización son menores cuando ocurre en una o dos fases; la falla trifásica por ser franca o equilibrada es mucho mayor que alguna otra.

Para el cálculo de la corriente de corto circuito se utilizan las expresiones producto del análisis de circuitos eléctricos, que son las mismas para los diferentes diagramas de impedancias y que corresponden a los diferentes instantes de análisis: en el primer ciclo (subtransitorio), en el instante en el que se lleva a cabo la interrupción (transitorio), o en cualquier otro momento en el cual actúen los relevadores de protección con retardo.

El método de solución que se maneja es el de componentes simétricas, considerando la aportación de corto circuito por parte de la compañía suministradora. Como en el caso de un corto circuito trifásico simétrico, el sistema eléctrico queda balanceado, es posible trabajar utilizando el circuito equivalente por fase, con las aproximaciones usuales, aplicando Thevenin en el punto de falla (componentes simétricas). El método es cómodo para resolver problemas con pocos nodos; sin embargo, cuando se trata de sistemas de mayor tamaño, resulta poco práctico. Por otra parte, para calcular un corto circuito en otra barra es necesario hacer de nuevo todas las reducciones. Cuando se trata de sistemas de gran magnitud, los cálculos manuales resultan demasiado engorrosos y se debe recurrir al uso de los computadores digitales.

El procedimiento de cálculo cumple con las normas:

- NOM-001-SEDE-2005. Instalaciones Eléctricas (Utilización).
- STD\_141\_1993\_Red\_Book\_IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- National Electrical Code 2008.

El método de las componentes simétricas basa su procedimiento en encontrar valores en por unidad (PU) de las Impedancias de los elementos que conforman y que tiene aportación de corrientes de corto circuito al sistema, para finalmente obtener la impedancia equivalente de Thevenin y posteriormente evaluar con la ecuación correspondiente a la corriente de secuencia positiva, que en realidad es la corriente de falla. Una vez encontrada, se realiza el producto de la corriente base con la corriente de secuencia, para así obtener la corriente trifásica en el punto de análisis.

#### 4.3.2 Desarrollo.

##### i. Datos conocidos:

- Contribución de CFE:

$P_{CC_{3\phi}}$  [MVA] Simétricos.

- Diagrama Unifilar.

##### ii. Cálculos:

Del diagrama unifilar regularmente se pueden obtener los valores del porcentaje de impedancia (%Z) de los transformadores. Sin embargo comúnmente hacen falta los datos de impedancia o reactancia de la mayoría de equipos, los cuales hay que obtener.

Para esto, echamos mano del Std.141-1993. Red Book del IEEE “Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, el cual indica que para motores menores a 50 HP hasta 200 HP con voltajes de operación menores a 600 V, se puede estimar un valor de reactancia (un poco sobrado) de 25 %. Ver tablas 4.1 y 4.2.

Por otra parte encontramos que existen cargas que contribuyen con corriente de corto circuito al sistema, pero que no están expresadas como motores o generadores, sino como tableros, por lo que tomaremos la impedancia de los alimentadores para poder obtener dicha contribución. En la tabla 4.3 se observan valores típicos (NEC 2008, específicamente en el capítulo 9, Tabla 9). Además para fines prácticos se considera que un 1HP = 1kVA (factor de potencia unitario).

| Tipo de máquina giratoria        | Red de primer ciclo | Red de interrupción |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Motores de inducción             |                     |                     |
| Todos los otros, 50 hp y mayores | $1.2 X_d''^*$       | $3.0 X_d''^*$       |
| Todos los menores a 50 hp        | $1.67 X_d''^{**}$   | omitido             |

Tabla 4.1 (4-2 del capítulo 4.5.4.1) Red combinada de multiplicadores de reactancia (o impedancia) de máquina giratoria.

| Tipo de máquina giratoria                                                                                               | Red de primer ciclo | Red de interrupción |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Todos los generadores de turbina; todos los hidrogeneradores con arrollamientos amortiguadores; todos los condensadores | $1.0 X_d''$         | $1.0 X_d''$         |
| Hidrogeneradores sin arrollamientos amortiguadores                                                                      | $0.75 X_d'$         | $0.75 X_d'$         |
| Todos los motores síncronos                                                                                             | $1.0 X_d''$         | $1.5 X_d''$         |
| Motores de inducción                                                                                                    |                     |                     |
| Mayores a 1000 hp a 1800 r/min o menos                                                                                  | $1.0 X_d''$         | $1.5 X_d''$         |
| Mayores a 250 hp a 3600 r/min                                                                                           | $1.0 X_d''$         | $1.5 X_d''$         |
| Todos los otros, 50 hp y mayores                                                                                        | $1.2 X_d''$         | $3.0 X_d''$         |
| Todos los menores a 50 hp                                                                                               | No usada            | No usada            |

Tabla 4.2 (4-1 del capítulo 4.5.4.1) Multiplicadores de reactancia (o impedancia) de máquina giratoria.

| Size (AWG or kcmil) | Ohms to Neutral per Kilometer<br>Ohms to Neutral per 1000 Feet |                |                                                          |                  |                |                                                   |                  |                |                                                  |                  |                |                                           |                  |                |     | Size (AWG or kcmil) |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|------------------|----------------|---------------------------------------------------|------------------|----------------|--------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------------------|------------------|----------------|-----|---------------------|
|                     | $X_L$ (Reactance) for All Wires                                |                | Alternating-Current Resistance for Uncoated Copper Wires |                  |                | Alternating-Current Resistance for Aluminum Wires |                  |                | Effective Z at 0.85 PF for Uncoated Copper Wires |                  |                | Effective Z at 0.85 PF for Aluminum Wires |                  |                |     |                     |
|                     | PVC, Aluminum Conduit                                          | Steel Conduit  | PVC Conduit                                              | Aluminum Conduit | Steel Conduit  | PVC Conduit                                       | Aluminum Conduit | Steel Conduit  | PVC Conduit                                      | Aluminum Conduit | Steel Conduit  | PVC Conduit                               | Aluminum Conduit | Steel Conduit  |     |                     |
| 14                  | 0.190<br>0.058                                                 | 0.240<br>0.073 | 10.2<br>3.1                                              | 10.2<br>3.1      | 10.2<br>3.1    | —                                                 | —                | —              | 8.9<br>2.7                                       | 8.9<br>2.7       | 8.9<br>2.7     | —                                         | —                | —              | 14  |                     |
| 12                  | 0.177<br>0.054                                                 | 0.223<br>0.068 | 6.6<br>2.0                                               | 6.6<br>2.0       | 6.6<br>2.0     | 10.5<br>3.2                                       | 10.5<br>3.2      | 10.5<br>3.2    | 5.6<br>1.7                                       | 5.6<br>1.7       | 5.6<br>1.7     | 9.2<br>2.8                                | 9.2<br>2.8       | 9.2<br>2.8     | 12  |                     |
| 10                  | 0.164<br>0.050                                                 | 0.207<br>0.063 | 3.9<br>1.2                                               | 3.9<br>1.2       | 3.9<br>1.2     | 6.6<br>2.0                                        | 6.6<br>2.0       | 6.6<br>2.0     | 3.6<br>1.1                                       | 3.6<br>1.1       | 3.6<br>1.1     | 5.9<br>1.8                                | 5.9<br>1.8       | 5.9<br>1.8     | 10  |                     |
| 8                   | 0.171<br>0.052                                                 | 0.213<br>0.065 | 2.56<br>0.78                                             | 2.56<br>0.78     | 2.56<br>0.78   | 4.3<br>1.3                                        | 4.3<br>1.3       | 4.3<br>1.3     | 2.26<br>0.69                                     | 2.26<br>0.69     | 2.30<br>0.70   | 3.6<br>1.1                                | 3.6<br>1.1       | 3.6<br>1.1     | 8   |                     |
| 6                   | 0.167<br>0.051                                                 | 0.210<br>0.064 | 1.61<br>0.49                                             | 1.61<br>0.49     | 1.61<br>0.49   | 2.66<br>0.81                                      | 2.66<br>0.81     | 2.66<br>0.81   | 1.44<br>0.44                                     | 1.48<br>0.45     | 1.48<br>0.45   | 2.33<br>0.71                              | 2.36<br>0.72     | 2.36<br>0.72   | 6   |                     |
| 4                   | 0.157<br>0.048                                                 | 0.197<br>0.060 | 1.02<br>0.31                                             | 1.02<br>0.31     | 1.02<br>0.31   | 1.67<br>0.51                                      | 1.67<br>0.51     | 1.67<br>0.51   | 0.95<br>0.29                                     | 0.95<br>0.29     | 0.98<br>0.30   | 1.51<br>0.46                              | 1.51<br>0.46     | 1.51<br>0.46   | 4   |                     |
| 3                   | 0.154<br>0.047                                                 | 0.194<br>0.059 | 0.82<br>0.25                                             | 0.82<br>0.25     | 0.82<br>0.25   | 1.31<br>0.40                                      | 1.35<br>0.41     | 1.31<br>0.40   | 0.75<br>0.23                                     | 0.79<br>0.24     | 0.79<br>0.24   | 1.21<br>0.37                              | 1.21<br>0.37     | 1.21<br>0.37   | 3   |                     |
| 2                   | 0.148<br>0.045                                                 | 0.187<br>0.057 | 0.62<br>0.19                                             | 0.66<br>0.20     | 0.66<br>0.20   | 1.05<br>0.32                                      | 1.05<br>0.32     | 1.05<br>0.32   | 0.62<br>0.19                                     | 0.62<br>0.19     | 0.66<br>0.20   | 0.98<br>0.30                              | 0.98<br>0.30     | 0.98<br>0.30   | 2   |                     |
| 1                   | 0.151<br>0.046                                                 | 0.187<br>0.057 | 0.49<br>0.15                                             | 0.52<br>0.16     | 0.52<br>0.16   | 0.82<br>0.25                                      | 0.85<br>0.26     | 0.82<br>0.25   | 0.52<br>0.16                                     | 0.52<br>0.16     | 0.52<br>0.16   | 0.79<br>0.24                              | 0.79<br>0.24     | 0.82<br>0.25   | 1   |                     |
| 1/0                 | 0.144<br>0.044                                                 | 0.180<br>0.055 | 0.39<br>0.12                                             | 0.43<br>0.13     | 0.39<br>0.12   | 0.66<br>0.20                                      | 0.69<br>0.21     | 0.66<br>0.20   | 0.43<br>0.13                                     | 0.43<br>0.13     | 0.43<br>0.13   | 0.62<br>0.19                              | 0.66<br>0.20     | 0.66<br>0.20   | 1/0 |                     |
| 2/0                 | 0.141<br>0.043                                                 | 0.177<br>0.054 | 0.33<br>0.10                                             | 0.33<br>0.10     | 0.33<br>0.10   | 0.52<br>0.16                                      | 0.52<br>0.16     | 0.52<br>0.16   | 0.36<br>0.11                                     | 0.36<br>0.11     | 0.36<br>0.11   | 0.52<br>0.16                              | 0.52<br>0.16     | 0.52<br>0.16   | 2/0 |                     |
| 3/0                 | 0.138<br>0.042                                                 | 0.171<br>0.052 | 0.253<br>0.077                                           | 0.269<br>0.082   | 0.259<br>0.079 | 0.43<br>0.13                                      | 0.43<br>0.13     | 0.43<br>0.13   | 0.289<br>0.088                                   | 0.302<br>0.092   | 0.308<br>0.094 | 0.43<br>0.13                              | 0.43<br>0.13     | 0.46<br>0.14   | 3/0 |                     |
| 4/0                 | 0.135<br>0.041                                                 | 0.167<br>0.051 | 0.203<br>0.062                                           | 0.220<br>0.067   | 0.207<br>0.063 | 0.33<br>0.10                                      | 0.36<br>0.11     | 0.33<br>0.10   | 0.243<br>0.074                                   | 0.256<br>0.078   | 0.262<br>0.080 | 0.36<br>0.11                              | 0.36<br>0.11     | 0.36<br>0.11   | 4/0 |                     |
| 250                 | 0.135<br>0.041                                                 | 0.171<br>0.052 | 0.171<br>0.052                                           | 0.187<br>0.057   | 0.177<br>0.054 | 0.279<br>0.085                                    | 0.295<br>0.090   | 0.282<br>0.086 | 0.217<br>0.066                                   | 0.230<br>0.070   | 0.240<br>0.073 | 0.308<br>0.094                            | 0.322<br>0.103   | 0.33<br>0.10   | 250 |                     |
| 300                 | 0.135<br>0.041                                                 | 0.167<br>0.051 | 0.144<br>0.044                                           | 0.161<br>0.049   | 0.148<br>0.045 | 0.233<br>0.071                                    | 0.249<br>0.076   | 0.236<br>0.072 | 0.194<br>0.059                                   | 0.207<br>0.063   | 0.213<br>0.065 | 0.269<br>0.082                            | 0.282<br>0.086   | 0.289<br>0.088 | 300 |                     |
| 350                 | 0.131<br>0.040                                                 | 0.164<br>0.050 | 0.125<br>0.038                                           | 0.141<br>0.043   | 0.128<br>0.039 | 0.200<br>0.061                                    | 0.217<br>0.066   | 0.207<br>0.063 | 0.174<br>0.053                                   | 0.190<br>0.058   | 0.197<br>0.060 | 0.240<br>0.073                            | 0.253<br>0.077   | 0.262<br>0.080 | 350 |                     |

Tabla 4.3 (Tabla No. 9 NEC-2008) Resistencia y reactancia en a.c. para 600 V, tres cables monopolares, 60 Hz, en un conduit.

➤ Bases del Sistema:

Para obtener los valores base (la potencia, los kV base) del sistema, se sugiere que sean aquéllos que se relacionen con la mayoría de los demás niveles de voltaje y potencias del sistema.

Para obtener las impedancias base, se consideran varias secciones del diagrama unifilar (ver figura 4.6) y después se hace una relación, como la indicada en la tabla 4.3.

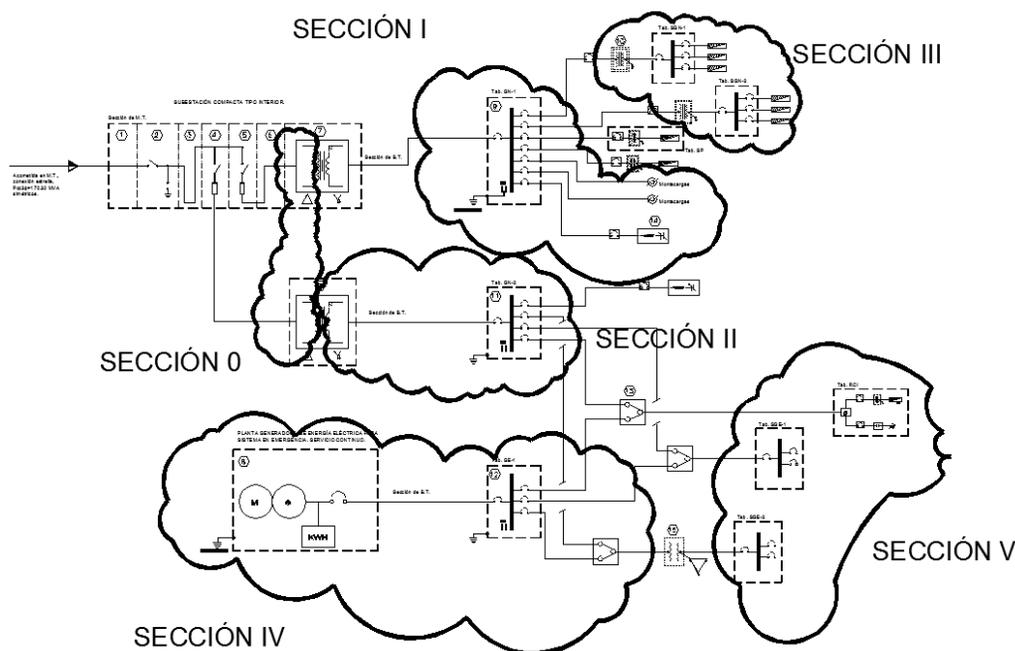


Figura 4.6 Diagrama unifilar en secciones.

| Sección | 0         | I      | II     | III    | IV     | V      | Unidades |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| $S_B$   | 0.750     | 0.750  | 0.750  | 0.750  | 0.750  | 0.750  | MVA      |
| $V_B$   | 13.2      | 0.480  | 0.480  | 0.220  | 0.480  | 0.220  | kV       |
| $Z_B$   | 2.323.200 | 0.3072 | 0.3072 | 0.0645 | 0.3072 | 0.0645 | $\Omega$ |

Tabla 4.3 Potencias, voltajes e impedancias bases del sistema.

Aquí para obtener las impedancias y algunos voltajes que no estén en la misma base o similar (debido a las relaciones del transformador) se utilizan las ecuaciones 4.17 y 4.18.

$$Z_{B_{sección\ X}} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (4.17)$$

$$V_{sección\ X} = V_B \left( \frac{V_{sec\ trafo}}{V_{prim\ trafo}} \right) \dots\dots\dots (4.18)$$

➤ Cálculo de las reactancias en pu:

❖ Acometida:

$$\bar{X} = \frac{MVA_B}{MVA_{CC3\phi}} \dots\dots\dots (4.19)$$

Se recomienda que los cálculos se dejen expresados con cuatro decimales con el fin de exactitud en los cálculos.

❖ Transformadores:

$$\bar{Z} = \frac{\%Z}{100} [\text{pu}] \dots\dots\dots (4.20)$$

En ocasiones sucede que los transformadores se encuentran en un bus que está a la misma base del sistema (por la relación de transformador), pero no a la misma potencia base del sistema, por lo que se realiza un cambio de base como:

$$\bar{X}_{\text{nueva}} = \bar{X}_{\text{ante}} \left( \frac{V_{\text{B ante}}}{V_{\text{B nueva}}} \right)^2 \left( \frac{S_{\text{B nueva}}}{S_{\text{B ante}}} \right) \dots\dots\dots (4.20')$$

❖ Tableros:

En este cálculo se debe tomar en cuenta el número de conductores por fase, el calibre del conductor y la longitud, esto es:

$$Z = \left( \frac{Z_{\text{cond}}}{\text{No. cables} \times \text{fase}} \right) \times \text{longitud} [\Omega] \dots\dots\dots (4.21)$$

$$\bar{Z} = \frac{Z[\Omega]}{Z_B[\Omega]} [\text{pu}] \dots\dots\dots (4.22)$$

❖ Motores:

Para este caso, se toma en cuenta lo anteriormente dicho sobre las reactancias de los motores que no se proporcionaron en el diagrama unifilar, entonces de acuerdo a las tablas 4.1 y 4.2, la reactancia de los motores no indicados será como a continuación (tomando en cuenta las bases del sistema y verificar que no exista cambio de base):

$$\bar{X}_{\text{no indicadas}} = 0.25 [\text{pu}] \dots\dots\dots (4.23)$$

Cuando existan motores mayores a 200 HP (por obviedad las tablas antes mencionadas ya no aplican), para obtener la impedancia (o reactancia) del equipo, se realiza con la siguiente ecuación, según los estándares C37-010-1979, C37.5-1979 y C37-13-1990 del IEEE.

$$\bar{X} = \left( \frac{\text{kV}}{\text{kV}_B} \right) \times \bar{I} \dots\dots\dots (4.24)$$

En donde la  $\bar{I}$  es la corriente de corto circuito del equipo expresada en por unidad, ésta última se obtiene de la siguiente manera:

$$\bar{I} = \frac{I_{\text{aport}}}{I_B} \dots\dots\dots (4.25)$$

Entonces:

Se recomienda que la corriente de aportación de corto circuito del equipo sea 4 veces el valor de la corriente nominal, esto es:

$$I_{\text{aport}} = 4 \times I_n \dots\dots\dots (4.26)$$



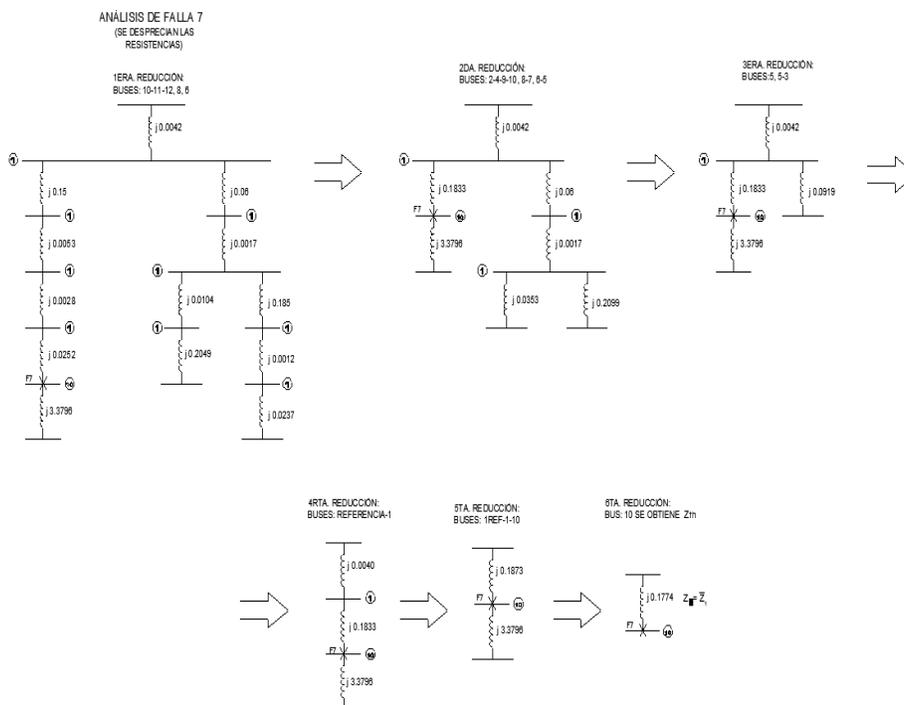


Figura 4.8 Reducción y obtención de la impedancia equivalente de Thevenin.

iii. Conclusiones:

Toda vez obtenidos los valores de corto circuito en los puntos de análisis, se procede a determinar la capacidad interruptiva de los dispositivos de protección para cada elemento en análisis, indicando si se trata de capacidad interruptiva normal, media o alta, dependiendo del marco de cada interruptor y de las diferentes marcas existentes en el mercado, así como para indicar la capacidad interruptiva de las barras de los tableros. Finalmente, con estos valores obtenidos se realizará la coordinación de protecciones correspondiente para el sistema eléctrico del proyecto.

**4.4 Selección de fusibles e interruptores.**

Cualquier instalación eléctrica debe de estar protegida contra los cortos circuitos y esto, salvo excepción, en cada punto que se presenta una discontinuidad eléctrica, lo que corresponde casi siempre con un cambio de sección de los conductores. La intensidad de la corriente de corto circuito debe calcularse para cada uno de los diversos niveles de la instalación con el fin de poder determinar las características de los componentes que deberán soportar o cortar la corriente de defecto.

4.4.1 Selección de interruptores.

Como se mencionó arriba, teniendo la capacidad de corto circuito, es necesario obtener una protección adecuada a éste para poder interrumpir la falla y evitar riesgos mayores. El elemento más usado en las instalaciones de tiendas de autoservicio es el interruptor termomagnético, que por su diversidad y características (vistas en el capítulo I) resulta ser la mejor opción.

Existen dos formas para interrumpir el flujo de la corriente: reduciendo a cero el potencial que lo genera y separando físicamente el conductor del flujo de corriente. Esta última, es la más usada para lograr dicha interrupción. Los primeros interruptores consistían en un juego de barras conductoras sumergidas en mercurio, posteriormente, se diseñó el interruptor con cuchillas, que aún es usado en algunas aplicaciones de baja tensión. En los interruptores

modernos la interrupción es un proceso que inicia en el instante de separación de sus contactos. Éste continúa mientras los contactos se separan y forman un entrehierro que es puentado por un plasma conductor. El proceso de interrupción termina cuando el plasma conductor pierde su conductividad. El plasma conductor es el núcleo del arco eléctrico y un elemento indispensable del proceso de interrupción de corriente. Basado en lo anterior, se deduce que el proceso de extinción del arco constituye el fundamento sobre el que se basa la interrupción de corriente.

Las condiciones bajo las que el interruptor opera están determinadas por las características eléctricas del circuito a interrumpir. La operación de un interruptor modifica el estado del circuito en el cual opera. Esta modificación comprende una fase transitoria, en la que se producen una serie de fenómenos transitorios provocados por el paso de un estado a otro.

El funcionamiento de los interruptores en el momento de interrupción de las corrientes de corto circuito depende de varios factores que se consideran como condiciones severas. La corriente y la tensión de corto circuito (ver figura 4.9) muestran que al efectuarse la interrupción al cruce por cero de la corriente, la tensión que aparece en las terminales del interruptor tiene una influencia importante en su funcionamiento. De hecho, la interrupción exitosa de la corriente depende de esta tensión. Esta tensión en las terminales después de la interrupción de corriente, tiene dos componentes: la primera (inmediatamente después de la interrupción), llamada tensión transitoria de restablecimiento y la segunda (después de que se amortiguan las oscilaciones) que alcanza la tensión de 60 Hz, llamada tensión de recuperación.

La selección de un interruptor en un sistema eléctrico, depende no sólo de la corriente que el interruptor pueda llevar bajo condiciones normales de operación, sino también de la corriente máxima que pueda circular momentáneamente y de la corriente que tenga que interrumpir al voltaje nominal de la línea a la cual se encuentre conectado.

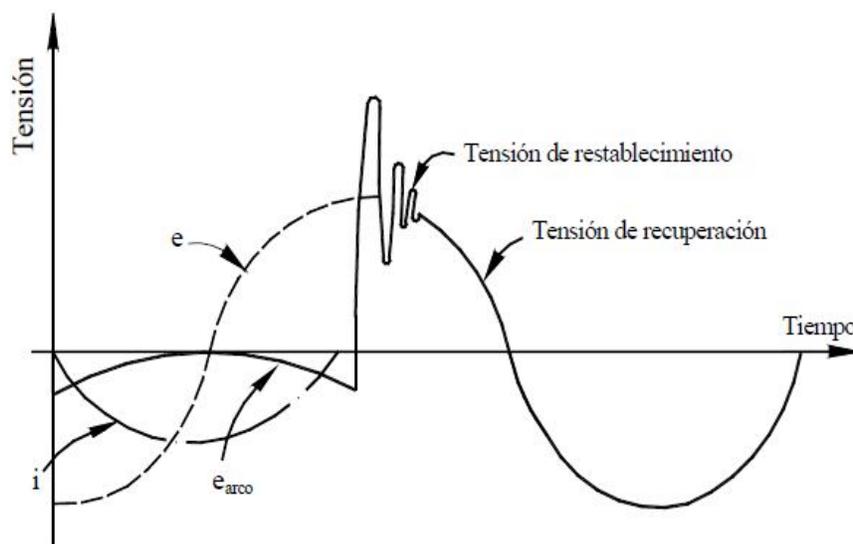


Figura 4.9 Tensiones producidas durante un corto circuito.

Para seleccionar un interruptor termomagnético adecuado debemos conocer primero algunas definiciones que nos servirán de gran ayuda. A continuación se enuncian algunas de las más importantes:

- Tensión normal de diseño: Es la tensión máxima para la que fue diseñado el interruptor.
- Tensión nominal de operación: Es la tensión del sistema donde operará el interruptor.
- Corriente nominal: Es la corriente máxima que puede circular a través de los contactos principales del interruptor.

- Capacidad interruptiva: Es la cantidad de corriente que el interruptor puede interrumpir con seguridad.
- Tensión de control: Es la tensión de los dispositivos secundarios de control.

De las definiciones anteriores la capacidad interruptiva es la más importante en la selección del interruptor de acuerdo al cálculo de corto circuito trifásico. Esta característica también llamada la potencia máxima de corto circuito que puede soportar un interruptor termomagnético está limitada por:

- La separación de los contactos en posición abierta.
- El tiempo que tardan en abrirse los contactos y llegar a la separación máxima.
- La capacidad de la cámara de extinción para enfriar los gases del arco.

Si la capacidad de corto circuito se especifica en amperes se entiende que el voltaje de restablecimiento es el voltaje nominal. Si la corriente de corto circuito sobrepasa la capacidad interruptiva, las paredes de la cámara de extinción no son capaces de enfriar los gases ionizados y la corriente sigue fluyendo. Entonces la energía disipada por el arco por efecto Joule, debida a la resistencia del arco ( $R I^2 t$ ), aumenta súbitamente y en fracciones de segundo los gases aumentan de volumen produciendo una explosión. Lo mismo sucede si la corriente es menor que la corriente máxima de corto circuito, pero el voltaje de restablecimiento es mayor que el voltaje nominal, ya que este voltaje restablece la corriente después de cada paso por cero y el arco se mantiene. En la figura 4.10 se muestran dos imágenes de un par de interruptores termomagnéticos, en donde se puede apreciar la capacidad interruptiva dada en kA y la capacidad nominal del interruptor dada en amperes.



Figura 4.10 Capacidad nominal en amperes y capacidad interruptiva en kA.

Todos los interruptores deben tener un respaldo, de tal forma que si la potencia del corto circuito es mayor a la que soporta el aparato, el respaldo opera y detiene el desarrollo de la energía en el arco del elemento que no pudo interrumpir.

Entonces resulta muy importante la calibración relativa (magnitudes nominales) entre dos elementos de protección en la misma rama. Si el rango de calibración entre ambos es muy

amplio, el respaldo puede considerar pequeña a una falla capaz de destruir al elemento de protección que no la interrumpió.

Amén de entendido el funcionamiento del interruptor en condiciones de falla y con el valor de corto circuito trifásico, se revisan catálogos de productos de fabricantes, para determinar la capacidad interruptiva del interruptor y sus características generales. Cabe mencionar que en las instalaciones eléctricas de centros comerciales, se cometen muchos errores de selección de los interruptores. Pero debido a que la mayoría de éstos están instalados en baja tensión, el nivel de corto circuito relativamente es pequeño y con “mucho suerte” la falla no perdura, sin embargo éste tipo de situaciones son las que se deben evitar en las instalaciones, ya que nuestro trabajo como ingenieros no se lo podemos dejar a la suerte.

#### 4.4.2 Selección de fusibles.

Al ocurrir una condición de corto circuito en una red eléctrica, se producen efectos térmicos y dinámicos muy apreciables a causa de las elevadas magnitudes que alcanza la corriente. La interrupción de estas corrientes en el menor tiempo posible es de suma importancia puesto que se evitan o cuando menos se minimizan los daños ocasionados por el sobrecalentamiento de partes conductoras y por los esfuerzos dinámicos.

##### 4.4.2.1 Definición.

Otro dispositivo de protección importante en las instalaciones eléctricas de centros comerciales es el fusible, que como se mencionó en el capítulo I, existen para baja, media y/o alta tensión. La idea general de este apartado es explicar de manera breve su funcionamiento, con el fin de entenderlos y poder especificar el adecuado en las instalaciones.

Los fusibles se definen como dispositivos de sobrecorriente con una parte extraíble que se calienta y es destruida cuando pasa una cantidad de corriente prefijada, provocando la apertura del circuito asociado al mismo. Todos los fusibles tienen la capacidad de limitar la corriente, pero el término “fusibles limitadores” se aplica a fusibles con una acción limitadora mucho más pronunciada. Estos fusibles son diseñados para actuar mucho más rápido que los fusibles normales, ya que pueden realizar la apertura del circuito en menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo a 60 Hz, antes que la magnitud de la corriente de corto circuito llegue a sus valores máximos.

Su principal uso es acompañado de interruptores o contactores de bajo voltaje, para evitar su destrucción cuando las magnitudes de la corriente de falla superen la capacidad de interrupción de los mismos. Los elementos fusible tienen una serie de perforaciones de precisión regularmente espaciadas a todo lo largo, calibradas de acuerdo a las características de cada fusible y que constituyen una reducción en la sección transversal de conducción al circular una corriente de corto circuito, es en estas zonas donde se produce la fusión de los elementos y se establece el arco voltaico durante la primera parte de la onda de la corriente. El tipo y número de cintas de plata conectadas en paralelo depende de la corriente nominal del fusible.

##### 4.4.2.2 Funcionamiento.

Estos fusibles proporcionan protección contra los daños térmicos y dinámicos que ocurrirían en caso de falla. La interrupción se debe a su respuesta instantánea y a la característica de limitación de corriente de corto circuito a los valores previstos en el diseño del fusible, en el momento de interrumpir la corriente antes de que el primer semiciclo de la onda de corriente llegue a su valor máximo natural. Cabe mencionar que la interrupción se realiza tanto para corrientes de corto circuito simétricas como asimétricas. En la figura 4.11 se observa este fenómeno.

El tiempo total de interrupción se compone del período de fusión durante el cual el calor se incrementa en el elemento del fusible y el período de arqueo después de que el elemento se funde y otros componentes del fusible enfrían los productos gaseosos del arco. El arco agrega una impedancia que limita la corriente, reduciéndola finalmente a cero.

La importancia de los fusibles radica en el efecto limitador de corriente, que es la capacidad de los fusibles para interrumpir la corriente de corto circuito antes de que alcance su valor pico máximo, al limitar el valor de la corriente de paso  $I_D$  al valor de la corriente de ruptura o corriente de fusión  $I_S$  que es considerablemente menor que la corriente de corto circuito no limitada (corriente prospectiva)  $I_k''$  mostrada en la figura 4.11 con línea punteada y que corresponde a la corriente de corto circuito disponible en el punto donde ocurre la falla.

Al iniciarse el corto circuito, una mínima resistencia se opone a la circulación de corriente de paso  $I_D$  por lo que ésta se incrementa a la par de  $I_k''$ , iniciándose el proceso de elevación de temperatura en los elementos fusible. Al llegar al valor  $I_S$ , los elementos fusible se funden y/o evaporan e interrumpen el circuito en varios puntos, apareciendo múltiples arcos voltaicos, cuya longitud se va incrementando rápidamente al fundirse y/o evaporarse más material. La tensión se incrementa bruscamente a partir del momento de la fusión hasta llegar a un máximo (tensión de interrupción) y la corriente se limita al valor  $I_S$ , iniciándose a partir de este momento un proceso de disminución.

El efecto limitador es por lo tanto el resultado de la inserción de la resistencia de los arcos voltaicos en varios puntos a partir de la fusión. Al enfriarse los arcos por efecto de la arena circundante se reduce consecuentemente la conductividad y por lo tanto, la resistencia a la circulación de corriente aumenta rápidamente. La corriente disminuye gradualmente al mismo tiempo que la tensión. Cerca del siguiente paso por cero de la tensión, se extinguen los arcos voltaicos y la corriente queda interrumpida totalmente. Los eventos descritos suceden dentro del primer semiciclo de la corriente de corto circuito, es decir en menos de 8 a 10 milisegundos.

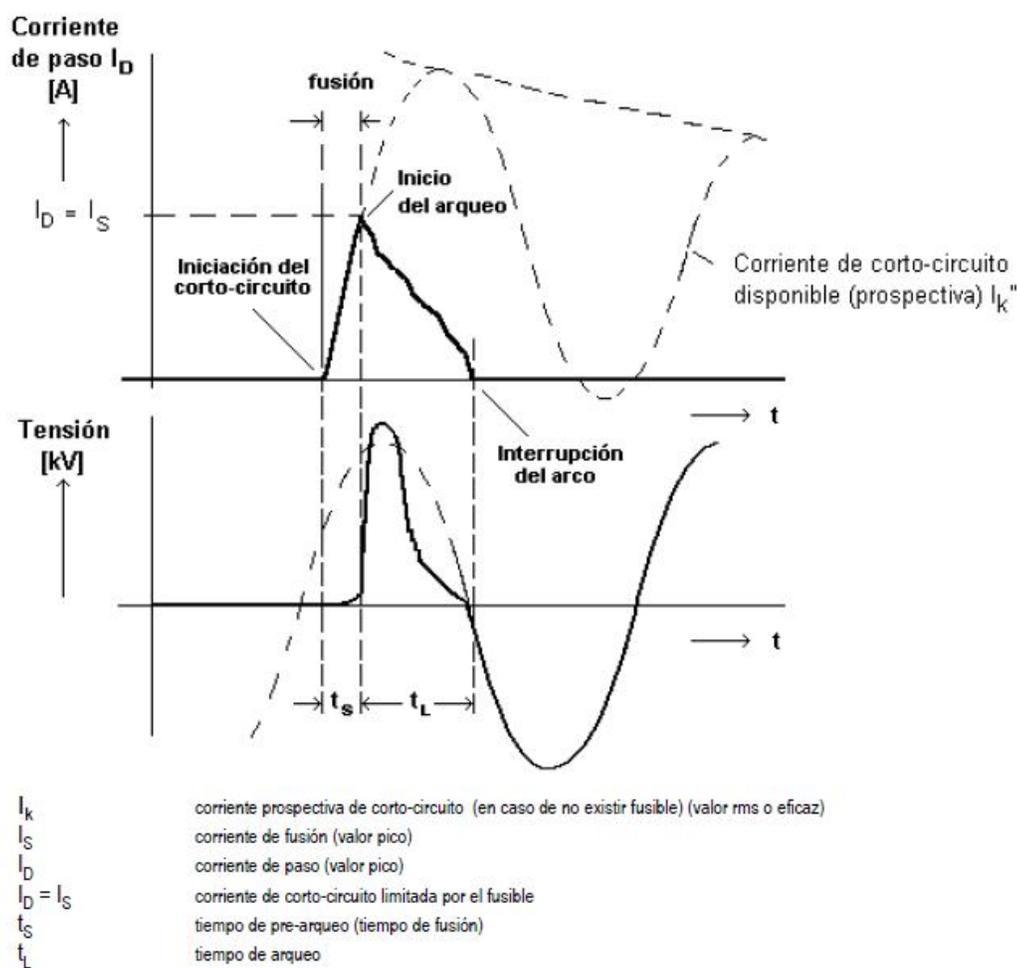


Figura 4.11 Proceso de interrupción de corriente de corto circuito en un fusible.

## 4.4.2.3 Parámetros de selección.

La selección adecuada de los fusibles está en función de diversos parámetros, a continuación se mencionan las más importantes.

- Corriente nominal ( $I_n$ ): La corriente nominal de un fusible corresponde al valor máximo de corriente que él mismo puede conducir por tiempo indefinido sin llegar a la fusión y que genera una cantidad de calor tal que el fusible puede disipar satisfactoriamente.
- Corriente máxima de interrupción ( $I_1$ ): También llamada capacidad interruptiva y corresponde a la intensidad de corriente corto circuito que un fusible es capaz de interrumpir con seguridad. Es del orden de varias decenas de kA.
- Corriente mínima de interrupción ( $I_3$ ): Para valores por encima de  $I_n$ , los tiempos de fusión son muy largos y van disminuyendo a medida que la corriente es mayor, así como se indica en la figura 4.12. En este rango, la capacidad de disipación de calor es menor que la cantidad de calor generado en el interior, por lo que se presentan esfuerzos térmicos severos que pueden dañar al fusible. A medida que la corriente es mayor, los tiempos de fusión son más reducidos y se llega a un punto tal que la fusión ocurre en un lapso de tiempo relativamente corto, antes de que se presenten los esfuerzos térmicos y daños al fusible. A este valor de corriente se le define como la corriente mínima de interrupción  $I_3$  y corresponde por lo tanto al límite inferior de la gama de corrientes que el fusible puede interrumpir satisfactoriamente.

Considerando lo anterior, en las curvas corriente tiempo se define para cada tipo de fusible un valor de corriente mínima de interrupción por debajo del cual no es recomendable la operación durante lapsos prolongados, debido a que la sobrecorriente no presenta una magnitud suficientemente alta para producir la fusión en forma franca y definida, pero produce un excesivo calentamiento, modificando las características de los elementos fusible y produciendo daños térmicos al cuerpo del mismo.

Por lo tanto, los fusibles limitadores de corriente no deben operar durante tiempos prolongados en el rango de corrientes superiores a la nominal e inferiores a la corriente mínima de interrupción por los motivos expuestos. Sin embargo, en el caso de corrientes altas superiores a  $I_3$ , es decir en la gama de las corrientes de corto circuito, la operación del fusible es rápida, definida y predecible.

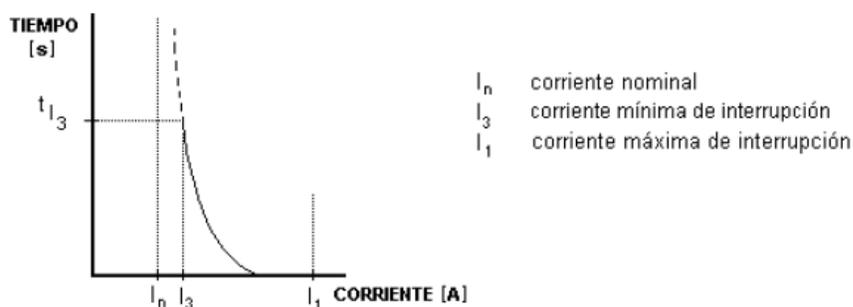


Figura 4.12 Curva característica corriente tiempo de un fusible.

- Tensión de operación ( $V_n$ ): Cuando se especifican las características de un fusible, es de vital importancia indicar la tensión de operación del sistema, ya que de ésta se especifica la tensión de operación del fusible. Si se especifica al fusible con otra tensión diferente a la de la red, es decir con una tensión de operación menor respecto a la tensión de la red se presentarán problemas para manejar los gradientes de crecimiento de la tensión, mientras que uno de mayor tensión nominal y consecuentemente de mayor tensión de interrupción, causaría un mayor gradiente de

crecimiento de tensión y consecuentemente originaría problemas en los aislamientos de otros equipos del sistema.

En conclusión, la selección de un fusible no debe realizarse solo en base a la experiencia, como en muchas ocasiones se realiza, se debe hacer un estudio detallado con el fin de conocer todas las adversidades que pudieran presentarse, así como las ventajas que un sistema de protección coordinado arroja.

#### 4.5 Efectos del corto circuito.

Si bien el corto circuito es un fenómeno que por lo regular es accidental, no está por demás conocer los efectos que trae consigo. Éstos son muy variados, pero los más importantes son:

- El efecto Joule.

Los sólidos tienen generalmente una estructura cristalina, ocupando los átomos o moléculas los vértices de las celdas unitarias, y a veces también el centro de la celda o de sus caras. Cuando el cristal es sometido a una diferencia de potencial, los electrones son impulsados por el campo eléctrico a través del sólido debiendo en su recorrido atravesar la intrincada red de átomos que lo forma. En su camino, los electrones chocan con estos átomos perdiendo parte de su energía cinética, que es cedida en forma de calor.

Este efecto se define como "la cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente". En otras palabras, es el calentamiento de los equipos eléctricos debido a la gran circulación de corriente y matemáticamente se escribe como sigue:

$$Q = I^2 \times R \times t \dots\dots\dots (4.30)$$

Donde:

- Q es la energía calorífica producida por la corriente.
- I es la intensidad de la corriente que circula.
- R es la resistencia eléctrica del conductor.
- t es el tiempo de duración de la falla.

Así mismo la potencia disipada por el efecto Joule es:

$$P = R \times I^2 = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots (4.31)$$

- Esfuerzos electromecánicos.

Se producen entre otros lugares, en las máquinas eléctricas, las cuales resultan afectadas de forma considerable.

- Destrucción física del lugar de la falla cuando se producen grandes arcos eléctricos.
- Interrupción del suministro eléctrico debido a la necesaria apertura del circuito eléctrico por parte de los dispositivos de protección para despejar la falla y evitar mayores daños en el sistema. Este es el más notorio.
- Efectos dinámicos y térmicos debidos a las corrientes de corto circuito.

Los efectos de un corto circuito dependen directamente de la energía que tiene que ser disipada por el arco, esto es:

$$W_{cc} = \int_0^t v \cdot i \, dt \dots\dots\dots (4.32)$$

Donde:

$v$  es el voltaje en los extremos del arco o del elemento considerado.

$i$  es la corriente de corto circuito.

$t$  es el tiempo que permanece la condición de cortocircuito.

Esta expresión no incluye la energía calorífica disipada a través de todos los conductores por los que circula la corriente de corto circuito.

La magnitud de una falla de corto circuito puede ser tal que produzca explosiones y provoque la destrucción de equipos completos, tableros, transformadores e interruptores, ente otros, pero sobre todo puede producir condiciones de peligro para las personas que estén próximas a la instalación.

Es conveniente hacer notar que en el diseño de ampliaciones o modificaciones a una instalación debe, además de contemplar las condiciones normales de operación, incluir un análisis de los cambios que sufre el nivel de la corriente de falla de cierto punto.

Finalmente el estudio de corto circuito es fundamental para el buen funcionamiento de una instalación eléctrica, no solo nos dará una visión de que capacidad deben tener los equipos de protección, cuantos tipos hay, como elegirlos. Tampoco nos deja satisfechos el conocer los métodos de solución existentes. Mas que todo esto nos indica el grado de peligrosidad que presenta el sistema, esto envuelve tanto a equipos como a las personas. Si protegemos adecuadamente nuestro sistema evitaremos daños irreparables. Aunque es muy importante mencionar que mientras no dejemos de ver a las instalaciones eléctricas como un gasto innecesario, cualquier falla por insignificante que sea es un peligro latente.