



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**Departamento de Ingeniería Eléctrica**

**“Estudio Comparativo de las  
Normas IEC y ANSI para Cálculo de  
Corto Circuito”**

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de:  
Maestro en Ciencias  
con especialidad en Ingeniería Eléctrica**

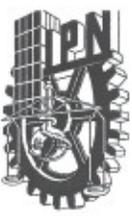
**Presenta:**

**Víctor Javier Vázquez Bojórquez**

**Director de Tesis: Dr. Ricardo Mota Palomino**



**México, D.F.  
Septiembre/2007**



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 06 del mes de septiembre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

### “ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEC Y ANSI PARA CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO ”

Presentada por el alumno:

**VÁZQUEZ**

Apellido paterno

**BOJÓRQUEZ**

materno

**VICTOR JAVIER**

nombre(s)

Con registro: 

B	7	8	0	2	5	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

### MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. RICARDO MOTA PALOMINO

Presidente

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Segundo Vocal

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Tercer Vocal

M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

Secretario

M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

Suplente

M. EN C. JESÚS REYES GARCÍA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 26 del mes Septiembre del año 2007 el que suscribe Ing. Víctor Javier Vázquez Bojórquez alumno del Programa de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro B780250, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Ricardo O. Mota Palomino cede los derechos del trabajo intitulado: "Estudio Comparativo de las Normas IEC y ANSI para Cálculo de Corto Circuito" al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Priv. San Lucas #12 Seminario Res. Hermosillo, Son.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
\_\_\_\_\_  
Víctor Javier Vázquez Bojórquez  
Nombre y firma

---

**ÍNDICE**

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
Portada.....	i
Índice.....	ii
Glosario.....	iv
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo de la tesis.....	4
1.5 Estructura de la tesis.....	4
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO</b>	
2.1 Fuentes de corriente de corto circuito.....	7
2.2 Ecuación de la respuesta transitoria de un circuito RL alimentado por voltaje senoidal.....	9
2.3 Derivación de ecuaciones para aplicación de normas IEC y ANSI.....	14
2.4 Corrientes de corto circuito en un generador síncrono con una falla trifásica en sus terminales.....	19
<b>CAPÍTULO 3 LA NORMA ANSI/IEEE</b>	
3.1 Consideraciones básicas de la norma ANSI/IEEE.....	28
3.2 Método de análisis de la corriente.....	29
3.3 Redes para el cálculo de corrientes de falla.....	30
<b>CAPITULO 4 LA NORMA IEC</b>	
4.1 Generalidades de la norma IEC.....	44
4.2 Definiciones y términos.....	48
4.3 Falla lejana al generador.....	51
4.4 Falla cercana al generador.....	59
4.5 Influencia de los motores.....	76
<b>CAPITULO 5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO IEC vs. ANSI/IEEE</b>	
5.1 Características relevantes de las normas básicas IEC y ANSI/IEEE para el estudio comparativo.....	79
5.2 Aplicación de las normas IEC y ANSI/IEEE en un sistema eléctrico de prueba.....	83
5.3 Análisis comparativo de las corrientes de corto circuito IEC vs. ANSI/IEEE.....	100

---

<b>CAPITULO 6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
Conclusiones específicas.....		110
Conclusiones generales.....		111
Conclusiones sobre el procedimiento de la norma ANSI/IEEE.....		111
Conclusiones sobre el procedimiento de la norma IEC.....		111
Aportaciones.....		112
Recomendaciones para trabajos futuros.....		113
<b>REFERENCIAS</b> .....		114
<b>ÁPENDICE</b> .....		117

---

## G L O S A R I O

---

**Tiempo de Arqueo** El intervalo de tiempo entre el instante de la primera iniciación del arco y el instante de la extinción final del arco en todas las fases.

**Corriente Asimétrica de Corto Circuito** La combinación de la componente simétrica de corriente alterna y la componente de corriente directa.

**Interruptor de Circuito (IC)** Dispositivo diseñado para abrir y cerrar un circuito para permitir y parar el flujo de corriente eléctrica. Generalmente diseñado para abrir automáticamente el circuito si una sobrecorriente predeterminada es excedida, sin presentar daños en si mismo.

**Tiempo de Apertura** El intervalo de tiempo entre el instante que se energiza la bobina de disparo hasta el instante que los contactos de arqueo se han separado.

**Corriente Cresta** La corriente instantánea más alta durante un período. Es también llamada corriente pico.

**Tiempo de Liberación** El intervalo de tiempo entre el instante en que se presentó la falla y la extinción total del arco de la primera iniciación del arco y el instante de la extinción final del arco en todas las fases. También llamado **Tiempo de Interrupción**.

**Tiempo de Separación de Contactos** Intervalo de tiempo entre el inicio de la falla y el instante en que los contactos de arqueo primarios se han separado en todos los polos. Es la suma del tiempo del relevador y del tiempo de apertura de contactos.

**X/R en el Punto de Falla** Es la relación de reactancia a resistencia en el punto de localización de la falla. Para su determinación se usará diferente procedimiento dependiendo de la norma (ANSI/IEEE o IEC) que se use para el cálculo de fallas.

**rms** Raíz cuadrada del valor promedio de los cuadrados de las corrientes (o voltajes) tomados a través de un periodo.

**Constante de Tiempo  $\tau$**  Tiempo requerido para que la corriente de que se trate decaiga a un 36.8% de su valor inicial.

### **Corto Circuito**

Conexión accidental o intencional, por una resistencia o impedancia relativamente baja, de dos más puntos en un circuito los cuales están normalmente a diferentes voltajes.

### **Corriente de Corto Circuito**

Una sobre corriente resultante de un corto circuito debido a una falla o a una conexión incorrecta en un circuito eléctrico.

---

**Corriente Disponible (o Esperada) de Corto Circuito**

La corriente que deberá fluir si el corto circuito fuera reemplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable sin ningún cambio en el suministro. Se supone que un corto circuito trifásico se realiza simultáneamente en los tres polos.

**Corriente Simétrica de Corto Circuito**

Es el valor rms (efectivo) de la componente de corriente alterna de la corriente de corto circuito, cuando se ignora, si existe, la componente aperiódica o de corriente directa

**A** Valor inicial de la componente aperiódica (corriente directa).

**C** Factor de Voltaje

$cU_n/\sqrt{3}$  Fuente de Voltaje Equivalente

$I_b$  Corriente de Corto Circuito Simétrica de Interrupción

$I_k$  Corriente de Corto Circuito en Estado Permanente

$I''_k$  Corriente de Corto Circuito Simétrica Inicial

$i_p$  Corriente de Corto Circuito Pico

$i_{CD}$  Componente de CD

$t_{min}$  Tiempo mínimo de retardo de un interruptor de circuito (IC).

$Z_k$  Impedancia de Thevenin en el punto de falla.

$R_k$  Resistencia de Thevenin en el punto de falla.

$X_k$  Reactancia de Thevenin en el punto de falla.

$R/X$  Relación de Resistencia a Reactancia.

$X/R$  Relación de Reactancia a Resistencia.

- 
- $K$  Factor para el cálculo de corriente pico de corto circuito.
- $f$  Frecuencia (50 o 60 Hz.).
- $\mu$  Factor para el cálculo de la corriente de interrupción asimétrica.
- $q$  Factor para el cálculo de la corriente de interrupción de motores asíncronos.
- $\lambda$  Factor para el cálculo de corriente de corto circuito de estado permanente.

---



---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Fig. 2.1 Oscilogramas de corrientes simétricas de corto circuito desde el sistema eléctrico, generador síncrono, motor síncrono y motor de inducción. Todas las corrientes se combinan para dar la gráfica inferior.

Fig. 2.2 Corriente Asimétrica de Corto Circuito producto de todas las fuentes ilustradas en la Figura 2.1 mas el componente de CD

Fig. 2.3 Un circuito serie RL energizado con una diferencia de potencial alterna.

Fig. 2.4 Significado físico del símbolo del ángulo  $\beta$ .

FIG. 2.5 Oscilograma que muestra el decaimiento de la componente de CD y como la corriente de corto circuito asimétrica llega a ser simétrica cuando desaparece la componente de CD.

Fig. 2.6 Combinación de término estacionario y transitorio ecuación (11) para obtener la onda resultante. Caso donde  $\theta = 85^\circ$  y  $Sen(\beta - \theta) = -1$ .

Fig. 2. 7 Corriente típica de corto circuito.

Fig. 2.8 Circuito serie RL súbitamente energizado por un voltaje alterno senoidal en  $t = 0$ .

Fig. 2.9 La corriente en función del tiempo en un circuito RL  $\beta - \theta = 0$ , siendo  $\theta = \text{arc tg} (\omega L / R)$ . La tensión aplicada en el instante  $t = 0$  es  $|E_m| \text{sen}(\omega t + \beta)$ .

Fig.2.10 La corriente en función del tiempo en un circuito RL  $\beta - \theta = -90^\circ$ , siendo  $\theta = \text{arc tg} (\omega L + \beta)$  La tensión aplicada en el instante  $t = 0$  es  $|E_m| \text{sen}(\omega t + \beta)$ .

Fig. 2.11 Corriente de corto circuito de un alternador con falla trifásica en sus terminales. El alternador opera sin carga.

Fig.2.12 Corrientes de corto circuito debidas a una falla en las terminales de un turbogenerador en vacío a voltaje y frecuencia nominal (Voltaje = 0, en el instante  $t = 0$  en la fase a).

Fig. 2.13 La figura (a) representa la corriente total de corto circuito en una fase de un generador con una falla trifásica en sus terminales operando sin carga. La figura (b) representa la componente CA (simétrica). La figura (c) representa la componente CD. Esto es Fig. (a) = Fig. (b) + Fig. (c).

Fig. 2.14 Onda simétrica de corriente de corto circuito de un generador síncrono sujeto a una falla trifásica en sus terminales.

Fig. 3.1 Onda simétrica de corriente de corto circuito de un circuito serie RL sin considerar la componente de CD. Aquí se observa el decaimiento de la onda de CA. de un generador síncrono sujeto a una falla trifásica en sus terminales.

Fig.3.2 Factor de Multiplicación Remoto FMr Falla Trifásica y de línea a Tierra Base de Corriente Total.

Fig.3.3 Factor de Multiplicación Local FMI Falla Trifásica Base de Corriente Total.

Fig.3.4 Factor de Multiplicación Local Falla Trifásica Base de Corriente Simétrica.

Fig.3.5 Factor de Multiplicación Remoto Falla Trifásica y línea a Tierra Base de Corriente Simétrica.

Fig. 4.1 Corriente de corto circuito de una falla lejos del generador (Diagrama Esquemático).

Fig. 4.2 Corriente de corto circuito de una falla cercana al generador (Diagrama Esquemático).

Fig. 4.3 Caracterización de un corto circuito y sus corrientes. La dirección de las flechas de corriente esta elegida arbitrariamente.

Fig. 4.4 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  de acuerdo con el procedimiento del voltaje equivalente de la fuente.

Fig. 4.5 Corriente de corto circuito de una falla lejos del generador (Diagrama Esquemático).

Fig. 4.6 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  de acuerdo con el procedimiento del voltaje equivalente de la fuente.

Figura 4.7 Factor  $x$  para circuitos serie en función de:

a) razón R/X; b) razón X/R

Fig. 4.8 Diagrama del sistema mostrando una falla alimentada por varias fuentes independientes unas de las otras. (En algunos casos la impedancia entre el bus B y la localización de la falla F puede ser despreciada.)

Fig. 4.9 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  en una red mallada. La corriente de corto circuito en la localización de la falla F es almacenada por el punto de conexión alimentadora Q a través de los transformadores T1 y T2.

Fig. 4.10 Corriente de corto circuito de una falla cercana al generador (Diagrama Esquemático).

Fig. 4.11 Falla con una sola fuente

- 1) Falla Alimentada desde Un generador (sin transformador)
- 2) Falla Alimentada desde una Estación Unitaria de Potencia (generador y transformador de unidad).

Fig. 4.12 Ejemplo para el cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''^k$  para una falla alimentada directamente de un generador.

Fig. 4.13 Factor  $\mu$  para el cálculo de corriente de ruptura de corto circuito  $I_b$ .

Fig. 4.14 Factores  $\lambda_{\max}$  y  $\lambda_{\min}$  para turbogeneradores.

Fig. 4.15 Factores  $\lambda_{\max}$  y  $\lambda_{\min}$  para maquinas de polos salientes.

Fig. 4.16 Ejemplo de cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''^k$  alimentada por una estación unitaria de potencia.

Fig. 4.17 Falla alimentada por fuentes no malladas. Cálculos realizados de acuerdo a las subclausulas 12.2.3, 12.3 y 12.4.

Fig. 4.18 Falla alimentada desde varias fuentes con impedancia común  $Z$ .

Los cálculos de acuerdo a las subclausulas 12.2.3, 12.2.4, 12.3 y 12.4.

Fig. 4.19 Ejemplo del cálculo de la corriente inicial simétrica de corto circuito  $I''^k$  alimentada por fuentes no malladas

Fig. 4.20 Explicación de el calculo de  $I''^k, \dot{I}_p, I_b$  e  $I_k$  para una falla trifásica alimentada desde fuentes no malladas de acuerdo con las ecuaciones 55 a 58.

Fig. 4.21 Falla en red mallada. Calculo de acuerdo a las subclausulas 12.2.4, 12.3 y 12.4.

Fig. 4.22 Ejemplo del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''^k$  en una red mallada alimentada por varias fuentes

Fig. 4.23 Factor  $q$  para el cálculo de corriente de ruptura de falla de un motor asíncrono

Fig. 4.24 Ejemplo para la estimacion de la contribucion de motores asincrinicos en relación al total de corriente de falla.

Fig. 5.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de estudio de corto circuito.

Fig.5.2 Diagrama unifilar del CCM3.

Fig.5.3 Diagrama unifilar del Bus 9.

---

Fig.5.4 Diagrama unifilar de subred.

Fig.5.5 Diagrama unifilar del Sub 23.

Fig. 5.6 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de estudio de corto circuito ANSI/IEEE.

Fig.5.7 Corrientes momentáneas de corto circuito trifásico.

Fig.5.8 Corrientes de interrupción de corto circuito trifásico.

Fig.5.9 Corrientes de corto circuito de 30 ciclos.

Fig. 5.10 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de estudio de corto circuito IEC.

Fig.5.11 Corriente inicial  $I''_k$  de corto circuito.

Fig.5.12 Corrientes pico  $\dot{i}_p$  de corto circuito.

Fig.5.13 Corrientes de corto circuito de estado permanente  $I_k$ .

Fig. A.1 Ciclo de trabajo del interruptor de circuito.

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1 Multiplicadores de la reactancia (o impedancia) de las máquinas rotatorias.

Tabla 3.2 Multiplicadores de la reactancia (o la impedancia) de las máquinas rotatorias para una red combinada.

Tabla 3.3 Aplicación de la red de Primer Ciclo.

Tabla 3.4 Definición del Tiempo Mínimo de Separación de Contactos para Interruptores de Alta Tensión.

Tabla 3.5 Factor de multiplicación Remoto para ICs de diferentes velocidades y X/R. Corriente de Base de Total.

Tabla 3.6 Factor de multiplicación Local para ICs de diferentes velocidades y X/R. Corriente de Base Total.

Tabla 3.7 Impedancia en la Red de 30 Ciclos.

Tabla 3.8 Aplicación de la Red de 30 Ciclos

Tabla 4.1 Factor de voltaje C.

Tabla 4.2 Cálculo de corrientes de falla de motores asíncronos en el caso de una falla en sus terminales.

Tabla 5.1 Principales tipos de corriente de ANSI y IEC 909.

Tabla 5.2 Multiplicadores ANSI de reactancias de las máquinas.

Tabla 5.3 Factores de voltaje de prefalla IEC.

Tabla 5.4 Corrientes de Falla simétricas Inicial ANSI vs. IEC.

Tabla 5.5 Corrientes de ½ Ciclo ANSI vs. IEC.

Tabla 5.6 Corrientes de falla pico IEC vs. Corriente de falla cresta ANSI.

Tabla 5.7 Corriente de interrupción ANSI vs. Corriente de ruptura IEC (Tomada esta como la Corriente de Falla Inicial  $I''_k$ ).

Tabla 5.8 Corriente de interrupción ANSI vs. Corriente de ruptura IEC para varios tiempos de apertura de contactos.

Tabla 5.9 Corrientes de retardo ANSI vs. Corrientes de estado permanente IEC.

---

## RESUMEN

El corto circuito es un transitorio eléctrico que somete los equipos y las instalaciones eléctricas a los más severos efectos. El corto circuito puede ocasionar daños en los equipos y sistemas y la suspensión del servicio de energía eléctrica ocasionando severas pérdidas técnicas y económicas a los suministradores y a los consumidores. Por esto, en la planeación y el análisis de los sistemas eléctricos, el estudio de corto circuito juega un papel muy importante. Existen aplicaciones de estos estudios, como la coordinación de protecciones y la selección de interruptores, que dependen de la determinación precisa de corrientes de corto circuito y cuya operación correcta resguarda a los sistemas de los daños mencionados. Esto obliga a usar procedimientos de cálculos de fallas precisos y confiables. En la actualidad dos son las normas aplicadas que tienen procedimientos para el cálculo de corto circuito: la IEC y la ANSI/IEEE. Existen diferencias entre ellas que ocasionan, al aplicarlas a un estudio de fallas sobre el mismo sistema eléctrico, que los resultados obtenidos sean diferentes. Estas diferencias deberán de entenderse cabalmente para evaluar el impacto técnico-económico en sus aplicaciones.

Con el proceso de globalización y estandarización actual, el ingeniero electricista deberá estar familiarizado con las normas mencionadas, y particularmente con sus diferencias, para escoger la más apropiada para la aplicación específica.

En este estudio se han incluido -en forma pertinente- los conceptos fundamentales de corto circuito y elaborado desarrollos matemáticos específicos para el cálculo de corrientes de falla para los efectos de este estudio.

En este estudio más que pretender hacer un análisis exhaustivo de cada norma en si misma, se desarrollan aquellos conceptos clave que sirven para caracterizarlas por separado, enfatizando aquellos que son relevantes y que sirven para establecer las diferencias básicas entre las normas. Como metodología, se establecen las diferencias entre los modelos, la información demandada por cada uno, sus procedimientos y los resultados obtenidos al aplicar las dos normas a un sistema eléctricos prueba. Para facilitar los cálculos se utilizó el programa computacional comercial ETAP que utiliza ambas normas

En las conclusiones se destacan aquellas características y diferencias importantes de cada norma para aplicarlas según la circunstancia específica del problema, la precisión técnica requerida y la valoración del impacto socio-económico de la decisión tomada. También se sugiere la realización de trabajos futuros en esta misma línea de estudios comparativos.

---

## A B S T R A C T

Short Circuit is an electric transient that puts electric equipment and installation under the most severe conditions. The short circuit may cause damage to equipments and systems, as well as the power service suspension resulting in severe technical and economical loss, both to suppliers and consumers. Therefore, in the electric system planning and analysis, the study of short circuit plays a very important role. There are applications of these studies, such as protection coordination and circuit breaker selection, which relies on the precise determination of short circuit currents and which correct operation keeps the systems from the above named damages. All this demands to use precise and reliable fault calculation procedures. At the present time, two are the standards applied: IEC and ANSI/IEEE standards. However, when applied to a fault study on the same electric system, there are differences between these two that cause the obtained results not to be the same. These differences must be entirely understood in order to determine the technical and economic impact on their applications.

With the current globalization and standardization processes, Electrical Engineers must be familiar with the above mentioned standards, particularly with their differences, in order to choose the most appropriate for the specific application.

This study includes – in a pertinent sense - fundamental concepts of the short circuit as well as mathematical work specific for failure current for this study's purposes.

This study is not intended to be an exhaustive analysis of each standard by itself, however, those key concepts useful to identify them separately are explained focusing on the basic differences between these standards. As methodology this study establishes the differences between: the models, the information demanded by each one of them, their procedures and the results obtained when applying both of the standards to one test electric system. In order to simplify the calculations, ETAP commercial software that uses both standards was used.

The conclusions emphasize important features and differences of each Standard to apply them according the specific problem circumstances, required technical precision, and the socio-economic impact assessment of the decision taken. Further work around the same comparative studies is also suggested.

.

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

El corto circuito se define como la conexión deliberada o accidental a través de una resistencia o impedancia relativamente baja entre dos o más puntos de un circuito los cuales usualmente tienen diferente voltaje [3,4]. También se puede explicar el corto circuito como un alto flujo de corriente eléctrica debido a la conexión de un circuito de baja impedancia. Aún los sistemas eléctricos mejor diseñados y con las protecciones más modernas ocasionalmente experimentan cortocircuitos que resultan en corrientes muy altas que cuando no se interrumpen oportunamente pueden causar fuertes daños y aun la destrucción total de los componentes de una instalación eléctrica.

Esquemas de protección y dispositivos de protección de sobrecorriente, tales como interruptores de circuito y fusibles, deberán aislar las fallas a una localización dada; con seguridad, con el mínimo daño al equipo y a los circuitos y una mínima interrupción de la operación de la planta o del sistema eléctrico. Otras partes del sistema tales como cables, barras y cuchillas desconectadoras deberán ser capaces de soportar esfuerzos térmicos y mecánicos resultantes del máximo flujo de corrientes de falla a través de ellos. Las magnitudes de las corrientes y las potencias de la falla son necesarias para seleccionar equipo eléctrico así como para determinar sus características. El cálculo de estas magnitudes de corriente de corto circuito y los esfuerzos correspondientes son el objetivo principal del estudio de fallas en los sistemas eléctricos.

En el análisis de los sistemas eléctricos industriales, de distribución y de potencia los estudios de corto circuito juegan un rol muy importante en la planeación y en la selección de equipo eléctrico. Estos estudios requieren procedimientos precisos y confiables de cálculo de corrientes de corto circuito. Entre otros, existen dos procedimientos normalizados, posiblemente los más conocidos, que se usan para calcular corrientes de corto circuito en los sistemas eléctricos: el normalizado por la IEC (International Electrotechnical Commission), de origen europeo y el ANSI/IEEE (American National Standard Institute/IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers) de origen norteamericano. Los dos proveen resultados que sirven, entre otros usos, para seleccionar interruptores de circuito y diseñar esquemas de protección. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre ellos (modelo matemático, esfuerzos de corto circuito, procedimiento de cálculo, etc.) que originan resultados de cálculo diferentes. Con todo, las diferencias existentes en los resultados obtenidos por estos dos procedimientos de cálculo deberán de entenderse cabalmente para evaluar el impacto técnico-económico en las aplicaciones.

Los dos estándares aplican en los países de origen y extienden su influencia a otras naciones del mundo. En México aplican ambos procedimientos para el cálculo de la corriente de corto circuito. En cuanto a aplicaciones se refiere, en la Comisión Federal de Electricidad los interruptores de distribución y potencia están normalizados con especificaciones IEC [1,2].

Un estudio de fallas en un sistema eléctrico es el análisis que determina los diferentes valores de corriente que fluyen, en distintos tiempos y puntos, en el circuito eléctrico

durante un corto circuito. Estos valores son usados para la selección de equipo eléctrico o para la determinación de las características del mismo. Especial atención en los estudios de fallas merecen los equipos de protección como interruptores, fusibles, etc.

Los resultados de un estudio de corto circuito es un conjunto de información indicando la corriente de corto circuito en los componentes principales del sistema eléctrico. Los resultados se comparan con la capacidad del equipo propuesto o existente. Esta comparación se hace para determinar donde y cuando el equipo estará expuesto a magnitudes de corriente mayores que la capacidad del equipo [6].

El flujo de corriente que se presenta durante un corto circuito en un punto cualquiera en un sistema está determinado, como se verá adelante, por las fuentes de alimentación de corto circuito hasta el punto de falla y por las impedancias de los componentes. Si existe un crecimiento en la capacidad del sistema existirá entonces un incremento en la corriente de corto circuito. Esto conlleva la necesidad de estar actualizando los estudios de fallas mientras haya modificaciones en la red que pudieran modificar los valores de las corrientes de falla y de aquí hacer una aplicación apropiada para los dispositivos de protección. En un estudio de fallas lo que se requiere normalmente son los valores de las corrientes máximas de falla. Sin embargo, en algunos casos los valores mínimos son también necesarios para verificar requerimientos de respuesta a la corriente de los dispositivos de protección.

El tamaño y la complejidad de muchos sistemas industriales modernos pueden hacer que los cálculos manuales ocupen demasiado tiempo y sean imprácticos. Las computadoras son generalmente usadas para estudios más importantes de análisis de fallas.

## **1.2 ANTECEDENTES**

Se conocen artículos que hacen análisis comparativos entre los métodos llamados estáticos y los métodos llamados dinámicos. Estos últimos son procedimientos hasta ahora no normalizados por organizaciones o agrupaciones de la ingeniería eléctrica como el ANSI, el IEEE o la IEC. También hay trabajos que tratan sobre las características, principalmente en lo que respecta a la modelación matemática, de cada una de estas normas tratando estas en forma separada. Asimismo existe una cantidad importante de trabajos que bajo diversos aspectos marcan la importancia de conocer las corrientes de falla para su aplicación en la especificación de equipo de protección refiriéndose generalmente al uso de un estándar u otro. Existe trabajo previo, incluido en libros, normas, guías o procedimientos, principalmente del IEEE o del IEC, sean clásicos o recientes que servirán de plataforma para este estudio. Asimismo se han encontrado trabajos que presentan metodologías para la comparación de diversos métodos y procedimientos de cálculo de fallas.

Las referencias de estudios que tratan de la relación entre las dos normas son cada vez más numerosas, originadas en parte por el acelerado intercambio de equipos eléctricos y de servicios de ingeniería en el mundo. Esto se presenta, mayormente en Estados Unidos con sus tratados de libre comercio y en Europa con la formación de la Unión Europea. Con esto, la producción de referencias respecto al uso de normas va dirigida principalmente a la intención de establecer una normalización única. En México, a pesar del uso combinado de equipo eléctrico de origen europeo y americano en sus instalaciones eléctricas, no se obliga a considerar las dos normas, IEC y ANSI/IEEE, en los estudios de corto circuito y sus aplicaciones.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Los sistemas eléctricos están expuestos a fallas, por lo que deben de establecerse previsiones para disminuir el daño al equipo y las costosas interrupciones del servicio cuando estas fallas ocurren. En el diseño moderno de sistemas eléctricos, estas previsiones se logran mediante el recurso de incorporar al sistema eléctrico características de diseño y operación con el objetivo de:

- Prevenir las fallas y,
- Si se presentan, reducir sus efectos.

El corto circuito es un tipo de falla eléctrica que origina efectos sumamente fuertes en un sistema eléctrico. El corto circuito es un fenómeno transitorio en el sistema eléctrico, que destruye o reduce la habilidad para transmitir energía de las partes del sistema con corrientes de corto circuito que pueden llegar a magnitudes que someten al equipo a grandes esfuerzos térmicos y dinámicos que, si se permiten que persistan, pueden causar daños severos al equipo.

En los sistemas eléctricos de potencia la falla de corto circuito puede también originar transitorios electromecánicos que, en algunas circunstancias, podría conducir a la pérdida de sincronismo de una o varias máquinas con el rompimiento parcial o total del sistema de energía.

Es necesario entonces reducir los efectos de las fallas mediante el retiro rápido del servicio de cualquier elemento de un sistema de potencia, cuando este sufre un corto circuito. Los sistemas de protección en conjunto con los interruptores tienen esta función.

Los estudios de coordinación de protecciones y de selección de equipo eléctrico, entre otros, requieren de cálculos confiables y precisos para la determinación de corrientes de corto circuito. Las normas IEC y ANSI/IEEE contienen procedimientos que son los más usados para el cálculo de corrientes de falla.

Ahora, con la apertura de los mercados eléctricos y la remoción de las barreras a los servicios de ingeniería y fabricación de equipo eléctrico, el profesional de la Ingeniería Eléctrica deberá de estar familiarizado no solo con estas normas en sí, sino también con las diferencias básicas entre el IEC y el ANSI/IEEE para poder aplicarlos correctamente y evaluar su cumplimiento en las aplicaciones mencionadas.

La comparación entre estas dos normas permite tener mejores elementos para decidir cual deberá aplicarse según las circunstancias específicas del problema, la precisión técnica requerida y valorando el impacto económico de la decisión tomada.

---

## 1.4 OBJETIVO DE LA TESIS

### Objetivo

Establecer las diferencias entre modelos, procedimientos y resultados de aplicar las normas ANSI/IEEE y la IEC para el cálculo de las corrientes de corto circuito para valorar el uso que se dé a los resultados en sus diversas aplicaciones.

### Objetivos específicos

- Conocer y valorar, mediante la comparación, las diferencias cualitativas y cuantitativas entre conceptos similares, no iguales (corriente inicial/corriente de primer ciclo, corriente de interrupción/corriente de ruptura, corriente de retardo/ corriente de estado estacionario) que afectan los resultados y sus aplicaciones.
- Establecer las diferencias (o semejanzas) relevantes en los conceptos que cada norma establece.
- Valorar la complejidad del procedimiento de cada norma para determinar que tanto incide en los resultados de cálculos de falla y en la selección de determinada norma para realizar estudios de falla.
- Determinar el significado de la terminología de cada norma. Esto evitaría posibles confusiones y su uso inapropiado.
- Se pretende establecer como influyen los siguientes factores en los resultados de la aplicación de cada norma.
  - La configuración de la red.
  - La relación X/R
  - La selección del Voltaje de Prefalla.
  - La “distancia eléctrica” desde las fuentes de corriente de corto circuito al punto de falla.
  - El tiempo de liberación de la falla.
- Determinar como se comportan los modelos de los decaimientos de la componente de corriente alterna (CA) y de corriente directa (CD) en cada estándar.

## 1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Enseguida se hace una breve descripción de lo tratado en cada capítulo de este trabajo. En el Capítulo 1 INTRODUCCIÓN se describe brevemente la importancia y el contexto de los estudios de corto circuito y el estado actual de los procedimientos incluidos en las normas (IEC y ANSI/IEEE) más usados para el cálculo de corto circuito. Se incluyen los ANTECEDENTES de este estudio comparativo. En la parte de JUSTIFICACIÓN se argumenta la importancia que tiene el mismo. También se describe el OBJETIVO de este estudio y la metodología que se emplea en este trabajo. En el Capítulo 2 FUNDAMENTOS DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO se revisan los elementos básicos de corto circuito. Ahí se apunta que los elementos que determinan la magnitud de la corriente de corto circuito son las máquinas rotatorias y las impedancias que en la red intervienen. Se destaca la importancia de cada una de las fuentes de corto circuito. También se presentan los oscilogramas que muestran la aportación de cada elemento (generadores, motores, etc.) a la falla. En este mismo capítulo se presenta la respuesta transitoria de un circuito RL

alimentado por una fuente senoidal como el modelo matemático que describe al corto circuito. Se observa que esta respuesta depende del momento de la falla y de los valores de R (Resistencia) y L (Inductancia) y que esta respuesta consta de dos componentes; la componente de corriente alterna (Componente de CA) y la componente de corriente directa (componente de CD) cuyas gráficas pueden manejarse de una manera adecuada para obtener el oscilograma de la corriente total de corto circuito. Se hace un desarrollo de las ecuaciones de las componentes de corriente alterna y corriente directa de manera tal que se obtienen expresiones matemáticas convenientes para cuando se analicen, en capítulos posteriores, los modelos de los estándares IEC y ANSI/IEEE. También se menciona la conveniencia de establecer un modelo similar al del circuito serie RL para la corriente de corto circuito en un generador síncrono con una falla en sus terminales. Se encontró también que debido a la naturaleza de los alternadores existían diferencias importantes. Con todo, prevaleció la idea de analizar la respuesta total de la corriente de corto circuito en el alternador como se hizo para un circuito RL, esto es; como una suma de una componente CD y una componente CA. En ésta última, para facilitar el análisis, se recurre a dividir el oscilograma de CA en tres períodos, que definen tres reactancias. De esta manera se manejan corrientes de período subtransitorio, transitorio y síncrono. Enseguida se procede al análisis de las normas IEC y ANSI/IEEE. Cabe señalar que todo lo tratado en esta parte aplica a las dos normas. Sin embargo, habiendo diferencias entre ellas, se requirió de una descripción de cada norma por separado y así, en el Capítulo 3 LA NORMA ANSI/IEEE se hace un análisis de este estándar en lo que interesa para una posterior comparación con el otro. Para este análisis se analizan los oscilogramas de la corriente de falla en un alternador y se enfatiza el tratamiento de la onda de CA en tres períodos. Se establecen tres redes de reactancias; la momentánea, la de interrupción y la de 30 ciclos. En cada una de ellas se establecen los valores de reactancia que deberán usarse y se señalan las aplicaciones de cada una de las tres redes. En particular, se enfatiza la clasificación de fallas *locales* y *remotas*. Continuando con este propósito, en el Capítulo 4. LA NORMA IEC de cálculo corto circuito se hace una descripción general del procedimiento que se sigue con esta norma. Ahí se observa como se aplican los factores de voltaje para considerar voltajes diferentes a los nominales en el punto de falla. En forma particular se enfatiza la clasificación de fallas *lejanas* y *cercanas*, se clasifican las redes según su configuración y así se tratan las diferentes tipos de corriente que esta norma maneja.

En el Capítulo 5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO IEC vs ANSI/IEEE se tiene una sección donde se enfatizan las características relevantes de las normas que son esenciales para el análisis comparativo. Así, se trabaja con los conceptos correspondientes, tanto para corrientes como para esfuerzos, que servirán como base comparativa entre las dos normas. Enseguida, se hace la aplicación de las normas IEC y ANSI/IEEE a un sistema eléctrico típico que sirve de prueba y que contiene los elementos necesarios para un estudio de corto circuito y se procede a realizar un estudio de falla trifásica de corto circuito. Los cálculos de falla se realizan aplicando ambas normas. Para estos cálculos se usó un paquete digital comercial que, entre otras características, tiene una herramienta para el cálculo de fallas llamado ETAP [12]. En la última sección de este capítulo se realiza propiamente el análisis comparativo de las dos normas usando los resultados numéricos arrojados con las dos normas en el estudio de corto circuito de los diversos conceptos de corrientes y esfuerzos de corto circuito.

---

En el Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES se observa que los dos procedimientos tienen su propia terminología, conceptos y procedimiento. Asimismo se destaca que la diferente modelación de las dos normas es determinante en los resultados del estudio y que como resultado de ello, en el caso estudiado, existen diferencias en los resultados de cálculo de corrientes de falla. Se observa que el método ANSI/IEEE es sencillo de manejar y que requiere de, relativamente, pocos datos con resultados acorde a su modelación limitada, mientras que el IEC emplea una modelación más completa y compleja que demanda más datos pero que es conveniente su uso donde se requiere precisión en los resultados de los estudios para aplicaciones importantes como la coordinación de protecciones y la selección de equipo de interrupción donde el margen entre la falla esperada y la capacidad de interrupción es muy estrecha.

Entre las aportaciones del trabajo se señala que al revisarse los fundamentos teóricos de fallas de corto circuito se han presentado las ecuaciones que gobiernan este fenómeno de forma tal que faciliten su uso en la comparación entre las normas. También, con el mismo propósito integrador, se desarrollan las ecuaciones que describen a la corriente de corto circuito en sus dos componentes de CD y CA. Se advierte de tomar precauciones para no intercambiar datos ni resultados entre las dos normas y ser consistentes en el uso y aplicación de una norma u otra. También se aportan elementos que ayudan a una selección técnicamente apropiada y económicamente aceptable de equipo de interrupción. En general, se establecen aquellas características y diferencias importantes de cada norma para aplicarlas según la circunstancia específica del problema, la precisión técnica requerida y la valoración del impacto socio-económico de la decisión tomada.

En este mismo capítulo se sugieren trabajos futuros en esta misma línea de análisis comparativo.

Asimismo, en la parte final del trabajo se incluyen referencias y apéndices que ayudan al desarrollo y comprensión del mismo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO

2.1 FUENTES DE CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

Las máquinas eléctricas rotatorias son las fuentes de alimentación de corrientes de corto circuito hacia la falla. Esto es; generadores, motores y condensadores síncronos, así como máquinas de inducción y, especialmente, las compañías suministradoras de electricidad.

La compañía suministradora de energía eléctrica que alimenta a la instalación que presenta la falla contribuye al cortocircuito con una corriente de falla que se representa con un oscilograma parecido a un generador síncrono pues, a fin de cuentas, la compañía se puede representar eléctricamente con un equivalente que es un generador síncrono. En la Figura 2.1 se observan las contribuciones de las diversas fuentes de corto circuito. La Figura 2.1(a) es el oscilograma de la onda de corriente de falla aportada por una compañía suministradora.

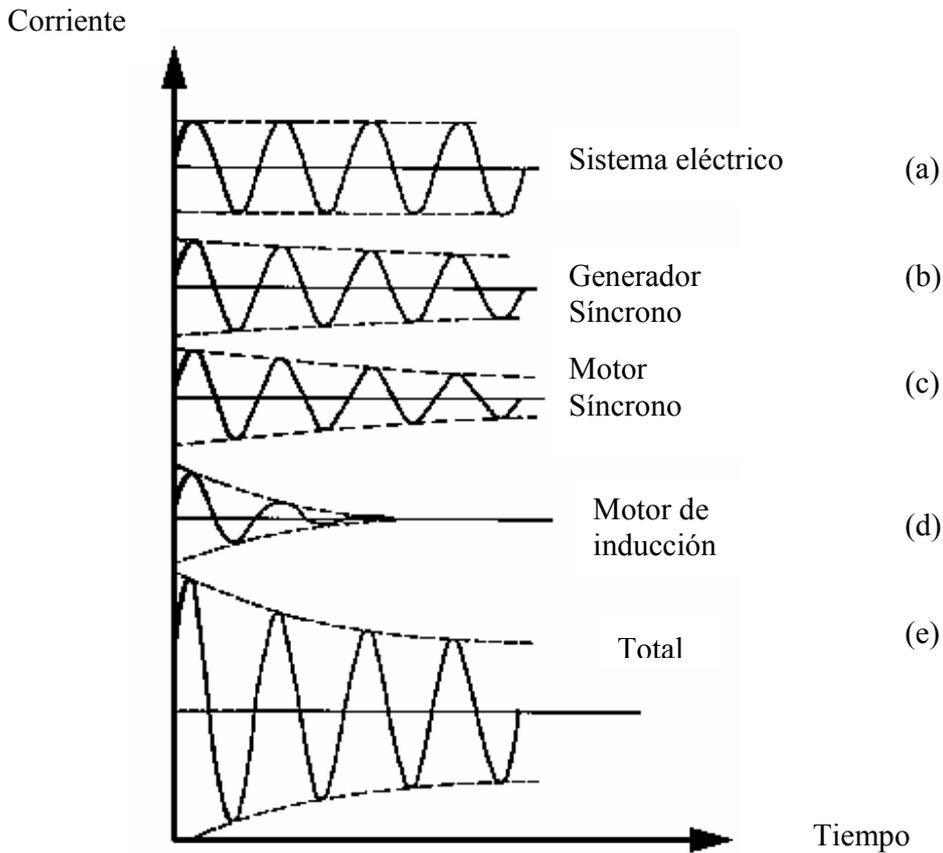


Fig. 2.1 Oscilogramas de corrientes simétricas de corto circuito desde el sistema eléctrico, generador síncrono, motor síncrono y motor de inducción. Todas las corrientes se combinan para dar la gráfica inferior (e).

Puesto que los generadores síncronos son movidos por un primomotor (turbinas, máquinas diesel o cualquier otro tipo), cuando se presenta un corto circuito en el circuito que este generador alimenta, el generador sigue produciendo un voltaje en sus terminales debido a que se le continúa manteniendo un voltaje de excitación y que el primomotor continúa moviendo al generador. Así el generador síncrono seguirá produciendo una corriente de corto circuito hasta que el circuito sea interrumpido por algún medio. Esta corriente de falla es de gran magnitud y está limitada por la impedancia del generador y por la impedancia del circuito desde el generador hasta la falla. Si la falla es en las terminales del generador, la única impedancia que limitará la falla será la del propio generador. La Figura 2.1 (b) representa la corriente de corto circuito de un generador síncrono en forma de un oscilograma.

Los motores y los condensadores síncronos tienen, ante una falla de corto circuito, un comportamiento muy parecido a los generadores síncronos y ante la presencia de una falla alimentan a ésta, en vez de ser alimentados como ocurre cuando no hay falla. Ver la Figura 2.1 (c) para el oscilograma de corto circuito correspondiente.

Los motores de inducción, ante la presencia de un corto circuito, alimentan a la falla. En los motores de inducción, la corriente de falla “se genera por la inercia que mueve al rotor en presencia de un flujo de campo, el cual es producido por inducción desde el estator del motor” [7]. La aportación de un motor de inducción a fallas de corto circuito en un sistema eléctrico dura alrededor de 2 o 3 ciclos. La Figura 2.1 (d) es el oscilograma que representa la aportación de un motor de inducción a una falla.

La Figura 2.2 representa el oscilograma de la corriente total de corto circuito con las aportaciones de todas las fuentes.

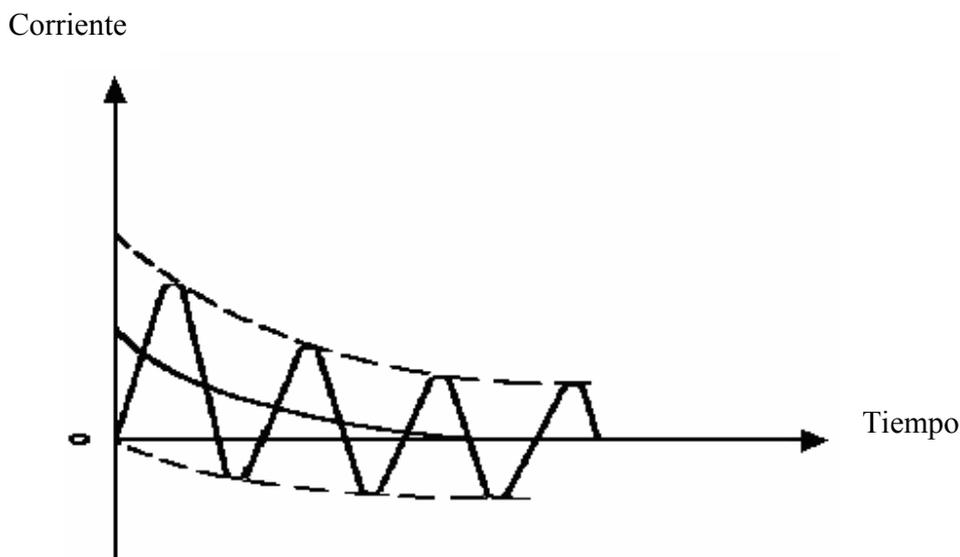


Fig. 2.2 Corriente asimétrica de corto circuito producto de todas las fuentes ilustradas en la Figura 2.1 más la componente de CD.

**2.2 ECUACIÓN DE LA RESPUESTA TRANSITORIA DE UN CIRCUITO RL ALIMENTADO POR VOLTAJE SENOIDAL**

La Figura 2.3 es un circuito serie RL típico que es alimentado con una fuente alterna senoidal.

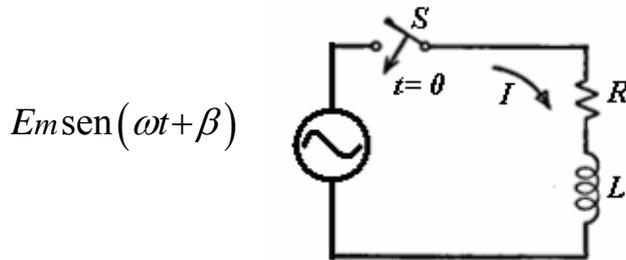


Fig. 2.3 Un circuito serie RL energizado con una diferencia de potencial alterna.

Enseguida se desarrolla la respuesta transitoria del circuito de la Fig. 2.3 [7]:

Al aplicar una diferencia de potencial alterna al circuito se tiene la siguiente ecuación de equilibrio:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = Em \text{sen}(\omega t + \beta) \tag{2.1}$$

Que también se puede escribir así

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{Em}{L} \text{sen}(\omega t + \beta) \tag{2.2}$$

El símbolo  $\beta$  representa la fase de la onda de voltaje cuando se cierra el interruptor de la Figura 2.3.

La observación de la Figura 2.4 siguiente muestra más claramente el significado de  $\beta$ .

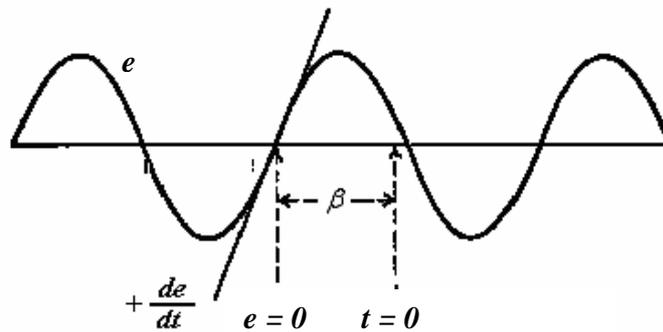


Fig. 2.4 Significado físico del símbolo del ángulo  $\beta$

Obsérvese que  $\beta$  es el desplazamiento angular, expresado en grados o radianes, entre el punto  $e=0$  y el punto  $t=0$ , medido *positivamente* desde el punto donde  $e=0$  y cuando  $\frac{de}{dt}$ , es positivo.

El factor  $\beta$  suministra un medio conveniente de examinar los fenómenos transitorios de corriente alterna, en este caso el transitorio por corto circuito.

En general, la magnitud de un transitorio de corriente alterna depende del tiempo del ciclo, en la onda de voltaje, en que se efectúa la operación de maniobra (cierre o apertura) del interruptor. La mayor parte de las operaciones de maniobra se efectúan sin tener en cuenta o sin conocer el punto en la onda de voltaje donde inicia el período transitorio, en este caso en el instante donde se presenta la falla de corto circuito. Así pues, para conocer el comportamiento del transitorio se suponen que la falla inicia en algunos puntos interesantes de la onda de voltaje. Esto se logra con diversos valores de  $\beta$ . En el caso de transitorios por corto circuito debe darse la máxima atención a los valores de  $\beta$  que producen las corrientes máximas que son las que originarán los esfuerzos máximos en los componentes del sistema eléctrico.

La solución de (2.2) para la corriente en un circuito  $R L$  con voltaje senoidal aplicado con  $E_m$ ,  $R$  y  $L$  constantes, es:

$$i = \frac{E_m}{L} e^{-Rt/L} \int e^{Rt/L} \text{sen}(\omega t + \beta) dt + c e^{-Rt/L} \quad (2.3)$$

----- Término estacionario -----      -----Término transitorio ---

Deben notarse las complejidades relativas de los dos términos de la solución anterior. En vez de pretender un método de solución complicado, se prefiere aprovechar

algunas suposiciones hechas sobre el circuito que se analiza para facilitar la solución. Así, para el término estacionario y sabiendo que se está aplicando un voltaje senoidal, se encuentra el valor de la integral (primer sumando) de (2.3):

$$i = \frac{E_m}{Z} \text{sen}(\omega t + \beta - \theta) \quad (2.4)$$

Donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (2.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \omega L / R \quad (2.6)$$

Enseguida se comenta la ecuación (2.4):

El valor máximo de la corriente estacionaria es  $\frac{E_m}{Z}$ , donde

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Esto es, la onda de corriente estacionaria se retrasa con respecto de la onda de voltaje aplicado un ángulo cuya tangente es  $\omega L / R$ .

Considerando lo anterior, la expresión completa para la corriente toma la forma:

$$i = \frac{E_m}{Z} \text{sen}(\omega t + \beta - \theta) + c_1 e^{-Rt/L} \quad (2.7)$$

La constante de integración  $c_1$  debe determinarse partiendo de las condiciones iniciales; esto es, de las condiciones existentes en el instante anterior al cierre del interruptor. Si la corriente del circuito es cero en el instante anterior al cierre del interruptor, lo que significa para estudios de fallas que la corriente anterior a la falla o corriente de carga es igual a cero, entonces:

Así, con  $\dot{i}=0$  en el instante  $t=0$ . Y, aplicando esta condición inicial a la ecuación (2.7) se tiene:

$$0 = \frac{E_m}{Z} \text{sen}(\beta - \theta) + c_1$$

De donde

$$c_1 = \frac{-E_m}{Z} \text{sen}(\beta - \theta)$$

Así:

$$i = \underbrace{\frac{E_m}{Z} \text{sen}(\omega t + \beta - \theta)}_{\text{Término estacionario}} - \underbrace{\frac{E_m}{Z} \text{sen}(\beta - \theta) e^{-Rt/L}}_{\text{Término transitorio}} \quad (2.8)$$

Término estacionario      Término transitorio

Obsérvese, que el primer término, comúnmente llamado “componente de corriente alterna”, varía senoidalmente con el tiempo y es el valor de estado permanente de la corriente en un circuito serie  $RL$ . El segundo término es aperiódico y tiene un decaimiento exponencial de acuerdo a la constante de tiempo del circuito  $\tau$  ( $\tau = L/R$ ). A este término transitorio, por ser unidireccional, se le llama “Componente de Corriente Directa”. A estas dos componentes abreviadamente se denotaran en este trabajo como “Componente de CA” y “Componente de CD”, respectivamente.

Gráficamente, y de manera esquemática, se puede representar la ecuación (2.8) mediante el oscilograma de corriente de la Fig. 2.5 donde se observa que la corriente total es asimétrica respecto al eje horizontal y es igual, en cualquier instante, a la suma algebraica de la Componente de CA (simétrica) y la Componente de CD (unidireccional).

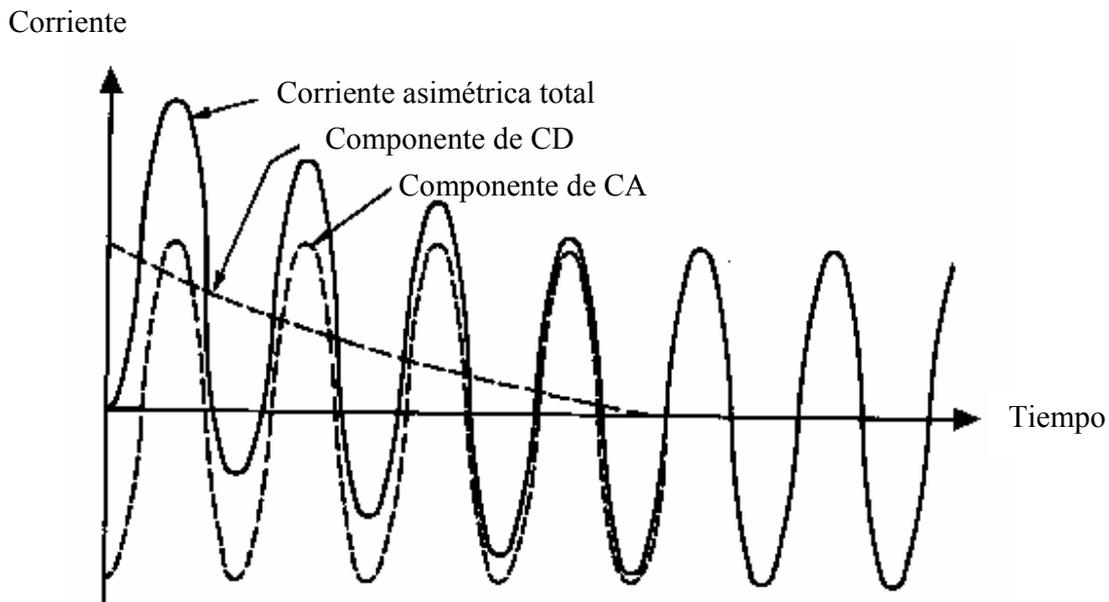


Fig. 2.5 Oscilograma que muestra el decaimiento de la Componente de CD y cómo la corriente de corto circuito asimétrica llega a ser simétrica cuando desaparece la Componente de CD.

En este punto es conveniente hacer un análisis más detallado de la ecuación (2.8):

- La Componente de CD es igual a cero cuando  $(\beta - \theta) = 0, \pi, 2\pi$ , etc. Si la rama RL es altamente inductiva, la razón  $\omega L / R$  es grande, haciendo con esto que  $\theta$  tienda hacia  $\pi/2$  como limite superior. En estos casos, la Componente de CD es igual a cero cuando  $\beta$  es aproximadamente igual a  $\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2$ , etc. Físicamente esto significa que en los circuitos altamente inductivos, como los sistemas eléctricos de potencia, cuando el circuito está energizado en puntos de la onda de voltaje cercanos al valor máximo, se dan efectos transitorios iguales a cero.
- El término transitorio de la ecuación (2.8) es máximo (para valores dados de  $R, L, \omega$  y  $E_m$ ) cuando  $(\beta - \theta) = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2$ , etc. Cuando  $\theta$  es aproximadamente igual a  $\pi/2$  está claro que el término transitorio es máximo cuando el interruptor se cierra en los puntos de la onda de voltaje con valor aproximado a cero. Un estudio detallado de la ecuación (2.8) muestra que las condiciones que llevan al máximo posible los términos transitorios no llevan necesariamente al máximo posible los valores de la corriente total. En los sistemas eléctricos representados por circuitos altamente inductivos no es grande la diferencia entre los dos grupos de condiciones y generalmente se supone que una perturbación transitoria máxima es el resultado de las condiciones que hacen a  $\text{sen}(\beta - \theta) = 1$  o  $\text{sen}(\beta - \theta) = -1$ . La condición presentada en este párrafo tiene una gran importancia, pues al obtenerse la corriente más alta supondrá los valores más altos de esfuerzos sobre los elementos del sistema eléctrico.
- En la Fig. 2.6 se presenta el oscilograma de la corriente de corto circuito, distinguiéndose las Componentes de CA y de CD, para el caso particular donde  $\theta = 85^\circ$  y para  $(\beta - \theta) = 3\pi/2$ . En estas condiciones  $\beta = 270^\circ + 85^\circ = 355^\circ = -5^\circ$ .

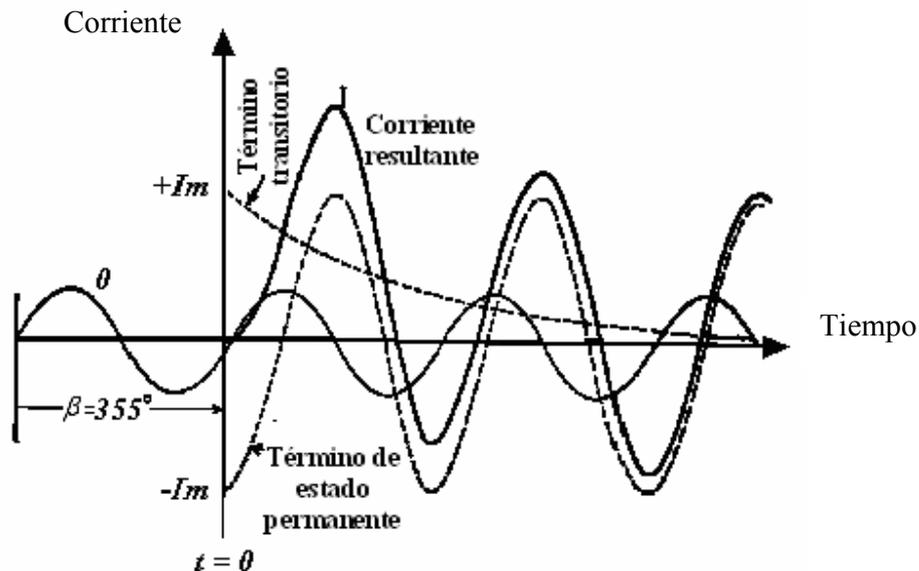


Fig. 2.6 Combinación de términos estacionario y transitorio para obtener la onda resultante. Caso donde  $\theta = 85^\circ$  y  $\text{Sen}(\beta - \theta) = -1$ .

Nótese en la Fig. 2.6 que en el instante  $t = 0$ , la Componente de CA tiene su valor máximo (negativo) y que la Componente de CD está en su valor máximo (positivo). Estas componentes se combinan en ese instante  $t = 0$  para hacer igual a cero la corriente total resultante. Esto es, cuando en el circuito eléctrico la corriente anterior al transitorio es cero. En un transitorio por falla de corto circuito es la condición de corriente de prefalla igual a cero, como se postuló antes.

### 2.3 DERIVACIÓN DE ECUACIONES PARA APLICACIÓN DE NORMAS IEC Y ANSI

Una de las principales aplicaciones, usando tanto normas IEC como ANSI, del estudio de fallas de corto circuito es la selección de interruptores de circuito (ICs) en los sistemas

eléctricos industriales y los sistemas de potencia.. Estos ICs protegen al sistema y a los equipos de las corrientes que ocurren sobre el sistema durante fallas de corto circuito. Por esto, uno de los puntos más importantes en el estudio de fallas es la determinación de las máximas corrientes de corto circuito que el IC deberá conducir e interrumpir.

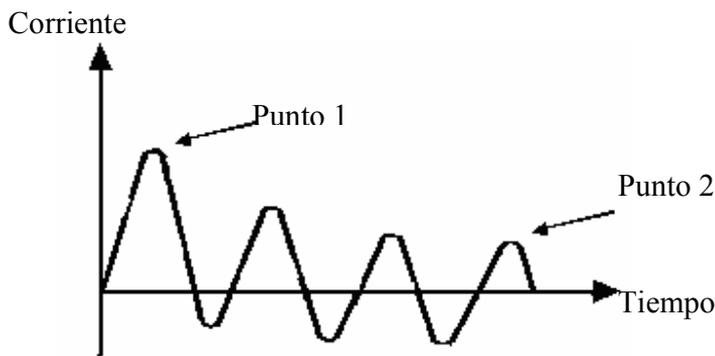


Fig. 2.7 Corriente típica de corto circuito.

La Fig.2.7 muestra los primeros ciclos de una corriente de corto circuito que podría ser “vista” por un IC. Observe que esta está formada por una Componente de CA senoidal decadente superpuesta sobre una componente unidireccional decadente o Componente de CD. El IC deberá soportar mecánicamente las fuerzas causadas por el primer pico de esta corriente (punto 1) y deberá interrumpir la energía en el arco causado por la corriente en el instante cuando los contactos del IC se aparten (que podría ser el punto 2). El problema de aplicación es, por lo tanto, el calcular el valor pico de la corriente en el inicio del corto circuito y la corriente total en el instante de separación de los contactos (Ver apéndice del CICLO DE TRABAJO DE UN INTERRUPTOR DE CIRCUITO) para las peores condiciones de corto circuito a las cuales el IC deberá estar sujeto y seleccionar un IC que deberá soportar estos esfuerzos.

Es necesario pues, desarrollar una serie de ecuaciones que permitan, tanto para IEC como para el ANSI/IEEE, el cálculo preciso de algunos valores de la corriente en determinados instantes de la onda de corto circuito. Para esto, las siguientes definiciones se usarán posteriormente:

$$I_m = \frac{E_m}{Z} = \text{Valor máximo de la Componente de CA}$$

$$I_{CA} = \text{Valor eficaz (rms) de la Componente de CA}$$

---


$$I_{CD \max} = I_m \quad (2.9)$$

Esto se debe a que el valor máximo posible de la componente de CD es igual al valor máximo de la Componente de CA.

Tomando el valor eficaz (rms) de la Componente de CA:

$$I_{CA} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_m = \sqrt{2} I_{CA} \quad (2.10)$$

Entonces:

$$I_{CD \max} = \sqrt{2} I_{CA} \quad (2.11)$$

Recordando que el valor eficaz de una onda es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores efectivos de sus componentes, entonces el valor eficaz de la corriente total (Componente CA más Componente CD) será, *al inicio* del periodo transitorio:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{CD \max}^2 + I_{CA}^2} \quad (2.12)$$

Sustituyendo (2.11) en (2.12);

$$I_{rms} = \sqrt{2I_{CA}^2 + I_{CA}^2} = \sqrt{3I_{CA}^2} = \sqrt{3} I_{CA} \quad (2.13)$$

Nótese que el *valor máximo posible* de  $I_{rms}$  es  $\sqrt{3}$  veces el valor efectivo de la Componente de CA.

Es usual que se tenga que determinar la Componente de CD para saber que valor se espera de ella en algún instante del transitorio, para esto, de la ecuación (2.8) y usando  $\tau = L/R$ , se separa la Componente de CD y la expresamos como:

$$I_{CD}(t) = I_{CD \max} e^{-t/\tau} \quad (2.14)$$

Sustituyendo (2.11) en (2.14);

$$I_{CD}(t) = \sqrt{2} I_{CA} e^{-t/\tau} \quad (2.15)$$

Nuevamente, recordando que el valor eficaz de una onda es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores efectivos de sus componentes, entonces el valor eficaz de la corriente total (Componente de CA más Componente de CD), *en cualquier instante* del transitorio, se encuentra, así:

$$I(t)_{rms} = \sqrt{ICA^2 + ICD^2(t)} \quad (2.16)$$

Sustituyendo (2.15) en (2.16):

$$I(t)_{rms} = \sqrt{ICA^2 + 2ICA^2 e^{-2t/\tau}}$$

$$I(t)_{rms} = \sqrt{ICA^2 (1 + 2e^{-2t/\tau})}$$

$$I(t)_{rms} = ICA \sqrt{1 + 2e^{-2t/\tau}} \quad (2.17)$$

Con esta ecuación, y tomando como base el valor rms de la Componente de CA, se puede determinar el valor rms de la corriente total de corto circuito en cualquier instante  $t$  para un circuito con una constante de tiempo  $\tau$  en el punto de falla.

Aquí conviene definir un Factor de Multiplicación de Asimetría, denotado  $FM_{asim}$ , de la manera siguiente:

$$FM_{asim} = \sqrt{1 + 2e^{-2t/\tau}} \quad (2.18)$$

Que, al aplicarlo a (2.17), esta ecuación queda:

$$I(t)_{rms} = FM_{asim} * ICA \quad (2.19)$$

$$FM_{asim} = \frac{I(t)_{rms}}{ICA} \quad (2.20)$$

Debido a que las normas modernas de los interruptores basan muchos de los conceptos de sus estructuras en la corriente simétrica (en inglés “basis simetrical”), la ecuación (2.19) es muy útil para determinar la capacidad interruptiva de un IC a partir de la corriente simétrica rms. Asimismo, con la ecuación (2.20) se determina la relación existente entre la corriente total de corto circuito y la corriente rms de la Componente de CA.

Para un tiempo de operación  $t = t_{oper}$  de un interruptor, con una constante de tiempo  $\tau$ , el  $FM_{asim}$  sería:

$$FM_{asim} = \sqrt{1 + 2e^{-2t_{oper}/\tau}} \quad (2.21)$$

Se observa que para un  $t = t_{oper} = 0$ , el  $FM_{asim}$  tiene el valor de  $\sqrt{3}$ , que es el mismo valor obtenido con la ecuación (2.13). Esto es, el máximo valor de la corriente rms total de corto circuito es  $\sqrt{3}$  veces la corriente rms de la Componente de CA, en el instante  $t = 0$ .

Para efectos de aplicación en interruptores es común expresar el tiempo de operación en ciclos y la constante de tiempo  $\tau$  en términos de la relación de  $X/R$ , de la siguiente manera:

$$\tau = L/R = \frac{\omega L}{\omega R} = \frac{X}{\omega R} \quad (2.22)$$

Asimismo, para expresar el tiempo en ciclos:

$$\omega = 2\pi ft \quad (2.23)$$

$$C = t(seg)f(ciclos / seg) \quad (2.24)$$

C es el tiempo en ciclos donde se desea calcular la corriente de corto circuito.

Sustituyendo (2.24) en (2.23);

$$\omega = 2\pi C \quad (2.25)$$

Sustituyendo, (2.22) y (2.25) en (2.15)

$$ICD(t) = \sqrt{2}ICAe^{-2\pi C/(X/R)} \quad (2.26)$$

En forma similar para la ecuación (2.18);

$$FMasim = \sqrt{1+2e^{-4\pi C/(X/R)}} \quad (2.27)$$

Otra relación matemática muy importante, tanto para cálculos con la norma IEC como con la norma ANSI, es con la que se determina el valor pico de la onda de corriente de corto circuito total en cualquier instante. Enseguida se presenta el desarrollo.

Asumiendo que el pico de la onda total se presenta cuando se tiene la máxima asimetría; esto es cuando se tiene el valor más alto de la Componente de CD, se tiene:

$$I_{pico} = ICA_{max} + ICD_{max} \quad (2.28)$$

Esto no necesariamente ocurre así; sin embargo el máximo error que puede esperarse es menor del 3% [8]. Con la sustitución de estas consideraciones en (2.28) se obtiene:

$$I_{pico} = ICA_{max} + ICA_{max} e^{-\omega t/(X/R)} \quad (2.29)$$

Usando valores rms:

$$I_{pico} = \sqrt{2}ICA + \sqrt{2}ICAe^{-\omega t/(X/R)}$$

(2.30)

$$I_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-\omega t / (X / R)}) I_{CA} \quad (2.31)$$

Aquí se define un nuevo factor de multiplicación que será necesario para relacionar el valor pico de la corriente total de corto circuito con la corriente rms de la Componente de CA que, como se ha dicho, es la base para las estructuras de las capacidades de los interruptores. Este factor, llamado Factor de Multiplicación Pico, se denota  $FM_{pico}$  y se expresa con la ecuación siguiente:

$$FM_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-\omega t / (X / R)}) \quad (2.32)$$

Aplicando este factor a la relación (2.31), se tiene:

$$I_{pico} = FM_{pico} I_{CA} \quad (2.33)$$

Expresando el tiempo en ciclos  $C$  y usando las ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25) la ecuación (2.32) queda:

$$FM_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-2\pi C / (X / R)}) \quad (2.34)$$

## 2.4 CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO EN UN GENERADOR SÍNCRONO CON UNA FALLA TRIFÁSICA EN SUS TERMINALES

### 2.4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se produce una falla en un sistema eléctrico, la corriente de falla la determinan las fuerzas electromotrices de las máquinas rotatorias (turbogeneradores, motores, etc.) que alimentan la falla, por las impedancias de estas máquinas y por las impedancias que existen entre las fuentes de corto circuito y la falla [9]. En la Sección 2.3 de este mismo capítulo se encontró que al alimentar súbitamente un circuito serie RL, con parámetros constantes, con una fuente alterna senoidal, como el mostrado en la Fig. 2.8, la respuesta transitoria de corriente viene dada por la ecuación siguiente:

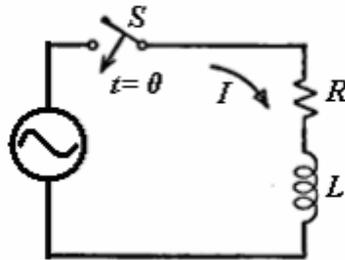


Fig. 2.8 Circuito serie RL súbitamente energizado por un voltaje alterno senoidal en  $t = 0$ .

$$i = \frac{Em}{Z} \text{sen}(\omega t + \lambda - \theta) - \frac{Em}{Z} \text{sen}(\lambda - \theta) e^{-Rt/L} \quad (2.35)$$

Se recuerda que la corriente total, como se ve en (2.35), es la suma de dos términos; el primero, llamado término permanente, el cual es senoidal; y el segundo llamado transitorio que es exponencial con decaimiento.

Lo anterior se puede observar gráficamente en los oscilogramas de la Fig.2.9 y la Fig.2.10.

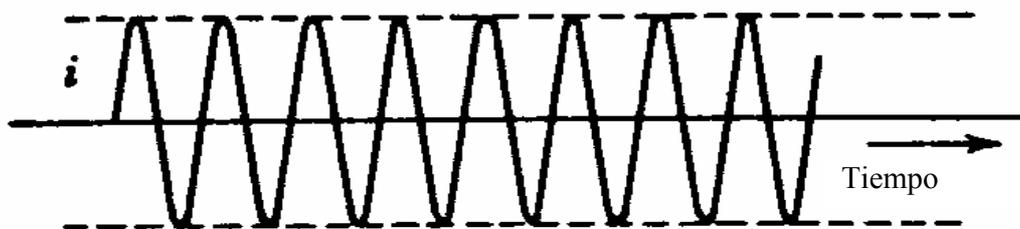


Fig. 2.9 La corriente en función del tiempo en un circuito RL  $\beta - \theta = 0$  con  $\theta = \tan^{-1} \omega L / R$ . La tensión aplicada en el instante  $t = 0$  es  $Em \text{sen}(\omega t + \beta)$ .

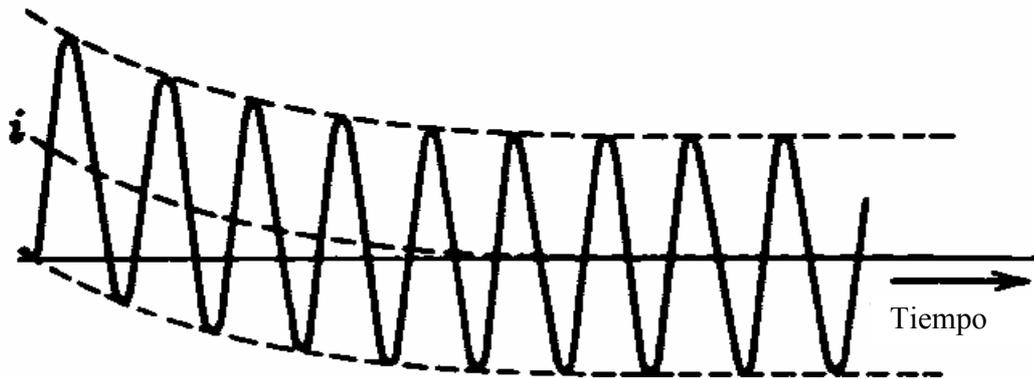


Fig.2.10 La corriente en función del tiempo en un circuito RL, con  $\beta - \theta = -\pi/2$  y  $\theta = \tan^{-1} \omega L/R$ . La tensión aplicada en el instante  $t = 0$  es  $E_m \text{sen}(\omega t + \beta)$ .

Es importante señalar que R y L se han considerado constantes y por lo tanto la Componente de CA no varía en su amplitud.

#### 2.4.2 LA ONDA DE CORRIENTE EN EL ALTERNADOR

De la teoría de máquinas síncronas, en particular de un generador de CA, se sabe que un campo magnético genera una tensión en el devanado del inductor que contiene resistencia e inductancia. Cuando se presenta una falla en las terminales de un generador de CA la corriente de falla que circula es muy parecida a la que se presentó en un circuito serie RL excitado por una fuente senoidal. Aquí se considera que la corriente de corto circuito producida por un alternador se puede modelar con una ecuación similar a (2.35). Sin embargo, como se anota en [9], existen diferencias importantes toda vez que en un alternador la corriente afecta al campo giratorio mismo. Ante una falla de corto circuito trifásico en las terminales de un alternador en vacío, se producirá una corriente de corto circuito cuyo oscilograma se puede ver en la Fig. 2.11:

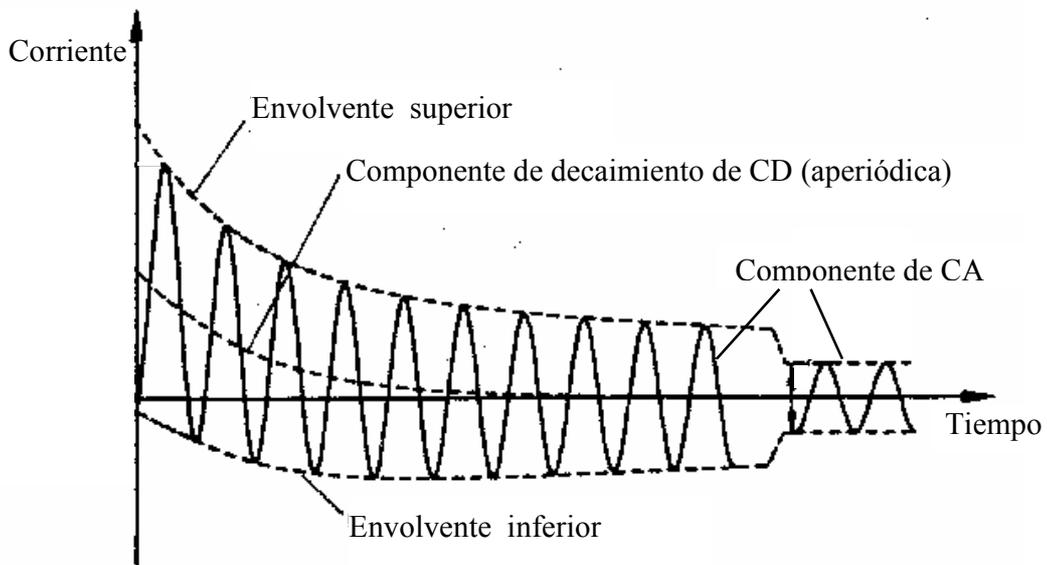


Fig. 2.11 Corriente de corto circuito de un alternador con falla trifásica en sus terminales. El alternador opera sin carga.

nador al presentarse un fallo en sus terminales. Como las tensiones generadas en las fases de una máquina trifásica están defasadas una de otras en  $120^\circ$  eléctricos, el corto circuito se aplica en puntos diferentes de la onda de tensión en cada fase. Esto puede observarse en la Fig. 2.12.

Corriente

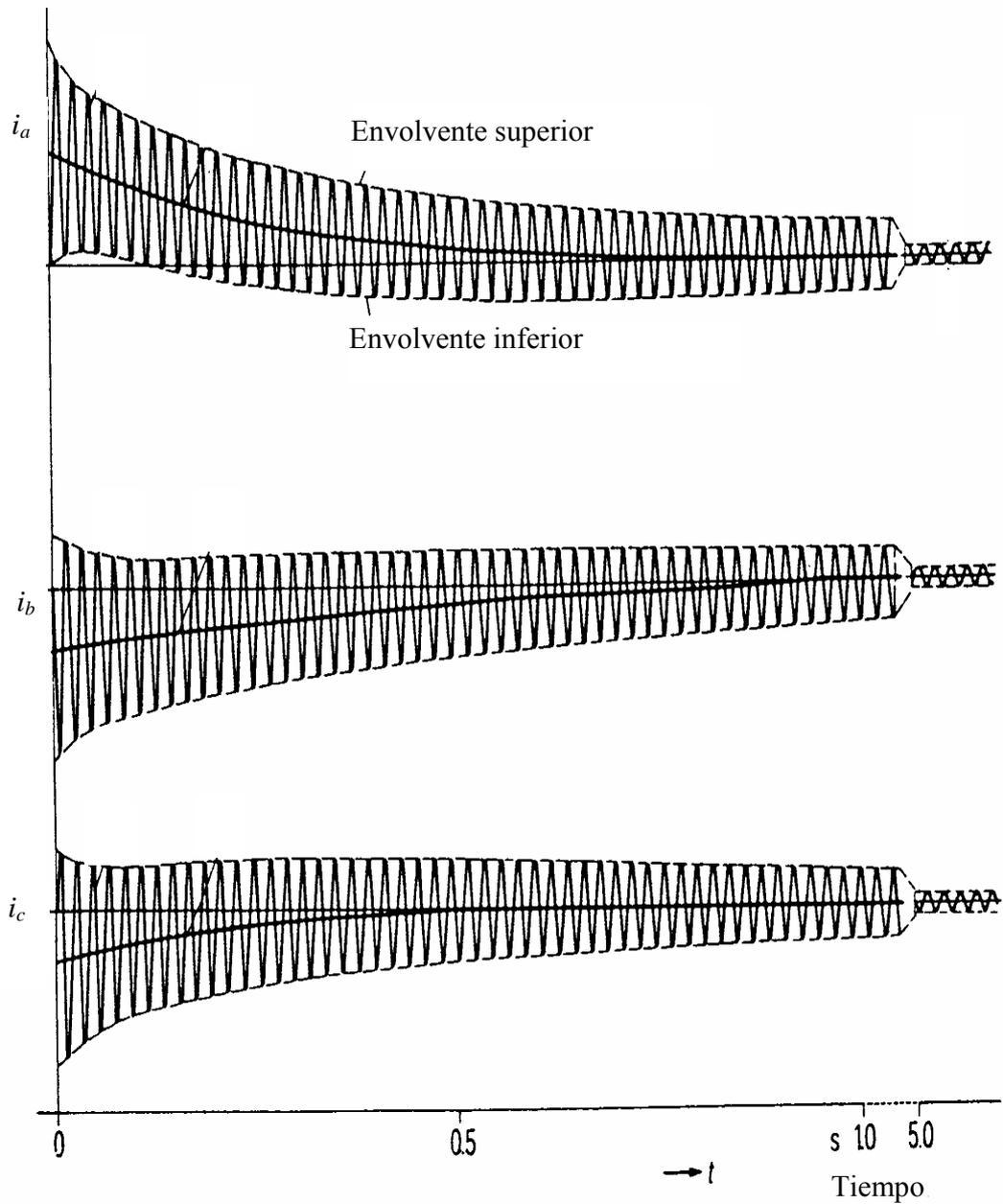


Fig.2.12 Corrientes de corto circuito debidas a una falla en las terminales de un turbogenerador en vacío a voltaje y frecuencia nominal (Voltaje = 0, en el instante  $t = 0$  en la fase a).

Tomando la fase a se puede analizarla mejor si se usa Fig. 2.13 [10]:

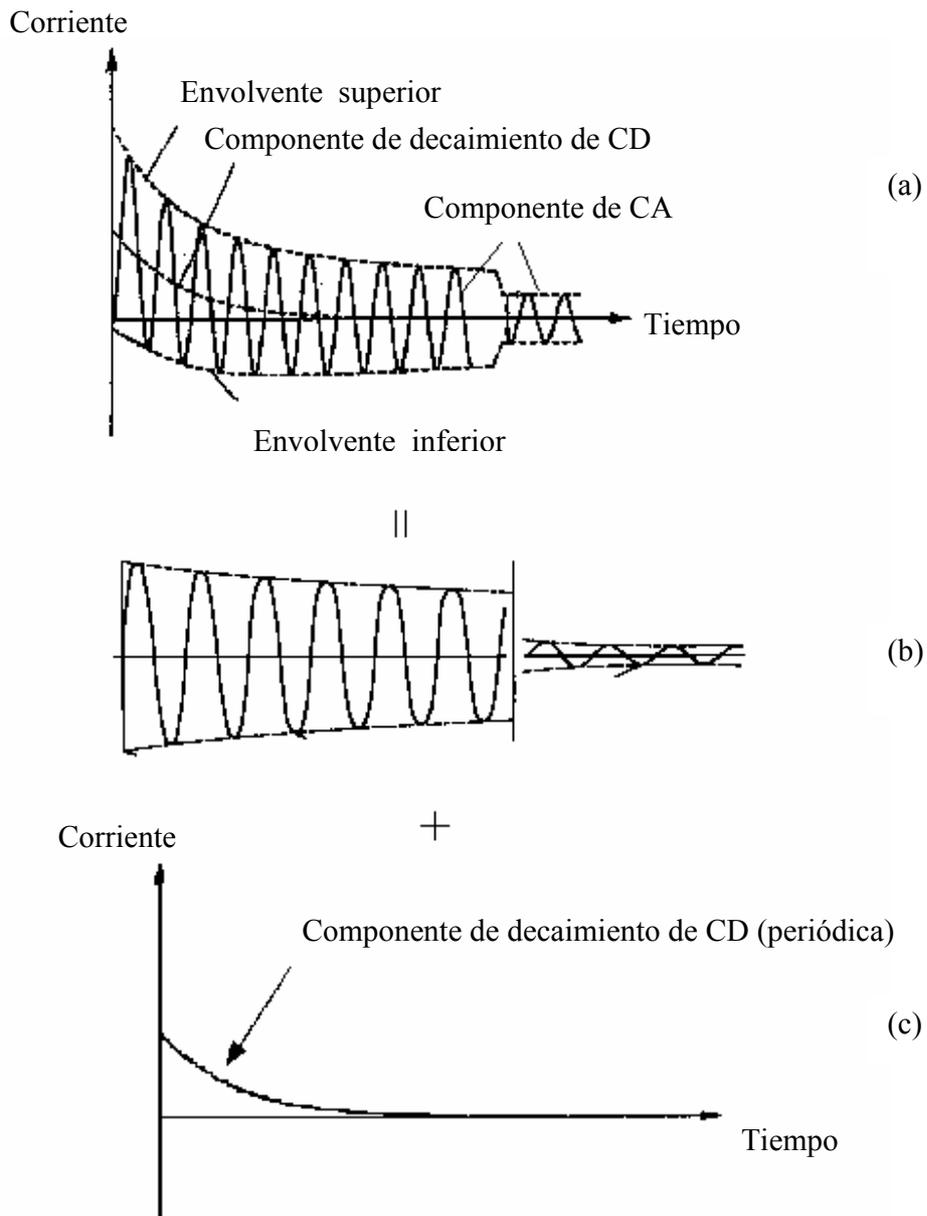


Fig. 2.13 La figura (a) representa la corriente total de corto circuito en una fase de un generador con una falla trifásica en sus terminales operando sin carga. La figura (b) representa la Componente CA (simétrica). La figura (c) representa la Componente CD. Esto es Fig. (a) = Fig. (b) + Fig. (c).

Con la Figura 2.13 se visualiza mejor que la corriente total de corto circuito es la suma de la Componente de CA y la Componente CD. La Componente de CD es diferente en cada fase mientras la componente de CA es la misma en todas las fases. Obsérvese que se toma el peor caso y que la razón de decaimiento exponencial (esto es la constante de tiempo) de la Componente de CD depende de la relación X/R de la máquina.

Para permitir un mejor tratamiento de la onda de corto circuito se remueve del oscilograma la Componente de CD; la Componente de CA queda sola y la corriente de falla aparecerá como se muestra en la Fig. 2.14.

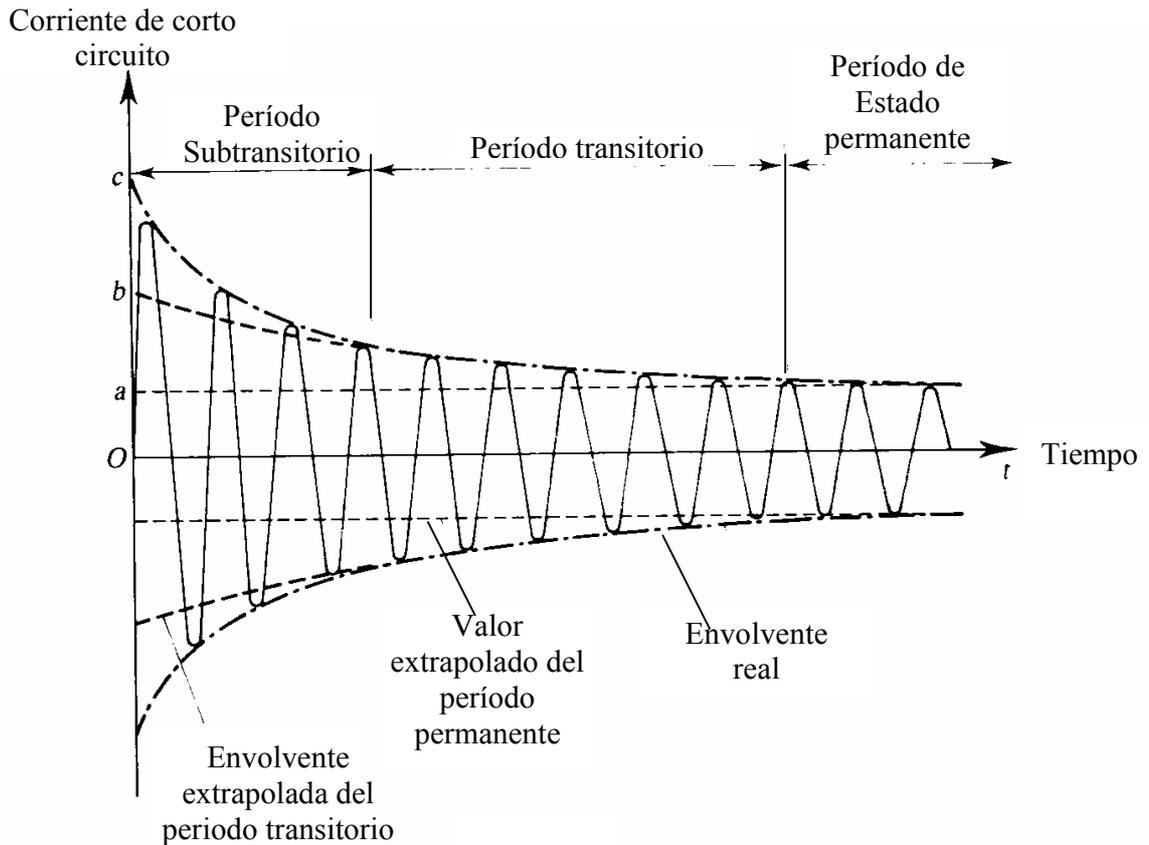


Fig. 2.14 Onda simétrica de corriente de corto circuito de un generador síncrono sujeto a una falla trifásica en sus terminales.

La amplitud de la onda senoidal se decrementa desde un valor inicial alto a un valor bajo que no cambia, esto es a un valor permanente [5].

De la teoría de máquinas: “ La explicación física de este fenómeno es que el flujo magnético causado por las corrientes de armadura de corto circuito (o por la FMM de armadura resultante) es inicialmente forzada para que fluya a través de trayectorias de alta reluctancia que no enlazan el devanado de campo o los circuitos amortiguadores de la máquina. Esto es un resultado del teorema de enlaces de flujo constantes, el cual postula que el flujo que enlaza a un devanado cerrado no puede cambiar instantáneamente. La inductancia de armadura, la cual es inversamente proporcional a la reluctancia es, por lo

tanto, inicialmente baja. De acuerdo a como el flujo se mueve a trayectorias con reluctancia mas bajas, la inductancia de armadura se incrementa” La corriente de falla CA en una máquina síncrona puede ser modelada por un circuito serie RL, como se hizo en la sección 2.2, siempre que se emplee una inductancia L que varíe con el tiempo L (t) o una reactancia  $X(t) = \omega L(t)$  [5].

El desarrollo de la corriente de corto circuito observado en la Fig. 2.14 está determinado por el proceso electromagnético que ocurre en un alternador. Sin embargo la representación y cálculo de las características de la corriente de corto circuito se basan considerando un voltaje constante y con la suposición de que el decaimiento de la corriente CA se debe a incrementos en la reactancia de la máquina.

Aplicando este recurso, el trazo de la Fig. 2.14 puede dividirse en tres períodos o regímenes de tiempo:

- Período subtransitorio. Asociado con la reactancia subtransitoria. Con duración de únicamente los primeros ciclos durante el cual el decaimiento de la corriente es muy rápido.
- Período transitorio. Asociado con la reactancia transitoria. Abarca un tiempo relativamente largo; esto es más allá de cinco ciclos durante el cual el decaimiento de la corriente es más moderado.
- Período de estado permanente o síncrono. Asociado con la reactancia síncrona. Con una duración mas allá de treinta ciclos y durante el cual la corriente de corto circuito permanece constante. Esto es, no existe decaimiento de la Componente CA.

Las corrientes durante estos tres períodos están limitadas principalmente por las reactancias respectivas de la máquina síncrona (se ignora la resistencia de armadura, por ser relativamente pequeña). Estas corrientes y reactancias están definidas por las siguientes expresiones, entendiendo como se ha dicho antes, que el alternador opera sin carga antes de que ocurra una falla trifásica en sus terminales.

Considerando lo expresado arriba y usando las reactancias de cada periodo, las siguientes ecuaciones determinan las corrientes en cada período.

$$|I| = \frac{Oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d} \tag{2.36}$$

$$|i'| = \frac{Ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X'_d} \tag{2.37}$$

$$|i''| = \frac{Oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d''} \quad (2.38)$$

Donde:

$E_g$  = Voltaje del generador operando sin carga.

$I$  = Corriente r.m.s. en estado permanente.

$i'$  = Corriente r.m.s. transitoria.

$i''$  = Corriente r.m.s. subtransitoria.

$X_d$  = Reactancia síncrona en eje directo

$X_d'$  = Reactancia transitoria en eje directo.

$X_d''$  = Reactancia subtransitoria en eje directo.

$Oa$ ,  $Ob$ , y  $Oc$  se muestran en la Fig. 2.14.

---

## CAPÍTULO 3

### LA NORMA ANSI/IEEE

Los conceptos que se establecieron en las paginas anteriores (desde la introducción, las fuentes de corriente de corto circuito, la respuesta transitoria de un circuito RL a una fuente de excitación senoidal, la corriente de corto circuito en las terminales de un generador en vacío) y otros como la representación de un sistema eléctrico de potencia en por unidad, la teoría de componentes simétricas y la formulación de corto circuito para diferentes tipos de fallas, aplican a las normas IEC y ANSI. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre ellas (modelo matemático, esfuerzos de corto circuito, procedimiento de cálculo, etc.) que originan resultados de cálculo diferentes. En las secciones que siguen se presentarán y/o describirán las consideraciones, conceptos y los datos fundamentales del procedimiento que se sigue para el cálculo de corto circuito cuando se usan las normas ANSI/IEEE.

#### 3.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LA NORMA ANSI/IEEE

Aún cuando los elementos tratados en este apartado se desarrollaron con suficiente detalle en los capítulos anteriores se hará una síntesis de ellos para manejarlos de manera más fresca en los apartados que siguen.

- Fuentes de Corriente de Corto Circuito.

Las máquinas rotatorias son las que aportan corriente de corto circuito al punto de la falla: Alternadores, motores y condensadores síncronos, motores de inducción y, al estar actuando como un alternador, el sistema eléctrico que alimenta a la instalación eléctrica.

- Limitadores de la Corriente de Corto Circuito.

Las impedancias de los elementos que existen en la trayectoria entre las fuentes de corto circuito y el punto de falla son quienes limitan la corriente de corto circuito que finalmente se presenta en la localización de la falla. Las impedancias de los equipos que alimentan la falla también limitan la corriente de corto circuito.

- Corrientes de Carga.

No se consideran corrientes de carga existentes antes de que se presente la falla de corto circuito.

- Falla Trifásica.

La falla trifásica es la que se considerará en este capítulo porque: es el tipo de falla más fácil de analizar, requiere menos información para su determinación, comúnmente es el tipo de falla más severo. También, si otros tipos de falla no se atienden, pueden degenerar en una falla trifásica.

**3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA CORRIENTE.**

Para facilitar el análisis de corto circuito la ANSI/IEEE separa y trabaja la corriente total de corto circuito en sus Componentes de CA y CD y después integra sus efectos. Lo que se requiere es la corriente de corto circuito asimétrica en cualquier instante de la onda después de que ocurre el corto circuito. Para lograr esto, usando las dos componentes, se usan factores que tomen en consideración la Componente de CD en el instante requerido y los factores que involucren la razón de cambio de la Componente de CA para conocer el valor de esta componente en el instante requerido. Como se estableció en la sección 2.4.2, al considerar los elementos giratorios, esto se logra dividiendo la onda de CA en los tres períodos mencionados en el capítulo anterior. Lo anterior se muestra en la Fig.3.1:

Corriente de corto circuito

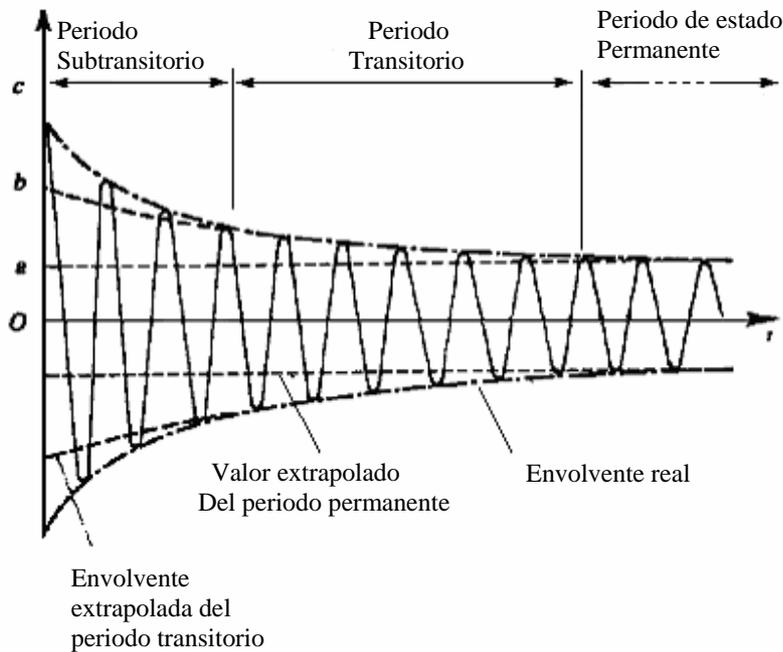


Fig. 3.1 Generador síncrono sujeto a una falla trifásica en sus terminales. Onda simétrica de corriente de corto circuito de un circuito serie RL sin considerar la componente de CD. Aquí se observa el decaimiento de la onda de CA.

Aquí debe enfatizarse que la onda de la Fig. 3.1 es la de una falla en un circuito con parámetros RL, donde se incluyen los parámetros de las máquinas que alimentan a la falla. En el capítulo 2 se trató la diferencia que había entre una falla en un alternador y una falla en un circuito, También se trató allí de las similitudes en los modelos del transitorio. De aquí en adelante se estarán tratando los oscilogramas de las corrientes de corto circuito en un circuito eléctrico. Así, cuando se hable de resistencia será la resistencia del circuito, la reactancia del circuito, etc.

---

**3.3 REDES PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE FALLA.**

El cálculo de la corriente de falla en los diferentes períodos de la onda de corto circuito conduce a definir tres intervalos de tiempo durante el tiempo en que está la falla presente. Cada uno de estos períodos también determinará tres redes [21]. Después se usará la teoría de circuitos en estas tres redes para calcular, en el intervalo deseado, la corriente de corto circuito. Según las normas ANSI/IEEE las tres redes señaladas son: La red de Primer Ciclo (también llamada momentánea o Primera Red), la red de Interrupción (Segunda Red o Red de Apertura de Contactos) y la red de 30 Ciclos (Tercera Red o Red de Estado Permanente).

Estas tres redes se forman con las reactancias (impedancias) de los elementos que intervienen en cada red. La única diferencia entre una red y otra es el valor que se asigna a las reactancias de cada máquina rotatoria [10]. Las reactancias de los elementos pasivos son las mismas en las tres redes.

**3.3.1 RED DE PRIMER CICLO (MOMENTÁNEA).**

Esta red presenta las siguientes características:

- Se usa para calcular la corriente momentánea rms simétrica de corto circuito y los esfuerzos de los equipos de protección en el primer ciclo después de que se ha presentado la falla.
- Las máquinas rotatorias se representan con sus reactancias modificadas por un factor de multiplicación. Estas reactancias modificadas aparecen en la primera columna (Red de Primer Ciclo) de la Tabla 3.1. Esta tabla está tomada de la referencia [11].
- Se recomienda que, para simplificar los cálculos en un sistema industrial, las dos últimas líneas de la Tabla 3.1 sean sustituidas por la Tabla 3.2. [11].
- Esta red se usa para determinar corrientes momentáneas de corto circuito y esfuerzos asociados para las aplicaciones que aparecen en la Tabla 3.3 [12].

Tabla 3.1 Multiplicadores de la reactancia (o impedancia) de las máquinas rotatorias.

Tipos de Máquinas Rotatorias	Red de Primer Ciclo	Red de Interrupción
Todos los turbogeneradores. Todos los hidrogeneradores con devanado amortiguador. Todos los condensadores	1.0 $X''d$	1.0 $X''d$
Hidrogeneradores sin devanado amortiguador	0.75 $X''d$	0.75 $X''d$
Todos los motores síncronos	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
Motores de inducción		
Arriba de 1000 hp a 1800 r/min o menos	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
Arriba de 250 hp a 3600 r/min	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
Todos los demás, 50 hp y más	1.2 $X''d$	3.0 $X''d$
Los más pequeños de 50 hp	Ignorar	Ignorar

Tabla 3.2 Multiplicadores de la reactancia (o la impedancia) de las máquinas rotatorias para una red combinada.

Tipo de máquina rotatoria	Red de Primer Ciclo	Red de Interrupción
Motores de inducción		
Todos los demás, 50 hp y más	1.2 $X''d$	3.0 $X''d$
Menores que 50 hp	1.67 $X''d$	Ignorar

Tabla 3.3 Aplicación de la red de Primer Ciclo.

<u>Tipo de Dispositivo</u>	<u>Esfuerzo</u>
Interruptor de Circuito de Alto Voltaje	Capacidad de “Cierre y Trabado”
Interruptor de Circuito de Bajo Voltaje	Capacidad Interruptiva
Fusible	Capacidad Interruptiva
Tableros de Interruptores y CCM	Soporte de Bus
Relevadores	Ajuste instantáneo

**3.3.2 FORMACIÓN DE LA RED DE PRIMER CICLO**

A continuación se presenta una guía para formar las redes de primer ciclo de resistencias y reactancias:

- a) La compañía suministradora que alimenta a la instalación eléctrica constituye la fuente principal de corriente de corto circuito a la falla. La aportación, en el punto de conexión, de la compañía suministradora es un dato que ella misma proporciona, normalmente como MVA de corto circuito. Esta deberá ser la más alta posible y deberá contemplar un crecimiento futuro esperado. En ocasiones, también se especifica, por la compañía suministradora, la relación X/R (reactancia y resistencia de Thevenin en el punto de conexión).
- b) Se determinan los valores de resistencia y reactancia de los elementos rotatorios y pasivos que intervienen en la red de primer ciclo usando (a falta de datos del fabricante) los datos típicos de resistencias, reactancias y valores de X/R para estudios de corto circuito se toman de Std. 141 IEEE [11]. De las Tablas 3.1 y 3.2 se seleccionan los multiplicadores que se aplican a los valores de reactancia de los elementos rotatorios. Con esto se tienen los valores de reactancia modificados.
- c) Se pasan los valores de las reactancias modificadas y resistencias a una base común.
- d) Se forma el diagrama de reactancias con los valores modificados, en por unidad a la base común, de los elementos de la red.
- e) Se forma el diagrama de resistencias con los valores, en por unidad a la base común, de los elementos de la red y se obtiene la resistencia equivalente (de Thevenin) en el punto de la falla. A esta resistencia resultante la llamaremos R. Se hace lo mismo para la X. Se determina la relación X/R en el punto de falla.
- f) Se determina la relación X/R en el punto de falla.

**3.3.3 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO DE PRIMER CICLO**

La corriente de corto circuito de Primer Ciclo (Momentánea) representa el valor más alto de la corriente de corto circuito antes de que los decaimientos de CD y CA lleven la corriente de falla a su valor permanente. Se considera que este valor se presenta en un tiempo de ½ ciclo después de que la falla se ha iniciado. En realidad el valor más alto se presenta en un tiempo ligeramente diferente del ½ ciclo. Esta diferencia se desprecia pues su impacto en los resultados es insignificante (máximo un 3%).

Enseguida se presenta el procedimiento y la formulación empleada para la determinación de la corriente de corto circuito de Primer Ciclo. Con el objeto de uniformar simbología se usará la notación empleada por el programa digital comercial empleado en los cálculos [12].

- a) Se calcula el valor efectivo simétrico de la corriente momentánea de corto circuito:

$$I_{mom,rms,sim} = E_{prefalla} / \sqrt{2} Z_{eq} \tag{3.1}$$

Esta corriente se tomará también como ICA y donde  $Z_{eq}$  es la impedancia equivalente (impedancia de Thevenin) en el punto de falla que se obtiene de la reducción de las redes separadas de X y R de Primer Ciclo.

- b) Se determina la ecuación de la corriente efectiva asimétrica de Primer Ciclo de la siguiente manera:

Rescribiendo las ecuación (2.19) y (2.27):

$$I(t)_{rms} = F_{Masim} * ICA \tag{3.2}$$

$$F_{Masim} = \sqrt{1 + 2e^{-4\pi C / (X / R)}} \tag{3.3}$$

Tenemos, para  $C = 1/2$  Ciclo:

$$F_{Masim} = \sqrt{1 + 2e^{-2\pi / (X / R)}} \tag{3.4}$$

Por lo que, para  $C=1/2$  ciclo

$$I(t)_{rms} = \sqrt{1 + 2e^{-2\pi / (X / R)}} * ICA$$

En general;

$$I_{mom,rms,sim} = F_{Masim} I_{mom,rms,sim} \tag{3.5}$$

Este valor se calcula como “Asymm. kA rms” de “Momentary Duty” en el programa ETAP.

c) Se determina la ecuación de la corriente pico asimétrica de Primer Ciclo de la siguiente manera:

Rescribiendo las ecuación (2.31) y (2.34):

$$I_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-\omega t / (X/R)}) ICA \quad (3.6)$$

$$FM_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-2\pi C / (X/R)}) \quad (3.7)$$

Tenemos, para  $C = 1/2$  ciclo:

$$FM_{pico} = \sqrt{2}(1 + e^{-\pi / (X/R)}) \quad (3.8)$$

Así, en general;

$$I_{mom, pico} = FM_{pico} I_{mom, rms, sim} \quad (3.9)$$

Este valor se calcula como “Asymm. kA Crest” de “Momentary Duty” en el programa ETAP.

ANSI [11] permite el uso de los siguientes factores de multiplicación de la corriente rms simétrica:

- $FM = 1.6$  para obtener la corriente momentánea de Primer Ciclo.
- $FM = 2.7$  para obtener la corriente pico de Primer Ciclo.

Ambos factores corresponden a aplicar las ecuaciones (3.4) y (3.8) con una relación de X/R de falla de aproximadamente 25. Para valores de X/R menores, se obtienen resultados conservadores. El uso de estos factores facilita el cálculo en esta Red de Primer Ciclo. Con todo, el usar las expresiones (3.4) y (3.8) se evitarán resultados excesivamente conservadores y provee resultados conservadores cuando la relación X/R es mayor de 25.

### 3.3.4 RED DE INTERRUPCIÓN (RED DE APERTURA DE CONTACTOS).

Esta red presenta las siguientes características:

- Se usa para calcular los esfuerzos de interrupción (de apertura de contactos) de los interruptores de circuito IC de mediana y alta tensión.
- Las máquinas rotatorias se representan con reactancias diferentes a las que se usan para la red momentánea. Las reactancias que se usan para esta red aparecen en segunda columna (Red de Interrupción) de la Tabla 3.1 [11].

Esta red se usa para determinar corrientes de corto circuito de interrupción para aplicaciones de interruptores de circuito de mediano y alto voltaje (arriba de 1kV). A estos interruptores de circuito (ICs) de aquí en adelante se les puede llamar también interruptores de alto voltaje [11].

En la aplicación de las corrientes calculadas a partir de la red de interrupción para los ICs de alto voltaje, las normas ANSI/IEEE hacen la siguiente distinción:

- ICs con características que toman como referencia o base la Corriente rms Total de Corto Circuito. Estos ICs son aquellos fabricados antes de 1964 y que fueron seleccionados y probados tomando como referencia o base la corriente rms total de corto circuito de interrupción. A estos ICs se les conoce como “**ICs con Base de Corriente Total**”. En estos ICs aplica el IEEE Std. C37.5-1979 [13].
- ICs con características que toman como referencia o base la Corriente rms Simétrica (Componente de CA) de la corriente de corto circuito. Estos ICs son aquellos fabricados después de 1964 y que fueron seleccionados y probados tomando como referencia o base la Corriente rms Simétrica (Componente de CA) de la corriente de corto circuito de la red de interrupción. A estos ICs se les conoce como “**ICs con Base de Corriente Simétrica**”. En estos ICs aplica el IEEE Std. C37.010 -1979 para calcular los esfuerzos de estos ICs [14].

Dada esta distinción entre ICs con Base de Corriente Total y Base de Corriente Simétrica y los correspondientes estándares aplicables, se hace necesario usar procedimientos de cálculo de corrientes de interrupción diferentes. Sin embargo, para la aplicación de los dos procedimientos existen pasos comunes. Entonces, primero se apuntarán los pasos comunes y posteriormente los pasos específicos de cada procedimiento.

### 3.3.5 PROCEDIMIENTO COMÚN

- a) Se determinan los valores de resistencia y reactancia de los elementos rotatorios y pasivos que intervienen en la Red de Interrupción usando -a falta de datos del fabricante- los datos típicos de resistencias, reactancias y valores de X/R para estudios de corto circuito del Std.141 IEEE.
- b) De la columna “Red de Interrupción” de las Tablas 3.1 y 3.2 se seleccionan los multiplicadores que se aplican a los valores de reactancia de los elementos rotatorios. Con esto se tienen los valores de reactancia modificados. Estos mismos multiplicadores se aplican a las resistencias de los elementos giratorios.
- c) Se pasan los valores de las reactancias y resistencias modificadas a una base común .
- d) Se forma el diagrama de reactancias con los valores modificados, en por unidad a la base común, de los elementos de la red.
- e) Se forma el diagrama de resistencias con los valores, en por unidad a la base común, de los elementos de la red.
- f) Se reduce el diagrama de reactancias a la reactancia de Thevenin en el punto de la falla. A esta reactancia resultante se le llama X.
- g) Se reduce el diagrama de resistencias a la resistencia de Thevenin en el punto de la falla. A esta resistencia resultante se le llama R

- h) Se determina la relación X/R en el punto de falla.
- i) Se determina el voltaje de operación de prefalla  $E_{pu}$ .
- j) Se determina el valor rms de la corriente de corto circuito de la Red de Interrupción con la siguiente ecuación:

$$I_{int, rms, sim} = E_{pu} / Z_{eq} \tag{3.10}$$

Donde  $Z_{eq}$  es la impedancia equivalente de falla formada con R y X.

**3.3.6 ESFUERZOS DE INTERRUPCIÓN CON BASE DE CORRIENTE TOTAL**

Habiendo determinado la corriente rms de interrupción con la ecuación (3.10), se procede a encontrar Factores de Multiplicación que se aplicarán a esta corriente, de acuerdo a lo siguiente [23,38]:

- a) Se deberán caracterizar las contribuciones de los diferentes buses al bus fallado como “Local” o “Remoto”. Se dice que una contribución se considera “Local” si la falla es alimentada predominantemente desde generadores a través de no más que una transformación o con una reactancia externa en serie con un valor menor a 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador. En caso contrario se considera que la contribución a la falla es “Remota” [13].
- b) Si la contribución es “Remota” se determina el Factor de Multiplicación “Remoto”  $FM_r$  desde las curva de la Fig. 3.2 entrando con el dato de la relación X/R del punto de falla y con el dato de Tiempo de Apertura de Contactos. Aquí conviene recordar que, dado que se requiere determinar la Corriente de Interrupción en el momento en que un IC abre sus contactos, se necesita conocer el Tiempo Mínimo de Separación de Contactos. Esta información se puede obtener del fabricante y desde la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Definición del Tiempo Mínimo de Separación de Contactos para Interruptores de Alta Tensión.

TIEMPO NOMINAL DE INTERRUPCIÓN (CICLOS) 60HZ	TIEMPO MÍNIMO DE SEPARACIÓN DE CONTACTOS (CICLOS) 60HZ
8	4
5	3
3	2
2	1.5

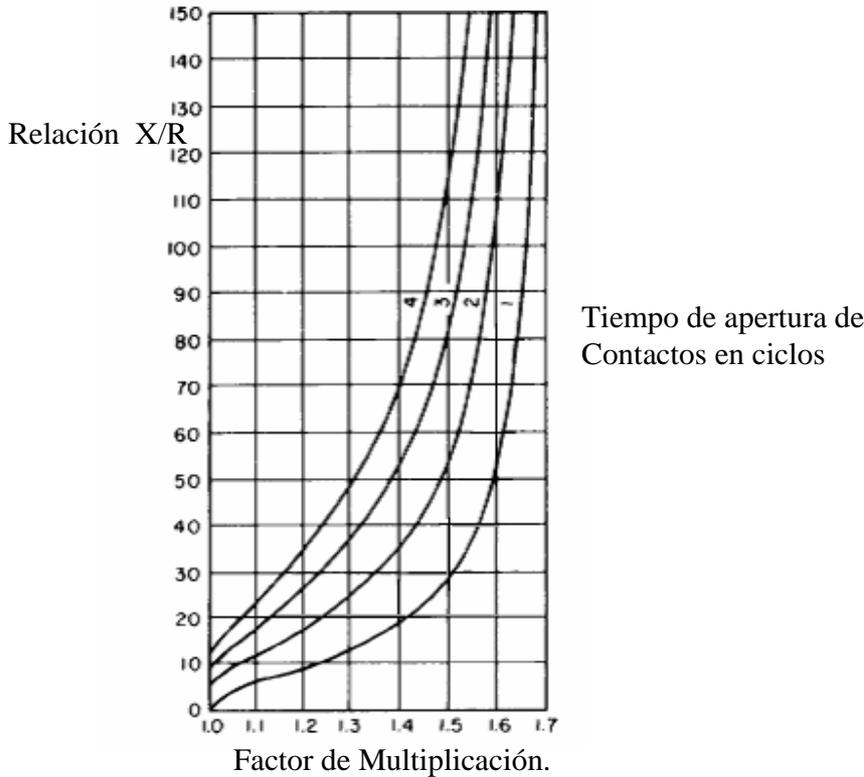


Fig.3.2 Factor de Multiplicación Remoto  $FMr$  Falla Trifásica y de línea a Tierra Base de Corriente Total.

Es de hacerse notar que el Factor de Multiplicación remoto  $FMr$  también puede determinarse con la ecuación siguiente.

$$FMr = \sqrt{1 + 2e^{-4\pi C / (X / R)}} \tag{3.11}$$

Donde  $C$  es el Tiempo de Apertura de Contactos del IC en Ciclos y  $X/R$  es la relación de reactancia a resistencia en el punto de falla.

La ecuación es la aplicación de (2.27), con la que se expresaba el Factor de Multiplicación de Asimetría  $FM$  asim., con un tiempo de operación igual al Tiempo de Apertura de Contactos.

Aplicando diferentes valores de  $X/R$  a los diferente ICs con sus respectivos Tiempos de Apertura de Contactos se forma la Tabla 3.5 Factores de Multiplicación Remoto. [12].

Tabla 3.5 Factor de Multiplicación Remoto para diferentes ICs y X/R. Base de Corriente Total.

X/R Relación	IC de 8 Ciclos (TSC4 Ciclos)	IC de 5 Ciclos (TSC3 Ciclos)	IC de 3 Ciclos (TSC2 Ciclos)	IC de 2 Ciclos (TSC1.5 Ciclos)
100	1.487	1.540	1,599	1,63
90	1,464	1.522	1,585	1,619
80	1.438	1.499	1.569	1.606
70	1.405	1.472	1.548	1.59
60	1.366	1.438	1.522	1.569
50	1.316	1.393	1.487	1.54
45	1.286	1.366	1.464	1.255
40	1.253	1.334	1.438	1.499
35	1.215	1.297	1.405	1.472
30	1.172	1.253	1.366	1.438
25	1.126	1.201	1.316	1.393
20	1.078	1.142	1.253	1.334
18	1.059	1.116	1.223	1.305
16	1.042	1.091	1.190	1.271
14	1.027	1.066	1.154	1.233
12	1.015	1.042	1.11	1.190
10	1.007	1.023	1.078	1.142
9	1.004	1.015	1.059	1.116
8	1.002	1.009	1.042	1.091
7	1.001	1.005	1.027	1.066
6	1.000	1.002	1.015	1.047
5	1.000	1.00.	1.007	1.023
4	1.000	1.000	1.002	1.009
3	1.000	1.000	1.000	1.002
2	1.000	1.000	1.000	1.000
1	1.000	1.000	1.000	1.000

- c) Si la contribución se clasifica como “Local”, se usará la Fig.3.3 con el respectivo valor de X/R y el Tiempo de Apertura de Contactos de acuerdo al IC de que se trate. De esta manera se determinará el Factor de Multiplicación Local *FMI*.

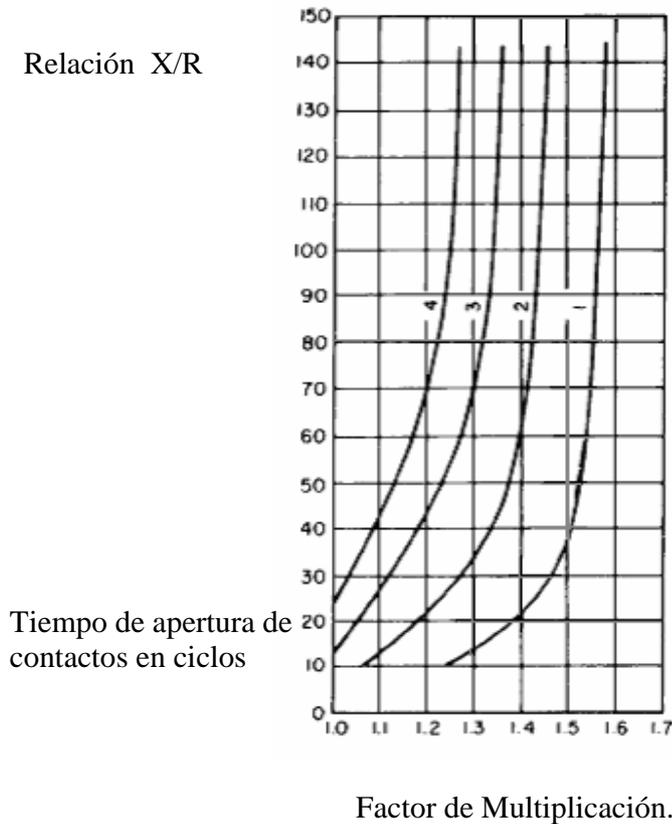


Fig.3.3 Factor de Multiplicación Local *FMI* Falla Trifásica Base de Corriente Total.

Enseguida se presenta la Tabla 3.6 Factor de Multiplicación Local para ICs de varias velocidades [12, 14].

Tabla 3.6 Factor de multiplicación Local para ICs de diferentes velocidades y X/R. Corriente de Base Total [14].

X/R Relación	IC de 8 Ciclos (TSC4 Ciclos)	IC de 5 Ciclos (TSC3 Ciclos)	IC de 3 Ciclos (TSC2 Ciclos)	IC de 2 Ciclos (TSC1.5 Ciclos)
100	1.252	1.351	1.443	1.512
90	1.239	1.340	1.441	1.511
80	1.222	1.324	1.435	1.508
70	1.201	1.304	1.422	1.504
60	1.175	1.276	1.403	1.496
50	1.141	1.241	1.376	1.482
45	1.121	1.220	1.358	1.473
40	1.098	1.196	1.337	1.461
35	1.072	1.169	1.313	1.446
30	1.044	1.136	1.283	1.427
25	1.013	1.099	1.247	1.403
20	1.000	1.057	1.201	1.371
18	1.000	1.039	1.180	1.356
16	1.000	1.021	1.155	1.339
14	1.000	1.003	1.129	1.320
12	1.000	1.000	1.099	1.299
10	1.000	1.000	1.067	1.276
9	1.000	1.000	1.051	1.263
8	1.000	1.000	1.035	1.250
7	1.000	1.000	1.019	1.236
6	1.000	1.000	1.003	1.221
5	1.000	1.000	1.000	1.205
4	1.000	1.000	1.000	1.188
3	1.000	1.000	1.000	1.170
2	1.000	1.000	1.000	1.152
1	1.000	1.000	1.000	1.132

- d) Cualquiera que sea el caso (local o remoto) se multiplica la corriente obtenida en (3.10) por el Factor de Multiplicación (Local o Remoto) para obtener el Esfuerzo de Interrupción rms Total:

$$\text{Esf. de Int. rms,total} = \text{Factor de Multiplicación} * I_{int,rms, sim} \quad (3.12)$$

Este valor representa el esfuerzo de interrupción rms de la corriente (calculada) de corto circuito total (asimétrica) para una falla trifásica franca (sólida) en un tiempo igual al Tiempo de Separación de Contactos.

En la aplicación de ICs esta corriente será comparada con la capacidad de interrupción del Interruptor de circuito, ya sea para seleccionarlo o para verificar su adecuada capacidad en uno ya instalado.

**3.3.7 ESFUERZOS DE INTERRUPCIÓN CON BASE DE CORRIENTE SIMÉTRICA**

El procedimiento para determinar los esfuerzos de interrupción para efectos de comparación con las características de los ICs fabricados con posterioridad a 1964 obedecen los criterios del IEEE Std. C37.0-1979 conocidos en forma genérica como los que tienen Base de Corriente Simétrica.

El procedimiento es prácticamente el mismo que se sigue para ICs con Base de Corriente Total, esto es:

- a) Habiendo determinado la corriente rms de interrupción con (3.10) y la relación X/R para el punto de falla dado, se procede a;
- b) Determinar Factores de Multiplicación que se aplicarán a la Corriente rms simétrica encontrada con la ecuación (3.10) de acuerdo a lo siguiente:
- c) Se deberán caracterizar las contribuciones de los diferentes buses al bus fallado como “Local” o “Remoto”. Esta caracterización obedece las mismas pautas que se explicaron antes.
- d) Si la contribución es “Local” se determina el Factor de Multiplicación Local *FMI* desde las curva de la Fig. 3.4 con la relación X/R y el Tiempo de Apertura de Contactos del IC de que se trate.

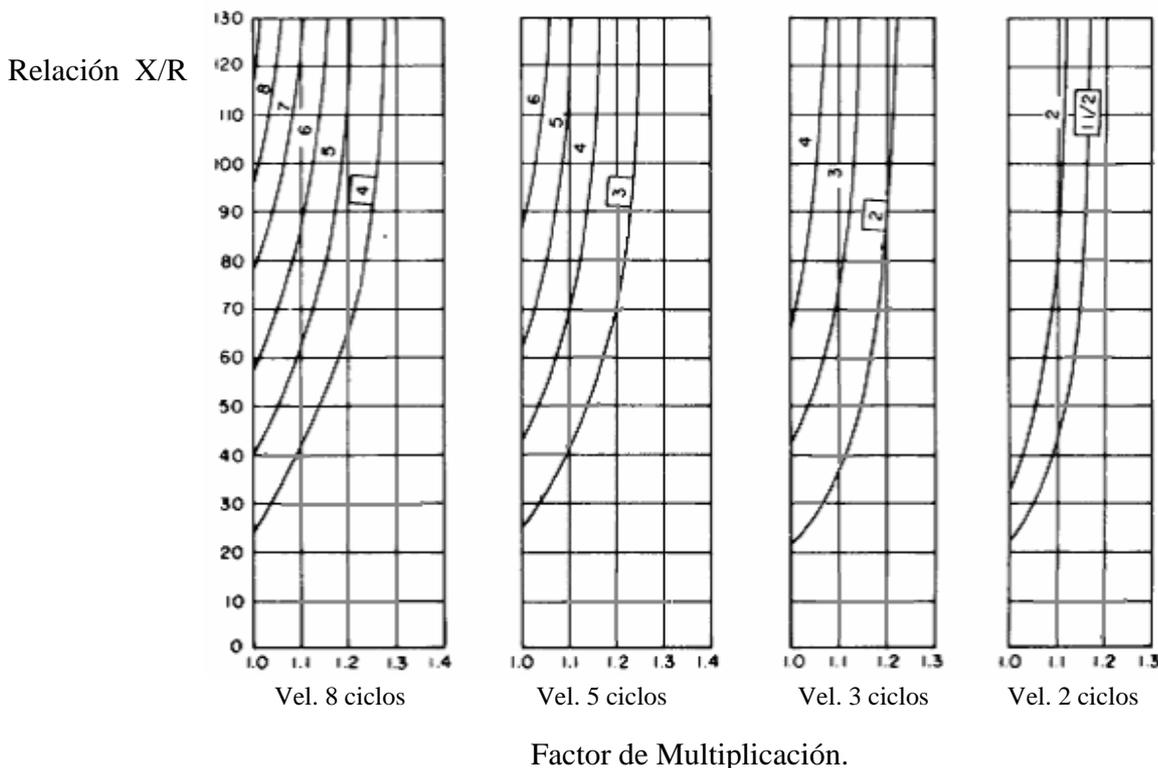


Fig.3.4 Factor de Multiplicación Local Falla Trifásica Base de Corriente Simétrica.

- e) Si la a contribución es “Remota” se determina el Factor de Multiplicación Remoto *FMr* desde las curvas de la Fig. 3.5 [11] o con la relación X/R y el Tiempo de Apertura de Contactos del IC de que se trate [14].

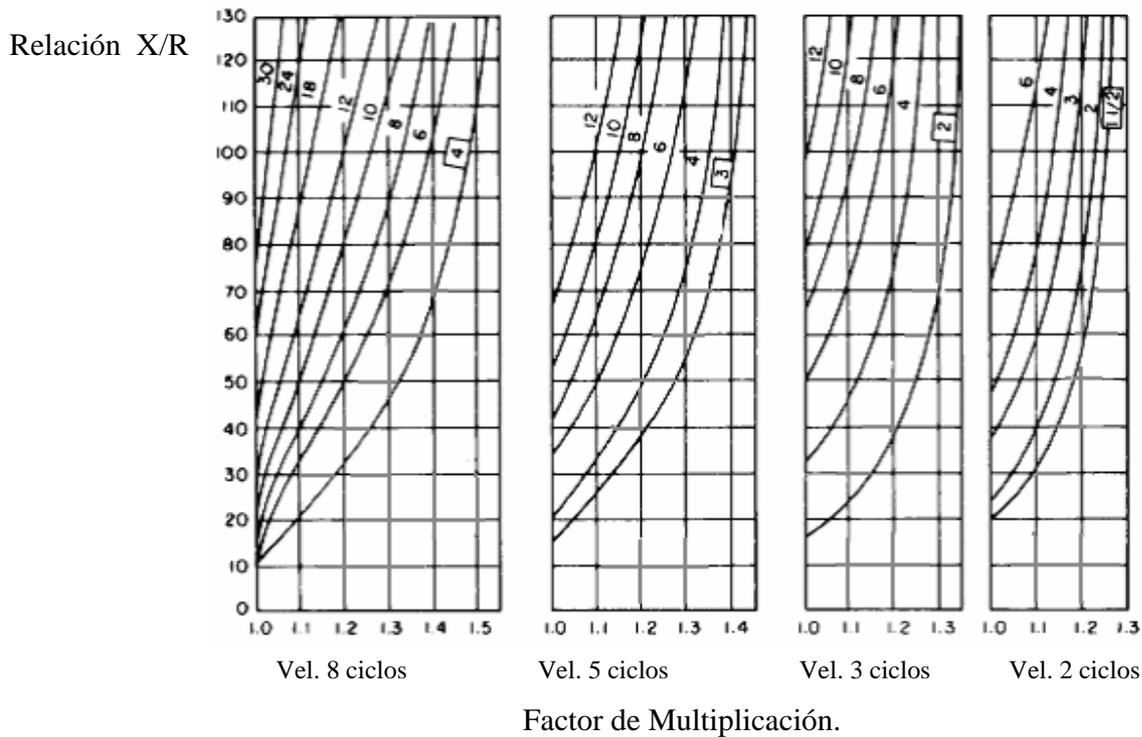


Fig.3.5 Factor de Multiplicación Remoto Falla Trifásica y Línea a Tierra Base de Corriente Simétrica.

f) Cualquiera que sea el caso (local o remoto) se multiplica la corriente obtenida en (3.10) por el Factor de Multiplicación (Local o Remoto) para obtener el Esfuerzo de Interrupción rms Simétrico:

$$\text{Esfuerzo de Int.rms, Sim} = \text{Factor de Multiplicación} * I_{\text{int, rms, sim}} \tag{3.13}$$

Este valor representa el esfuerzo de interrupción rms de la corriente (calculada) de corto circuito simétrica para una falla trifásica franca en un tiempo igual al Tiempo de Apertura de Contactos.

Cuando se trate de una aplicación de ICs esta corriente será comparada con la capacidad de interrupción simétrica del IC (con Base de Corriente Simétrica), ya sea para seleccionarlo o para verificar la capacidad adecuada en uno que ya esté en operación.

### 3.3.8 RED DE 30 CICLOS

Esta red presenta las siguientes características:

- Se usa para calcular las corrientes mínimas, o de estado permanente, que se requieren para operar los relevadores actuados por corriente. Las condiciones de la instalación eléctrica bajo estudio son aquellas donde se tiene la mínima generación. Esto es cuando la carga que se está considerando es aquella que se presenta durante la noche o con carga

mínima. Con estas condiciones y en presencia de falla, algunos interruptores podrían abrir y dejar fuera algunas cargas.

- En esta red, los generadores de la planta misma se representan con su reactancia transitoria o con una reactancia grande que se relaciona con la magnitud del decaimiento de la corriente de corto circuito en el tiempo deseado.
- El tipo de máquina rotatoria y su representación en la Red de 30 Ciclos se muestra en la Tabla 3.5. Nótese que las máquinas de inducción, los motores síncronos y los condensadores no son considerados en el cálculo de fallas en esta red.

Tabla 3.7 Impedancia en la Red de 30 Ciclos.

<u>Tipo de máquina</u>	$X_{sc}$
Suministrador	$X'$
Turbogenerador	$X'$
Hidrogenerador con devanado amortiguador	$X'$
Hidrogenerador sin devanado amortiguador	$X'd$
Condensador	Infinita
Motor síncrono	Infinita
Máquina de inducción	Infinita

- Esta red se usa para determinar corrientes momentáneas de corto circuito y esfuerzos asociados para las aplicaciones que aparecen en la Tabla 3.8 [12].

Tabla 3.8 Aplicación de la Red de 30 Ciclos.

<u>Tipo de Dispositivo</u>	<u>Esfuerzo</u>
Interruptor de circuito de alto voltaje	N/A
Interruptor de circuito de bajo voltaje	N/A
Fusible	N/A
Tableros de interrupción y centro de control de motores	N/A
Relevadores	Ajustes sobrecorriente

---

## CAPÍTULO 4

### LA NORMA IEC

Uno de los procedimientos de cálculo de corrientes de corto circuito se encuentra en las normas IEC (Comisión Internacional de Electrotecnia). Las normas IEC han sido desarrolladas en Europa y abarcan prácticamente todos los temas de la electrotecnia. En particular aquí se presenta los aspectos sobresalientes del estándar IEC 60909 [4] que norma el procedimiento para el cálculo de corrientes de corto circuito en sistemas eléctricos trifásicos de corriente alterna. Esta norma abarca a sistemas de bajo voltaje y a sistemas eléctricos con voltajes nominales de hasta 230 kV. Que tienen frecuencia nominal de 50 o 60 Hz.

Con la Norma IEC 909 se pretende establecer un procedimiento conciso para que los resultados que se tengan sean precisos y de carácter conservador. Los resultados que se encuentran con este procedimiento se pueden usar para la comprobación de algunas características de equipo instalado así como para la selección de equipo en la etapa de planeación.

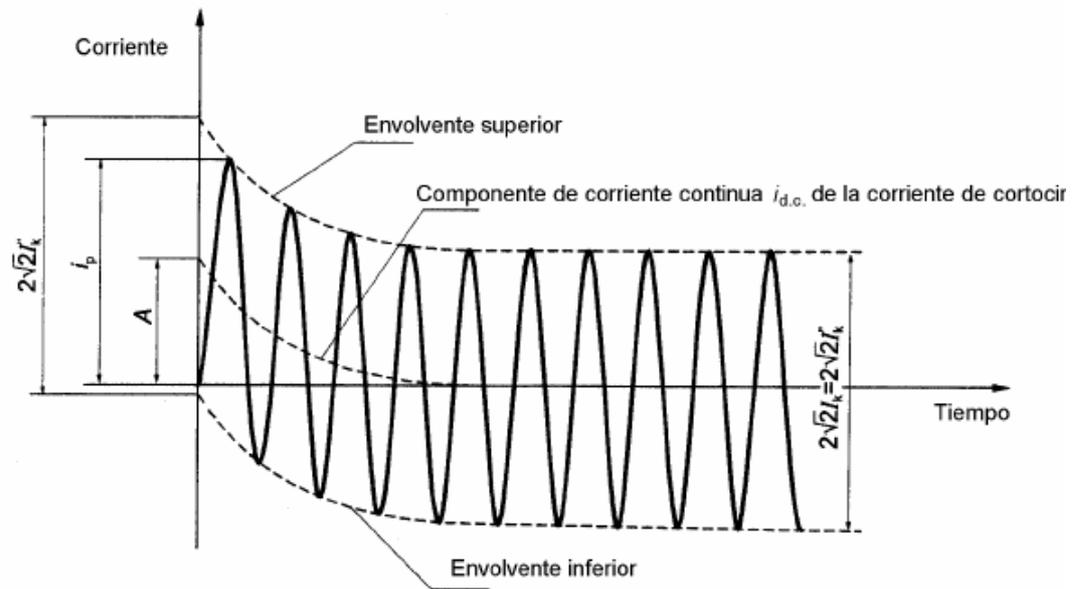
#### 4.1 GENERALIDADES DE LA NORMA IEC

En los cálculos de corriente de corto circuito usando las normas IEC se siguen las siguientes prácticas:

- Los cálculos consideran la distancia eléctrica desde la localización de la falla hasta los generadores síncronos. Así, se hace la siguiente distinción:

**Falla Lejana al Generador:** Sistemas con corriente de corto circuito sin decaimiento en la Componente de CA. Ver Fig. 4.1. Más específicamente, esta es una condición en la cual la magnitud de la Componente de CA de la corriente de corto circuito disponible permanece esencialmente constante.

**Falla Cercana al Generador:** Sistemas con corriente de corto circuito con decaimiento en la Componente de CA. Ver Fig. 4.2. Más específicamente, esta es una condición de corto circuito en la cual por lo menos una máquina síncrona contribuye a la corriente inicial de corto circuito esperada con una corriente de más del doble de la corriente nominal del generador. También se puede pensar como una condición de corto circuito en la cual los motores síncronos y asíncronos contribuyen con más del 5% de la corriente simétrica inicial de corto circuito  $I_k''$  calculada sin motores.



$I_k$  = Corriente simétrica inicial de corto circuito.

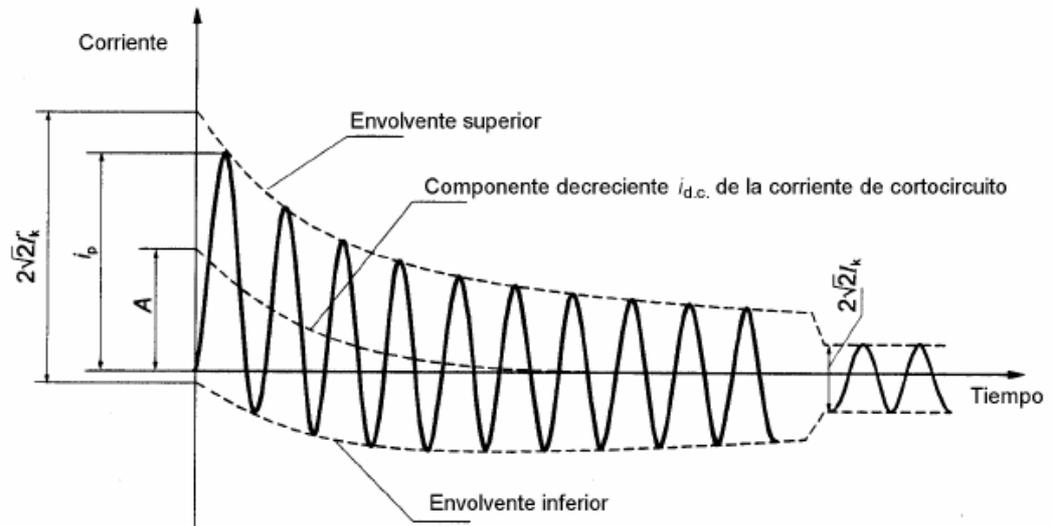
$I_p$  = corriente pico de corto circuito.

$I_k$  = Corriente en estado permanente de corto circuito.

$i_{CD}$  = Componente de CD con decaimiento.

$A$  = Valor inicial de la componente de CD  $I_{CD}$

Fig. 4.1 Corriente de cortocircuito de un cortocircuito alejado de un alternador con componente de corriente alterna constante (representación esquemática) [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]



- $I''_k$  = Corriente simétrica inicial de corto circuito.
- $I_p$  = corriente pico de corto circuito.
- $I_k$  = Corriente en estado permanente de corto circuito.
- $i_{CD}$  = Componente de CD con decaimiento.
- $A$  = Valor inicial de la componente de CD  $I_{CD}$

Fig. 4.2 Corriente de cortocircuito de un cortocircuito próximo a un alternador con componente de corriente alterna decreciente (representación esquemática) [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

- Se asume un sistema trifásico balanceado.
- Se asume una falla franca (sólida) de forma que no se considera la resistencia de un posible arco.
- El procedimiento IEC aplica a fallas balanceadas y desbalanceadas. En el análisis de fallas desbalanceadas se usa el método de componentes simétricas. En este trabajo solo se consideran fallas trifásicas. Estas fallas aparecen en los diagramas de la Fig. 4.3

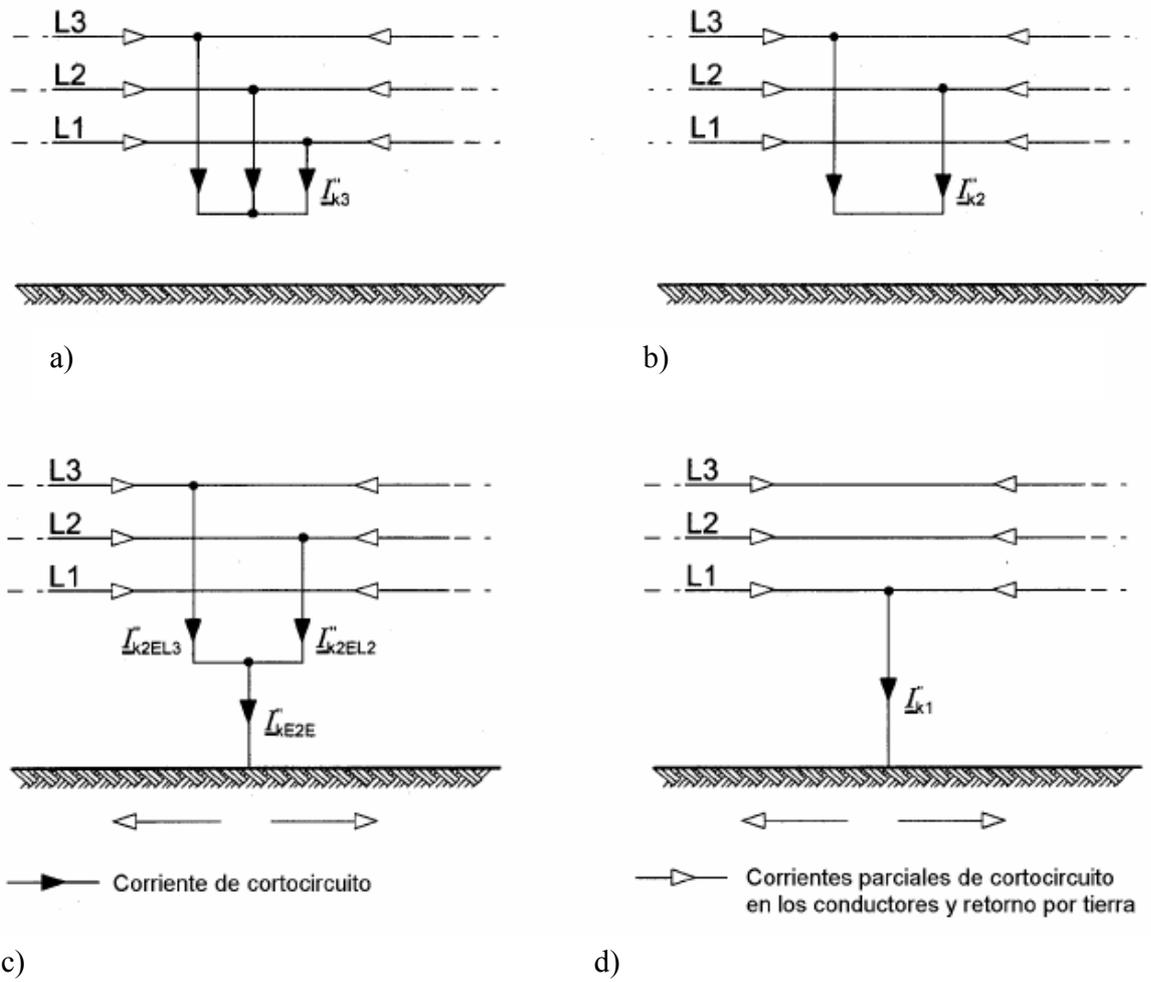


Fig. 4.3 Caracterización de un corto circuito y sus corrientes. La dirección de las flechas de corriente esta elegida arbitrariamente. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

## 4.2 DEFINICIONES Y TERMINOS

Los estándares IEC usan las siguientes definiciones que son muy relevantes en esta parte del trabajo [4]. Aquí se traen desde el glosario. Para una mejor apreciación de los términos obsérvese las Fig. 4.1, 4.2 y 4.3.

- **Corriente de Corto Circuito Simétrica**  
Es el valor rms de la Componente de CA de la corriente de corto circuito (que se espera o que existe) en el punto de falla despreciando la Componente de CD.
- **Corriente de Corto Circuito Simétrica Inicial  $I''_k$**   
Es el valor rms de la Componente de CA de la Corriente de Corto Circuito Simétrica aplicable en el instante de corto circuito, en el tiempo cero.
- **Componente de CD (Aperiodica) de la corriente de corto circuito  $i_{CD}$**   
El valor medio entre la envolvente superior y la envolvente inferior del oscilograma de corto circuito que decae desde un valor inicial A (en el tiempo cero) hasta un valor cero.
- **Corriente de Corto Circuito Pico  $\dot{i}_p$**   
Es el valor instantáneo máximo posible de la corriente de corto circuito (que se espera o que existe) en el punto de falla. Esta corriente varia dependiendo del instante en que ocurre la falla. Así, el cálculo de  $\dot{i}_p$  aplica a la fase y al momento en que se presenta el valor máximo. Observe que la  $\dot{i}_p$  incluye la Componente de CD.
- **Corriente de Corto Circuito Simétrica de Interrupción  $I_b$**   
Es el valor rms de un ciclo completo de la Componente CA de la corriente de corto circuito disponible en el instante de la separación de contactos del primer polo de un interruptor.
- **Corriente de Corto Circuito en Estado Permanente ( $I_k$ )**  
Es el valor rms de la corriente de corto circuito que permanece después del decaimiento del fenómeno transitorio.
- **Tiempo mínimo de retardo ( $t_{min}$ ) de un interruptor de circuito (IC).**  
Es el tiempo mas corto entre el inicio de la corriente de corto circuito y la primera separación de contactos de un polo del dispositivo de interrupción  
Note que  $t_{min}$  es la suma del tiempo de operación mas corto posible de un relevador instantáneo y el tiempo de apertura mas corto de un IC.

• **Componente de CD  $i_{CD}$**

La Componente de CD de la corriente de corto circuito, para el tiempo de retardo mínimo de un dispositivo de protección, se calcula basándose en la corriente de corto circuito simétrica inicial y la relación X/R de la siguiente manera.

$$i_{CD} = I''_k \sqrt{2} e^{\left( -\frac{2\pi f t_{\min}}{X/R} \right)} \tag{4.1}$$

Donde:

$f$  es la frecuencia del sistema.

$t_{\min}$  es el tiempo de retardo mínimo del dispositivo de protección que se está considerando.

X/R es la relación del sistema en el punto de bus falla.

• **Fuente de Voltaje Equivalente  $C U_n / \sqrt{3}$**

El IEC 60909 incluye el concepto de Fuente de Voltaje Equivalente como el único voltaje efectivo de la red para el cálculo de corrientes de corto circuito. Los voltajes internos de los generadores o de la red se ponen en corto circuito y el valor de la fuente equivalente es usado como el único voltaje efectivo en el punto de falla.

El Factor de Voltaje C aparece en la Tabla 4.1 siguiente:

Tabla 4.1 Factor de voltaje C.

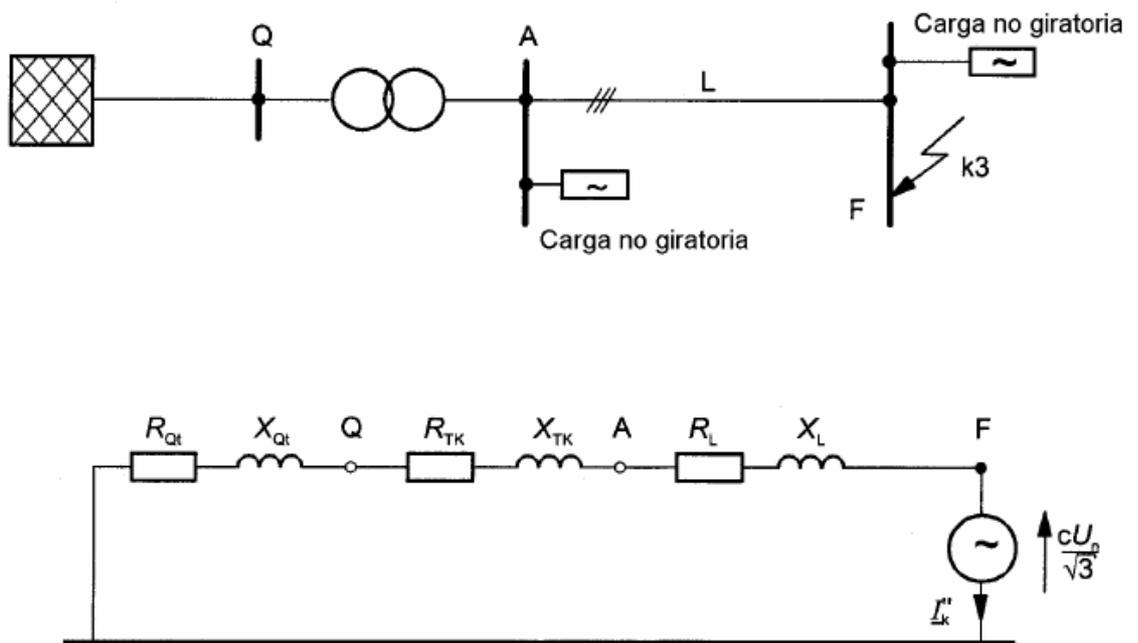
Voltaje nominal $U_n$	Factor de voltaje C	
	Para el cálculo de máxima corriente de corto circuito $C_{\max}$	Para el cálculo de mínima corriente de corto circuito $C_{\min}$
Bajo voltaje: 100V a 1000V		
230V / 400V	1.00	0.95
otros voltajes	1.05	1.00
Voltaje medio: >1 kV a 35kV	1.10	1.00
Alto Voltaje: > 35kV a 230kV	1.10	1.00

NOTA. Los valores de  $c_{\max}$  dados en la tabla anterior son usados como valores por omisión en los cálculos y el usuario puede ajustar estos valores de acuerdo al caso de que se trate.

Con la Fuente de Voltaje Equivalente (y contando con el Factor de Voltaje C) se considera que:

- Se pueden ignorar las cargas estáticas.
- Los cambiadores de derivación de los transformadores (“taps”) se encuentran en la posición nominal.
- La excitación de los generadores es un dato que se puede ignorar.
- Todos los alimentadores de la red, máquinas síncronas y síncronas se representan por sus impedancias internas.
- Todas las capacitancias de la líneas y las cargas estática se desprecian, excepto para aquellas que intervienen en el sistema de secuencia cero.

Aplicando lo anterior, en la Fig. 4.4 se muestra un ejemplo de una fuente equivalente en el punto de falla, para un sistema eléctrico alimentado desde la red de suministro a través de un solo transformador.



- Diagrama del Sistema
- Diagrama del Circuito Equivalente (Secuencia Positiva)

Fig. 4.4 Ilustración del calculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I_k'$  de acuerdo con el procedimiento del voltaje de la fuente. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Obsérvese que:

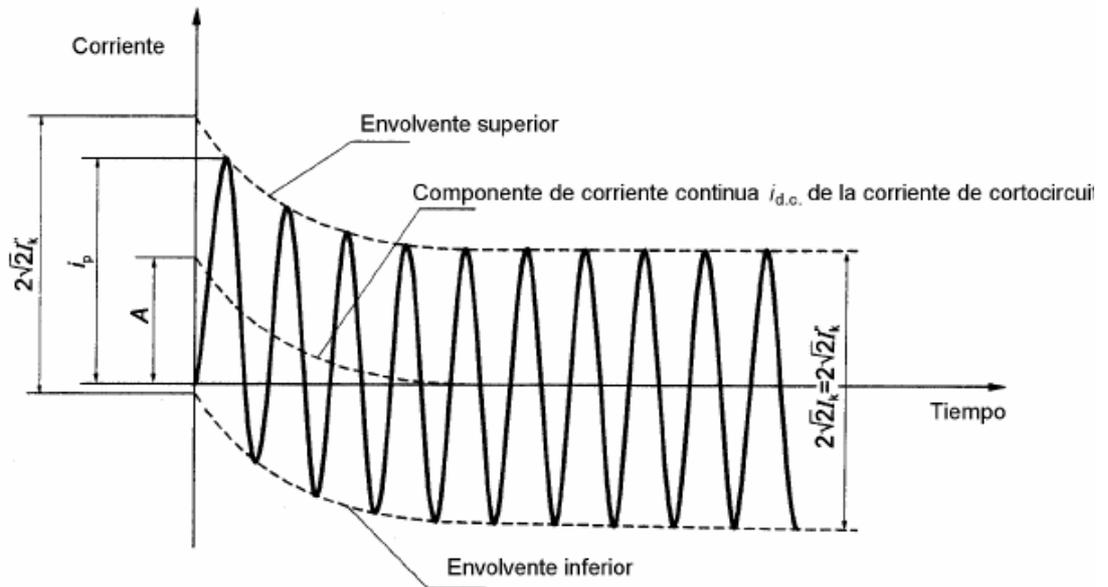
- Solo existe una fuente de voltaje.
- Todos los otros voltajes del sistema se suponen cero.
- El alimentador se representa por su impedancia interna  $ZQ$ .
- Las admitancias en derivación (esto es, capacitancias de líneas y cargas pasivas) no se consideran en los cálculos de corrientes de corto circuito.
- La fuente de voltaje es igual a  $CUn/\sqrt{3}$

En un estudio completo de corto circuito se busca determinar el valor de la corriente de corto circuito, en el punto de falla, en cualquier instante de tiempo. Este valor de corriente de corto circuito es el valor instantáneo. En la aplicación práctica de estudios de falla no es necesario conocer el valor de la corriente en cada instante de tiempo después de ocurrida la falla. Dependiendo de la aplicación que se desee, solo es necesario el determinar ciertos valores de la corriente en ciertos momentos del transitorio (ver Fig. 4.1 y 4.2). En este procedimiento es de interés conocer el valor rms de la componente simétrica de CA y el valor pico  $\dot{i}_p$  de la corriente de corto circuito que se presenta enseguida de la falla. Este valor  $\dot{i}_p$  depende de la constante de tiempo de la Componente de CD ( $i_{CD}$ ) y de la frecuencia del sistema y, como se explicó en el Capítulo 2, se alcanzará el valor más alto cuando la falla se presenta en el momento en que la onda de voltaje está en el valor cero. Al depender de la relación X/R, esto es, al depender de la constante de tiempo, no existe mayor problema en determinar esta relación en redes radiales. Sin embargo, en redes malladas existen diversas constantes de tiempo, por lo que se requiere de métodos especiales para determinar la corriente pico  $\dot{i}_p$  y la componente aperiódica  $i_{CD}$ . En las secciones posteriores se abundará en lo tratado aquí.

### 4.3 FALLA LEJANA AL GENERADOR

En esta sección se trata el procedimiento de cálculo de corrientes de corto circuito para sistemas que no tienen decaimiento en la Componente de CA., como se mencionó en la Sección 4.1. Las condiciones para que estos se presente se pueden resumir en que existen las condiciones de voltaje adecuadas y no existe ningún cambio significativo en la impedancia del circuito pues se esta tratando con impedancia constantes y lineales.

Con el objeto de tener una imagen más reciente y facilitar la comprensión de este tipo de falla, se tiene la Fig. 4.1.



- $I''_k$  = Corriente simétrica inicial de corto circuito.
- $I_p$  = corriente pico de corto circuito.
- $I_k$  = Corriente en estado permanente de corto circuito.
- $i_{CD}$  = Componente de CD con decaimiento.
- $A$  = Valor inicial de la componente de CD  $I_{CD}$

Fig. 4.5 Corriente de cortocircuito de una falla lejos del generador (representación esquemática) [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Note que en este tipo de falla:

- La Componente de CA permanece con un valor de amplitud constante durante toda la duración de la falla.
- La Componente de CD inicia (en el tiempo cero) con un valor igual a  $A$  y paulatinamente cae a cero.
- La componente simétrica de CA es  $I''_k$  y, como  $I_k$ , son valores efectivos (rms) y, además, son iguales:

$$I''_k = I_k \tag{4.2}$$

**4.3.1 IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO**

Las impedancias que se usan son las de secuencia positiva, por ser falla trifásica. A partir de estas se determina la impedancia de falla (Thevenin).

**4.3.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO**

De acuerdo a la configuración que guardan las fuentes de corto circuito con respecto al punto de falla, el IEC define tres tipos de redes y en base a esta clasificación determina los diferentes corrientes del oscilograma de falla.

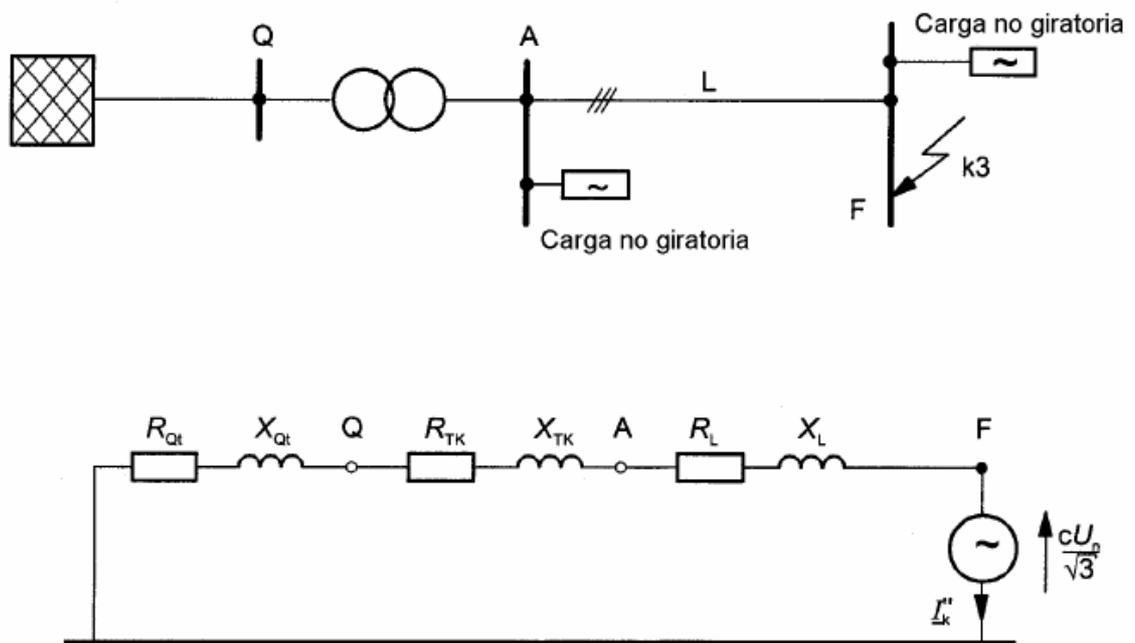
Estos tipos de configuraciones son:

- Configuración Radial con Una Fuente.
- Configuración No Mallada con Varias Fuentes
- Configuración Mallada

Cada una de estas configuraciones se presentará en las siguientes secciones con su procedimiento de cálculo de las diversas corrientes que aparecen en el oscilograma.

**Fallas en Configuración Radial con una Fuente.**

Un ejemplo de esta configuración aparece en la Fig.4.6.



- c) Diagrama del Sistema
- d) Diagrama del Circuito Equivalente (Secuencia Positiva)

Fig. 4.6 Ilustración del calculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  de acuerdo con el procedimiento del voltaje equivalente de la fuente. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

- a) Corriente de Corto Circuito Simétrica Inicial  $I''_k$  .  
Esta corriente se determina con la ecuación siguiente:

$$I''_k = \frac{cUn}{\sqrt{3}Z_k} \quad (4.3)$$

Donde  $Z_k$  es la impedancia equivalente en el punto de falla y está dada por:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

- b) Corriente Pico  $\dot{i}_p$  .

Como la falla es alimentada por un circuito serie, se tiene una sola impedancia compuesta por una sola X y una sola R, de tal forma que se tiene una única relación de X/R y la corriente pico se expresa por:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (4.4)$$

Donde la constante  $\kappa$  es una función de la relación X/R del sistema en el punto de falla y toma en cuenta el decaimiento de la Componente de CD. El factor esta dado (aproximadamente) por:

$$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X} \quad (4.5)$$

También, el factor  $\kappa$  se obtiene de las curvas de la Fig. 4.7, partiendo de las relaciones R/X o X/R.

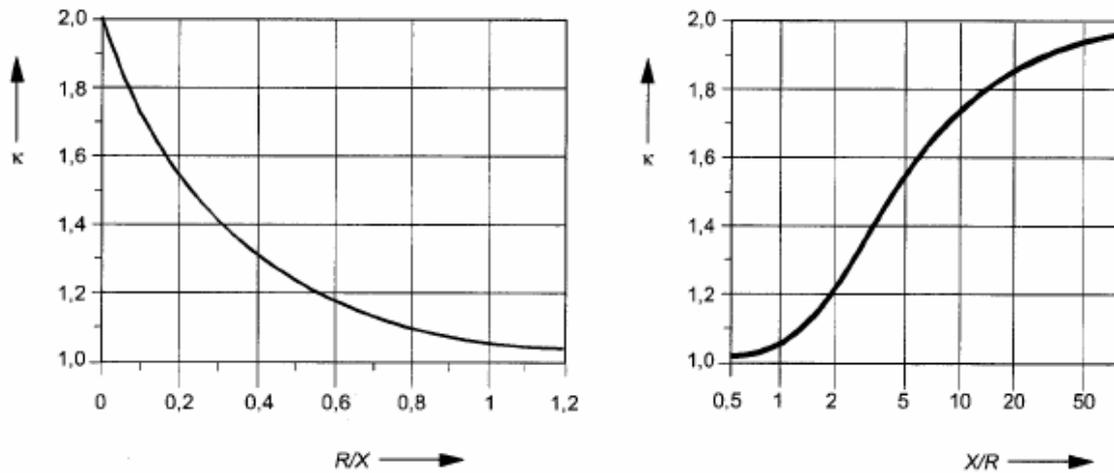


Figura 4.7 Factor  $k$  para circuitos serie en función de: a) razón  $R/X$ ; b) razón  $X/R$  [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

El valor pico  $\dot{i}_p$  ocurre durante el período que sigue inmediatamente después de la ocurrencia del corto circuito. El valor pico determina los esfuerzos dinámicos a que somete las instalaciones la corriente de corto circuito.

c) Corriente de Ruptura  $I_b$ .

Del oscilograma de la Fig. 4.1, se observa que la corriente de ruptura es igual a la corriente de estado permanente y a la corriente inicial simétrica  $I''k$  :

$$I_b = I_k = I''k \quad (4.6)$$

Fallas en Configuración No Mallada con Varias Fuentes

Un ejemplo de esta configuración aparece en la Fig.4.8.

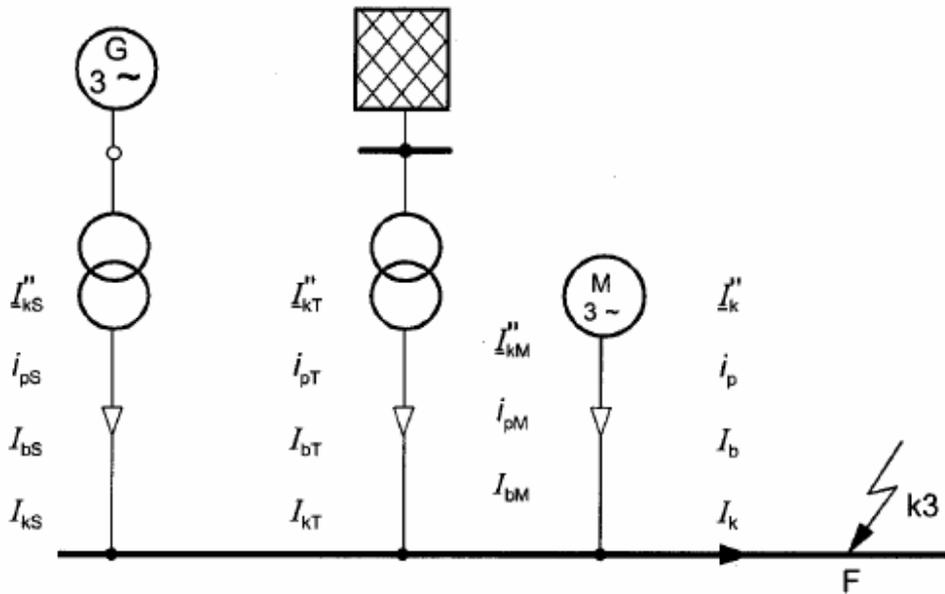


Fig. 4.8 Diagrama del sistema mostrando una falla alimentada por varias fuentes independientes unas de otras. (En algunos casos la impedancia entre el bus B y la localización de la falla F puede ser despreciada). [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

a) Corriente Inicial de Corto Circuito  $I''^k$ .

La corriente  $I''^k$  se compone de la suma fasorial de las corrientes iniciales de corto circuito de cada rama. Para ejemplificar, de la Fig. 4.8, se tiene:

$$I''^k = I''^{kt1} + I''^{kt2} \tag{4.7}$$

b) Corriente Pico  $\dot{i}_p$ .

La corriente pico en el punto de falla se compone de la suma fasorial de las corrientes pico de cada rama.

$$\dot{i}_p = \dot{i}_{pt1} + \dot{i}_{pt2} \tag{4.8}$$

c) La corriente de ruptura  $I_b$  y la corriente de corto circuito de estado permanente  $I_k$  guardan la misma relación que el caso anterior:

$$I_b = I_k = I''^k \tag{4.9}$$

Conviene señalar que cada corriente de corto circuito de rama se calcula de la misma forma que se hace para el caso anterior de red radial alimentada con una sola fuente.

Es común que los ángulos de fase de las corrientes de falla de rama sean muy parecidos, de tal forma que lo que es una suma fasorial se convierte, para muchos casos, en una suma algebraica.

**Fallas con Configuración Mallada**

Una red mallada aparece en la siguiente Fig. 4.9 a). En la Fig. 4.9 b) aparece el circuito equivalente de la red mallada. Observe que  $CUn/\sqrt{3}$  es la fuente de voltaje equivalente y es la única en el circuito equivalente:

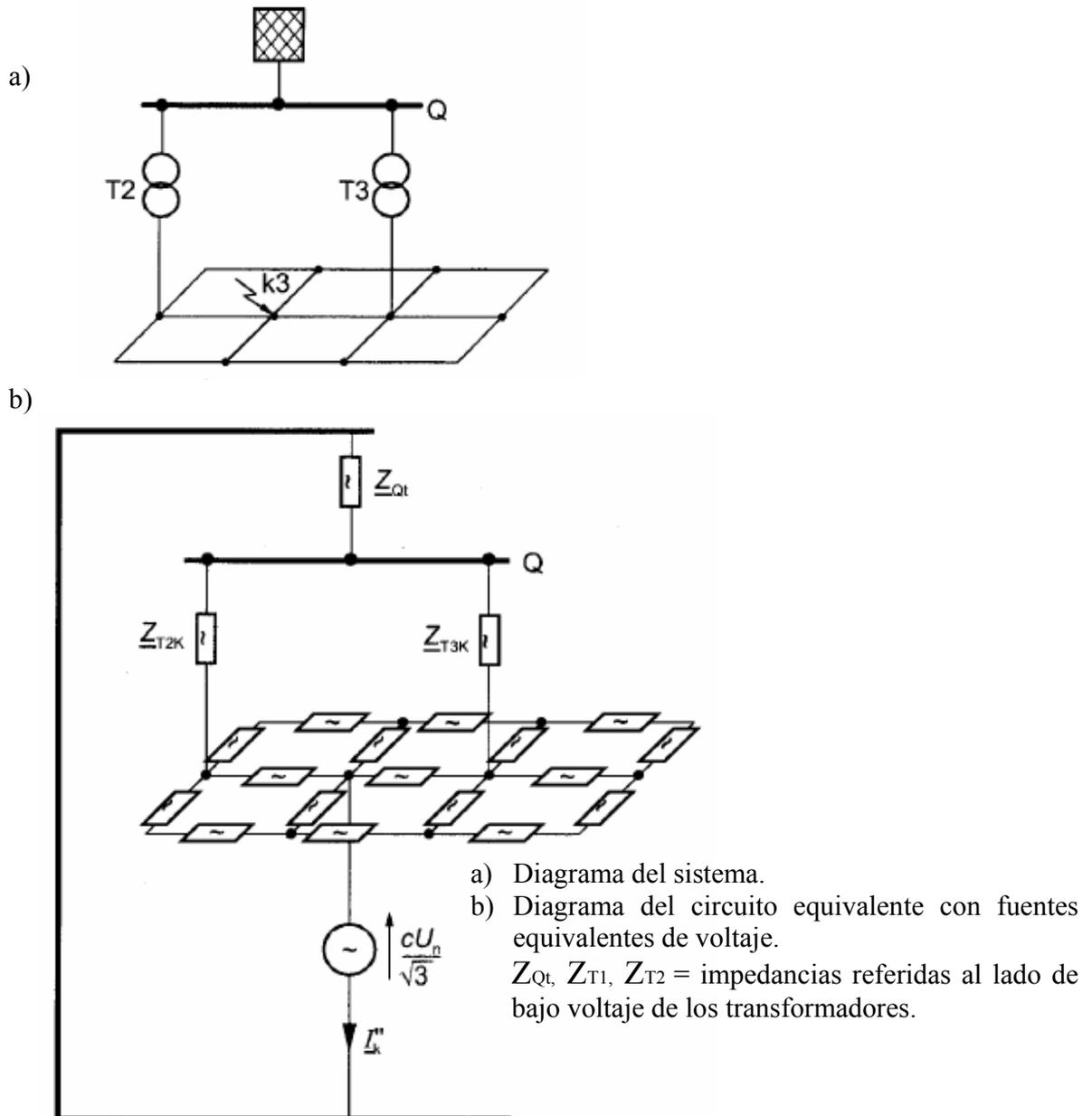


Fig. 4.9 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  en una red mallada. La corriente de corto circuito en la localización de la falla F es suministrada en el punto Q a través de los transformadores T1 y T2.  
[IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

a) Corriente inicial de Coto circuito  $I''k$

$$I''k = cUn / \sqrt{3} \quad (4.10)$$

Se determina con (4.3)

$$I''k = \frac{cUn}{\sqrt{3}Zk}$$

Donde  $Zk = \sqrt{Rk^2 + Xk^2}$  = Impedancia de corto circuito

b) Corriente de Corto Circuito Pico  $\dot{i}_p$ .

La corriente pico en el punto de falla esta dada por:

$$\dot{i}_p = \kappa \sqrt{2} I''k \quad (4.11)$$

En redes malladas  $\kappa$  puede determinarse con cualquiera de los tres métodos siguientes que el IEC 60909 provee [17]:

- Método A. Relación R/X (o X/R) uniforme ( $\kappa = \kappa a$ )

Aquí se hace  $\kappa = \kappa a$ , donde el valor de  $\kappa a$  se determina, de la Fig. 4.7, usando la relación mas pequeña de R/X (o de la más grande de X/R) de todas las ramas de la red bajo estudio. Únicamente se incluyen aquellas ramas que contienen un total de 80% de la corriente a voltaje nominal correspondiente al punto de falla. Las ramas pueden ser una combinación de diversos elementos.

Para redes de bajo voltaje,  $\kappa \leq 1.8$

- Método B. Relación R/X en el punto de falla ( $\kappa = 1.15 \kappa b$ ).

Con este método se hace  $\kappa = 1.15 \kappa b$ . El valor de  $\kappa b$  se determina de la Fig. 4.7, para una relación de X/R donde X y R se obtienen de la impedancia de falla Z. Esta impedancia se determina con la frecuencia nominal (50 o 60 Hz).

Para redes de Bajo Voltaje,  $\kappa \leq 1.8$

Para redes de Mediano Voltaje,  $\kappa \leq 2.0$

Para redes de Alto Voltaje,  $\kappa \leq 2.0$

El factor 1.15 es un factor de seguridad para tomar en cuenta las inexactitudes ocasionadas después de obtener la relación R/X desde una reducción de la red con impedancias complejas.

- Método C. Frecuencia equivalente  $f_c$  ( $\kappa = \kappa_c$ ).

El valor del factor  $\kappa_c$  se determina desde la Fig. 4.7 usando una frecuencia equivalente y una relación alterada de R/X. Esta relación se calcula de la siguiente manera:

Paso1) Se calculan las reactancias de cada rama  $i$  de la red para la frecuencia equivalente  $f_c$  en la red de secuencia positiva:

$$X_{ic} = \frac{f_c}{f} X_i \quad (4.12)$$

donde  $f$  es la frecuencia nominal (50 o 60 Hz).

$f_c$  es la frecuencia equivalente (20 Hz para frecuencia nominal de 50 Hz y 24 Hz para frecuencia nominal de 60 Hz).

Paso 2) se calcula la impedancia equivalente  $Z_c = R_c + j2\pi f_c L_c$  donde  $Z_c$  es la impedancia vista desde el punto de falla del circuito equivalente con una frecuencia  $f_c$ .

Paso 3) se determina la relación ajustada R/X:

$$\frac{R}{X} = \frac{f_c R_c}{f X_c} \quad (4.13)$$

Paso 4) Con esta relación de X/R se entra en la Fig. 4.7 y se obtiene  $\kappa$ .

Notar que también se puede trabajar estos pasos con una relación ajustada de X/R.

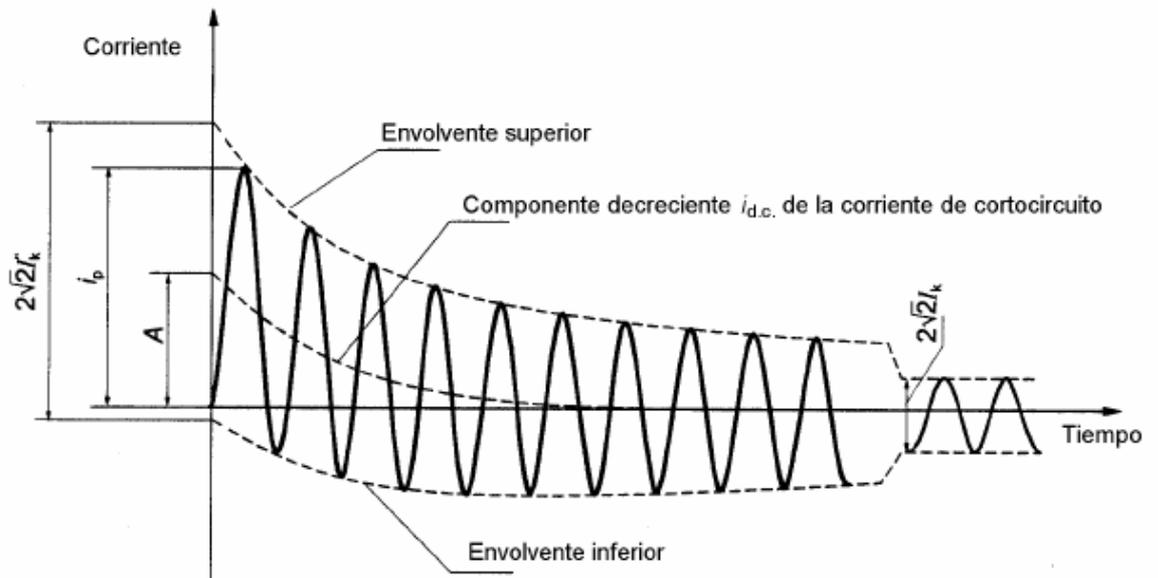
- c) La corriente de ruptura  $I_b$  y la corriente de corto circuito de estado permanente  $I_k$  guardan la relación:

$$I_b = I_k = I''_k \quad (4.14)$$

#### 4.4 FALLA CERCANA AL GENERADOR

En esta sección se describirá el procedimiento de cálculo de corrientes de corto circuito para sistemas donde existe decaimiento en la Componente de CA, como se mencionó en la sección 4.1.

En la Fig. 4.10 aparece el oscilograma donde se aprecia el comportamiento de la corriente de corto circuito en una Falla Cercana al Generador:



- $I''_k$  = Corriente simétrica inicial de corto circuito.
- $I_p$  = corriente pico de corto circuito.
- $I_k$  = Corriente en estado permanente de corto circuito.
- $i_{CD}$  = Componente de CD con decaimiento.
- $A$  = Valor inicial de la componente de CD  $I_{CD}$

Fig. 4.10 Corriente de cortocircuito de una falla cercana al generador (representación esquemática) [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Una falla cercana al generador es un corto circuito en el cual por lo menos una

Como se definió antes, una falla cercana al generador es un corto circuito en el cual por lo menos una máquina síncrona contribuye a una corriente simétrica de corto circuito que es más que el doble de la corriente nominal del generador, o un corto circuito al cual motores síncronos y asíncronos contribuyen con más del 5% de la corriente de falla inicial simétrica  $I''_k$  calculada sin motores.

En la determinación de corrientes de corto circuito para Fallas Lejanas, la falla puede ser alimentada por generadores, estaciones unitarias de potencia (EUP) y motores. Por esto,

el oscilograma se presenta como una corriente de corto circuito que va disminuyendo paulatinamente de valor, de tal forma que no solo la corriente de corto circuito inicial  $I''_k$  y la corriente pico  $\dot{I}_p$ , son de interés sino que al ser diferentes las corrientes de ruptura  $I_b$  y de estado permanente  $I_k$ , se requiere el cálculo de ellas. Así, tendremos para estas fallas:

$$I''_k > I_b > I_k \quad (4.15)$$

Asimismo; de acuerdo al oscilograma y a lo tratado en el Capítulo 2, el valor de la corriente de corto circuito en cualquier instante de la onda será igual a la suma de la Componente de CA (con su decaimiento en amplitud) y la Componente de CD que inicia en el valor A y decae paulatinamente a cero.

Como se mencionó antes, en aplicaciones de estudios de falla como en la determinación de esfuerzos durante el cierre o apertura de interruptores de circuito (ICs) es necesario el cálculo de la corriente que circula en el instante de apertura de contactos ( $t_{min}$ ) del interruptor (ver apéndice D). Por esto se requiere determinar la corriente asimétrica (total) de ruptura  $I_b$  asim partiendo de la corriente simétrica de ruptura  $I_b$  de la componente de CA, y haciendo uso del teorema de superposición, agregarle la corriente  $i_{CD}$  evaluada en el mismo  $t_{min}$ . La corriente total o asimétrica de ruptura estará dada por:

$$I_{basim} = \sqrt{I_b^2 + I_{cd}^2} \quad (4.16)$$

Donde:  $I_{basim}$  = Corriente de ruptura asimétrica rms en el tiempo  $t_{min}$ .  
 $I_b$  = Corriente simétrica rms de la componente CA

La componente de CD de la corriente de corto circuito para el tiempo de retardo mínimo de un dispositivo de protección se calcula basándose en la corriente de corto circuito simétrica inicial y la relación X/R de la siguiente manera.

$$i_{CD} = I''_k \sqrt{2} e^{\left(-\frac{2\pi f t_{min}}{X/R}\right)} \quad (4.17)$$

Donde:

$f$  es la frecuencia del sistema.

$t_{min}$  es el tiempo de retardo mínimo del dispositivo de protección que se está considerando.

X/R es la relación del sistema en el punto de falla.

#### 4.4.1 IMPEDANCIAS DE CORTO CIRCUITO

Las impedancias que se usan son las de secuencia positiva, por ser falla trifásica. A partir de estas se determina la de la falla (Thevenin).

**4.4.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO**

En forma similar a como se hizo Con las Fallas Lejanas, de acuerdo a la configuración y al numero de fuentes de corto circuito con respecto al punto de falla, el IEC define varios tipos de redes y en base a esta clasificación determina los diferentes corrientes del oscilograma de falla. Estos tipos de configuraciones son:

- Configuración Radial con Una Fuente de Corto Circuito.
- Configuración No Mallada con Varias Fuentes
- Configuración Con Varias Fuentes con Impedancia Común.
- Configuración con Redes Malladas.

Se hace notar que en todos los casos de arriba:

- En los circuitos equivalentes existirá una sola Fuente de Voltaje Equivalente,  $CUn/\sqrt{3}$ .
- Las máquinas síncronas se representan con su impedancia subtransitoria.
- Los motores asíncronos se representan con sus impedancias determinadas desde sus corrientes a rotor bloqueado.

Cada una de estas configuraciones se presentará en las siguientes secciones con su procedimiento de cálculo de las corrientes de corto circuito  $I''_k$ ,  $\dot{i}_p$ ,  $I_b$  e  $I_k$ , en el punto de falla, donde el sistema se convertirá a un circuito equivalente con impedancia de falla  $Z_k$ .

**Fallas en Configuración Radial con una Fuente de Corto Circuito**

Dos casos de esta configuración aparecen en la Fig. 4.11.

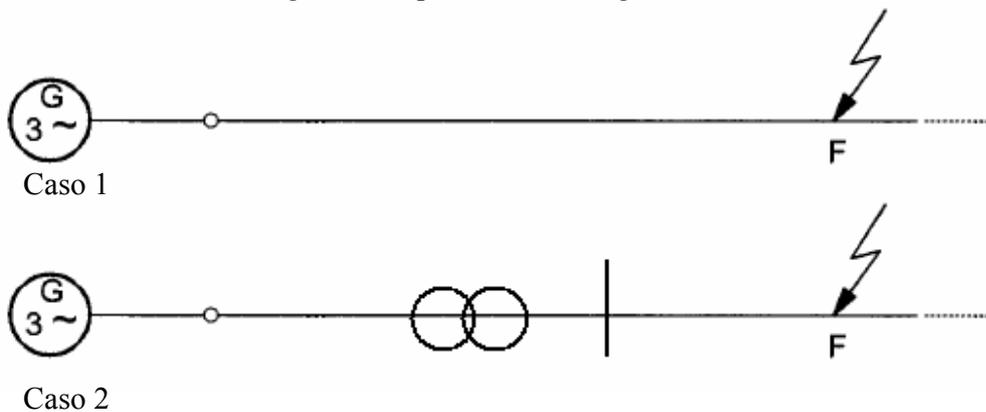
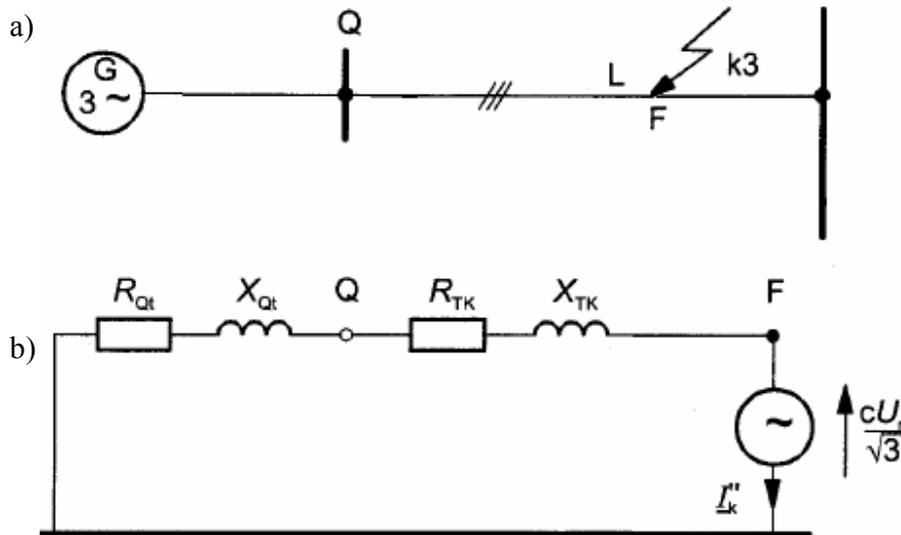


Fig. 4.11 Falla con una sola fuente. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

**Caso 1)** Falla alimentada desde un generador (Sin Transformador).  
El circuito equivalente de este caso aparece en la Fig. 4.12.



- a) Diagrama del Sistema.
- b) Circuito equivalente para el cálculo con la fuente de voltaje equivalente.

Fig. 4.12 Ejemplo para el cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  para una falla alimentada directamente de un generador. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

- a) Corriente Inicial de Corto Circuito  $I''_k$ .  
Se determina con (4.3)

$$I''_k = \frac{cUn}{\sqrt{3}Zk}$$

Donde el valor de C se escoge para la máxima corriente de corto circuito.

- b) Corriente Pico  $I_p$ .

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \tag{4.18}$$

Donde  $\kappa$  se determina con la ecuación ya conocida:

$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X}$  o las curvas de la Fig.4.7. En esta relación se usará un valor corregido de resistencia igual a  $K_g R_g$  y un valor corregido de Reactancia igual a  $K_g X''_d$  [Cláusula 9.1.1.2 de IEC 909]

- c) Corriente Simétrica de Ruptura  $I_b$ .

Al llegar, en el oscilograma, al punto donde se calcula la corriente  $I_b$  (en el tiempo  $t$  min) la corriente de corto circuito ha decaído. Este decaimiento se toma en cuenta con el factor  $\mu$  que modifica a  $I_b$ :

$$I_b = \mu I''_k \tag{4.19}$$

Observe que  $\mu$  dependerá del valor  $t_{\min}$  en que se desee hacer el cálculo y de la relación  $I''_{kG} / I_{rG}$ , de acuerdo al siguiente conjunto de expresiones:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.84 + 0.26e^{-0.26I''_{kG} / I_{rG}} \text{ para un } t_{\min} = 0.02s \\ \mu &= 0.71 + 0.51e^{-0.30I''_{kG} / I_{rG}} \text{ para un } t_{\min} = 0.05s \\ \mu &= 0.62 + 0.72e^{-0.32I''_{kG} / I_{rG}} \text{ para un } t_{\min} = 0.10s \\ \mu &= 0.56 + 0.94e^{-0.38I''_{kG} / I_{rG}} \text{ para un } t_{\min} = 0.25s \end{aligned} \tag{4.20}$$

Los valores de  $\mu$  anteriores aplican al caso donde los turbogeneradores, los generadores de polos salientes y los compensadores síncronos de voltaje medio, son excitados por excitatrices rotatorias o por excitatrices con convertidores estáticos (pensando que para estos últimos el  $t_{\min}$  es menor que 0.25 s y el voltaje máximo de excitación es menor que 1.6 veces el voltaje de excitación a carga nominal).

Se anota que  $\mu=1$  para aquellos casos donde se desconoce el valor exacto. Otra forma de obtener  $\mu$  es usar la Fig. 4.13. Si se tienen valores de  $t_{\min}$  diferentes a los que aparecen en las curvas, se pueden usar interpolaciones entre valores conocidos.

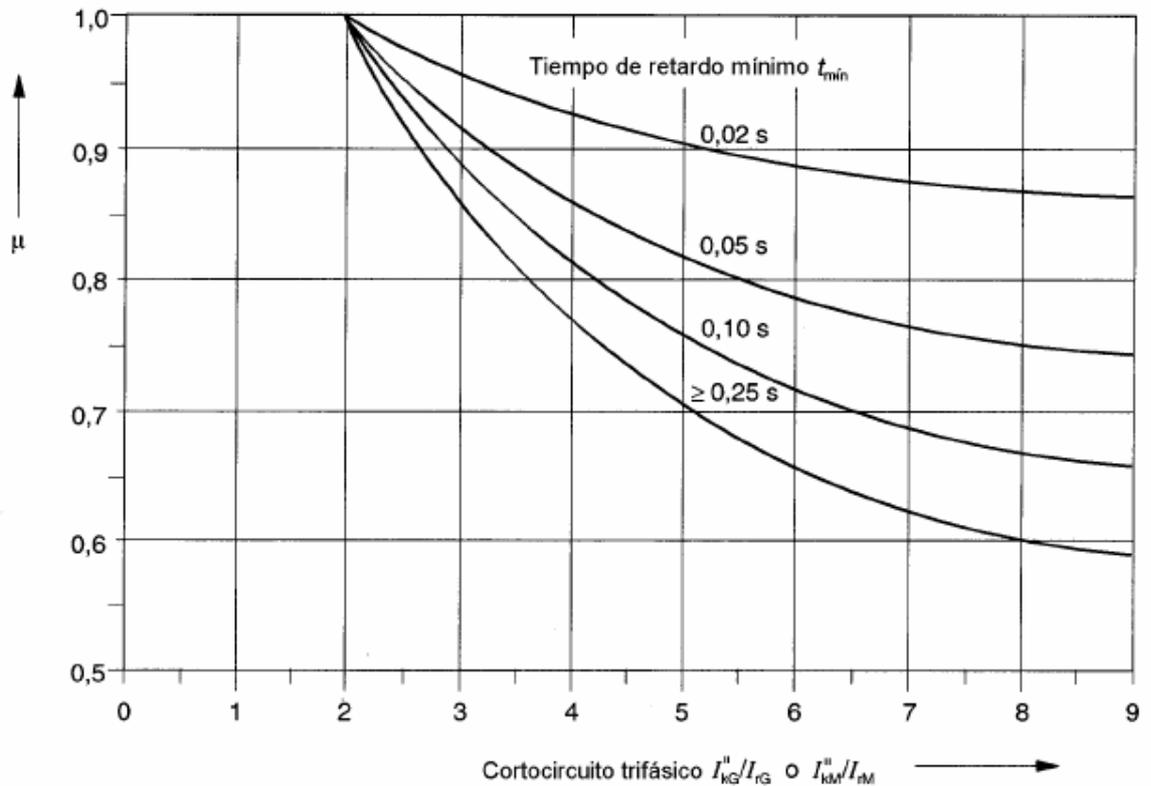


Fig. 4.13 Factor  $\mu$  para el cálculo de corriente de ruptura de corto circuito  $I_b$ .  
[IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Los valores de de la corriente parcial de corto circuito en las terminales del generador  $I''kG$  y los de  $IrG$  se relacionan al mismo voltaje. En el caso de motores asíncronos deberá remplazarse la G por la M. (Ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Cálculo de corrientes de falla de motores asíncronos en el caso de una falla en sus terminales.

Falla	Falla Balanceada	Falla de línea a línea
Corriente de falla simétrica inicial	$I''k3M = \frac{cUn}{\sqrt{3}Zm}$	$I''k2M = \frac{\sqrt{3}}{2} I''k3M$
Corriente pico de falla	$i_{p3M} = XM \sqrt{2} I''k3M$  Motores de alto voltaje: $XM = 1.65$ (correspondiendo a $RM/XM = 0.15$ ) para potencia de motores por par < 1 Mw $XM = 1.75$ (correspondiendo a $RM/XM = 0.10$ ) para potencia de motores por par $\geq 1$ Mw Grupos de motores de bajo voltaje con cables de conexión $XM = 1.3$ (Correspondiendo a $RM/XM = 0.42$ )	$i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3M}$
Corriente de falla simétrica de ruptura	$Ib3M = \mu q I''k3M$  $\mu$ de acuerdo a la ecuación (4.20) o Figura 4.10 $q$ de acuerdo a la ecuación (4.35) o Figura 4.20	$Ib2M \approx \frac{\sqrt{3}}{2} Ib3M$
Corriente falla de estado estable	$Ik3M = 0$	$Ik2M \approx \frac{1}{2} I''k3M$

Si  $I''kG / IrG$  es menor o igual a 2, se hace  $\mu = 1$  para cada  $t$  min .

d) Corriente de Estado Permanente  $Ik$

El cálculo de la corriente de corto circuito en estado permanente desde un generador o un motor síncrono, de acuerdo a la norma IEC, toma en consideración lo siguiente:

- La excitación del generador
- El tipo de máquina síncrona
- Si los generadores son de rotor cilíndrico o de polos salientes
- Los ajustes de la excitación de las máquinas

Al tomar en consideración lo anterior, la corriente de falla con que contribuyen los generadores será una función de su corriente nominal usando factores de multiplicación que se obtendrán desde curvas (en base a parámetros) contra la reactancia síncrona saturada del generador, del ajuste de la excitación y del tipo de máquina. Se consideran dos situaciones:

- **Situación donde  $I_k$  Máxima:** En esta caso se calcula la corriente de corto circuito de estado permanente máxima que se presenta cuando se aplica la más alta excitación al generador síncrono que alimenta la falla de la siguiente manera:

$$I_k \max = \lambda \max IrG \tag{4.21}$$

Donde  $\lambda \max$  es una función del voltaje de excitación (máximo) del generador, de la relación entre su corriente simétrica inicial y corriente nominal y otros parámetros del alternador, e  $IrG$  es la corriente nominal del generador. Se determina de la Fig. 4.14 (Turbogeneradores) o Fig. 4.15 (Máquinas de Polos Salientes). En las dos figuras  $X_{dsat}$  (reactancia saturada en eje directo) es el recíproco de la relación de corto circuito.

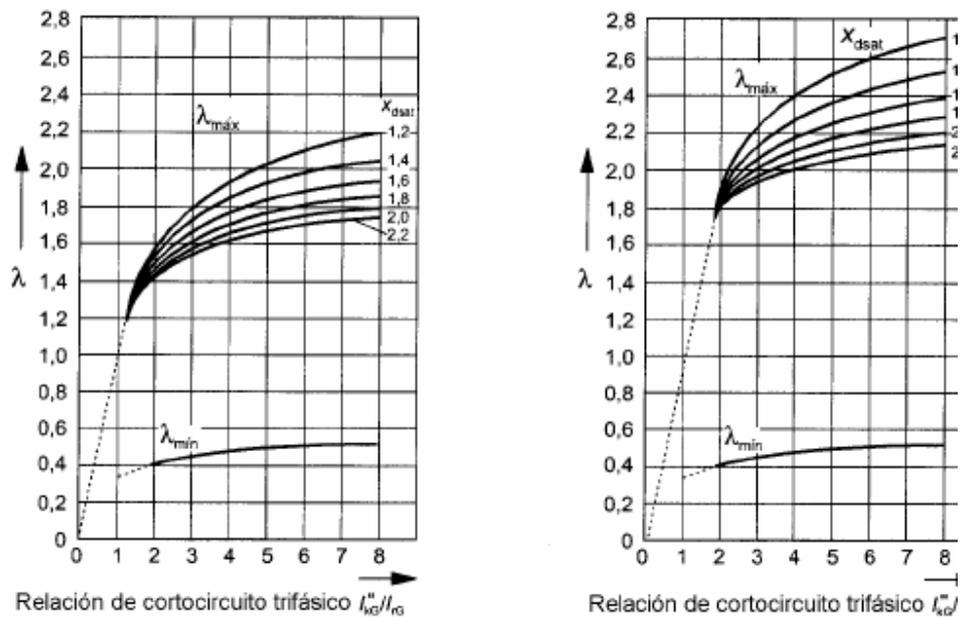


Fig. 4.14 Factores  $\lambda \max$  y  $\lambda \min$  para turbogeneradores [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

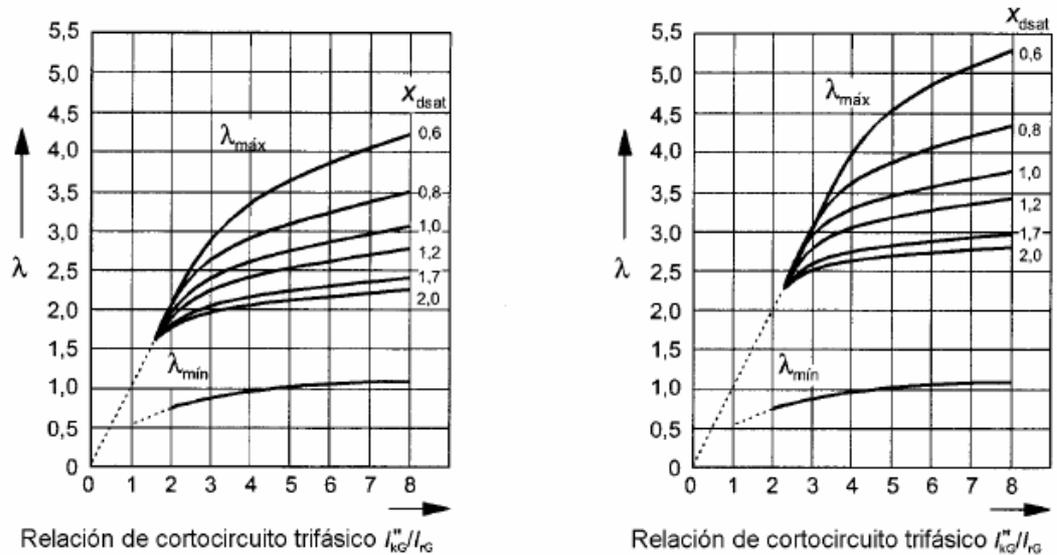


Fig. 4.15 Factores  $\lambda$  max y  $\lambda$  min para máquinas de polos salientes. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Obsérvese que las curvas están identificadas por Serie 1 y Serie 2. Esta identificación obedece las siguientes consideraciones:

Serie 1: El voltaje de excitación más grande posible es 1.3 veces el voltaje de excitación nominal a carga nominal y factor de potencia nominal para Turbogeneradores. Para Máquinas de Polos Salientes esta relación es 1.6.

Serie 2: El voltaje de excitación más grande posible es 1.6 veces el voltaje de excitación nominal a carga nominal y factor de potencia nominal para Turbogeneradores. Para Máquinas de Polos Salientes esta relación es 2.0.

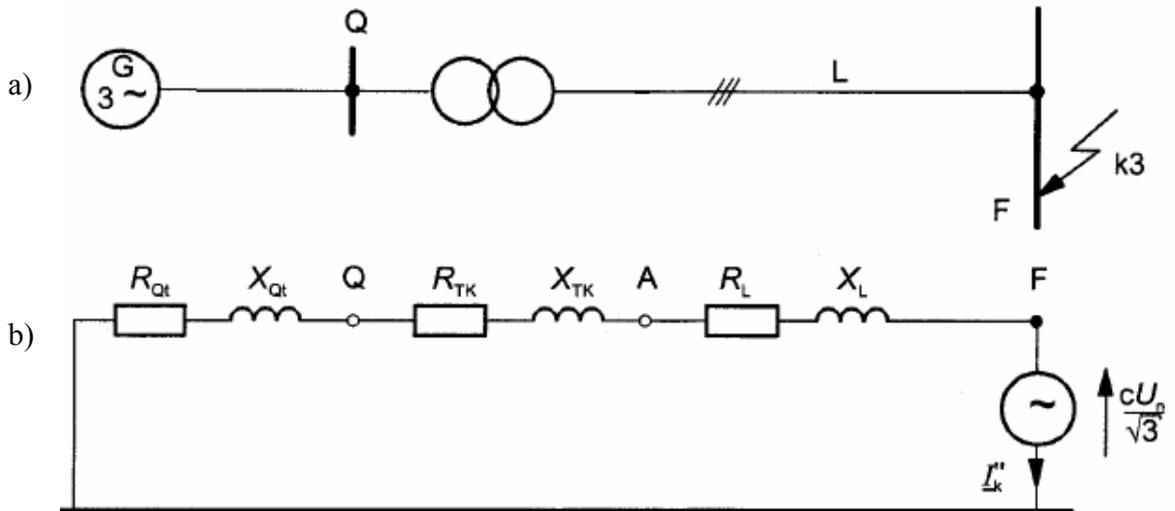
- **Situación donde  $I_k$  Mínima:** En este caso se calcula la corriente de corto circuito de estado permanente mínima que se presenta cuando se aplica una excitación constante sin carga al generador síncrono que alimenta la falla.

$$I_{k \min} = \lambda_{\min} I_r G \tag{4.22}$$

Donde  $\lambda_{\min}$  se determina de la Fig. 4.14 (Turbogeneradores) o Fig. 4.15 (Máquinas de Polos Salientes).

**Caso 2) Falla Alimentada desde una Estación Unitaria de Potencia (EUP)**

El circuito equivalente de este caso aparece en la Fig. 4.16.



- a) Diagrama del Sistema
- b) Diagrama del circuito equivalente de la red de secuencia positiva para el cálculo con la fuente de voltaje equivalente en la localización de la falla y las impedancias corregidas del generador y transformador de la estación unitaria de potencia.

Fig. 4.16 Ejemplo de cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  alimentada por una estación unitaria de potencia [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Para calcular la impedancia de falla consideraremos la impedancia del generador, el transformador y la línea. A partir de esta impedancia se calculará una impedancia corregida para la EUP (Cláusula 11.5.3.8 del IEC909).

a) Corriente Inicial de Corto Circuito  $I''_k$ .

Esta corriente se calcula con la ecuación siguiente:

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \tag{4.23}$$

b) Corriente Pico  $i_p$

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (4.24)$$

Donde  $\kappa$  se determina con la ecuación ya conocida:

$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X}$  o las curvas de la Fig.4.7 (Cláusulas 11.5.3.7 y 11.5.3.8 del IEC909).

c) Corriente Simétrica de Ruptura  $I_b$

El cálculo de esta corriente se realiza de acuerdo a Caso 1) inciso c) con las sustituciones pertinentes (Cláusula 12.2.1.3 de IEC 909).

d) Corriente de Corto Circuito de Estado Permanente  $I_k$ .

El cálculo de esta corriente se realiza de acuerdo a Caso 1) inciso d) con las sustituciones pertinentes adecuadas (Cláusula 12.2.1.4 de IEC 909).

**Fallas en Configuración No Mallada con Varias Fuentes de Corto circuito**

Además de fallas alimentadas desde fuentes no-malladas (Fig.4.17) las fallas alimentadas a través de una impedancia común  $Z$  (Fig. 4.18), pueden calcularse con el procedimiento de esta sección siempre que dicha impedancia reúna los requisitos estipulados en la Cláusula 12.2.3.1 del IEC 909.

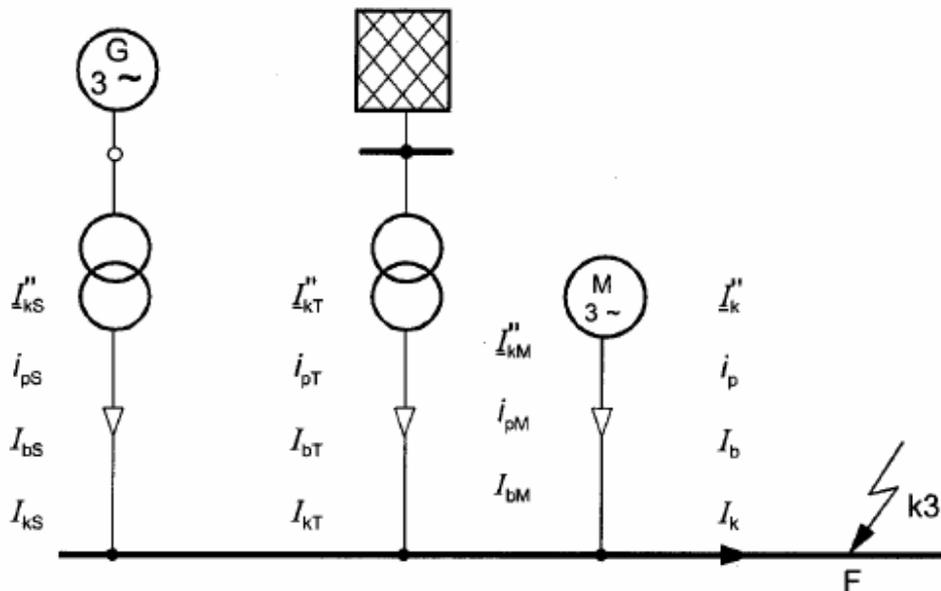
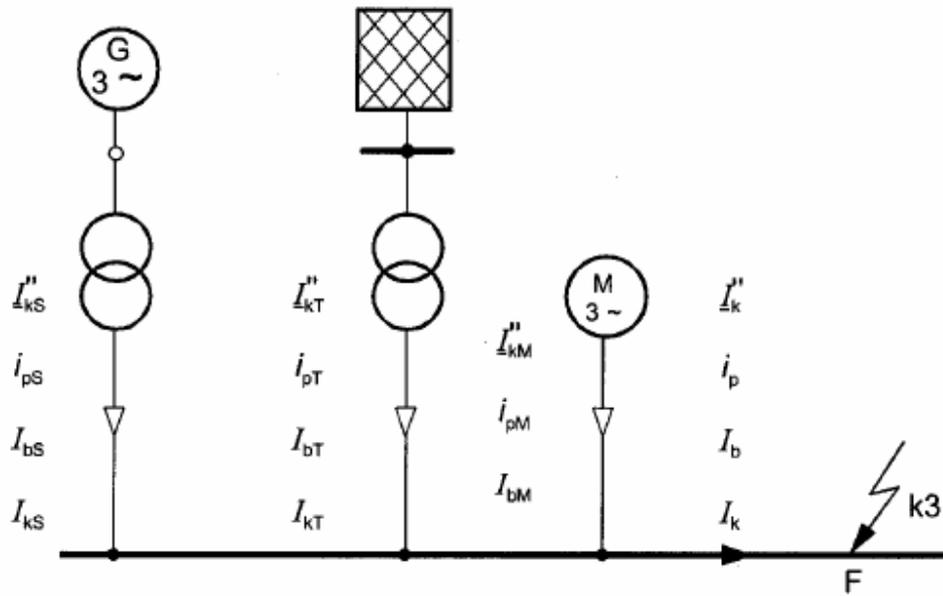


Fig. 4.17 falla alimentada por fuentes no malladas. Cálculos según Cláusulas 12.2.3, 12.3 y 12.4 del IEC909.

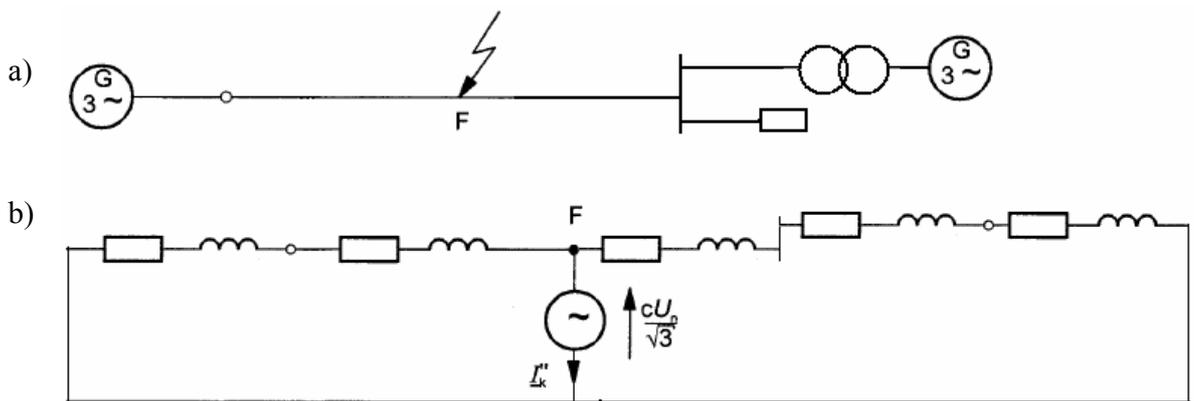
[IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]



$Z$  se desprecia si

$$Z < 0.05 \frac{UnB}{\sqrt{3}I''_k B}$$

Fig. 4.18 falla alimentada desde varias fuentes con impedancia común  $Z$ . Cálculos según Cláusulas 12.2.3, 12.2.4, 12.3 y 12.4 de IEC 909. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]



- a) Diagrama del Sistema
- b) Diagrama del circuito equivalente de la red de secuencia positiva para el calculo con la fuente de voltaje  $cUn/\sqrt{3}$  equivalente en la localización de la falla

Fig. 4.19 Ejemplo del cálculo de la corriente inicial simétrica de corto circuito  $I''_k$  alimentada por fuentes no malladas. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

a) Corriente Inicial de Corto Circuito  $I''k$ .

La corriente  $I''k$  se compone de la suma fasorial de las corrientes iniciales parciales, como se muestra en la Fig. 4.20.

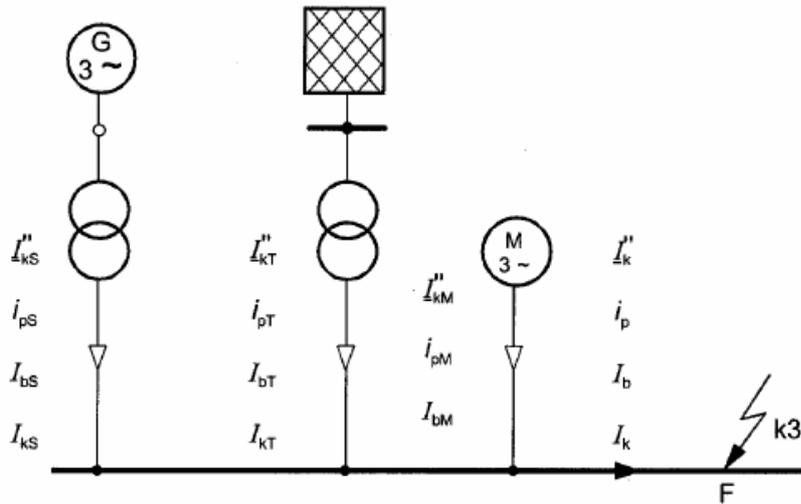


Fig. 4.20 Explicación de el calculo de  $I''k, \dot{i}_p, I_b$  e  $I_k$  para una falla trifásica alimentada desde fuentes no malladas. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

$$I''k = I''k_{UEP} + I''k_T + I''k_M + \dots \quad (4.25)$$

Recordando que los ángulos de las diversas componentes son muy similares, se puede simplificar el cálculo de (4.25) haciendo sumas algebraicas.

b) Corriente Pico  $\dot{i}_p$

$$\dot{i}_p = \dot{i}_pEUP + \dot{i}_pT + \dot{i}_pM + \dots \quad (4.26)$$

c) Corriente de Ruptura  $I_b$

$$I_b = I_bEUP + I_bT + I_bM + \dots \quad (4.27)$$

d) Corriente Permanente  $I_k$

$$I_k = I_bPSU + I''k_T + \dots \quad (4.28)$$

Observar, desde a) hasta d) que:

- Las corrientes parciales se determinan de acuerdo a su configuración (falla con una sola fuente sin transformador, falla desde fuente con transformador, etc.).
- Las aportaciones de los motores se consideran de acuerdo al IEC909.

- Se asume que los generadores producen una corriente de estado permanente de la siguiente manera:

$$IkG \approx IbG \text{ o}$$

$$IkEUP \approx IbEUP$$

- Para alimentadores desde la red :

$$Ik = Ib = I''k$$

- No existe aportación de los motores a la corriente en estado permanente.

**Fallas en Red Mallada.**

La Fig. 4.21 muestra un ejemplo de una red mallada con varias fuentes que alimentan al corto circuito.

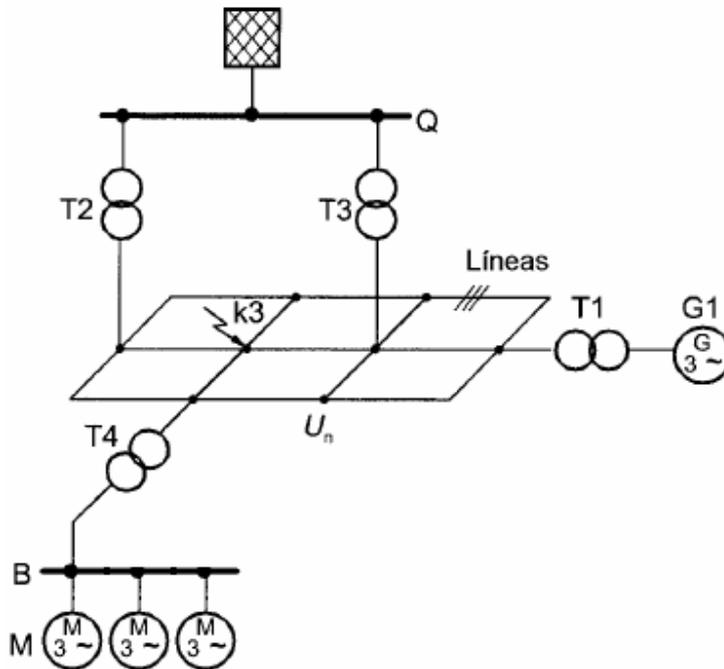
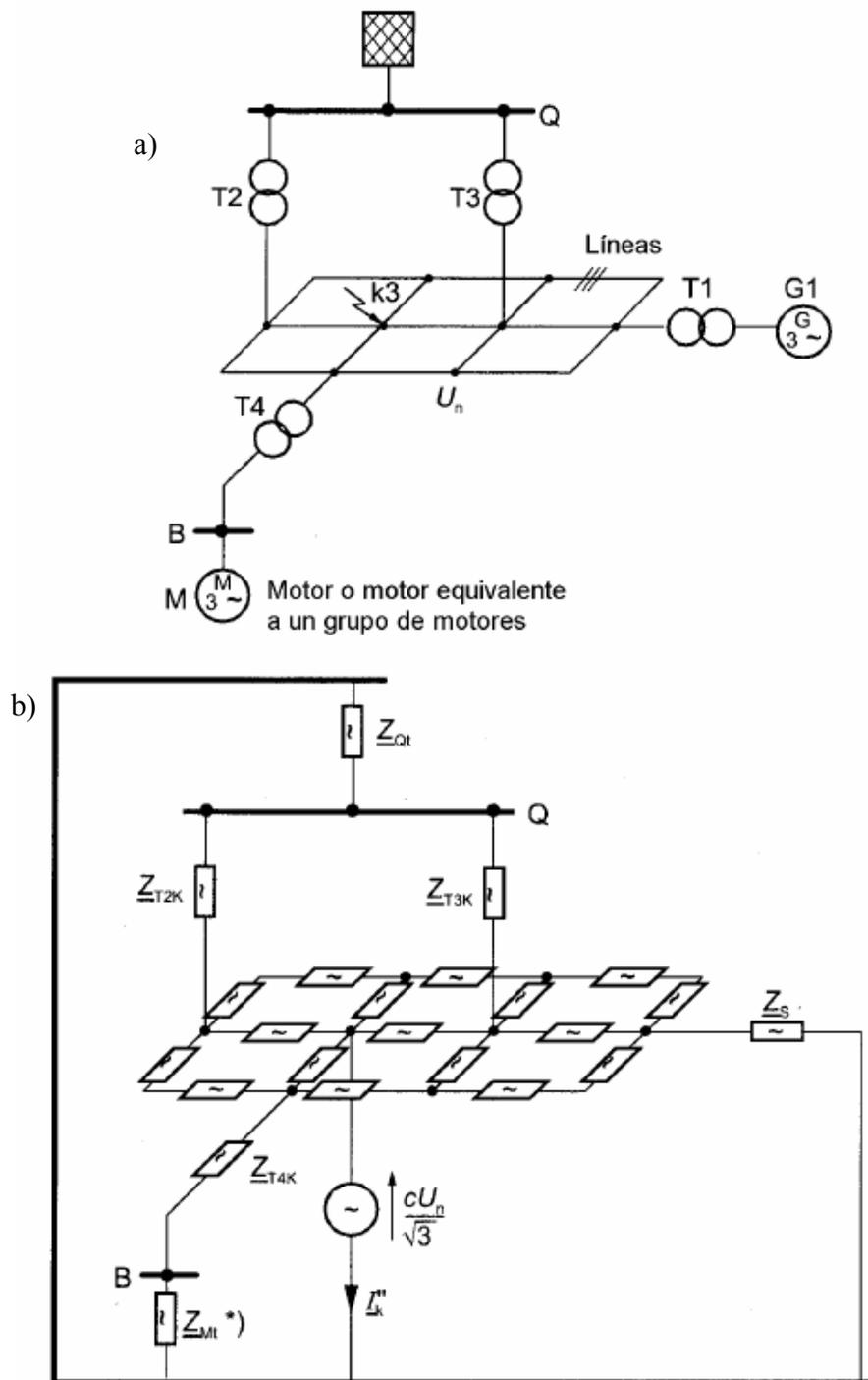


Fig. 4.21 Falla en red mallada. Calculo de acuerdo a las subclausulas 12.2.4, 12.3 y 12.4.

[IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

- a) Corriente de Falla Simétrica Inicial  $I''k$  .

Esta corriente se determina haciendo un circuito equivalente que contiene la fuente equivalente  $cUn/\sqrt{3}$  como se muestra en la Fig. 4.22 siguiente:



a) Diagrama del Sistema  
 b) Diagrama del circuito equivalente para el cálculo con la fuente de voltaje equivalente  $cU_n/\sqrt{3}$  en la localización de la falla  
 Impedancia de un motor o un motor equivalente a un grupo de motores

Fig. 4.22 Ejemplo del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito  $I''_k$  en una red mallada alimentada por varias fuentes [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

Para esta configuración:

$$I''_k = \frac{cUn}{\sqrt{3}Z_k} \quad (4.29)$$

Impedancia de falla según Cláusula (11.5.3) del IEC909.

b) Corriente Pico  $\dot{i}_p$ .

La corriente pico en el punto de falla esta dada por:

$$\dot{i}_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (4.30)$$

Donde  $\kappa$  puede determinarse con cualquiera de los tres métodos A, B o C descritos para redes malladas con falla lejanas.

c) Corriente Simétrica de Ruptura  $I_b$

La corriente simétrica de ruptura para redes malladas esta dada, de manera conservadora, por:

$$I_b = I''_k \quad (4.31)$$

Una expresión más precisa es la siguiente:

$$I_b = \underline{I''}_k - \sum_i \frac{\underline{\Delta U''}_{Gi}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I''}_k G_i - \sum_j \frac{\underline{\Delta U''}_{Mj}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I''}_k M_j \quad (4.32)$$

$$\underline{\Delta U''}_{Gi} = jX''_{di} \underline{I''}_k G_i \quad (4.33)$$

$$\underline{\Delta U''}_{Mj} = jX_{Mj} \underline{I''}_k M_j \quad (4.34)$$

donde  $\underline{\Delta U''}_{Gi}$  y  $\underline{\Delta U''}_{Mj}$  expresan las diferencias del voltaje en los puntos de conexión de la máquina síncrona  $i$  y el motor asíncrono  $j$ . También  $\underline{I''}_k G_i$  y  $-\underline{I''}_k M_j$  son las partes de las corrientes de corto circuito simétrica inicial de la máquina síncrona  $i$  y el motor asíncrono  $j$ ;  $\mu$  se define en la ecuación (4.20) y  $q$  se define en el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned}
 q &= 1.03 + 0.12 \ln m \text{ para un } t_{\min} = 0.02s \\
 q &= 0.79 + 0.12 \ln m \text{ para un } t_{\min} = 0.05s \\
 q &= 0.57 + 0.12 \ln m \text{ para un } t_{\min} = 0.10s \\
 q &= 0.26 + 0.10 \ln m \text{ para un } t_{\min} \geq 0.25s
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l}
 \text{con } m: \\
 \text{la razón de potencia} \\
 \text{de los motores (MW)} \\
 \text{por par de polos}
 \end{array} \quad (4.35)$$

Observe que el factor  $q$ , para motores asíncronos, es función de  $t_{\min}$  y de  $m$ .  
 La constante  $m$  depende de la potencia activa de los motores por par de polos.  
 Si  $q > 1$ , entonces se hace  $q = 1$ . El valor de  $q$  también se determina de la Fig. 4.23

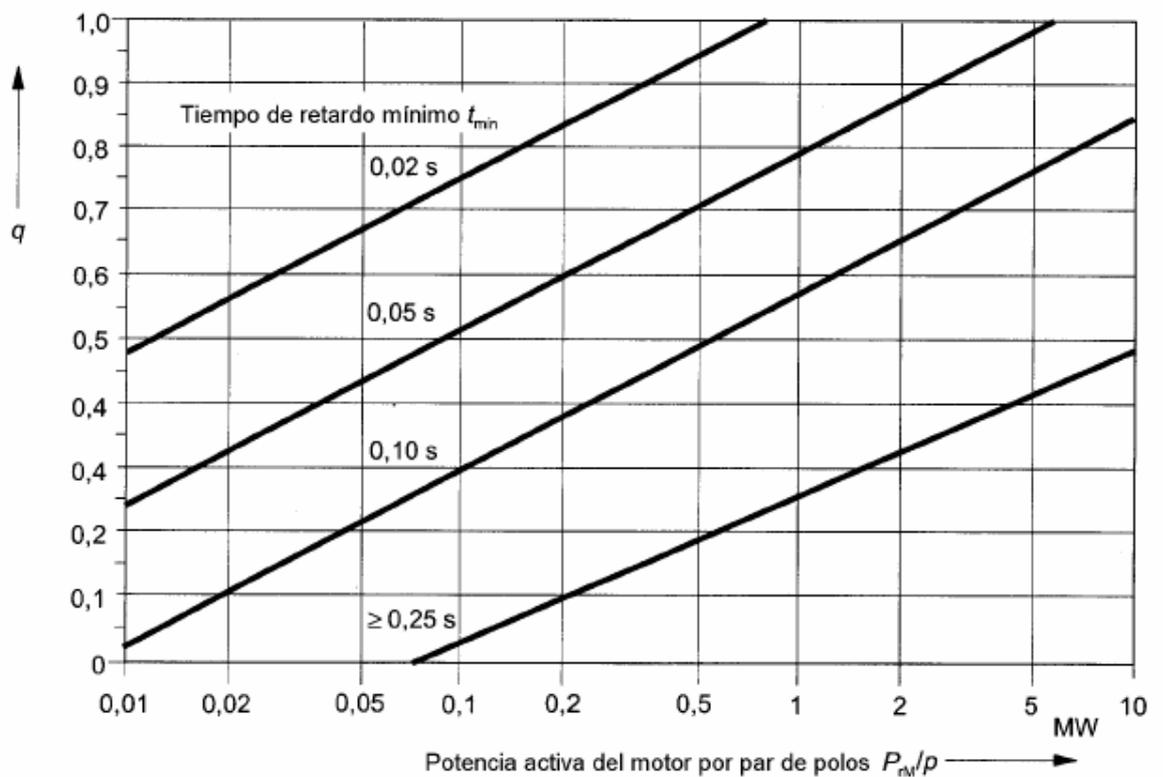


Fig. 4.23 Factor  $q$  para el cálculo de corriente de ruptura de falla de un motor asíncrono. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

d) Corriente de estado permanente  $I_k$

Para la corriente de estado permanente, se desprecian los efectos de los motores. Esto está dado por:

$$I_k = I''_{k, Mout} \quad (4.36)$$

Donde  $I''_{k, Mout}$  es la corriente inicial de corto circuito sin motores.

**4.5 INFLUENCIA DE LOS MOTORES**

Enseguida se considera la influencia de los diversos tipos de motores en su contribución a la corriente de corto circuito.

**4.5.1 MOTORES Y COMPENSADORES SINCRONOS**

- En el cálculo de  $I''_k$ ,  $\dot{i}_p$ ,  $I_b$  e  $I_k$  los motores y compensadores son tratados como generadores síncronos.

**4.5.2. MOTORES ASINCRONOS:**

- Contribuyen a  $I''_k$ ,  $\dot{i}_p$  e  $I_b$ . En fallas balanceadas no contribuyen a  $I_k$ .
- Los motores de bajo voltaje en sistemas de suministro de redes públicas pueden ser despreciados.
- Los motores de alto y bajo voltaje que están conectados a través de un transformador de dos devanados, a la red donde se presenta la falla, pueden ser despreciados si:

$$\frac{\sum Pr M}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0.8}{\left| \frac{c100 \sum S_{rT}}{S''_k Q} - 0.3 \right|} \tag{4.37}$$

Donde las sumatorias se determinan de acuerdo a lo establecido en la Fig.4.24 siguiente:

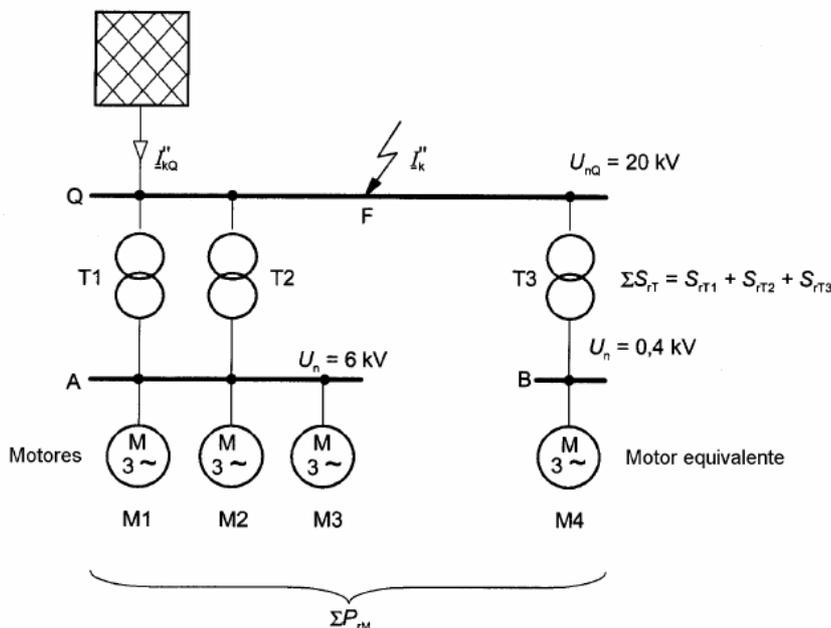


Fig. 4.24 Ejemplo para la estimación de la contribución de motores asincrónicos en relación al total de corriente de falla. [IEC 60909 – 0 – 1ª Edición 2001]

- La corriente de ruptura  $I_b$  para motores asíncronos se calcula con la siguiente expresión:

$$I_b = \mu q I^n \quad (4.38)$$

El factor  $q$  se encuentra desde el conjunto de ecuaciones (4.35) o de la Fig. 4.20.

- Grupos de Motores de Bajo Voltaje  
Para simplificar los cálculos, pueden combinarse grupos de motores de bajo voltaje, incluyendo sus cables de conexión, para formar un motor equivalente (por ejemplo el Motor M4 de la Fig. (4.21). Para este motor equivalente se tiene:

$I_{rM}$  = Suma de corrientes nominales de todos los motores en el grupo.

Relación de corriente a rotor bloqueado a corriente nominal a plena carga =  $I_{LR}/I_{rM} = 5$

$R_M/X_M = 0.42$ ,  $\kappa_M = 1.3$  y  $m = 0.05$  MW si no se tiene el dato.

$$(4.39)$$

La corriente de corto circuito parcial de motores de bajo voltaje se desprecia si la corriente nominal del motor equivalente (suma de capacidades del grupo de motores) y la corriente simétrica inicial en el bus de bajo voltaje al cual estos motores están directamente conectados, sin la contribución de los motores, guardan la siguiente relación:

$$I_{rM} \leq 0.011 I^n \kappa, Mout \quad (4.40)$$

---

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO IEC vs ANSI/IEEE

En este capítulo se tiene una sección donde se enfatizan las características relevantes de las normas que son esenciales para el análisis comparativo. Así, se trabaja con los conceptos correspondientes, tanto para corrientes como para esfuerzos, que servirán como base comparativa entre las dos normas. En la sección siguiente se hace la aplicación de las normas IEC y ANSI/IEEE a un sistema eléctrico típico que sirve de prueba y que contiene los elementos necesarios para un estudio de corto circuito y se procede a realizar un estudio de falla trifásica de corto circuito. Los cálculos de falla se realizan aplicando ambas normas. Para estos cálculos se usó un paquete digital comercial que, entre otras características, tiene una herramienta para el cálculo de fallas llamado ETAP [12]. En la última sección de este capítulo se realiza propiamente el análisis comparativo de las dos normas usando los resultados numéricos arrojados con las dos normas en el estudio de corto circuito de los diversos conceptos de corrientes y esfuerzos de corto circuito.

#### 5.1 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE LAS NORMAS IEC Y ANSI/IEEE PARA EL ESTUDIO COMPARATIVO

Como se mostró en los capítulos iniciales, en los oscilogramas de corriente de corto circuito existen los decaimientos de CA y de CD. La consideración y cálculo de estos decaimientos son fundamentales en la determinación de las corrientes de corto circuito en los dos procedimientos de las normas IEC y ANSI. Asimismo la determinación de los esfuerzos correspondientes a estas corrientes de corto circuito dependerá en gran medida del cálculo e inclusión de los decaimientos de CA y CD. Siendo común que los resultados finales de estudios de análisis de fallas se usen en la determinación de la capacidad de los medios de protección y en la coordinación de dispositivos de protección es entonces muy importante determinar correctamente el decaimiento de CA y CD en ambos procedimientos.

El decaimiento de CA esta relacionado con la tendencia inherente a las máquinas de incrementar sus reactancias con el tiempo desde que se establece la corriente de corto circuito. Esto es, la reactancia de las maquinas cambia, como se dijo en capítulos anteriores, desde un valor conocido como reactancia subtransitoria, pasando por la reactancia transitoria, hasta la reactancia síncrona.

Por su parte, el decaimiento de CD esta estrechamente relacionado con el instante exacto de interrupción y con las propiedades de amortiguamiento del circuito interrumpido.

El determinar y tomar en cuenta los decaimientos de CA y CD, para ambas normas, lleva una fuerte complejidad en la modelación y determinación de las corrientes de corto circuito. La complejidad aumenta al considerar sistemas eléctricos que contienen varias máquinas. Esta complejidad se ve reducida si se adoptan simplificaciones mediante la incorporación de algunas suposiciones sobre los modelos de los componentes de los sistemas eléctricos. Estas suposiciones permiten analizar redes lineales con menos dificultad. Estas suposiciones fueron incorporadas en los procedimientos de la IEC y la ANSI/IEEE.

Enseguida y siguiendo la metodología descrita en [15,22, 24] se describirán y analizarán aquellas características y conceptos relevantes de las corrientes de corto circuito de las dos normas que permitan una comparación entre ellas.

**5.1.1 Corrientes y esfuerzos IEC y ANSI/IEEE**

Las principales corrientes de falla reconocidas por IEC y ANSI se listan en la Tabla 5.1 El que se coloquen de la manera en que están no significa, que estas corrientes que están en pares sean iguales, de hecho cualitativamente son diferentes. Podríamos decir que son correspondientes.

Tabla 5.1 Principales tipos de corriente de ANSI y IEC 909.

Tipo de Esfuerzo	Corrientes ANSI	Corrientes IEC 909
1	Primer Ciclo o Momentáneo	Inicial ( $I''k$ )
2	Cerrado – Trabado	Pico ( $ip$ )
3	Interrupción	Ruptura ( $Ib$ )
4	Retardo de Tiempo	Estado Permanente ( $Ik$ )

**5.1.2 Aspectos de modelación del decaimiento de CA**

Cuando se calculan las corrientes simétricas de interrupción, ANSI/IEEE recomienda factores multiplicadores para las reactancias subtransitorias y transitorias del equipo rotativo. Estos multiplicadores son una función del tipo de esfuerzo (para tomar en cuenta el tiempo transcurrido desde el inicio de la falla), del tamaño de la máquina (HP), y de la velocidad (revoluciones por minuto). Estos multiplicadores son independientes de la proximidad de la máquina a la falla y del tiempo de apertura de los contactos del interruptor. La primera columna de la Tabla 5.2 lista los factores ANSI/IEEE con previsiones para el análisis de primer ciclo (momentáneos) de sistemas que incluyen circuitos de bajo voltaje.

La norma IEC no recomienda un multiplicador de ajuste de reactancias para la carga rotatoria. El decaimiento CA es modelado considerando el tipo de máquina, el tamaño y la velocidad (MW por par de polos), el tiempo exacto de apertura de contactos y la proximidad de la máquina a la falla. El procedimiento de la IEC no se basa en curvas para modelar el decremento AC para estaciones de generación, la cual es una práctica favorecida en los ANSI C37.5 y ANSI C37.010.

Además la guía ANSI/IEEE clasifica la falla como “local” o “remota”, del generador a la falla. En cambio, el IEC clasifica a las fallas como “cercana” o “lejana” al generador (presente en el decremento CA), para cuantificar la aportación del generador y también de las máquinas rotatorias de carga. En el IEC, el concepto de falla “cercana” o “lejana” es

muy importante en la modelación de máquinas para cálculo de corriente de falla de ruptura y en estado permanente.

Tabla 5.2 Multiplicadores ANSI de reactancias de las máquinas.

Tipo Máquina	Red de Primer Ciclo (Momentánea)	Red de Interrupción
Turboalternadores	1.0 $X''d$	1.0 $X''d$
Hidro con Amortiguadores	1.0 $X''d$	1.0 $X''d$
Condensadores	1.0 $X''d$	1.0 $X''d$
Hidro sin Amortiguadores	0.75 $X'd$	0.75 $X'd$
Motores Síncronos	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
<b>MOTORES DE INDUCCION</b>		
Mayores de 1000 Hp De 1800 RPM o Menos	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
Mayores de 250 Hp a 3600 RPM	1.0 $X''d$	1.5 $X''d$
Todos los otros 50 Hp y más	1.20 $X''d$	3.0 $X''d$
Menores de 50 Hp. Menores de 50 Hp(Para sistemas de voltaje múltiple)	Se ignoran 1.67 $X''d$	Se ignoran Se ignoran

### 5.1.3 Aspectos de modelación del decaimiento de CD

ANSI recomienda aplicar multiplicadores a las corriente simétricas de falla para obtener las corrientes asimétricas. Un concepto central en el ANSI/IEEE en el cálculo de del decaimiento de DC, es la relación X/R en el punto de falla [11]. Los mismos estándares requieren una red de reactancias para determinar la reactancia equivalente (reactancia de Thevenin) en el punto de falla y una red, separada, de resistencias de red para determinar una resistencia equivalente (resistencia de Thevenin). Su relación es la relación X/R requerida para determinar los multiplicadores necesarios. Este recurso se recomienda para considerar las numerosas constantes de tiempo presentes en sistemas de varias máquinas.

La norma IEC no considera que deba usarse solamente una relación X/R. En vez de esto, en general, considera más de una relación X/R. Este procedimiento, el cual se aplica cuando fuentes independientes alimentan la falla, se basa en el principio de superposición.

Esto se aplica para las corrientes pico  $i_p$ , así como para el cálculo de la Componente de CD de las corrientes de ruptura asimétricas  $I_{basim}$ . Estas consideraciones y sus correspondientes implementaciones en los cálculos de corrientes son determinantes y diferencian fuertemente al procedimiento IEC del ANSI/IEEE.

#### 5.1.4 Voltajes de prefalla

La norma ANSI/IEEE recomienda un voltaje de prefalla de 1.0 p.u. en el bus fallado. El procedimiento IEC recomienda que se apliquen diversos factores de multiplicación de voltaje de prefalla para tomar en cuenta las derivaciones del transformador, las cargas del sistema, el comportamiento subtransitorio de las máquinas rotatorias, etc. Estos factores aparecen aquí en la Tabla 5.3. Se observa que se aplican diferentes factores de voltaje de prefalla para el cálculo de corriente de fallas máximas y mínimas.

En la aplicación de factores de voltaje de prefalla IEC recomienda algunos ajustes a la impedancia equivalente de las redes de suministro y de los generadores. Los ajustes toman en cuenta la carga del generador antes de la falla y el factor de voltaje mismo [4]. En algunos casos esto puede extenderse a transformadores asociados con las plantas generadoras. Para el objetivo de este estudio se supone que no existe carga antes de la falla.

Tabla 5.3 Factores de voltaje de prefalla IEC.

Voltaje Nominal en kV	Factor de Voltaje	
	Falla Máxima kA	Falla Mínima kA
.23 y .4 kV	1.00	0.95
Otros < 1.00 kV	1.05	1.00
1.00 – 230 kV	1.10	1.00

---

## 5.2 APLICACIÓN DE LAS NORMAS IEC Y ANSI/IEEE EN UN SISTEMA ELÉCTRICO PRUEBA

En capítulos anteriores se ha hecho énfasis en la importancia que tiene para el diseño y la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) y los Sistemas Industriales de Potencia (SIP) el conocer los esfuerzos a que se ven sometidos sus componentes al presentarse una falla de corto circuito en algún punto del mismo sistema. Queda claro pues, que se requiere de los cálculos precisos de estas corrientes y de los esfuerzos asociados a ellas. Como se ha mencionado antes, existen varios métodos que se usan actualmente para los cálculos de las corrientes de corto circuito. Estos métodos, procedimientos o técnicas varían en algunos aspectos y en otros tienen alguna similitud. Con todo, los más usados y los mejor normalizados son el Método IEC y el Método ANSI/IEEE. Estos métodos brindan procedimientos específicos para cálculos de corrientes de corto circuito y de los esfuerzos asociados a estas corrientes.

El ANSI/IEEE 141 es la norma, de origen americano, que determina el procedimiento a seguir en los cálculos de corrientes de corto circuito en Estados Unidos y en los países, que por influencia tecnológica de aquel país, han adoptado esta norma. Esta norma va acompañada por otros estándares que se les conoce genéricamente como la Serie C37 [10]. En varios países de Europa la norma que reglamenta los procedimientos de cálculo de corto circuito es la guía IEC 909. Esta guía está dirigida a sistemas con voltaje nominal de hasta 230kV. El IEC 909 tiene su origen en la alemana VDE 0102. El IEC 909 es el procedimiento central para los países Europeos y otros que adoptaron este procedimiento por la influencia europea. En el proceso de integración que vive Europa es la norma que está siendo mandataria para los procedimientos de cálculo de corto circuito.

En estos tiempos de intercambio de mercancías y servicios, en este caso de Ingeniería Eléctrica, se hace conveniente y necesario un análisis comparativo de las dos normas para conocer las diferencias, y similitudes más relevantes entre ellas y así usar adecuadamente esta información en la aplicación tan variada e importante de los estudios de corto circuito.

### 5.2.1 Descripción del sistema eléctrico prueba

Para la aplicación de las normas ANSI/IEEE y IEC 909 a un caso concreto se escogió el un sistema eléctrico con el diagrama unifilar de la Fig. 5.1 [12]. Este sistema eléctrico presenta las características siguientes:

- Contiene una amplia variedad de cargas rotatorias.
- Tiene diferentes niveles de voltaje.
- La frecuencia del sistema es de 60 Hz.
- En la aplicación de los dos procedimientos se simuló únicamente fallos trifásicos, se calcularon las corrientes de corto circuito para ese tipo de falla y se examinaron los diversos tipos de esfuerzos.
- Contiene diversas clases de dispositivos de protección como fusibles, interruptores, etc.

- Contiene transformadores de tres devanados.
- Contiene enlaces.
- Aparecen subredes o redes internas. Ver Fig. 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.
- Existen diferentes niveles de voltaje.

**5.2.2 Diagrama unifilar del sistema eléctrico prueba**

En las Fig. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, aparece el diagrama unifilar del sistema eléctrico y de sus partes más importantes que son objeto de estudio:

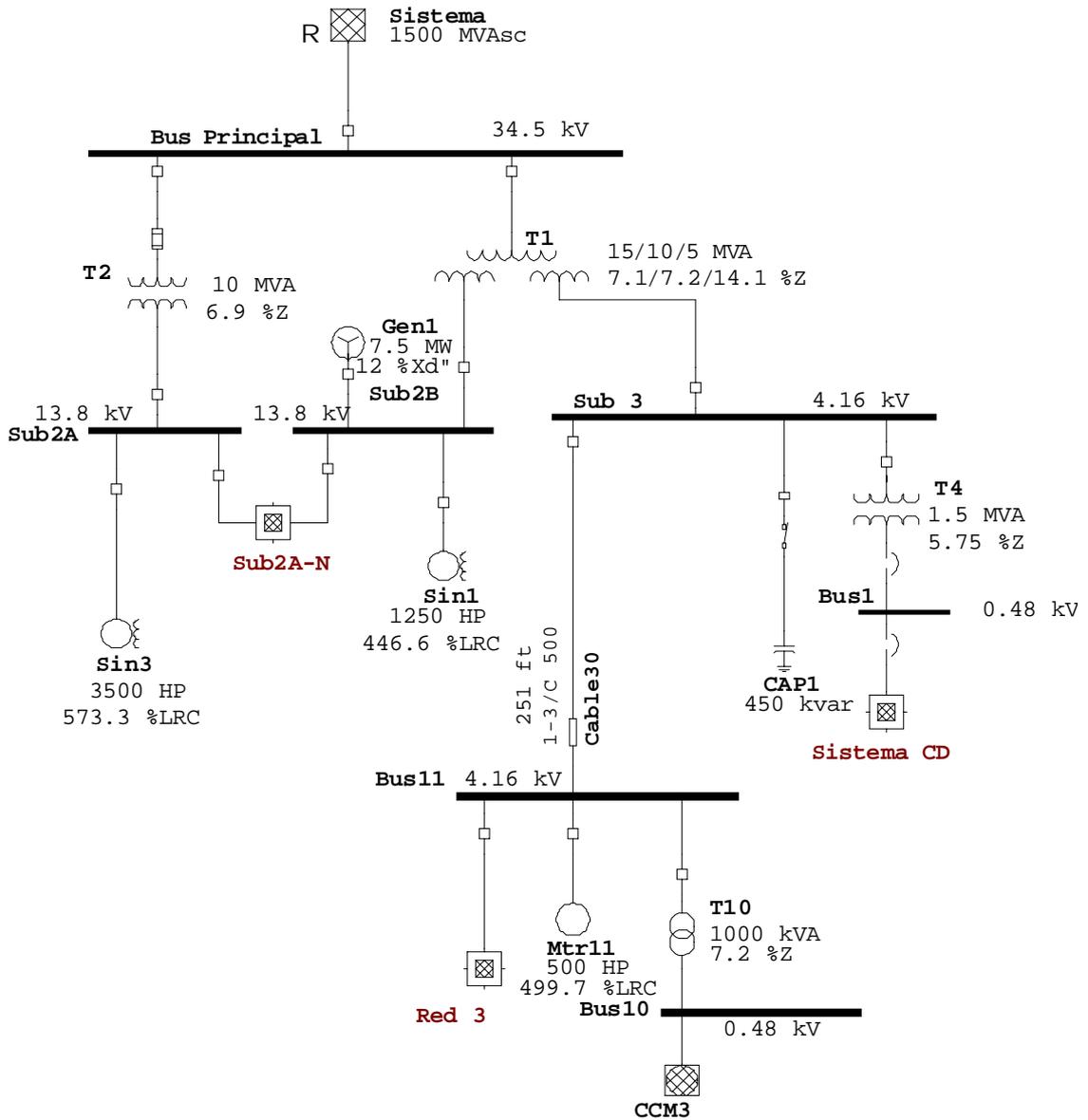


Fig. 5.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de estudio de corto circuito.

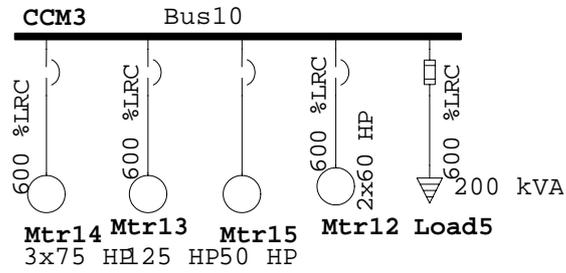


Fig.5.2 Diagrama unifilar del CCM3

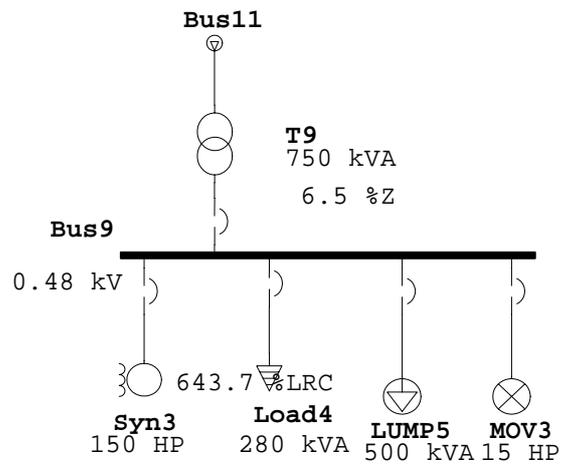


Fig.5.3 Diagrama unifilar del Bus 9.

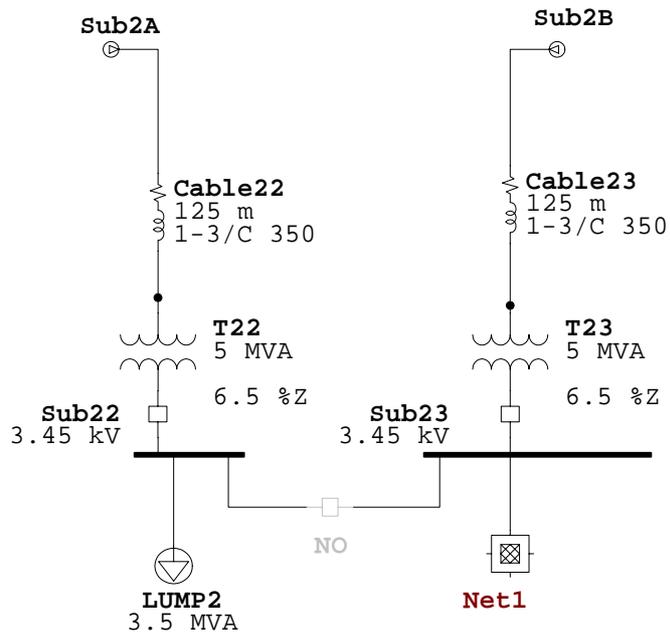


Fig.5.4 Diagrama unifilar de subred.

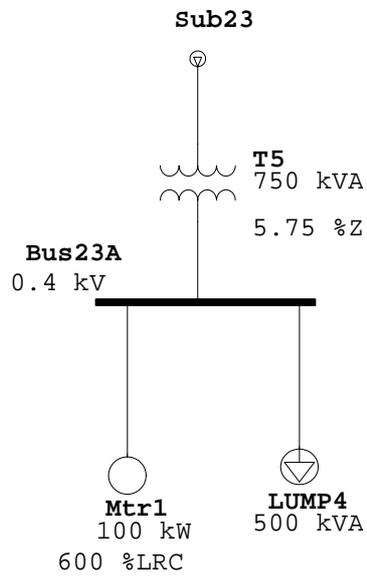


Fig.5.5 Diagrama unifilar del Sub 23.

---

### 5.2.3 Simulación para el cálculo de corto circuito

La simulación de los dos procedimientos de cálculo que se están comparando se agilizó grandemente mediante el uso del paquete comercial de software ETAP [12]. Con el uso de este paquete se evita un gran número de cálculos manuales y se gana una gran precisión y rapidez en los cálculos de corrientes y esfuerzos de corto circuito, amén de poder realizar las simulaciones que se deseen y enfocarse a análisis de los resultados. Este paquete trabaja las normas IEC y ANSI/IEEE con sus diferentes opciones de cálculo de corrientes y esfuerzos de corto circuito. Asimismo se escogió este paquete por su facilidad en el manejo y ser muy versátil en la presentación de datos y resultados de la simulación.

### 5.2.4 Cálculo de las corrientes y los esfuerzos ANSI/IEEE

Con el objetivo de obtener las corrientes de corto circuito se aplicó el programa de simulación al sistema eléctrico descrito antes y que para una referencia más detallada aparece como Fig.5.6 Esta simulación se hizo aplicando el procedimiento de ANSI/IEEE. El cálculo se efectuó para las tres redes o tipos de esfuerzo:

- Cálculo de corrientes de corto circuito momentáneas.
- Cálculo de corrientes de corto circuito de interrupción.
- Cálculo de corrientes de corto circuito de 30 ciclos o de estado permanente.

Los resultados de las simulaciones con ETAP de estos tres casos aparecen, en este capítulo, en los estudios de los casos 5.2.7, 5.2.8 y 5.2.9, respectivamente.

### 5.2.5 Características de la falla aplicada

En cuanto a las características de las fallas, los cálculos se realizaron atendiendo lo siguiente:

- Se aplicó la norma ANSI/IEEE para el cálculo de las corrientes de corto circuito para corrientes de corto circuito momentáneo, de interrupción y de 30 Ciclos.
- La falla aplicada es una falla trifásica.
- La falla es sólida (franca). Esto es, no hay impedancia de falla.
- El voltaje de prefalla de 1.00 PU.
- Se aplicó una falla trifásica a todos los buses. Una falla a la vez.

Otras consideraciones se explican donde se requieren.



---

**5.2.6 Reportes del estudio de corto circuito ANSI/IEEE**

- Es conveniente señalar que el programa de simulación usado presenta los reportes completos para los estudios de corto circuito de las corrientes momentáneas, de interrupción y de 30 ciclos del ANSI/IEEE, que aparecen listados abajo, donde se incluyen:
  - Portada o reporte genérico.
  - Datos de entrada de los buses.
  - Datos de entrada de cables y líneas
  - Datos de entrada de los transformadores.
  - Conexiones de los ramales.
  - Datos de la red de alimentación del sistema.
  - Información de los generadores síncronos.
  - Datos de entrada de los motores síncronos y de inducción.
  - Datos de la carga agrupada.
  - Reporte de Corto Circuito por cada bus
  - Reporte Sumario de Esfuerzos Momentáneos o de 1ª Red (también llamada de Primer Ciclo).
  - Reporte Sumario de Esfuerzos de Interrupción o de 2da Red.
  - Reporte Sumario de corrientes de 30 ciclos de estado permanente.

Sin embargo, tratando de simplificar aquí se presentan solo aquellos resultados necesarios para el análisis posterior de los mismos. Así:

- En la Fig. 5.7 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes de falla para la primera red o red momentánea.
- En la Fig. 5.8 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes de falla para la red de interrupción o segunda red.
- En la Fig. 5.9 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes de falla de 30 Ciclos.



**5.2.8 Caso de estudio: ANSI/IEEE. Corrientes de corto circuito de interrupción**

En la Fig.5.8 siguiente se muestran las corrientes de interrupción de corto circuito en los principales buses fallados. Asimismo se muestran las contribuciones a la falla desde los buses con enlaces directos al bus fallado.

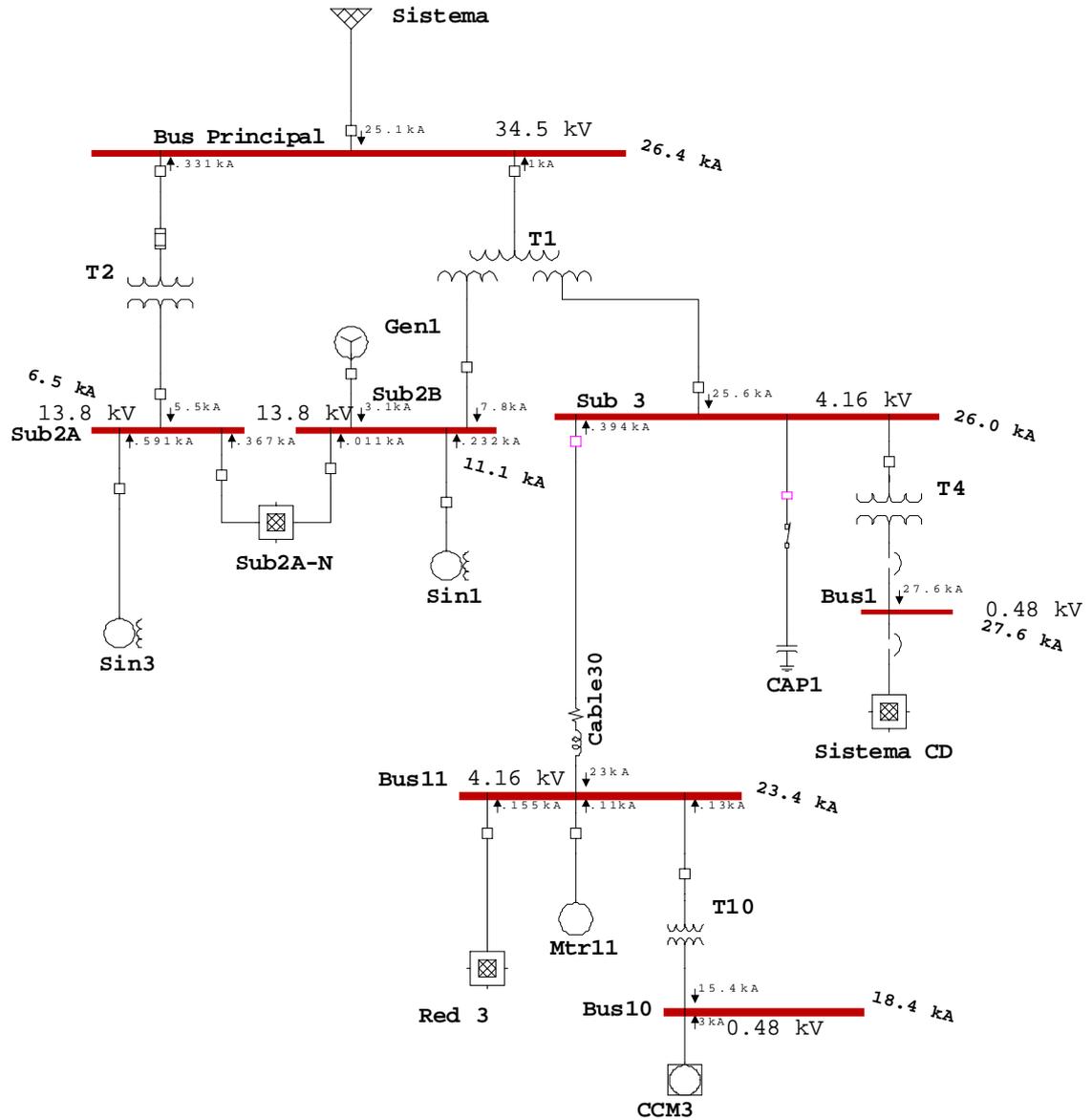


Fig.5.8 Corrientes de interrupción de corto circuito trifásico.

**5.2.9 Caso de estudio: ANSI/IEEE. Corrientes de corto circuito de 30 ciclos**

En la Fig.5.9 que aparece abajo se muestran las corrientes de corto circuito de 30 Ciclos aplicando la norma ANSI/IEEE en los principales buses fallados. Asimismo se muestran las contribuciones a la falla desde los buses con enlaces directos al bus fallado

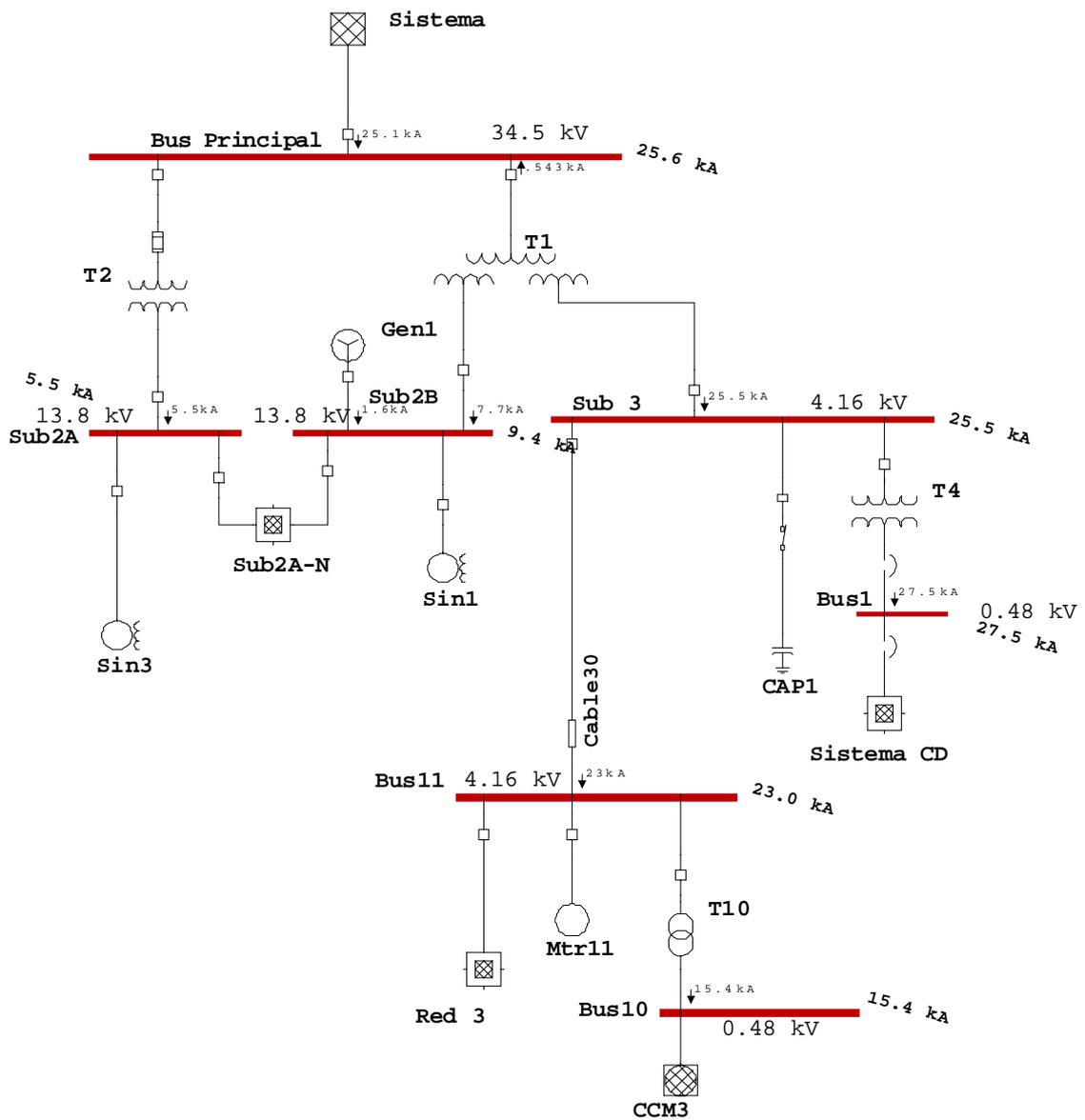


Fig.5.9 Corrientes de corto circuito de 30 Ciclos.

---

### 5.2.10 Cálculo de las corrientes y los esfuerzos IEC

Con el propósito de calcular las corrientes de corto circuito por el procedimiento IEC, se aplicó el programa de simulación al sistema eléctrico descrito. Este sistema se coloca nuevamente aquí, ahora con simbología IEC para una referencia más precisa y pertinente y aparece como Fig. 5.10. Esta simulación se hizo aplicando el procedimiento IEC 909 para llevar a cabo lo siguiente:

- Cálculo de corrientes de corto circuito iniciales  $I''_k$ .
- Cálculo de corrientes de corto circuito de ruptura  $I_b$ .
- Cálculo de corrientes de corto circuito de estado permanente  $I_k$ .
- Otras corrientes de corto circuito asociadas o derivadas de las anteriores como corriente pico, corrientes asimétricas. etc. que se irán comentando en este y en el próximo capítulo.

Por la estructura del programa de simulación, todas las corrientes bajo estudio aparecen en el caso de estudio llamado IEC.

### 5.2.11 Falla aplicada con IEC

Las fallas aplicadas tienen las características siguientes:

- Se aplicó la norma IEC609 [9] para el cálculo de todas las corrientes de corto circuito que intervienen en el estudio.
- La falla aplicada es una falla trifásica.
- La falla es sólida (franca). Esto es, no hay impedancia de falla.
- El voltaje de prefalla es de 1.00 PU.
- Se aplicó una falla trifásica a todos los buses. Una falla a la vez.
- Cuando existen otras consideraciones para los cálculos de las corrientes de corto circuito se explican en su oportunidad.

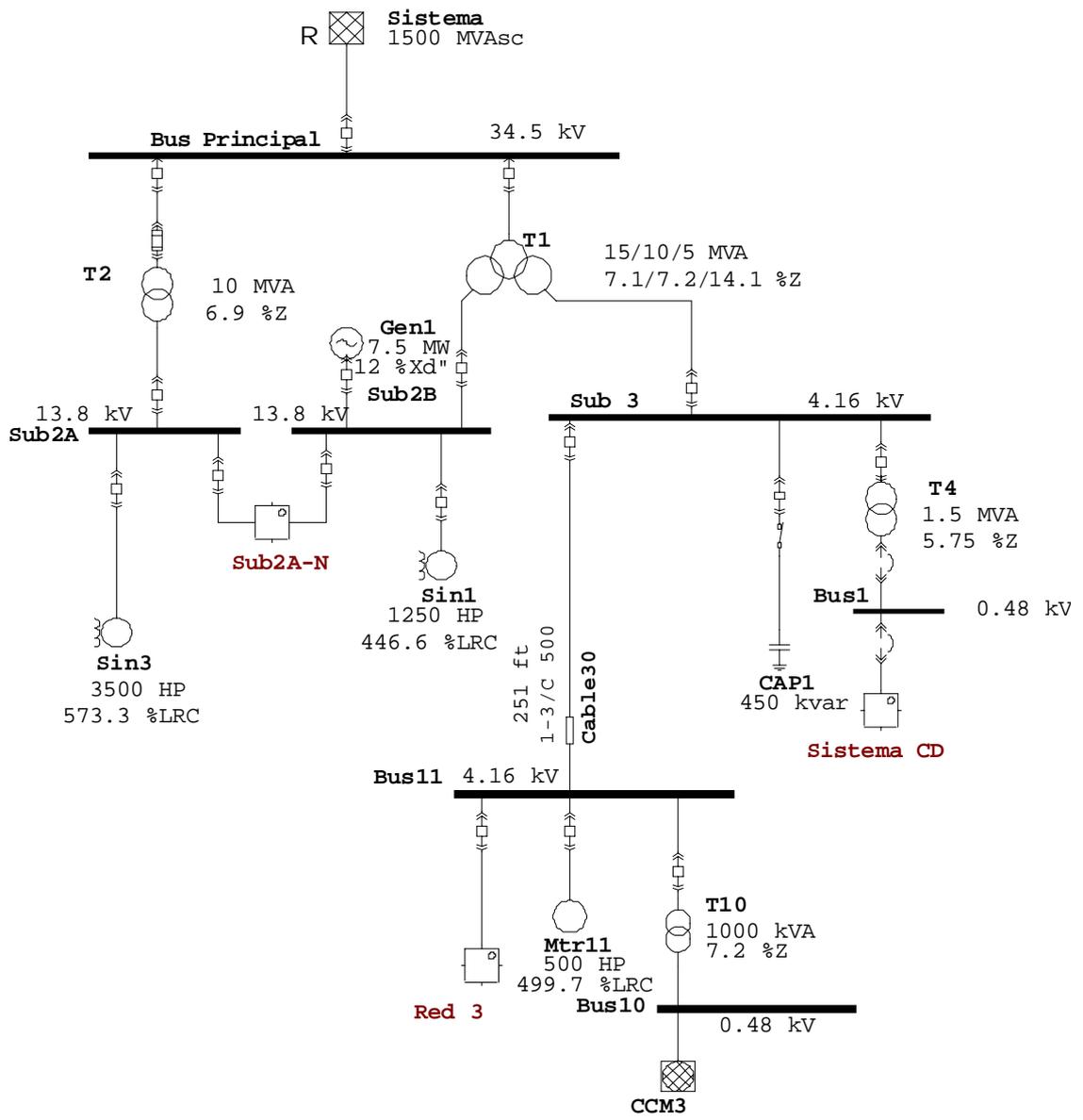


Fig. 5.10 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de estudio de corto circuito IEC

---

### 5.2.12 Reportes de estudio de corto circuito IEC

Es conveniente señalar que el programa de simulación usado presenta los reportes completos para los estudios de corto circuito de las corrientes inicial, de ruptura, de estado permanente, corriente pico y otras relacionadas con el estudio usando la norma IEC909, que aparecen listados abajo, donde se incluyen:

- Portada o reporte genérico.
- Datos de entrada de los buses.
- Datos de entrada de cables y líneas
- Datos de entrada de los transformadores.
- Conexiones de los ramales
- Datos de la red de alimentación del sistema
- Información de los generadores síncronos.
- Datos de entrada de los motores síncronos y de inducción.
- Datos de la carga agrupada.
- Reporte de Corto Circuito por cada bus
- Reporte Sumario de Corrientes  $I''_k$ .
- Reporte Sumario de Corrientes pico  $\dot{i}_p$
- Reporte Sumario de Corrientes de Estado permanente.

Sin embargo, tratando de simplificar aquí se presentan solo aquellos resultados necesarios para el análisis posterior de los mismos. Así:

- En la Fig. 5.11 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes de falla inicial de corto circuito  $I''_k$ .
- En la Fig. 5.12 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes pico  $\dot{i}_p$ .
- En la Fig. 5.13 se muestra el diagrama unifilar con las corrientes de falla de estado permanente  $I_k$ .



**5.2.14 Caso de estudio: IEC corrientes de falla pico  $i_p$**

En la Fig.5.12 que sigue se muestran las corrientes de falla pico  $i_p$  en los principales buses fallados. También se muestran las contribuciones a la falla desde los buses con enlaces directos al bus fallado.

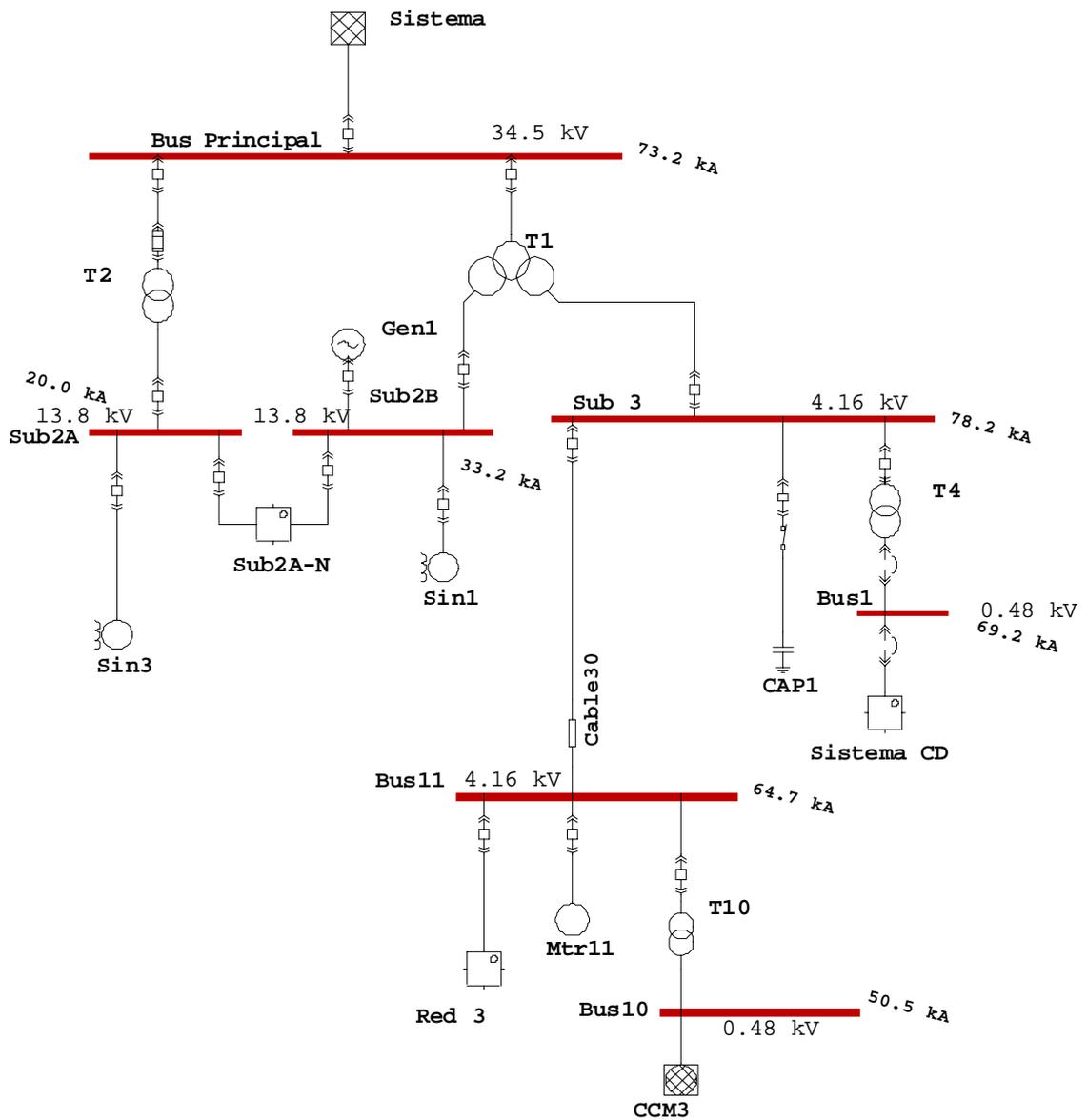


Fig.5.12 Corrientes pico  $i_p$  de corto circuito.



---

### **5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO IEC VS ANSI/IEEE**

#### **5.3.1 Introducción**

En este punto del trabajo ya se cuenta con los elementos siguientes que son necesarios para la comparación de las dos normas, IEC y ANSI/IEEE.

- Los fundamentos teóricos del fenómeno de corto circuito.
- La modelación matemática del corto circuito.
- El conocimiento del procedimiento IEC
- El conocimiento del procedimiento ANSI/IEE.
- Las características relevantes, para efectos del estudio, del método IEC.
- Las características relevantes, para efectos del estudio, del método ANSI/IEEE.
- Los resultados cuantitativos, mediante simulación digital con un paquete comercial, de un estudio de corto circuito, aplicando el procedimiento ANSI/IEEE a un sistema eléctrico muestra, para las tres redes; momentánea, de interrupción, de 30 ciclos y de las corrientes asociadas.
- Los resultados cuantitativos, mediante simulación digital con un paquete comercial, de un estudio de corto circuito, aplicando la norma IEC909 a un sistema eléctrico muestra, para el cálculo de las corrientes de falla inicial, pico, de ruptura y en estado permanente. así como corrientes que se derivan de estas.

A continuación se presentan las comparaciones entre los tipos de corrientes que por su modelación, su "posición" en un oscilograma de corto circuito y por su uso en el diseño de sistemas eléctricos son comparables.

#### **5.3.2 Metodología para la comparación**

Para contrastar los dos procedimientos se usa una metodología [15, 22,24] que consiste en lo siguiente:

- Una comparación del modelo matemático que las normas en cuestión usan para cada componente principal del sistema eléctrico. Estos es; el modelo o forma de representar a generadores, motores, transformadores, líneas, cables, etc.
- Una comparación de los datos que cada norma requiere en los diferentes modelos de los componentes. Cada norma usa diferentes datos, o difiere en la forma de presentarlos, de generadores, morotes, transformadores, líneas,

etc. para aplicar el procedimiento. La comparación de los datos dice mucho acerca de la complejidad del modelo usado en cada procedimiento.

- Se hace una comparación entre los diferentes tipos de corriente que cada norma establece. Asimismo se relacionan, para efectos de comparación, los diferentes tipos de esfuerzos que las corrientes de corto circuito establecen sobre los componentes del sistema eléctrico.

### 5.3.3 Corriente inicial de falla

La norma IEC 909 define la corriente inicial de falla como la corriente esperada que se presentará en el punto de falla al inicio de la misma (tiempo cero) con la impedancia constante. ANSI define la corriente simétrica momentánea o de primera red como la corriente de corto circuito que se presenta inmediatamente después del inicio de la falla. Los cálculos que se realizaron en el sistema eléctrico aparecen en el reporte detallado de los apéndices de resultados se resumieron y se muestran los valores para este tipo de esfuerzo en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Corrientes de falla simétricas iniciales ANSI vs. IEC.

Bus #	Bus kV	ANSI Momentánea		IEC 909	IEC 909 $I''_k$
		X/R	Falla Trifásica (AMPS)	Relación X/R	Falla Trifásica (AMPS)
1	0.48	7.9	27613	7.8	28974
2	0.48	2.9	22141	2.9	23234
6	13.8	22	11025	2.1	11928
7	13.8	19.6	6876	18.4	7442
9	0.48	14.7	15881	8.6	17305
10	0.48	21.9	18421	10.4	19886
11	4.16	10.4	23891	9.8	26195
23A	0.48	6.1	18282	5.0	20500
Principal	34.5	44.5	26656	41.4	26786
Sub2A	13.8	25.8	6955	23.0	7525
Sub2B	13.8	41.3	11261	36.9	12177
Sub3	4.16	39.3	26416	29.3	28905
Sub22	3.45	13.1	11030	12.8	12090
Sub23	3.45	-----	10233	12.0	11321

De la Tabla 5.4 se observa que, en todos los buses, la corriente inicial  $I''_k$  (IEC) de falla es más alta que la corriente simétrica momentánea ANSI/IEEE. Este comportamiento se atribuye a la influencia que tienen los voltajes de prefalla recomendados por el IEC y al hecho de que las impedancias, de todas las cargas rotatorias, que son usadas por el IEC para el cálculo de la corriente inicial, son las impedancias subtransitorias.

**5.3.4 Corrientes de falla de cerrado/trabado ANSI vs. IEC**

Las corrientes de esfuerzos de Cerrado y Trabado son corrientes asimétricas de falla que son comúnmente calculadas en ½ ciclo después del inicio de la falla. ANSI recomienda la misma red debido a que en ½ ciclo el modelo de la máquina permanece siendo válido. Algunos ensayos de asimetría recomiendan, como regla, un Factor de Multiplicación de 1.6. Esto es suponiendo una relación X/R de 25 en un tiempo de 0.5 ciclos (variable C) en (5.1). Aplicando la ecuación (5.1) con un tiempo de 0.5 ciclos a diferentes valores de X/R para los diferentes buses se tienen los factores multiplicadores que aparecen en la Tabla 5.5.

$$M.Fr = \sqrt{1.0 + 2.0e^{-(4\pi CR/X)}} \tag{5.1}$$

El procedimiento IEC909 no provee explícitamente corrientes asimétricas de ½ ciclo. Sin embargo, para propósitos de comparación, se calcularon corrientes IEC de ½ ciclo y los resultados se muestran también en la misma tabla. El decaimiento AC tampoco fue modelado en la red IEC.

En la Tabla 5.5 se muestran las corrientes ANSI/IEEE de ½ ciclo así como las de ½ ciclo IEC.

Tabla 5.5 Corrientes de ½ Ciclo ANSI vs. IEC.

BUS #	ANSI		IEC	
	<i>M.Fr</i>	Amperes	MF	Amperes
1	1.379	38076	1.376	39868
2	1.112	24625	1.103	25627
6	1.582	17447	1.576	18798
7	1.566	10767	1.556	11580
9	1.518	24106	1.401	24244
10	1.582	29134	1.447	28775
11	1.446	34552	1.433	37537
23A	1.311	23960	1.253	25686
Principal	1.654	44098	1.649	44170
Sub2A	1.602	11143	1.588	11950
Sub2B	1.649	18563	1.639	19958
Sub3	1.644	43440	1.617	46739
Sub22	1.497	16508	1.491	18026
Sub23	-----	----	1.478	16732

### 5.3.5 Corrientes de falla pico $\dot{i}_p$ IEC vs Corriente cresta ANSI

De acuerdo al IEC, para el caso en que la contribución al corto circuito venga desde una fuente mallada, puede usarse una sola relación de X/R para calcular la corriente pico  $\dot{i}_p$ . El procedimiento IEC 909 recomienda tres métodos, los cuales ya se describieron con detalle en el Capítulo 4, para el cálculo de esa única relación X/R [4]. Aquí se resumen para una referencia pertinente. Estos métodos del IEC no se parecen a la técnica aplicada por ANSI de reducción separada. Estos métodos del IEC son:

- Método A. o de la “relación dominante X/R”. Para este método la relación X/R de la rama (la cual puede estar compuesta de varios elementos) llevando por lo menos el 80% de la corriente de falla, se define como la relación dominante X/R.
- Método B. También llamado “relación dominante X/R en el punto de la falla.
- Método C o método de la “frecuencia equivalente”. En este método se considera que una fuente de frecuencia equivalente (20 Hz. para un sistema de 50 Hz. y 24 Hz. para un sistema de 60Hz.) excita la red en el punto de falla y se calcula la impedancia equivalente de falla  $Z_c = R_c + j X_c$ . La X/R buscada se calcula por la ecuación (5.2):

$$X / R = (X_c / R_c) * (f / f_c) \quad (5.2)$$

Donde  $f$  es la frecuencia del sistema.

La corriente de falla pico se obtiene entonces de la corriente inicial de falla como sigue:

$$\dot{i}_p = \kappa \sqrt{2} I'' k \quad (5.3)$$

Con  $\kappa$  calculada por la ecuación siguiente:

$$\kappa = \left( 1.02 + 0.98 e^{-3R/X} \right) \quad (5.4)$$

Esta  $\kappa$  también puede obtenerse de curvas paramétricas, resultantes de la ecuación (5.4). Es común, por razones de seguridad aplicarle un factor de 1.15 a la misma  $\kappa$ , quedando la expresión así:

$$\kappa = 1.15 \left( 1.02 + 0.98 e^{-3R/X} \right) \quad (5.5)$$

Se ha abundado en el método C por ser el aplicado en los calculo IEC para encontrar las corrientes pico  $\dot{i}_p$  a partir de las corrientes  $I'' k$ .

Para cálculos ANSI/IEEE, la siguiente ecuación es a menudo la más usada para determinar el mismo multiplicador (factor cresta):

$$MFp = \sqrt{2} \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{X/R}} \right) \quad (5.6)$$

La relación X/R se calculará desde redes separadas de resistencia y reactancia. La Tabla 5.6 muestra los factores de cresta calculados con ANSI así como las correspondientes corrientes cresta. Como se mencionó arriba, las corrientes pico IEC fueron calculadas usando el método de las frecuencias equivalentes y se muestran en la misma tabla.

Observando la Tabla 5.6 se ve que son mayores los valores de corrientes pico IEC con respecto a los valores cresta ANSI.

Tabla 5.6 Corrientes de falla pico IEC vs. Corriente de falla cresta ANSI.

BUS #	ANSI Valor Cresta			IEC 909 $i_p$ = Valor Pico
	X/R	Factor de Cresta $MFp$	AMPS	AMPS
1	7.9	2.364	65268	69197
2	2.9	1.901	42090	45140
6	22	2.640	29114	31578
7	19.6	2.619	18010	19498
9	14.7	2.556	40595	42994
10	21.9	2.639	48622	50459
11	10.4	2.460	58749	64701
23A	6.1	2.259	41342	45782
Principal	44.5	2.732	72828	73213
Sub2A	25.8	2.670	18542	20012
Sub2B	41.3	2.724	30683	33169
Sub3	39.3	2.720	71843	78152
Sub22	13.1	2.527	27881	30703
Sub23	-----	-----	-----	28664

### 5.3.6 Corriente de interrupción ANSI vs. Corriente de ruptura IEC

Las corrientes de interrupción son las corrientes que se presentan en el inicio de la apertura de contactos. ANSI/IEEE recomienda un ajuste para la reactancia de las máquinas (Ver 2da. Columna de la Tabla 3.1) para este esfuerzo. Los cálculos de corriente de ruptura IEC no recomiendan ningún ajuste a la reactancia inicial asociada con la modelación del decaimiento de CA. El IEC recomienda, como una simplificación, que la corriente de ruptura simétrica sea tomada igual a la corriente de falla inicial. Si atendemos esto, las corrientes de ruptura estimadas son más altas que las corrientes de ruptura reales. Ver Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Corriente de interrupción ANSI vs. corriente de ruptura IEC  
(Tomada ésta como la Corriente de Falla Inicial  $I''k$  ).

BUS #		
	ANSI	IEC $I_b = I''k$
1	27613	28974
2	22141	23234
6	10850	11928
7	6434	7442
9	15881	17305
10	18421	19886
11	23427	26195
23A	18282	20500
Principal	26445	26786
Sub2A	6506	7525
Sub2B	11081	12177
Sub3	25958	28905
Sub22	10073	12090
Sub23	9971	11321

Como se mencionó en el Capítulo 4, una técnica de cálculo más refinada recomienda que la corriente de ruptura simétrica sea calculada tomando en cuenta el tiempo exacto de apertura, el tipo de máquina y la proximidad de la máquina al corto circuito.

El que las corrientes de ruptura sean más grandes que las corrientes de interrupción ANSI se atribuye a la carencia de modelación del decremento CA en el caso IEC, mientras en el caso ANSI las reactancias se han incrementado disminuyendo la corriente de corto circuito, para considerar así el decaimiento CA. Si se toma en cuenta el decaimiento CA en el IEC, los resultados son mucho más dependientes de la diferencia entre los modelos del decaimiento CA de ambas normas. Para ilustrar estas diferencias genéricas, se hicieron cálculos de corrientes de ruptura con varios tiempos de de interrupción. La Tabla 5.8 muestra las corrientes simétricas de ruptura IEC para tiempos estándar de apertura de contactos de interruptores de circuito manteniéndose los valores de ANSI.

Tabla 5.8 Corriente de interrupción ANSI vs. Corriente de ruptura IEC para varios tiempos de apertura de contactos.

BUS #	ANSI	IEC 909 ( <i>I<sub>b</sub></i> ) Amperes			
	(Amperes)	.02 segundos	.05 segundos	.1 segundos	.25 segundos
1	27613	28974	28974	28974	28974
2	22141	23234	23234	23234	23234
6	10850	11462	11041	10749	10500
7	6434	7340	7244	7178	7115
9	15881	16705	15868	15241	14541
10	18421	18114	17196	16559	16012
11	23427	26096	25991	25915	25860
23A	18282	18283	18148	17292	16390
Principal	26445	26642	26505	26411	26318
Sub2A	6506	7421	7323	7256	7193
Sub2B	11081	11696	11264	10963	10709
Sub3	25958	28898	28891	28886	28881
Sub22	10073	11852	11292	10691	9924
Sub23	9971	11321	11321	11321	11321

### 5.3.7 Corriente ANSI/IEEE de retardo de tiempo vs. Corrientes IEC de estado permanente

El procedimiento IEC y el procedimiento ANSI/IEEE reconocen que los efectos transitorios en el tiempo en que se presenta la corriente de estado permanente han pasado ya y por lo tanto no se consideran en el modelado. Para ANSI/IEEE se toma una red que contiene únicamente generadores [11] representados por su reactancia transitoria o por una reactancia más alta. El IEC implícitamente recomienda que se use las reactancias del generador que se usaron para el cálculo de la corriente inicial estipulando que “la corriente de falla de estado permanente es la corriente de falla inicial calculada sin motores [4]”. Sin embargo el IEC estipula que, para el cálculo de corrientes de estado permanente, se tome en cuenta el modelo del sistema de excitación del generador. Con este recurso, el IEC discrimina entre generadores de rotor cilíndrico y de polos salientes y toma en cuenta los ajustes de excitación mínimos, intermedios y altos. La corriente de falla con que contribuye cada generador viene a ser una función de su corriente nominal, por virtud de multiplicadores obtenidos desde curvas paramétricas (o de las ecuaciones que las

generaron) contra la reactancia saturada de dispersión del generador, del ajuste de la excitación y del tipo de máquina (turbo o saliente). Las mismas consideraciones pueden también aplicarse a motores síncronos dependiendo del tipo de sistemas de excitación. Estas consideraciones y su inclusión en los cálculos de corriente de estado permanente del IEC909 contra las corrientes de 30 Ciclos del ANSI dan origen a las diferencias encontradas en los reportes del estudio y se muestran en la Tabla 5.9 y separa al IEC del ANSI. En el ANSI se usaron las reactancias transitorias de las máquinas mientras que en el IEC se consideró que los motores ya no aportaban corriente de corto circuito. Las diferencias encontradas se atribuyen principalmente a los diferentes valores de reactancia que se usan en los dos procedimientos.

Tabla 5.9 Corrientes de retardo ANSI vs. Corrientes de estado permanente IEC.

BUS #	ANSI	IEC 909
	FALLA 3 $\Phi$ $X'd$	FALLA 3 $\Phi$ Inicial
1	27492	26062
2	22068	20728
6	9188	8077
7	5481	5702
9	12974	12416
10	15413	14773
11	22954	23472
23A	15331	11268
Principal	25646	25097
Sub2A	5540	5774
Sub2B	9352	8263
Sub3	25467	26100
Sub22	8111	7753
Sub23	9535	7633

---

### 5.3.8 Comparación de datos requeridos

Los diferentes modelos [40] de los componentes del sistema usados por los dos procedimientos requieren diferente información de dichos componentes. A continuación se menciona los datos que se requieren en cada norma.

- **Redes de secuencia**

Positiva

- IEC y ANSI/IEEE recomiendan omitir las cargas estáticas y los efectos en derivación de secuencia positiva de las líneas.
- Las resistencias y las reactancias en serie de líneas, cables, transformadores y de otros equipos, son datos obligatorios en ambas normas.
- El IEC 909 también toma en cuenta aquellos transformadores cuyos voltajes nominales de devanado son diferentes de los voltajes nominales del sistema (fuera del “tap” nominal).

Negativa

- Tanto el IEC como el ANSI/IEEE usan las reactancias de secuencia negativa para fallas desbalanceadas (línea a tierra, dos líneas a tierra, entre líneas y otras). En este trabajo solo se trató la falla trifásica que es balanceada y no se requirieron impedancias de secuencia negativa.

Cero

- Tanto el IEC como el ANSI/IEEE usan las reactancias de secuencia cero para fallas que involucren tierra. En este trabajo solo se trató la falla trifásica.

- **Datos de generadores**

- Ambas normas requieren los datos más comunes de los generadores como son impedancias (reactancias) transitorias, número de polos, voltaje nominal y MVA nominal.
- Los cálculos IEC de falla en estado permanente requieren la reactancia saturada de dispersión (o la relación de corto circuito) del generador para tener en cuenta el modelado de la respuesta del sistema de excitación.

- **Datos de los motores**

- Tanto el IEC como el ANSI/IEEE requieren de los motores de inducción los datos de reactancia de rotor bloqueado, kV nominal, MVA nominal, factor de potencia, número de polos y la frecuencia.
- Para el ANSI/IEEE los datos de reactancia de los motores se basan en la velocidad (RPM).

- 
- Para los motores síncronos los datos que se requieren son los mismos que en el párrafo anterior. Es necesario señalar que aun cuando los datos que se necesitan de los motores en esencia son los mismos para los dos procedimientos, los datos de los motores pueden no ser directamente intercambiables debido a diferencias menores como:
    - Caballos de potencia para el ANSI/IEEE contra Megawatts de la norma IEC.
    - El número de polos de IEC contra velocidad (RPM) de ANSI/IEEE.
    - Reactancia  $X''d$  en el ANSI/IEEE contra relación de corriente de carga /corriente a rotor bloqueado en el IEC.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los objetivos generales y específicos planteados, este capítulo destaca las conclusiones, aportaciones y recomendaciones que se extraen del desarrollo del trabajo, de los resultados finales de la simulación y análisis de los mismos.

#### Conclusiones específicas

El procedimiento IEC se basa en corrientes mientras que el procedimiento ANSI/IEEE es un procedimiento basado en impedancias. En el IEC estas corrientes serán función del tipo de configuración de la red, de la relación X/R, de la clasificación de cada fuente de corriente de corto circuito como “Cercana” o “Lejana” al punto de falla, del tiempo de liberación de la falla y del tipo de sistema de excitación de los generadores síncronos.

En cuanto al tipo de configuración de la red, el procedimiento IEC define tres tipos de redes (radial, mallada y no mallada) de acuerdo a la configuración que guardan las fuentes de corto circuito respecto al punto de falla. El procedimiento de cálculo de corrientes de corto circuito variará de acuerdo a esta clasificación, haciendo el procedimiento más complicado pero más preciso. El método ANSI/IEEE no considera la configuración de la red, simplificando, en este aspecto, el procedimiento de cálculo. En cuanto a la relación X/R, ANSI/IEEE favorece usar una sola relación X/R mientras que en el procedimiento IEC cada contribuyente verá una relación de X/R hacia el punto de localización de la falla usando, generalmente, varias relaciones de X/R. Esto influye en la modelación de la componente de CD de ambos procedimientos, haciendo que, en este punto, el IEC sea un procedimiento más apegado a la realidad, de mayor rigor y más exacto que el ANSI/IEEE.

El voltaje de prefalla que usa ANSI/IEEE es igual, de entrada, al voltaje nominal del sistema a menos que se desee incorporar otras condiciones de operación del sistema, flexibilidad que presenta esa norma. En cambio el IEC considera un factor de multiplicación para el voltaje de prefalla ya establecido en su procedimiento independientemente de las condiciones de operación del sistema. Así pues, en este aspecto, la norma IEC es menos flexible.

En cuanto a la caracterización de las fuentes de corto circuito como “Cercana” o “Lejana”, el procedimiento IEC sigue la práctica de clasificar las fallas de acuerdo a la “distancia eléctrica” entre la fuente de corto circuito y la localización de la falla. El procedimiento ANSI/IEEE, con criterios propios, clasifica la generación como “Local” o “Remota”.

Aun cuando los dos procedimientos toman en cuenta el decaimiento de la componente de CA, cada uno lo hace de manera diferente a través de la distinta modelación de este decaimiento.

El procedimiento ANSI/IEEE se puede pensar como un procedimiento que está basado en las impedancias de los elementos de la red y la modelación de estos se basa en esta consideración. Este procedimiento indica que se formen tres tipos de redes que representarán tres intervalos de tiempo en un oscilograma de corriente de corto circuito. Se entiende que la corriente en cada intervalo de tiempo no cambiará de valor. Las tres redes

difieren solamente en sus valores de reactancia para los elementos giratorios. Esto se logra aplicando factores de multiplicación que toman en cuenta el decaimiento de CA. Con esto se tendrá una relación X/R en el punto de la falla que servirá para modelar el decaimiento de la componente de CD. Al considerar que la reactancia no cambia en cada intervalo de tiempo, este procedimiento es considerado como un “procedimiento estático”. Este recurso produce inexactitud en el cálculo de la corriente de corto circuito.

En el cálculo de corriente de falla en estado permanente IEC y de la correspondiente corriente de corto circuito de 30 ciclos ANSI/IEEE, los dos procedimientos son muy diferentes. Esta diferencia se presenta tanto en el concepto mismo como en procedimiento de cálculo, pues mientras el IEC favorece el considerar los sistemas de excitación, y por lo tanto su modelación, el ANSI no requiere considerar estos sistemas y prescinde de su modelación haciendo más sencillo el cálculo de la corriente de 30 ciclos, aunque menos preciso. De esta manera el IEC tiene una modelación más completa que el ANSI/IEEE.

Los resultados de los cálculos con IEC presentan una tendencia para mantener valores más altos para la corriente de falla simétrica y pico. La misma tendencia se observa en las corrientes de falla de interrupción para tiempos de liberación de hasta 0.02 seg.

### **Conclusiones generales**

Cada norma tiene definido sus propios conceptos y terminología y difieren notablemente.

Las diferencias cualitativas y cuantitativas entre conceptos similares afectan significativamente los resultados.

La diferencia en la modelación de la red y de los componentes del sistema eléctrico por ambas normas afecta los resultados obtenidos. En particular, las diferencias en el tratamiento y en el modelo de los elementos rotatorios afecta los resultados en los cálculos de las diversas corrientes de los procedimientos de las normas.

El proceso mismo de cálculo de las dos normas afecta los resultados obtenidos.

Los resultados de los cálculos aplicando los dos procedimientos sobre el mismo sistema prueba, muestran que las corrientes que se han relacionado entre sí, para efectos de comparación, difieren en prácticamente todos los casos.

### **Conclusiones sobre el procedimiento de la norma ANSI/IEEE**

El estándar ANSI/IEEE es más sencillo en su procedimiento debido a su carácter eminentemente práctico. Por su modelación más sencilla requiere menos datos con el consecuente ahorro de tiempo y de inversión en la búsqueda de esta información. Esto lo convierte en un método atractivo para su uso. Sin embargo esta misma característica de practicidad lo hace menos útil donde se requiere de cálculos más precisos. Asimismo el procedimiento de esta norma está fuertemente ligado a su aplicación a interruptores de circuito. Esto lo hace muy dependiente de los intereses comerciales y de los aspectos de la evolución tecnológica de estos equipos.

### **Conclusiones sobre el procedimiento de la norma IEC**

El estándar IEC intrínsecamente posee una modelación más completa de las corrientes de falla debido a que los modelos de los componentes de la instalación y del sistema de suministro son más completas que en el método ANSI/IEEE. Sin embargo, estas características lo hacen más demandante de más datos de entrada con las necesarias inversiones de tiempo y recursos económicos para su consecución. Lo anterior lleva a que IEC sea más preciso aunque sea más complejo su uso. IEC no relaciona el procedimiento

de cálculo a su aplicación en interruptores u otro equipo, dándole un carácter más permanente y menos dependiente de los cambios de la tecnología asociada a estos equipos.

En aplicaciones de selección de interruptores es conveniente el uso del estándar IEC donde se requieren resultados más precisos como en los casos donde:

Los niveles de corto circuito esperados en la ubicación de un interruptor están muy cercanos a su capacidad de interrupción. Aquí el procedimiento seguido para el cálculo de esfuerzos de corto circuito sería el factor decisivo para seleccionar el interruptor entre diferentes fabricantes, capacidades y costos.

- Se busca márgenes de seguridad de equipo de protección instalado en sistemas que han estado experimentando un crecimiento súbito.
- La modelación más completa del sistema y sus componentes lo hace más conveniente en aplicaciones importantes donde se requiere de información precisa sobre corrientes de falla, como en el diseño de esquemas de protección e interrupción cuya operación apropiada determina la seguridad de las personas, los equipos y los sistemas.

### **Aportaciones**

Se han revisado y presentado los fundamentos teóricos del fenómeno de corto circuito de forma tal que se ha simplificado su aplicación a la comparación entre las normas IEC y ANSI/IEEE. También se ha desarrollado una presentación apropiada de las ecuaciones que describen a la corriente de corto circuito en función de las componentes de corriente alterna (CA) y (CD) de forma tal que se facilita el uso y comprensión de los modelos que las representan.

Se han destacado las características relevantes de cada procedimiento.

Se aporta información para valorar mejor la influencia sobre los procedimientos de las dos normas de los siguientes factores: Configuración de la red, la relación X/R, voltaje de pretalla, “distancia eléctrica” desde las fuentes de corriente de corto circuito al punto de falla y el tiempo de liberación de la falla.

Se hacen recomendaciones en el sentido de: no intercambiar datos de los diversos elementos de la red bajo estudio, ni resultados entre las normas IEC y ANSI/IEEE, ser consistente en el uso de una norma u otra, de forma que, ya escogido un procedimiento de cálculo de fallas, se continúe con el mismo hasta finalizar y aplicar los resultados de estudio y que la selección de interruptores de circuito deberá ser congruente con el estándar aplicado.

Dado que el costo de los interruptores de circuito aumenta de acuerdo a como se incrementa su capacidad de interrupción, no es económico el instalar interruptores de circuito cuya capacidad exceda a los esfuerzos esperados en una ubicación particular durante toda la vida útil de este equipo. Los resultados de este trabajo aportan información para realizar, con conocimiento de causa, estudios de fallas para la selección adecuada de equipo de interrupción.

Se han establecido las diferencias y características entre los dos procedimientos de cálculo de corto circuito que proporcionan bases para decidir cual deberá aplicarse según las circunstancias específicas del problema, la precisión técnica requerida y valorando el impacto económico de la decisión tomada.

**Recomendaciones para trabajos futuros**

Como las dos normas descansan fuertemente en suposiciones que simplifican los procedimientos mismos; pero que al emplear factores empíricos (factores de voltaje, relaciones aproximadas de X/R, factores de reactancias, etc.) no dejan de ofrecer resultados del lado conservador, con las implicaciones de aumento de costos, en aplicaciones como la selección de interruptores. Al realizar cálculos de corrientes de corto circuito en puntos muy identificados del oscilograma de corto circuito se puede pensar en los procedimientos tratados como procedimientos “estáticos”. Un procedimiento que calcula estas corrientes en cualquier instante y que considera la respuesta dinámica de los elementos del sistema eléctrico se le llama “procedimiento dinámico”. Este procedimiento dinámico requiere de herramientas analíticas y computacionales poderosas pero que, afortunadamente, ya existen. Las computadoras personales y los desarrollos de software como el EMTP (Electromagnetic Transients Program), sus derivados y otros similares, hacen posible el considerar modelos de representación de redes que incluyan el comportamiento dinámico de las variables y parámetros interesantes de las máquinas y elementos en cada instante de la evolución de la falla. Así se propone estudios comparativos entre los dos métodos tradicionales y los métodos dinámicos.

Las estructuras de las capacidades, los parámetros y los requerimientos de pruebas de los interruptores de circuito son aspectos que tanto la Internacional Electrotechnical Commission y el American National Standard Institute y el IEEE establecen por separado y tienen aplicación en su propia esfera de influencia. El avance tecnológico de la industria eléctrica ha cambiado estos estándares y sin duda los seguirá impactando. El intercambio de equipos y servicios de ingeniería en esta época de globalización hace necesario que el profesionalista dedicado a la aplicación de interruptores de circuito se familiarice con las diferencias y similitudes en estas dos normas. Siendo los interruptores de circuito elementos costosos en las instalaciones eléctricas industriales, de distribución y potencia, la correcta selección de ellos tiene consecuencias económicas importantes. Un estudio que analice y compare lo más relevante de las estructuras y conceptos de las normas internacionales de interruptores ayudaría a la mejor comprensión de esta aplicación.

---

**REFERENCIAS**

1. **Especificación NRF-022-CFE-2002.** *Interruptores de Potencia de 72.5 a 420 kV.*
2. **Especificación CFE V5000-15.** *Interruptores de Potencia para Distribución de 15.5 a 123 kV.*
3. **Rieffel Vivanco, Jean C.** “IEC“ *Short Circuit Calculation*, Cement Industry Technical Conference. IEEE. 1998.
4. **IEC 60909.** *International standard: short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems.* 1<sup>st</sup> Edition. 1988.
5. **Glover Duncan J., Sarma. M. S.** *Power System: Analysis and Design.* 3<sup>rd</sup>. Edition. Brooks/Cole. Thomson Learning 2002.
6. **Shipley R. B.** *Introduction to Matrices and Power Systems.* New York. John Wiley, 1976.
7. **Kerchner Russell M., Corcoran George F.** *Alternating Currents Circuits.* 3<sup>rd</sup>. Edition. John Wiley. 1958.
8. **Hartman Craig N.** *Understanding Asymmetry.* IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 21, No. 4, July/August, 1985.
9. **Stevenson W.D. Jr.** *Elements of Power System Analisis.* 4<sup>a</sup> Edicion. McGraw Hill. 1992.
10. **Mercede, J. Frank.** *How To Perform Short-Circuit Calculations- Part 1.* EC&M, June, pp 46-50, 1995.
11. **IEEE Std. 141-1993.** IEEE. *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.*
12. **User Guide ETAP PowerStation.** Operation Technology.
13. **IEEE Std. C37.5 – 1979.**
14. **ANSI/IEEE Std. C37.010 – 1979.** *Applications Guide for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.*
15. **Rodolakis Anthony J.** “A Comparison of North American (ANSI) and European (IEC) Fault Calculation Guidelines. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29. No. 3. May/June 1993.
16. **Nasar. Syed A.** *Electric Power Systems,* McGraw Hill. 1990.

17. **Kasikci Ismail.** *Short Circuits in Power Systems. A practical Guide to IEC 60909.* Germany 2002. Wiley-Vch.
18. **ANSI/IEEE C37.13 – 1981.** *Std. for Low Voltage Ac Power Distribution for Industrial Plants.*
19. **Mercede, J. Frank.** *How To Perform Short-Circuit Calculations- Part 2.* EC&M, Dec., pp 36-40, 1995.
20. **Mercede, J. Frank.** *How To Perform Short-Circuit Calculations- Part 3.* EC&M, April, pp 48-61, 1996.
21. **Toledo Toledo F.** *Desarrollos Computacionales Didácticos para Análisis de Fallas en Sistemas Industriales.* Tesis de Maestría. Sección de Estudios de Graduados e Investigación. ESIME. IPN.1997. México D.F.
22. **Halpin S. Mark, Parise Giuseppe.** *A Comparison of the Characteristics Currents Method with IEC, ANSI/IEEE and Dynamic Simulation Procedures for Fault Calculations.* IEEE. Transactions on Industry Applications.
23. **Enríquez Harper Gilberto.** *Protección de Instalaciones Eléctricas Industriales y Comerciales.* 2da. Edición. Noriega Editores.
24. **Knight Gene and Sieling Harrys.** “*Comparison of ANSI and IEC Short-Circuit Current Calculation Procedures*”. IEEE. Transactions on Industry Applications, Vol 29. No. 3. May/June 1993.
25. **Anderson Paul M.** *Analysis of Faulted Power System.* Iowa State University Press. 1973.
26. **Bratu N. Campero E.** *Instalaciones Eléctricas: Conceptos Básicos y Diseño.* 2ª. Edición. Alfa-Omega. 1992.
27. **Graves Bruce.** *Short Circuit studies and Harmonic Analysis / studies (what, why and When are They Needed).* Cement Industry Technical Conference. IEEE. 1998.
28. **Roeper Richard.** *Short-circuit Currents in Three-phase Systems.* 2<sup>nd</sup>. Edition. Wiley. 1985.
29. **Corrales Martín Juan.** *Introducción a los Fenómenos Transitorios.* Marcombo. 1983.
30. **Das J. C.** *Power System Analysis. Short Circuit Load Flow and Harmonics.* Marcel Dekker Inc. New York. 2002.

31. **Navarro José A., Montañés Antonio, Ángel Santillán.** *Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión: Sistemas de maniobra, medida y protección.* 2<sup>da</sup>. Edición. Paraninfo. 1999.
32. **Beeman Donald.** *Industrial Power System Handbook.* 1<sup>st</sup>. Edition. McGraw Hill 1955.
33. **Stagg G.W., El-Abiad.** *Computer Methods in Power Systems Analysis.* New York. Mc. Graw Hill, 1968.
34. **Pierre Conrad.** *Sample Suystem for Three-Phase Short Circuit Calculations.* IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 26. No. 2.March/April 1990.
35. **Gross C. A.** *Power System Analysis.* New York, JhonWiley, 1979.
36. *Electrical Transmission and Distribution Reference Book.* 4<sup>th</sup>. Westinghouse Electric Corp. East Pittsburgh, PA. 1964.
37. **Fleck Herbert A., Mercede Frank J.** *Using Short-Circuit Currents to Perform a Protective Device Coordination Study.* IEEE Industry Applications Magazine. March/April 2000.
38. **Enríquez Harper Gilberto.** *Elementos de Diseño de Instalaciones Eléctricas Industriales.* 1a. Edición. Noriega Editores.
39. **Garzón Ruben D.** *High Voltage Circuit Breakers. Design and Applications.* Marcel Dekker, Inc. New York. 1997.
40. **Ruiz Daniel, Asiain Tomas, Olguin Daniel.** *Teaching and Research Laboratory Simulator of Electric Power Systems.* 29<sup>th</sup>. ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference. San Juan, Puerto Rico.
41. **Glover Duncan J., Sarma. M. S., Overbye Thomas J.** *Power System: Analysis and Design.* 4<sup>th</sup>. Edition. Brooks/Cole. Thomson Learning 2007.
42. **Glover Duncan J., Sarma. M. S.** *Sistemas de Potencia. Análisis y Diseño.* 3a. Edición. Thomson Learning.2003.
43. **Smith P. Thomas.** *Power System Studies for Cement Plants.* IEEE Industry Applications Magazine. July/August 2007.

## A P É N D I C E

### CICLO DE TRABAJO DE UN INTERRUPTOR DE CIRCUITO

#### TIEMPOS DE INTERRUPCIÓN

El ciclo de trabajo de un interruptor de potencia consiste en una serie de operaciones de apertura y cierre. Los tiempos asociados a estas maniobras son de suma importancia, tanto desde el punto de la estabilidad del sistema como desde el de la demanda térmica. Mientras mas tarde el interruptor en despejar la corriente de falla, mayor será el daño que la misma causará al sistema. El ciclo comienza al ocurrir la falla, en este momento el relevador detecta el corto circuito y energiza su bobina, consecuentemente se cuenta el tiempo de apertura de contactos, el cual se refiere al tiempo que toma el interruptor desde el instante en que la bobina del relevador es energizada hasta el tiempo de separación de los contactos, para finalizar con el tiempo que toma en extinguirse el arco eléctrico producido en el interruptor. El tiempo de contacto es la sumatoria del periodo que toma el relevador mas el tiempo de apertura de los contactos, el tiempo de interrupción comprende desde que se energiza la bobina hasta la extinción del arco eléctrico. Este ciclo se muestra en la Fig. A.1.

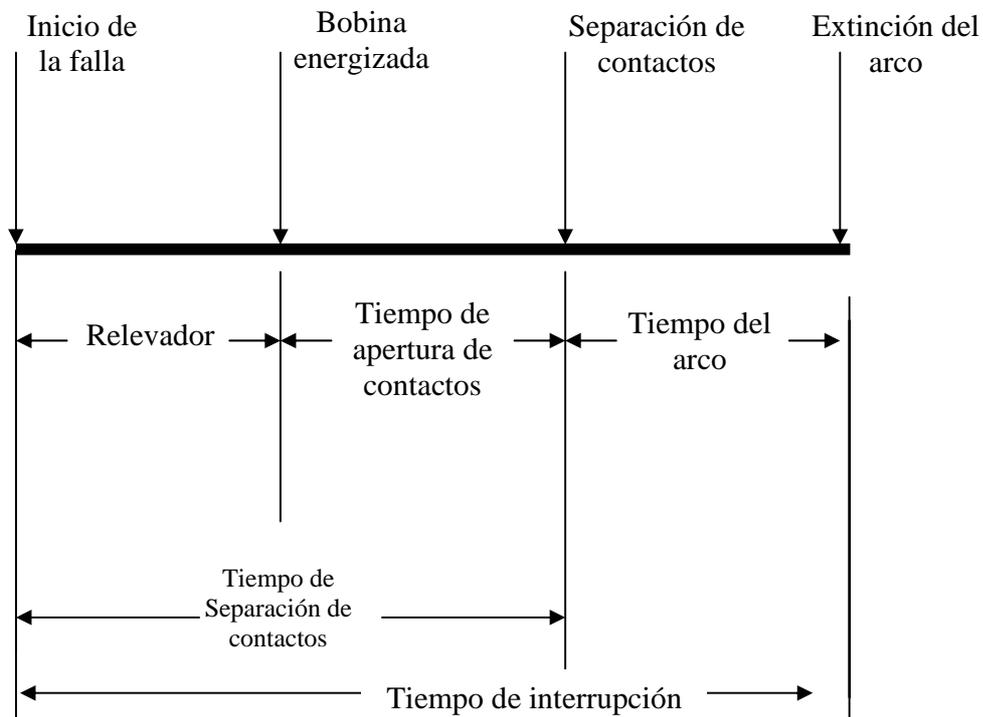


Fig. A.1 Ciclo de trabajo del interruptor de circuito.