

## TEMA 2

### CÁLCULOS DE CORRIENTES DE FALLA

#### 2.1- Métodos aproximado y exacto

En condiciones normales de carga, la intensidad de corriente está fijada por la tensión del sistema y limitada por las impedancias de red y de carga. Al producirse el cortocircuito desaparece la impedancia de carga como limitante, quedando la intensidad fijada por los dos factores restantes. En ciertos casos la falla no es neta, o sea que posee un valor de resistencia (a veces también inductancia), correspondiente al arco eléctrico, que puede llegar a atenuarla considerablemente. La presencia de esta resistencia es sumamente aleatoria, por lo que se calcula la falla considerando sus valores extremos, cero y aproximadamente 20 a 40 ohms, estudiando mas adelante su distribución estadística.

El cálculo completo de la corriente de cortocircuito, puede verse en detalle en varias publicaciones.

Nuestro interés radica solamente en analizar los casos particulares que se presentan en los sistemas de distribución industrial, en lo que respecta a simplificaciones posibles y consideraciones especiales.

Existen gráficas que dan los valores aproximados de corriente de cortocircuito inicial y valor de cresta, para circuitos de baja tensión, alimentados por transformador, como las editadas por Siemens SA, que se conocen desde hace mas de cuarenta años.

Pueden encontrarse aproximaciones algo mas completas, empleando método por unidad y considerando aporte de motores de inducción.

#### 2.2- Transitorios y asimetrías de la corriente de cortocircuito

Los sistemas de sub-transmisión y distribución de energía eléctrica son en su gran mayoría trifásicos, no obstante nosotros efectuaremos el estudio basándonos en un sistema monofásico. Esto se debe a que nuestro interés radica en el valor máximo que puede presentarse, ya sea de valor de pico o eficaz por lo tanto de las tres líneas de un sistema trifásico (desplazadas en  $120^\circ$  en el tiempo), solo una de ellas alcanzará el máximo en un instante dado, encontrándose las dos restantes en condiciones más benignas. En consecuencia si analizamos el instante en que una fase alcanza el máximo, tal situación es equivalente a tomar un sistema monofásico en la condición más desfavorable.

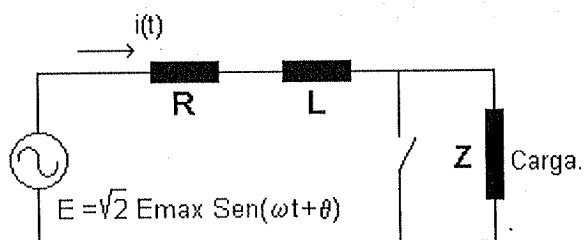


Figura 2.1

Además, no se debe olvidar que muchos de los dispositivos de protección empleados en distribución son preponderantemente monofásicos. El circuito a usar para el análisis de la corriente de cortocircuito, se muestra en la Figura 2.1.

Como se utiliza un circuito con los parámetros en serie, su aplicación se extiende a aquellos casos donde el circuito fallado no posee ramas en paralelo en su representación. Los circuitos equivalentes de un sistema fallado, bajo todos los tipos posibles de desperfecto, se muestran en la Figura 2.2. Como ya se mencionó, el procedimiento es aplicable a aquellos sistemas, cuyo circuito equivalente en componente simétrica, pueden reducirse a uno serie.

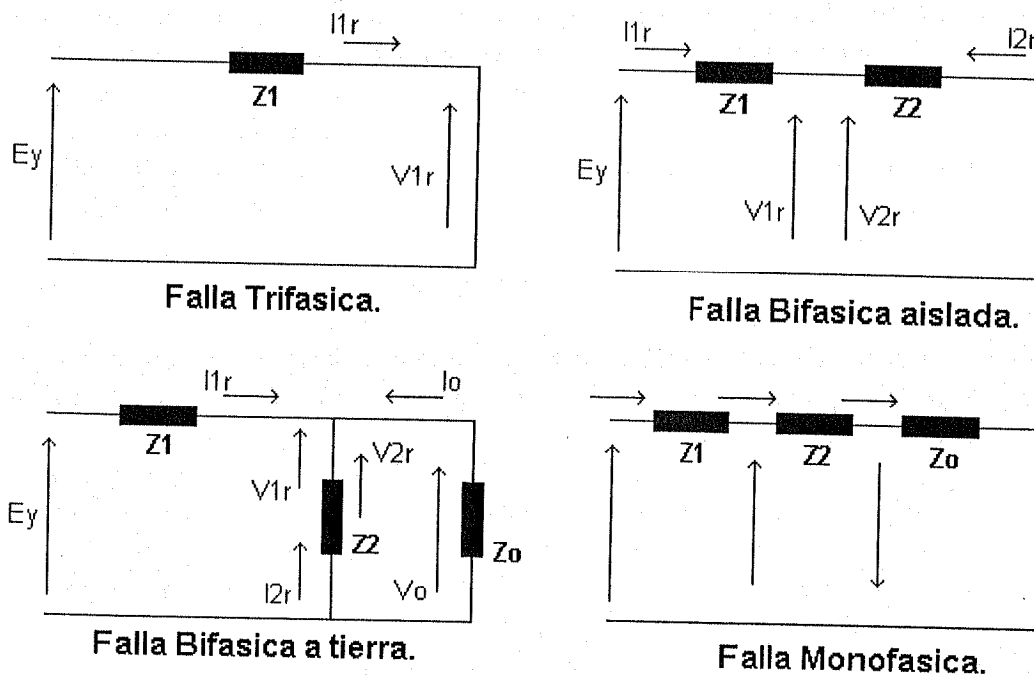


Figura 2.2

Si se observan los cuatro circuitos de la Figura 2.2, se concluye que el método no puede aplicarse con gran exactitud al caso de falla bifásica a tierra. No obstante, sacrificando algo de precisión en beneficio de la facilidad del trabajo, extendemos este método a todos los tipos posibles de fallas.

El circuito de la Figura 2.1, responde a la siguiente expresión:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \theta) \quad (2.1)$$

La solución de esta ecuación diferencial, empleando cualquiera de los métodos usuales, da como resultado:

$$i(t) = \sqrt{2}I \left[ \sin(\omega t + \theta - \phi) + \sin(\phi - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (2.2)$$

donde:

$i$  = valor instantáneo de la corriente.

$$I = \text{valor eficaz de la corriente de falla} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$\omega = \text{pulsación angular dada por } \omega = 2\pi f \text{ con } f = \text{frecuencia.}$$

$$t = \text{tiempo.}$$

$$\theta = \text{ángulo que determina el momento en el cual se produjo el cortocircuito, medido a partir del pasaje por cero de la tensión.}$$

$$\phi = \text{ángulo del factor de potencia que encuentra esa corriente.}$$

dado por:

$$\text{ArcTg}\left(\frac{X}{R}\right)$$

$$\frac{X}{R} \leq \frac{25}{6} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Med. Tensión} \\ \text{Baja Tensión} \end{array}$$

$$R = \text{resistencia del circuito.}$$

$$X = \text{reactancia del circuito.}$$

$$L = \text{inductancia del circuito.}$$

$$E = \text{valor eficaz de la tensión.}$$

### 2.2.1- Asimetría de la corriente de falla

De la observación de la expresión (2.2), se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- dentro del corchete existen dos sumandos, el primero de ellos es una función seno del tiempo; o sea se trata de un elemento periódico, cuya amplitud y frecuencia son constantes a lo largo del tiempo, significa que es el término que da la corriente de régimen permanente, se la denomina componente de corriente alternada.
- el segundo elemento dentro del corchete, es una función que se amortigua en el tiempo en forma exponencial, según la constante de tiempo  $L/R$ , lo que nos dice que al cabo de un cierto lapso desaparecerá totalmente, dependiendo de los valores de las constantes del circuito, resistencia e inductancia. A esta se la denomina componente unidireccional o de continua, su nombre deriva del hecho que se amortigua sin oscilar.
- en esta expresión existen dos elementos que definen el comportamiento del transitorio, estos son los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  cuyos significados se indicaron previamente.
- según los valores que adopten los ángulos descriptos, pueden encontrarse situaciones extremas. Es importante recalcar que los valores de  $\phi$ , están determinados por los parámetros del circuito, o sea para un circuito dado el  $\phi$  queda fijado. En cambio la situación difiere fundamentalmente cuando se habla del ángulo  $\theta$  ya que él solo está regido por el azar, en otras palabras el cortocircuito puede presentarse en cualquier instante. El concepto enunciado quizás es el más importante para la comprensión del fenómeno de la corriente asimétrica.

- si el cortocircuito se presenta en un momento tal que  $\theta = \phi$ , de la ecuación (2.2), la componente de corriente continua se anula; quedando solo el primer elemento del corchete, por lo tanto no hay régimen transitorio, a esta corriente se la denomina simétrica. Tal situación, si bien es cierto que es muy remota, no significa que sea imposible, por lo tanto es un caso real, no solo ideal.

- la otra condición extrema, tiene lugar cuando se presenta el desperfecto en el momento en que  $\theta = 0^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ , bajo tal situación  $R/L = 0$  transformándose el segundo elemento del corchete en  $+1$ . En tal caso el valor de pico podría llegar a valer 2,828. Pero tal situación es ideal, pues si bien es cierto que perfectamente puede presentarse el caso de que  $\theta = 0^\circ$  es imposible que  $\phi = 90^\circ$  ya que siempre los circuitos poseen algo de resistencia. Se la llama corriente asimétrica.

- entre estos dos valores pueden presentarse infinidad de situaciones, en otras palabras el segundo término del corchete estará siempre comprendido entre  $-1$  y  $+1$ .

Como ya se dijo, es imposible que se presente la situación  $\phi = 90^\circ$ , o sea  $R/X = 0$ , en la práctica se adopta un valor límite, que es sumamente improbable que sea superado, salvo condiciones extraordinariamente anormales. Este valor límite depende del fabricante o de la norma a la que responde y está comprendido entre  $X/R = 6,59$  y  $X/R = 25$ , o en términos del factor de potencia  $\cos \phi = 0,15$  o  $\cos \phi = 0,04$  respectivamente.

### 2.2.2- Factores de asimetría.

El continuo crecimiento de los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica, trae como consecuencia que las corrientes de cortocircuito que se presentan, son cada día mayores, por lo tanto su poder destructivo, desde el punto de vista térmico y electrodinámico se incrementa en forma paulatina. Debido a ellos los dispositivos de protección e interrupción deben estar diseñados para manejar estos montos y para evitar al máximo el daño que pueda sufrir la instalación; debiendo ser muy veloces en su operación. Este hecho trae como consecuencia que tales dispositivos tengan que entenderse con los valores iniciales transitorios de la corriente de cortocircuito.

El fenómeno transitorio puede subdividirse en dos partes, la atenuación simétrica respecto al eje de tiempos, causada por una característica intrínseca de la máquina sincrónica que convencionalmente se toma como que la máquina posee impedancia variable definiéndose así tres impedancias: subtransitoria, transitoria y permanente. Esta parte del fenómeno, como ya se mencionó se traduce en una amortiguación de la corriente a medida que transcurre el tiempo, pero se mantiene simétrica respecto a tal eje.

La máquina sincrónica ofrece la característica de ser estable en si misma, o sea que si se presenta alguna alteración, reacciona oponiéndose a ella. En nuestro caso, la máquina se encuentra entregando energía eléctrica con una corriente en modulo y ángulo, cuando se produce un súbito cortocircuito, frente a él los circuitos cerrados de la máquina reaccionarán para mantener el **Flujo concatenado constante**. La consecuencia de ello es la aparición de corrientes de reacción en los circuitos principal de campo y en el de amortiguamiento (jaula de ardilla), las cuales poseen su reflejo en la corriente de armadura. El análisis es: la corriente de falla es muy inductiva, o sea desmagnetizante, disminuye el flujo concatenado, aparecen corrientes para reforzarlo en el circuito de amortiguamiento que refleja en la armadura a la llamada corriente subtransitoria. El circuito de campo también genera una corriente cuyo reflejo se denomina transitoria.

Ambas corrientes son reacción y sus reflejos carecen de fuente externa para mantenerlas, por lo cual se atenúan en base a las constantes de tiempo propias de los circuitos que las originaron, esto significa que la subtransitoria lo hace en base a la relación  $L/R$  de la jaula de amortiguamiento y el efecto transitorio se atenúa siguiendo la constante del circuito de campo. Las constantes de tiempo son función del tamaño de la máquina, pero en general podemos afirmar que el efecto subtransitorio desaparece luego de 3 a 10 ciclos y el transitorio entre 10 y 40 ciclos, tiempos relativamente cortos para los valores usuales de las protecciones.

La restante parte, es lo que se conoce como asimetría de la corriente de cortocircuito, lo que provoca que la onda atenuada en el tiempo, que se mencionó en el párrafo anterior se desplace separando su eje de simetría del eje nombrado. Este apartamiento desaparece con el tiempo y se considera como causado por una corriente continua superpuesta a la alterna.

Este transitorio es quien permite clasificar a los cortocircuitos en próximos y alejados del generador sincrónico. Si la distancia desde el generador hasta el punto en donde se produjo la falla es grande como para que la impedancia intercalada enmascare a las subtransitoria y transitoria se deja de lado esta parte del transitorio, considerando solo lo que produce la asimetría, entonces a esta falla puede llamársela "**alejada del generador**". En cambio si los valores subtransitorios y transitorios tienen un peso considerable frente a la impedancia total del circuito, debe tenérselos en cuenta, si es que no se desea cometer gruesos errores, este tipo de falla se denomina "**próxima al generador**".

El análisis que sigue tiene en cuenta solo a los cortocircuitos alejados del generador, o sea se desprecia la influencia de las distintas reactancias del generador sincrónico. Esta es la situación, es la que se presenta casi exclusivamente en la sub-transmisión y distribución de la energía eléctrica, donde las tensiones pueden considerarse como medias y bajas, por ejemplo: 220/380 V, 2,2 kV, 3,3 kV, 6,6 kV, 13,2 kV, 33 kV y 66 kV.

Las expresiones normalmente usadas para determinar los valores de las corrientes de cortocircuito que pueden presentarse en un punto dado del sistema, (ver Figura 2.2) dan el resultado en valor eficaz simétrico. Lo que en realidad atraviesa a las diversas partes del sistema es una corriente con valores instantáneos variables en el tiempo, asimétricos. Si se efectúa la verificación o el dimensionamiento de los equipos en base al valor eficaz simétrico, puede suceder que no sean capaces de soportar los asimétricos, por lo tanto para este análisis es imprescindible contar con los valores reales, ya sea para estudiar los esfuerzos electrodinámicos como los efectos térmicos. En consecuencia lo que nosotros debemos utilizar son los valores de pico (los esfuerzos electrodinámicos son proporcionales al cuadrado del valor de pico de la corriente) y los eficaces asimétricos (las solicitaciones térmicas son proporcionales al  $\int i^2 dt$ ) su determinación es sumamente compleja y no resulta práctico perder un buen número de horas en su cálculo, por ello será mucho mas cómodo disponer de curvas o tablas que den los números por los cuales hay que multiplicar a los valores eficaces simétricos para encontrar los correspondientes de pico y eficaz asimétrico. A estos números es a quienes se denomina factores de asimetría.

#### - Primer Factor de Asimetría:

$$\begin{aligned}
 I_{cc\ max} &\rightarrow P \rightarrow I_{max} \\
 S' &= 10\ ms \\
 S'' &= I_{cc\ max} (t_s = 0) \\
 T &\rightarrow I_{cc\ max}
 \end{aligned}$$

Este valor da la relación entre el máximo monto de pico que puede presentarse en un circuito y el valor eficaz simétrico de la corriente de cortocircuito. Lo designaremos con  $P$ , y es adimensional. O sea, con cualquiera de los métodos usuales se determina el valor eficaz simétrico de la máxima corriente de falla que puede atravesar un circuito en el punto bajo estudio; multiplicando este resultado por el primer factor de asimetría se encuentra el valor de pico máximo.

#### - Determinación del primer factor de asimetría:

La corriente de cortocircuito responde a la expresión (2.2), por lo tanto el problema radica en determinar su máximo. De la observación de tal ecuación se puede deducir que se trata de una función de dos variables  $\theta$  y  $t$ , pues una vez que el circuito se ha construido,  $\phi$  deja de ser variable.

Dicho ángulo, está relacionado con las constantes características del circuito, mediante:

$$\phi = \text{ArcTg}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2.3)$$

De esta forma el problema se reduce a determinar el máximo de una función de dos variables el cual se resuelve haciendo:

$$\frac{df(t, \theta)}{d\theta} = \frac{df(t, \theta)}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

Efectuando las operaciones indicadas y mediante una serie de transformaciones trigonométricas, se llega a que:

$$\text{Tg}(\phi - \theta) = \text{Tg}(\phi) \quad (2.5)$$

$$\phi - \theta = \phi \text{ o } \phi - \theta = \phi + 180 \quad (2.6)$$

que son los puntos de pasaje por cero de la onda de tensión.

Lo cual significa que el máximo de la expresión se presentara para  $\theta = 0$ , por lo tanto la ecuación (2.2) se transforma en:

$$i(t) = \sqrt{2}I \left[ \sin(\omega t - \phi) \right] + \sin(\phi) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) es una función de una sola variable:  $t$ , para encontrar su máximo, se la deriva con respecto a  $t$  y se iguala a cero, encontrando:

$$\frac{di}{dt} \bigg|_{\theta=0} = \sqrt{2}I \left[ \cos(\omega t - \theta)\omega + \sin(\phi)e^{-\frac{R}{L}t} \left( -\frac{R}{L} \right) \right] \quad (2.8)$$

La forma mas cómoda para suministrar los valores del primer factor de asimetría P, es como gráfica o curva en la cual se toma como eje vertical a P y a  $\cos \phi$  como abscisa. Por lo tanto se toman valores arbitrarios de  $\phi$ , de forma tal que sea cómodo de graficar. Con ello se despejan los correspondientes tiempos de la expresión (2.8), entrando con estos valores a la siguiente expresión, que proviene de la (2.2) con un pasaje de términos, se determinan los correspondientes P.

$$P = \sqrt{2 \left[ \sin(\omega t - \phi) + \sin(\phi)e^{-\frac{R}{L}t} \right]} \quad (2.9)$$

Con los pares de valores así obtenidos, se traza la curva  $P = f(\cos \phi)$  en la Figura 2.3.

La situación que se presenta con  $\theta = 0$ , para la cual se tienen los picos, se denomina, de máxima asimetría.

#### **- Segundo Factor de Asimetría:**

El valor así denominado, es la relación entre el máximo valor eficaz asimétrico y el eficaz simétrico de la corriente de cortocircuito. Se designa con la letra S, y por tratarse del cociente entre dos corrientes, es adimensional; por lo tanto el valor eficaz simétrico de la corriente de falla multiplicado por este factor, dará por resultado el eficaz asimétrico, lo cual nos da una indicación de la energía que atraviesa el circuito en falla.

#### **- Determinación del segundo factor de asimetría:**

Este monto indica el calor de Joule o energía térmica de la corriente de falla y tal valor está dado por la siguiente expresión:

$$dE_n = Ri^2 dt \quad (2.10)$$

Si consideramos una corriente continua que atraviesa el mismo circuito y que produce el mismo monto de energía, tendremos:

$$E_n = RI^2 dt \quad (2.11)$$

Integrando la expresión (2.10), e igualando con la (2.11) se deduce:

$$RI^2 T = \int Ri^2 dt \quad (2.12)$$

Considerando que la resistencia es constante lo que es cierto si se desprecia la variación con la temperatura entonces se tendrá:

$$I' = \sqrt{\frac{1}{T} \int i(t)^2 dt} \quad (2.13)$$

donde:

$I'$  es el valor eficaz asimétrico.

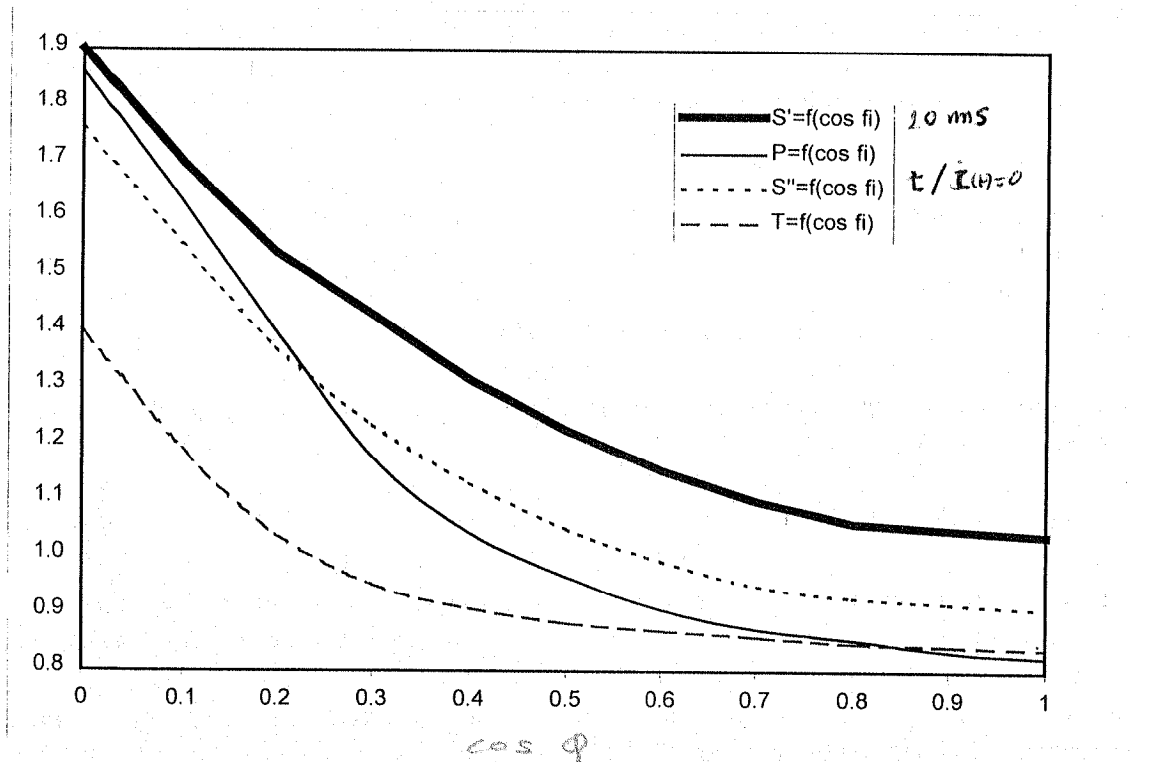


Figura 2.3

Si efectuamos las operaciones indicadas en la expresión (2.13), se obtiene la ecuación (2.14).

Haciendo el cociente entre el  $I'$  máximo y el valor eficaz simétrico, o sea  $I$  se obtendrá el  $S$  buscado.

$$I' = I \sqrt{\frac{2}{T} \left\{ \left[ -\frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t + \theta - \phi) + \frac{1}{2} T + \frac{1}{4\omega} \sin 2(\theta - \phi) \right] + \right.}$$

$$\left. \sin^2(\phi - \theta) \frac{1}{-2R/L} \left( e^{-2R/L} - 1 \right) + 2 \sin(\phi - \theta) \cdot \left\{ -\frac{1}{1 + \left( R/L\omega \right)^2} \times \right. \right.$$



$$\left[ \frac{e^{-Rt/L}}{\omega} \cos(\omega t + \theta - \phi) + \frac{R}{L\omega^2} e^{-Rt/L} \sin(\omega t + \theta - \phi) - \left( \frac{\cos(\theta - \phi)}{\omega} + \frac{R}{L\omega^2} \sin(\theta - \phi) \right) \right] \Bigg|_{t_2}^{t_1} \Bigg|^{1/2} \quad (2.14)$$

Las dificultad de esta determinación radica en el elevado numero de variables involucradas, las cuales una vez construido el circuito (o sea  $\phi$  o  $X/R$  fijados) se reducen a  $\theta$ ,  $f$ ,  $t_1$  y  $t_2$ . Como la intención de este análisis es dar una información general de  $S$ , aplicable a cualquier circuito  $\phi$  debe considerarse como otra variable.

Para reducir el número de variables, se efectúan las siguientes consideraciones:

-  $t_2$  es el límite inferior de integración y como es fácil de ver, representa el tiempo de arranque del proceso, o sea es el momento en el que se presenta el cortocircuito, por lo tanto  $t_2 = 0$ .

Ya que no nos interesan los valores extremos sino el intervalo de tiempo.

En cuanto a  $t_1$  la situación cambia, ya que al fijar  $t_2$ , el  $t_1$  es quien da el intervalo; se soluciona el problema adoptando el extremo superior en forma convencional. Para el caso de estudio de la protección, existen dos convenciones, considerar como tiempos de cálculo el pasaje por cero de la onda de corriente o un tiempo adoptado libremente, como es el de medio ciclo, 10 ms. para nuestros sistemas. La decisión de cual de ellos se emplea está relacionada con el dispositivo en estudio, si nos referimos a elementos de interrupción resulta más conveniente el empleo de la correspondiente al pasaje por cero, ya que es allí donde finaliza el proceso de interrupción.

Por lo tanto la convención a usar es la que fija:  $t_1 = t''$  tiempo del primer pasaje por cero de la onda de corriente (asimétrica).

Otra de las variables es  $\theta$  cuyo significado ya fue explicado; como los valores que tratamos de determinar son los máximos posibles, se deben tomar los ángulos  $\theta$  que producen tal condición. En algunos artículos puede encontrarse que se toma un  $\theta$  en forma convencional como por ejemplo:  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = \phi - 90^\circ$ . En realidad el valor que nos interesa es el  $\theta$  que produce el  $I'/I$  máximo, o sea el  $S$ .

El primero de los valores mencionados precedentemente, o sea  $\theta = 0$  nos coloca en la situación denominada de asimetría máxima; el segundo corresponde a una corriente cuya componente de continua es máxima, ya que en tal caso  $\sin(\phi - \theta)$  es igual a 1, lo cual puede verse en la ecuación (2.2). En cuanto a la restante variable, la frecuencia podemos demostrar que no posee influencia alguna en los valores de  $S$ . (por lo que los factores de asimetría son aplicables tanto a 50 como a 60 Hz)

El uso de la adopción  $t_1 = t''$  complica un poco los cálculos ya que ahora los valores de  $\theta$  modifican el tiempo  $t''$ . No obstante puede aplicarse el siguiente análisis:

- aparece el grupo  $2\pi f t''$ , en numerosas oportunidades dentro de la expresión (2.14), el cual cumple con:

$$2\pi f t'' = k\pi \quad (2.15)$$

T:  $I_{pmax}$ . Valor promedio de las oscilaciones por las fases / se usan también la energía de las dist. fases interactiva entre si.

Reemplazando en la expresión (14), se obtiene una ecuación la cual resulta independiente del tiempo, quedando en función de  $k$ . El problema radica en la determinación de  $k$ , el cual es independiente de la frecuencia, pero depende de  $\theta$ . Para obtener el mencionado valor recurrimos a la expresión (2.2), igualándola a cero, reemplazando  $\omega t''$  por su igual  $2\pi f t'' = k\pi$  y teniendo en cuenta que en el segundo sumando:

$$\frac{R}{L} t'' = \frac{R}{X} 2\pi f t'' = \frac{R}{X} k\pi \quad (2.16)$$

Expresar el segundo sumando del término de la derecha en función de  $R/X$  no presenta ninguna complicación ni demasiada artificialidad, ya que el valor elegido como referencia para el graficado es  $\cos \phi$ , y sabiendo que  $R/X = 1 / (\tan \phi)$ .

Encontrar una expresión que de  $k$  en función de las restantes variables involucradas es muy complejo, por lo tanto para la determinación de tal elemento, se prefirió emplear un método iterativo. Como consecuencia podemos afirmar que el valor máximo de  $I'/I$  o sea  $S$ , depende de los elementos  $\phi$  y  $\theta$ .

Por lo tanto se dispone de una función de dos variables de la cual se debe determinar el valor máximo; debido a su complejidad matemática, para tal obtención se utilizó el siguiente método:

- se tomaron valores arbitrarios de  $\cos \phi$ , los cuales permitieran un fácil y exacto trazado de la correspondiente curva, para cada uno de ellos se calculó el  $I'/I$  con el ángulo  $\theta$  variable desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$  de  $\frac{1}{2}$  grado en  $\frac{1}{2}$  en grado. De todos los montos obtenidos, para distintos  $\theta$  y un mismo  $\cos \phi$  se separó el mayor, o sea el  $S$ . En la Figura 2.3, se trazo la función  $S = f(\cos \phi)$ .

#### **- Tercer Factor de Asimetría:**

Se le da esta denominación al cociente entre el valor eficaz asimétrico promedio máximo de las tres fases y el eficaz simétrico; se lo designa con la letra  $T$ . Su uso se reduce casi exclusivamente a la aplicación en interruptores trifásicos.

#### **- Determinación del tercer factor de asimetría:**

Solo se efectúa la determinación para la convención de  $t$ ; que es el tiempo correspondiente a medio ciclo, ya que hablar del primer pasaje por cero de la corriente en un caso donde se tienen tres ondas desfasadas en  $120^\circ$  no posee mucho significado ni aplicación.

Por lo que se mencionó previamente el valor promedio se encuentra calculando la suma de tres montos de  $S$  (para  $t'$ ) cuyos ángulos de conexión son:  $\theta$ ,  $\theta+120^\circ$ , y  $\theta+240^\circ$ ; dividiendo en tres al resultado. Nuevamente se debe tomar valores arbitrarios de  $\cos \phi$  y para cada uno de ellos calcular  $I'$  promedio /  $I$  con  $\theta$  variable desde  $-5^\circ$  hasta  $180^\circ$  de grado en grado, tomando de todos ellos el máximo, que es el  $T$ . El resultado de tales cálculos se gráfico en la Figura 2.3.

#### **Utilización de los factores de asimetría:**

- Para determinar el valor de pico máximo de la corriente de cortocircuito que puede atravesar un sistema, se obtiene primeramente el primer factor de asimetría P, entrando a la Figura 2.3 con el factor de potencia del circuito recorrido por la corriente de falla. Este número P, multiplicado por el valor eficaz simétrico de la corriente de perturbación dará directamente el pico en amperes de cresta.
- El valor eficaz asimétrico máximo y el valor eficaz asimétrico promedio máximo, se determinan empleando el mismo procedimiento pero utilizando las correspondientes curvas de la Figura 2.3.

### 2.3- Distribución y valores típicos de las corrientes de falla

La distribución cuantitativa aproximada de las fallas del tipo de cortocircuito, se muestran en la tabla 2.1.

Uno de los hallazgos mas importantes del estudio realizado por el Electric Power Research Institute, fue que la intensidad de falla que se presenta es bastante mas baja que los valores esperados, por ejemplo en el caso de falla a tierra el valor promedio medido es de 2100 A (promedio 36 % del máximo), con un máximo registro de 6100A, a pesar de que el cálculo sugería un valor promedio de 8500 A. Para el caso de falla bifásica el promedio fue de 3200 A (promedio 48,5 % del máximo) con un máximo de 6600 A. Los valores citados previamente son eficaces.

**Tabla 2.1: Distribución por tipo de falla**

Características de la falla	Incidencia (%)
Monofásicas a tierra	65 (64 [5])
Bifásicas	10 (11 [5])
Bifásicas a tierra y dobles a tierra	20 (6 [5])
Trifásicas	5 (2 [5])

Además, la posibilidad de que se produzca una falla con la asimetría máxima, o sea estableciéndose en la zona del pasaje por cero de la tensión, es muy baja, siendo demostrado por los resultados en el campo. Tales experiencias indican que la mayoría de las fallas se originan en la zona del valor de cresta de la tensión, fundamentalmente entre 80 y 90 °, 60 % de las fallas comenzaron a menos de 5 ° de la cresta de tensión.

Aproximadamente el 50 % de las fallas registradas no mostraban asimetría, su valor promedio de relación asimétrica / simétrica fue de 1,11 con un 24 % de valores mayores a 1,2; 7,1 % mayores a 1,4 y una sola falla (1,4 %) alcanzando un valor 1,6. Los valores se calculan en base al cociente de los montos eficaces para medio ciclo. La relación X/R promedio fue de 1,41, con una constante de tiempo promedio de 2,81 ms. El valor de X/R no muestra relación alguna con la intensidad de falla.

El 80 % de los transformadores del sistema estudiado se encontraban conectados en triángulo - estrella, con el centro puesto a tierra, tensiones de cortocircuito entre 6 y 8

%, conectados a sistema donde más del 55 % de la tensión de alimentación se encontraba entre 12 y 13 kV, cuyas características son muy similares a nuestros sistemas típicos de distribución.

## 2.4- Colaboración de los motores

Si el sistema protegido posee motores conectados, estas máquinas contribuirán corrientes a la falla durante un tiempo relativamente corto, dependiendo del tipo de motor y de la inercia motor - carga mecánica.

Esta contribución muy frecuentemente es dejada de lado, pero debido al gran uso de motores en los sistemas de distribución, fundamentalmente industriales, no solo en cantidad de máquinas sino también en potencias unitarias, se hace cada día mas necesaria la consideración y determinación en amplitud y duración de esta corriente en los cálculos de cortocircuito. De esta manera se puede predecir con mayor certeza el accionar de las protecciones y las capacidades de ruptura necesarias.

La determinación de si es necesario considerar el aporte de los motores al cortocircuito o no, se efectúa en base a las siguientes reglas:

- Es despreciable si la sumatoria de todas las corrientes de carga de los motores conectados directamente al punto de falla es menor que el 1% de la componente inicial de la corriente de falla en el punto, sin considerar a los motores.

$$\sum I_{mm} \leq 0,01 \cdot I''_k \quad (2.17)$$

- Es despreciable si el cociente entre la suma de las potencias de cargas de los motores y la suma de las potencias aparentes de los transformadores intercalados entre la falla y los motores, es menor o igual a 0,8 dividido por la diferencia del cociente del 110 veces la suma de las potencias aparentes de los transformadores y la potencia de cortocircuito inicial en la barra en falla, menos 0,3.

$$\sum P_{mm} / \sum S_n \leq 0,8 / (110 \cdot \sum S_n / S''_k - 0,3) \quad (2.18)$$

donde:

$\sum I_{mm}$  = sumatoria de todas las corrientes de carga de los motores conectados directamente

$I''_k$  = componente inicial de la corriente de falla en el punto

$\sum P_{mm}$  = suma de las potencias de cargas de los motores

$\sum S_n$  = la suma de las potencias aparentes de los transformadores intercalados

$S''_k$  = potencia de cortocircuito inicial en la barra

Cuando la tensión aplicada al estator del motor se reduce rápidamente, debido por ejemplo a un cortocircuito, el flujo en el motor no puede cambiar a igual velocidad que la tensión de alimentación, además, la inercia mecánica propia la mantendrá girando por varios ciclos de la duración de la falla.

El flujo remanente genera una tensión, inicialmente igual a la fuerza electromotriz antes de producirse la falla, decayendo el citado flujo con la constante de tiempo del circuito de corriente y flujo asociados, por lo que la componente de alterna inicialmente es igual a la corriente de arranque directo.

Por lo tanto, durante la falla el motor de inducción actúa como una fuente generando componentes de alterna y de continua, ambas atenuándose en base a:

$$i_{ca} = I_s \cdot e^{-t/t_d} \quad (2.19)$$

$$i_{cd} = 2 \cdot I_s \cdot e^{-t/t_a} \quad (2.20)$$

donde:

$I_s$  = corriente de arranque directo

$t_d$  = constante de tiempo de corriente alterna

$t_a$  = constante de tiempo de corriente continua

A partir de ensayos experimentales, se determinan las expresiones para las constantes de tiempo:

$$t_d = X_{st} / (2 f R_2 (s=0)) \quad (2.21)$$

$$t_a = X_{st} / (2 f R_1) \quad (2.22)$$

donde:

$X_{st}$  = reactancia de dispersión a plena tensión, con rotor detenido.

$R_2(s=0)$  = resistencia circuito rotórico a deslizamiento cero (ohm)

$R_1$  = resistencia circuito estatórico (ohm)

$f$  = frecuencia (Hz)

Los valores típicos para motores de inducción de 380 V, son:

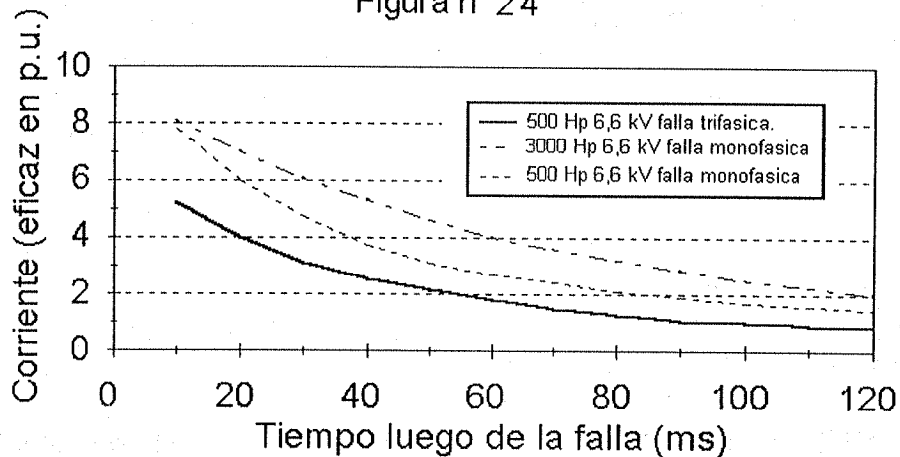
**Tabla 2.2: Constantes de tiempo para corriente suministrada por motores**

Potencia (Hp)	$t_d$ (ms)	$t_a$ (ms)
10	20	10
100	50	40

Además, la corriente generada bajo condiciones de cortocircuito monofásico es típicamente mayor que para el trifásico, como se muestra en la Figura 2.4.

## Contribución del motor a la falla

Figura n° 24



La velocidad nominal del motor también es un factor crítico, ya que máquinas con menos de 6 polos, o sea de 1000 rpm hacia arriba, la corriente aportada a la falla tarda mucho mas tiempo en atenuarse.

En general es imprescindible tener en cuenta la colaboración, para máquinas de tensiones de 2,3 kV o mayores.

La Figura 2.5, muestra los valores de corriente en función del tiempo para motores de 2-4 polos y más lentas, para el peor caso o sea considerando falla monofásica.

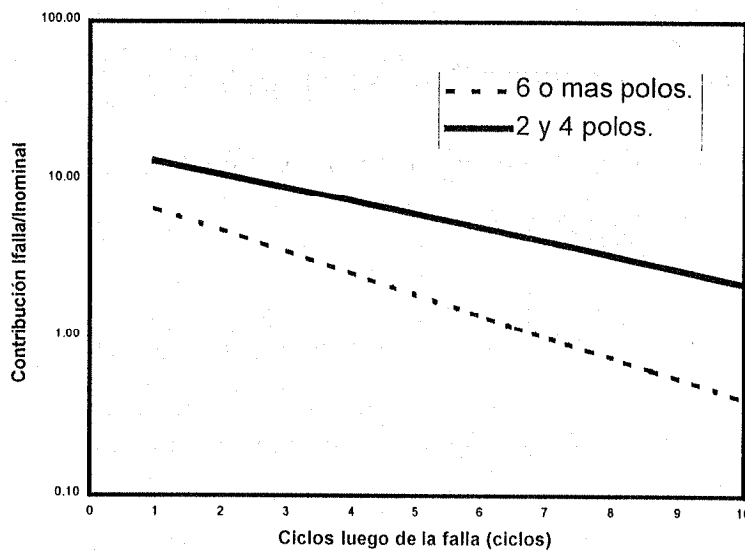


Figura 2.5

### 2.5- Efecto de la cogeneración

Se habla de cogeneración descentralizada en un sistema de distribución, cuando generadores pertenecientes al usuario, se encuentran conectados en el lado del usuario

del medidor. Día a día tales combinaciones se vuelven mas frecuentes, por el interés de los usuarios de emplear al máximo sus recursos energéticos.

Los sistemas normales de distribución son construidos en forma radial con alimentación desde un extremo, teniendo sus protecciones coordinadas para tal función. Al disponer algún usuario de generación propia, el sistema se convierte a una especie de red, donde algunas de las fallas podrán ser alimentadas desde dos (o mas) fuentes, encontrándonos con casos donde la corriente de falla tendrá ahora sentido opuesto al original.

El estudio del sistema se comienza por medio de la individualización de las zonas alimentadas radialmente y aquellas con posible inversión de corriente. En las primeras el estudio se efectúa en la forma convencional.

En el segundo caso, se deben introducir elementos con direccionalidad y "juegos de interruptores", que poseen un elemento que comanda y otro que actúa, frente a la señal del primero, recibida por alguna vía de comunicación.

Otro de los factores a analizar es el tiempo muerto que se les debe o puede dar a los interruptores, para evitar la reconexión en contrafase o fuera de posición con los generadores, ya que podría sacar a todo el sistema.

La protección de estos sistemas se aproxima cada vez mas a la correspondiente a los sistemas de transmisión, con la aparición de conceptos nuevos para distribución, como son estabilidad, etc..

## **2.6- Efecto del transformador en el sistema**

En las redes de baja tensión, la impedancia ofrecida por el transformador es decisiva, ya que generalmente supera a las demás impedancias intercaladas. La tensión de cortocircuito, voltaje necesario para hacer circular la corriente nominal por el transformador con el secundario en cortocircuito, nos da una idea del valor de tal impedancia, o sea a medida que la tensión de cortocircuito en por ciento aumenta, la caída originada por la corriente de carga en su impedancia lo hace de igual manera, reduciendo la intensidad de falla.

Cuando se han trazado los circuitos en componentes simétricas, el transformador presenta la particularidad de poseer impedancias de secuencia cero fijadas por el tipo de conexión, como puede verse en la Figura 2.6.

## **2.7- Impedancia de falla, distribución estadística**

En el estudio de la protección de un sistema de distribución, es necesario conocer los valores mínimos y máximos de la corriente de falla en cada punto bajo análisis. Usualmente los valores máximos se consiguen con falla próxima a la generación, tensión en sus valores altos e impedancia de falla nula.

En cambio los valores mínimos se presentan cuando la tensión está en valores bajos (valle de carga), impedancia de fuente para generación mínima y un valor distinto de cero de la impedancia de falla.

Para los sistemas de distribución, los dos primeros elementos usualmente no son importantes, por lo que frecuentemente se los desprecia, restando únicamente la impedancia de falla  $Z_f$  como determinante de los valores mínimos y máximos de corriente de falla. El valor de  $Z_f$  es sumamente variable, dependiendo de la causa de la falla, el tipo de falla y el ambiente en el que se produce.

Diagrama.		Circuito equivalente.	Impedancia vista del lado de la carga.
Fuente.	Carga.	Impedancia de secuencia cero.	
			$Z_{oL} = \text{infinito}$
			$Z_{oL} = \text{infinito}$
			$Z_{oL} = Z_1$
			$Z_{oL} = \text{infinito}$
			$Z_{oL} = Z_1 + 3 Z_n$
			$Z_{oL} = \text{infinito}$
			$Z_{oL} = \text{infinito}$
			$Z_{oL} = \text{infinito}$

Figura 2.6

Una falla entre líneas de una línea aérea, causada por una rama seca o muerta posee elevada impedancia y no involucra tierra. Un conductor caído al suelo representa una impedancia elevada si se encuentra sobre el pavimento seco o muy baja si cayó sobre



una corriente de agua o charco. Además es variable con el tiempo, pudiendo comenzar con valores altos progresando hacia bajos y a la inversa pudiendo incluso auto eliminarse.

La indefinición en esta impedancia es el eslabón más débil en el procedimiento para determinar la corriente mínima, provocando en ciertos casos que no se la calcule, adoptando como mínimo a la capacidad de sobrecarga del sistema. El inconveniente de esta simplificación es que fallas de alta impedancia no serán detectadas por la protección, cuando su valor es inferior a la de sobrecarga.

La solución mas usual radica en emplear un valor máximo adoptado en base a la experiencia, recurriendo a estudios estadísticos. El primero de ellos realizado en los años 30 determinó que la impedancia se encontraba entre 5 y 25 ohms, estudios posteriores realizados en los años 50 y 60 recomiendan utilizar 40 ohms como máximo para el cálculo de las corrientes mínimas.

En base a lo expresado la determinación del valor de  $Z_f$  es una solución de compromiso, que debe tomarse considerando que la protección debe detectar ese valor, pero que siempre existe la pequeña posibilidad de que se presenten impedancias mayores, con corrientes menores al mínimo calculado y por ello que pasen inadvertidas para la protección.

Un estudio indirecto de las resistencias de falla, realizado sobre 1375 fallas, donde se midieron la corriente y tensión, calculando la resistencia de falla que se le debe agregar a la impedancia del sistema para obtener los valores medidos, muestra que tal resistencia está comprendida entre 5 y 25 ohms.

En el mismo trabajo se muestra una gráfica de valores acumulativos de resistencia aparente, Figura 2.7, a partir de la cual se obtiene el valor más probable como 20 ohms. Es sorprendente la aparición de valores negativos, los cuales pueden deberse mas a errores de la medición que a un justificativo real.

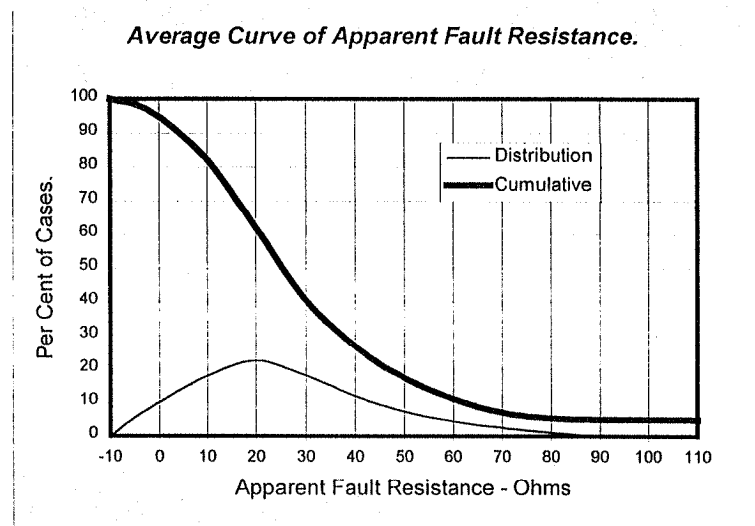


Figura 2.7

Del estudio del EPRI, ya citado, se obtienen una serie de valores de impedancia o resistencia de falla determinados en base a registros oscilográficos tomados frente a la operación de algún elemento de protección, encontrando que los valores mas probables

están entre 11 y 13 ohms, con valores extremos de 2 y 40 ohms con un número muy bajo de eventos.

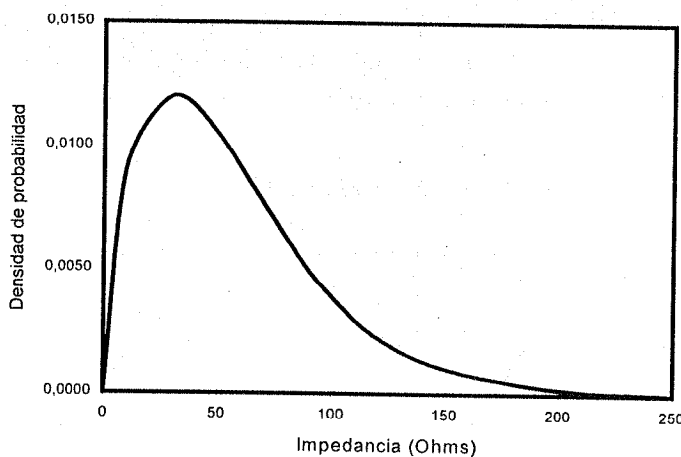
### Fallas de alta impedancia:

Se trata de fallas que presentan un arco con una impedancia tal que muchas veces la corriente que erogan es menor que la nominal de carga del sistema, por lo cual su identificación es imposible con los dispositivos normales de sobrecorriente. Estas fallas son de alta peligrosidad para el público y poseen elevado riesgo de incendios. Se asocian fundamentalmente con las fallas a tierra, las cuales representan cerca del 70 % del total de fallas, por lo tanto su presencia en un sistema es muy probable.

**Tabla 2.3: Corrientes de falla**

12,5 kV.

Superficie	Corriente (A)
Asfalto seco	< 1
Hormigón	<1
Arena seca	<1
Arena húmeda	15
Césped seco	20
Pasto seco	25
Césped húmedo	50
Hormigón armado	75



**Figura 2.8**

Su presencia se debe fundamentalmente a la caída de conductores sobre superficies secas y el contacto de ramas con los mismos. Estudios especializados demuestran que la impedancia puede alcanzar un valor desde 0 hasta 1000 ohms, con la mayoría de los valores entre 10 y 100 ohms, lo cual conduce a la recomendación de efectuar el cálculo de mínima con 40 ohms. Los valores típicos para un alimentador de 12,5 kV se muestran en la tabla 2.3.

Estos valores son superiores a los mostrados en el párrafo anterior, pero debe tenerse en cuenta que posiblemente valores mayores hayan pasado desapercibidos para la protección y por ello no registrados.

Se ha tratado de hallar la distribución probabilística de los valores de impedancia, mostrando en la Figura 2.8 una curva típica determinada empleando la distribución de Weibull, con un valor máximo de 30 ohms y un medio de 56 ohms.

En conclusión, se deben calcular para cada punto las:  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ,  $i_{max}$ ,  $i_{asim}$ .

## 2.8- Efectos de las corrientes de falla, explosiones, energía liberada, gabinetes, distorsión de barras, etc.

La corriente de cortocircuito presenta fundamentalmente efectos térmicos y electrodinámicos. Los efectos térmicos dependen de la energía liberada o calor de Joule, dado por la expresión:

$$E_t = \int R \cdot i^2 \cdot dt \quad (2.23)$$

Donde se ve que interviene no solo la intensidad de corriente, sino también el lapso de tiempo. En esta expresión se está considerando que el tiempo de duración de la falla es suficientemente corto como para que no haya disipación de calor, por radiación o convección.

El detalle de este estudio se verá mas adelante al analizar a los conductores.

También deben estudiarse los esfuerzos de tracción y compresión, causados por la dilatación y contracción térmica, especialmente en caso de barras.

Los esfuerzos electrodinámicos son originados por la corriente circulando en conductores en paralelo, que se repelen o se atraen según la corriente circule en distinto o en igual sentido. Tales fuerzas tratan de doblar las barras y / o conductores, conjuntamente con la tendencia a distorsionar las estructuras. La fuerza está dada por:

$$F = 0,2 \cdot I_s^2 \cdot l / a \quad (2.24)$$

donde:

$F$  = fuerza en Newton

$I_s$  = corriente de cresta en kA

$l$  = longitud del conductor entre los apoyos en cm.

$a$  = distancia entre los centros de los conductores en cm

En caso de corriente alterna, la fuerza de atracción o repulsión varía con el cuadrado de la corriente, por lo que la frecuencia de tal fuerza es el doble de la correspondiente a la potencia de red.

Las fuerzas pueden ser de formas muy variadas, causadas por conductores paralelos, perpendiculares, en ángulo, etc.

## Energía liberada en gabinetes o recintos cerrados

Uno de los objetivos de la protección es limitar el efecto de las fallas al mínimo posible, tal efecto es función de la energía dejada pasar por los elementos de conexión y la liberada en el punto de ubicación de la falla. El primer elemento se considera en el estudio de la protección individual de cada uno de ellos, por ejemplo conductores, transformadores, barras, etc. empleando el concepto de energía específica. El segundo factor se considera mediante el estudio del arco producido en el punto en falla.

El citado arco es altamente variable en posición, intensidad y tipo de falla, ya que usualmente comienza como falla monofásica a tierra o bifásica, derivando rápidamente en una trifásica, hecho que se produce usualmente en un tiempo de 5 a 15 ms.

El análisis del comportamiento es sumamente complejo, mas allá del alcance del presente tratamiento, ya que tenemos conjunción de sistemas electrodinámico, termodinámico, gran influencia de la geometría y de las condiciones ambientales previas a la falla.

Cuando hablamos de equipamiento en media o baja tensión una de las exigencias para su existencia es que la corriente de falla supere a los 1000 A.

El efecto del arco dentro de un gabinete puede ser dividido en dos tipos de daño:

1- veloz elevación de la temperatura del arco, y la extensión de la columna de arco en forma explosiva, produciendo una elevación de presión dentro del recinto del orden de 2 a  $3 \times 10^5$  Pa.

2- elevada temperatura con alto poder destructivo, alcanzando valores entre 5 y  $10 \times 10^4$  °K

El cálculo de la corriente correspondiente a este tipo de arco puede hacerse empleando un método semiempírico deducido en base a experiencias de campo y simuladas en laboratorio, el cual considera el efecto de la tensión y la longitud en forma de ecuación:

$$\rightarrow k_y = 43,6 \times U_r^{-1} + 0,015 \times U_r^{-0,16} \times d \quad (2.25)$$

para  $d < 60$  mm

$$\rightarrow k_y = 1,92 \times U_r^{-0,26} + 0,27 \times U_r^{-1} \times d \quad (2.26)$$

para  $d \geq 60$  mm

el próximo paso consiste en obtener a partir de la Figura 2.9 el valor de  $K_b$  en función del  $K_y$  determinado previamente y la relación R/X, donde  $k_b$  es la relación de la corriente de falla de arco con respecto a la corriente máxima de cortocircuito trifásico ( $I''_{k(3)}$ ).

Los valores normales de  $k_b$  se encuentran entre 0,3 y 0,6, lo que significa que la resistencia del arco reduce la corriente de falla a valores del 30 al 60 % de la trifásica.

La corriente por si sola no es suficiente para determinar el daño, ya que la duración de la falla puede alcanzar tiempos tan extensos como 100 o 200 ms., debiendo por ello estudiarse la energía.

La energía de falla posee tres componentes. La más importante, teniendo entre el 40 y 60% del total es la que produce la sobre-presión dentro del gabinete. La energía empleada en calor, radiación, convección y conducción representa del 30 al 40%. Del 10 al 20 % se emplea en el efecto de las denominadas raíces de arco, que erosiona funde y vaporiza el material conductor.

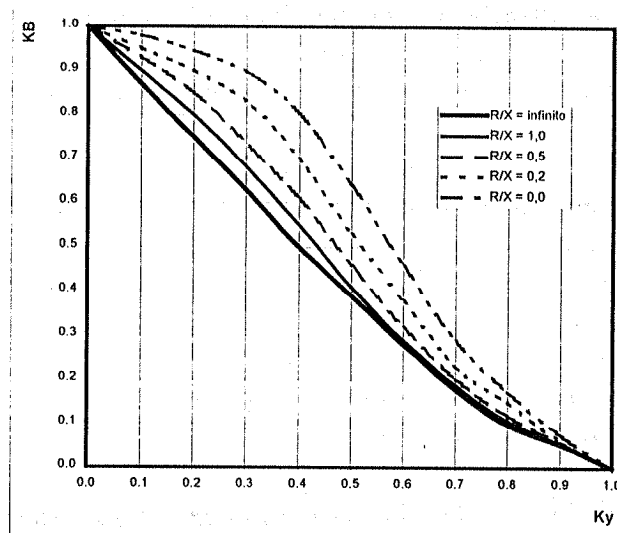


Figura 2.9

En base a ensayos experimentales se deduce:

Energías menores a los 100 kW, no requieren cambio ni reparación de elementos, solo una limpieza para extraerles el hollín y restablecer el poder dieléctrico de partes aislantes.

Energías de arco entre 100 y 140/150 kW producen efectos térmicos de los componentes, pequeño quemado causado por las raíces del arco, sin impedir el posterior funcionamiento de los equipos.

Rangos entre 150 y 250 kW causan daños al equipamiento que requieren reparación extensiva y costosa. Dependiendo de la ubicación de la falla, su movimiento y de la existencia y tipo de las placas separadoras, puede ser necesario el reemplazo de paredes laterales, fondos y frentes.

\* Con valores algo mayores a 250 kW, se produce extenso daño a equipos, desarrollo de combustión y generación de denso humo negro. No obstante el arco es controlado dentro del gabinete, sin explosión ni apertura de puertas, por lo cual se puede afirmar que este valor es el límite de protección personal.

La pregunta que surge naturalmente es como se relacionan estas energías con los tiempos y corrientes, que son los parámetros manejables por el usuario.

Se define

$$K_p = P_{\text{arco}} / S''_k \quad (2.27)$$

donde:

$P_{\text{arco}}$  es la potencia en el arco

$S''_k$  es la potencia de cortocircuito de la falla trifásica

La Figura 2.10 muestra los valores de  $K_p$  en función del tiempo obtenidos experimentalmente para tres valores de corriente de falla, de la cual se concluye:

- El arco tarda de 0,4 a 0,6 ms en desarrollarse
- La pendiente de crecimiento es función de la corriente
- Luego de 15 ms de establecido el arco, se estabiliza, manteniendo la conductibilidad, longitud y forma, cumpliendo con las ecuaciones de los sistemas termodinámico y

electrodinámico, como así mismo de las condiciones geométricas. O sea la potencia del arco permanece constante.

- La sobrepresión interna crece mas rápidamente que la potencia, alcanzando su máximo en tiempos de 5 a 8 ms.

Empleando el citado criterio se puede determinar el tiempo permisible en base a la adopción de las siguientes energías límites, 250 kW para protección personal y 100 kW para protección de equipos:

$$t_p = \text{Energía permitida} / (k_p \times S''_k) \quad (2.28)$$

Si la falla que puede presentarse está entre las máximas posibles, 65 a 100 kA, se debe fijar un tiempo de duración máxima de arco de 5 ms.

Para corrientes inferiores, se determinan los tiempos en base a la última expresión, adoptando un  $k_p$  de entre 0,22 y 0,27 como se deduce de la figura anterior.

Si se emplean los valores de  $I^2 t$  resulta:

$$I^2 t_{\text{arce f.}} \leq (I^2_{\text{falla}} \cdot t_p) = (k_b^2 \cdot I_{k(3)}^2) \cdot (\text{Energía permitida} / k_p \cdot 3^{1/2} U_n I_{k(3)}) \quad (2.29)$$

que simplificando produce:

$$I^2 t_{\text{arce f.}} \leq (k_b^2 / k_p) \cdot (I_{k(3)} / 3^{1/2} U_n) \cdot \text{Energía permitida} \quad (2.30)$$

Recordando que la energía permitida es de 100 o 250 kW.

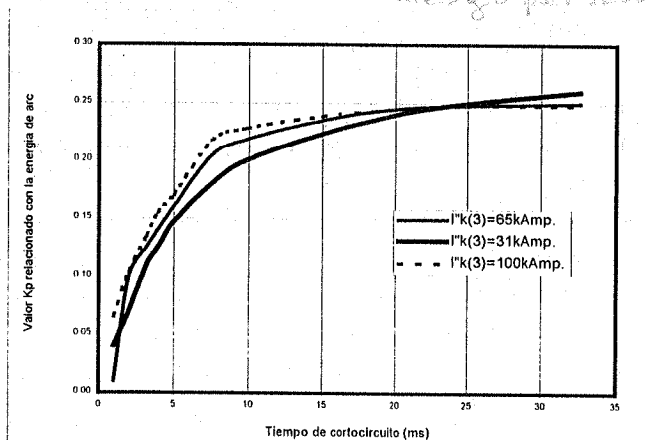


Figura 2.10

## 2.9- Puesta a Tierra:

Los sistemas eléctricos de potencia deben conectarse a tierra por razones técnicas y de seguridad, de hecho la mayoría están puestos a tierra ya sea directamente o a través de una impedancia. La puesta a tierra se logra mediante el enterramiento de piezas metálicas conectadas al neutro del sistema. De esa manera se logra un camino de baja impedancia entre el neutro y el gran suelo conductor, lo que garantiza que la tensión del neutro con respecto a tierra será pequeño, bajo cualquier condición.

Sin embargo existen muchos sistemas funcionando con el neutro libre o sea aislados de tierra. Los partidarios de tales sistemas los defienden en base a que son más económicos (se ahorra el conductor de tierra y la puesta a tierra propiamente dicha) y además se

puede seguir manteniendo el suministro con una fase fallada a tierra y las dos restantes sanas, lo cual es en cierta medida cierto para líneas aéreas, donde la falla no se transforma en otra polifásica, lo que si ocurre en el caso de cables donde la falla inicial produce calentamiento y quemado de aislación degenerando rápidamente en otro tipo de falla, con lo que se requiere una protección rápida de falla a tierra. Se puede brindar protección a tierra mediante un transformador con el primario en estrella a tierra, secundario en triángulo abierto y un relé de tensión dentro del triángulo.

Las ventajas obtenidas al conectar a tierra son:

- a- asegurar operación adecuada de los dispositivos eléctricos, ya que al presentarse una falla a tierra, la corriente regresa por el neutro, pudiendo ser utilizada para su detección y funcionamiento selectivo de la protección, manteniendo las partes sanas y desconectando solo las falladas
- b- brindar seguridad durante régimen y emergencias, ya que la tensión en las partes sanas es inferior a la de fase del sistema
- c- estabilizar la tensión durante transitorios, especialmente en el caso de arcos a tierra
- d- disipar descargas eléctricas y rayos sin disturbios para el sistema.

Las condiciones de un sistema desde el punto de vista de la puesta a tierra, puede clasificarse en:

a- Donde al menos en un punto, el neutro es conectado permanentemente a tierra, ya sea en forma directa o mediante una impedancia de valor óhmico bajo. A tal sistema se lo considera puesto a tierra en forma efectiva si en caso de falla línea - tierra, la tensión de las fases sanas no supera al 80 % de la de línea del sistema. Tal caso se logra normalmente cuando todos los neutros de los transformadores se ponen a tierra en forma sólida. El término conexión sólida se debe definir mas precisamente en función de la relación de corrientes de falla. Podemos demostrar que la corriente de falla monofásica puede estar comprendida entre 0 y 3 veces la trifásica, además la sobretensión de las fases sanas pueden estar entre 0,6 y 2 veces la de fase nominal, en este amplio margen se dice que la puesta a tierra es sólida si la relación de reactancia secuencia cero a reactancia secuencia positiva no es mayor que tres y la relación resistencia secuencia cero sobre reactancia secuencia positiva no es mayor que uno.

Existen casos, donde para puesta a tierra rígida se cumple que  $\phi_1 - \phi_0 \leq 30^\circ$ , pudiendo I unipolar superar a tripolar hasta en un 50 % y la tensión nunca supera al 90 % de la de línea.

b- Donde al menos en un punto, el neutro es conectado permanentemente a tierra mediante una bobina de supresión de arco. La intención es que la mayoría de las fallas a tierra se auto-eliminen sin interrumpir el suministro. Si la falla no se auto-elimina, se dispone de tres métodos de operación.

b-1- La falla se desconecta automáticamente luego de un retardo corto

b-2- Se la permite durante un tiempo no mayor de 125 h/a y un máximo de 8 h en 24 h.

b-3- Se la permite durante mayor tiempo que el anterior pero sin alcanzar estado de régimen

c- Todos los neutros están aislados de tierra

d- Sistema monofásico con un conductor puesto a tierra.

Estas diferencias son muy importantes desde el punto de vista de los descargadores de sobretensión y de los interruptores particularmente con su capacidad de ruptura, especialmente en los casos b-3 y c.

La puesta a tierra múltiple es desaconsejable por la circulación de corriente entre neutros con la consiguiente interferencia a las comunicaciones. Los defensores de la puesta a tierra múltiple señalan como ventaja de que de esta manera se elimina el riesgo de perder la conexión a tierra del sistema, posibilidad que existe si la máquina que suministra la puesta única puede ser sacada del sistema.

La puesta a tierra única permite la limitación de las corrientes a tierra por la inserción de una impedancia, manteniendo este valor constante independientemente del número de máquinas conectadas al sistema. Si la conexión es sólida, de igual manera se limita la corriente de falla a la máxima que permite la máquina individual, con lo que se obtienen las siguientes ventajas adicionales:

- Reducir el quemado y fundido de los dispositivos recorridos por la corriente de falla, como interruptores, transformadores, cables, barras, etc.
- Reduce el esfuerzo electrodinámico en los portadores de la falla
- Disminuye el riesgo de accidente eléctrico al personal, por corrientes distribuidas o parásitas en el camino hacia la toma de tierra
- Reduce explosión del arco y el fuego en la zona de la falla a tierra
- Disminuye la caída de tensión y posterior recuperación, al eliminarse la falla.
- Controla las sobretensiones

Para sistemas de hasta 66 kV es usual la puesta a tierra sólida. En caso de mayores tensiones, con extensas líneas aéreas la posibilidad de falla a tierra y la corriente que se produce son muy altas, por lo cual es aconsejable colocar resistencias limitadoras, a valores suficientes para ser detectados por las protecciones. Debiendo asegurar que no se pueda presentar un incremento de valor óhmico de la puesta a tierra por ejemplo, lo que sería indetectable por las protecciones. Para tensiones muy elevadas, donde se pueda lograr un considerable ahorro de costo con el empleo de la aislación gradual, mínima desde extremo de neutro hacia máximo en extremo de fase, se vuelve nuevamente conveniente la puesta a tierra sólida.

Las resistencias que se emplean son fundamentalmente de dos tipos, malla metálica formada por barras de acero o de fundición y por otro lado líquida. No existen valores normalizados para tales resistencias, en general el criterio es que limite la corriente de falla a la nominal del mayor generador o transformador del sistema.

De esta manera, empleando protección diferencial, se logra proteger el 80/85% del bobinado, con regulaciones de disparo entre el 20 y 15%. Valores menores son posibles, pero existe el riesgo de disparo intempestivo por elevadas corrientes pasantes. Este 20 % desprotegido no es riesgoso ya que es improbable que se produzca una falla en esta zona con tan bajo valor de tensión. Tales porcentajes se refieren a la mayor máquina del sistema, por lo que las menores tendrán menos de 20% desprotegido.

En sistemas con el neutro aislado, la única corriente que circulará a tierra es la capacitiva de las tres fases sanas. Si la línea es transpuesta, las capacidades de las líneas contra tierra serán iguales, por lo que podemos afirmar que no existirá corrimiento entre el neutro del sistema y el neutro de las capacidades (tierra), por lo que se puede considerar al sistema con una puesta a tierra capacitiva. En tal sistema una falla a tierra no constituye un cortocircuito, siendo la corriente de falla tres veces la correspondiente a la capacitiva de cada línea, pudiendo mantenerse el sistema funcionando. En líneas aéreas tales valores de corriente son tan pequeños como para no ser detectados por la



protección, causando la elevación de la tensión hasta el valor de línea, lo que puede producir la perforación y/o el envejecimiento de la aislación. Esta perforación es inestable produciendo ondas transitorias de tensión, viajando en ambas direcciones. Una de las soluciones es la utilización de la bobina supresora de arco (Petersen), que si se calcula de acuerdo a la capacidad puede eliminar la posibilidad de arco a tierra, permitiendo el funcionamiento del sistema por mayor tiempo. En ciertos casos se coloca un interruptor en paralelo con la bobina supresora, de manera que al cabo de un cierto tiempo de producida la falla a tierra (30 seg.), si no ha habido ninguna reparación el interruptor se cierra, produciendo una falla neta a tierra y provocando la operación de la protección correspondiente. Es muy importante tener en cuenta la intensidad de falla, ya que valores mayores a 10 A deben ser interrumpidos rápidamente, pues un arco con esa intensidad es capaz de producir daños importantes en espacios confinados.

El problema se presenta por los cambios de configuración del sistema que provocan la alteración de las corrientes capacitivas, una de las soluciones consiste en colocar cambiadores de tomas para modificar el valor óhmico de la reactancia.

Para los sistemas de baja tensión, menor de 450 V, el agregado de una impedancia es innecesario debido a la resistencia propia de la toma de tierra que limita la corriente de falla.

### **Diseño de la Puesta a tierra**

La gran complejidad y elevada corriente de falla de los sistemas eléctricos actuales, requiere métodos complejos de análisis y de diseño para la puesta a tierra, existiendo a la fecha varios programas comerciales para tal fin.

El criterio de diseño es eliminar riesgo personal y minimizar la elevación del potencial de tierra, especialmente para evitar daño a los equipos de comunicaciones. Por ello se deben controlar las tensiones de contacto, de paso y de transferencia (tensiones que aparecen en estructuras no conectadas galvánicamente, solo a través de la tierra), los cuales son proporcionales a la elevación del potencial de tierra.

El comportamiento del sistema de puesta a tierra depende de:

- a- Resistividad del terreno del punto de la puesta a tierra
- b- Malla de tierra, área y geometría.
- c- Estructura del sistema eléctrico, generadores, transformadores, impedancias de tierra, torres, contrapesos, etc.

Para el diseño se realizan los siguientes pasos:

- 1- Determinación del modelo del suelo (obtención del valor de resistividad)
- 2- Suponer una estructura típica de malla de tierra
- 3- Incorporar las impedancias del sistema
- 4- Calcule elevaciones de tensión
- 5- Si los valores superan los límites, modificar la malla y retornar a 2.
- 6- Si los valores no superan los límites, fin.

### **Transformadores de puesta a tierra:**

En ciertos sistemas de distribución, como los rurales, se presenta frecuentemente la necesidad de disponer de neutro en lugares donde no se dispone de transformadores que puedan conectarse a tierra, para lo cual se emplea el llamado transformador de tierra. Tales transformadores se disponen como se muestra en la Figura 2.11. (conexión zig-zag, sin arrollamiento secundario, que ofrece una muy baja impedancia a la corriente

homopolar), donde el camino a tierra ofrece una inductancia compuesta por la suma de las impedancias del sistema a las tres corrientes de línea, mas la impedancia normal del equipo (medida cortocircuitando el secundario). El citado transformador no conduce corriente normalmente, suministrando corriente solo en el caso de que el sistema se ponga a tierra. La detección de la falla se efectúa a través de la medición de la corriente por el neutro del equipo o por desbalance de las tensiones del sistema, produciendo la operación del interruptor correspondiente, el cual normalmente efectúa uno o varias reconexiones.

El tiempo durante el cual el equipo conducirá la corriente de falla depende del tipo de protección empleada, normalmente se diseñan para conducir la corriente de falla durante un minuto sin sobrecalentamiento excesivo. El sobrecalentamiento admisible es usualmente mayor que los transformadores normales, en razón que siempre trabajan prácticamente sin carga. Las normas Americanas especifican un valor de elevación máxima durante un minuto de 175 °C, 125 °C por 10 minutos y 75 °C en forma continua. La elevación de temperatura por 1 min. se basa en que todo el calor es almacenado en el cobre, la temperatura para 10 minutos es la que indica su valor de potencia nominal.

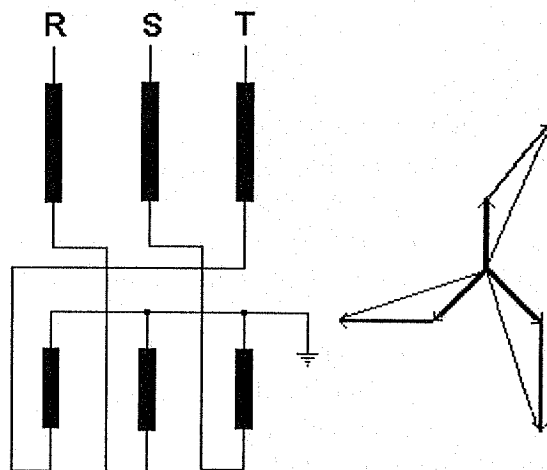


Figura 2.11

La corriente a tierra está limitada principalmente por la impedancia del equipo, de manera que la intensidad frente a una falla es equivalente al cortocircuito, siempre y cuando no exista otra impedancia en el sistema, como podría ser la de puesta a tierra. Debemos recordar que la corriente a tierra es tres veces la de fase del transformador, por lo que la impedancia externa debe agregarse triplicada para el cálculo de la impedancia de secuencia cero del sistema.

### Bibliografía

- [1] Lythall, R.T.; The J&P Switchgear Book; Newnes-Butterworths, 1972, ISBN 0-408-00069-4
- [2] Sakis Meliopoulos, A.P.; Power System Grounding and Transients; M. Dekker, 1988; ISBN 0-8247-7908-8.
- [3] SES Consulting Inc., Folleto explicativo de Softwares.

- [4] Bean, RL; Chackan N.; Moore, HR; Wentz, EC; Transformers for the electric power industry; Westinghouse Electric Corporation, McGraw-Hill, 1959.
- [5] Westinghouse Transmsion reference Book,
- [6] IEEE Green Book; Grounding; IEEE 1992, ISBN 1-55937-141-2
- [7] Roeper, Richard; Corrientes de cortocircuito en redes trifásica; Marcombo, 1985.
- [8] Garzon, Ruben D.; High Voltage Circuit Breakers, design and applications; Marcel Dekker Inc.; New York 1996.
- [9] Barnard, J. Pahwa, A.; Determination of the impacts of high impedance faults on protection of power distribution systems using a probabilistic model; Electric Power System Research, 28 (1993) pp. 11-18.
- [10] Edison Electric Institute and the Bell Telephone System, Engineering Reports of the Joint Subcommittee on Development and Research, Vol. IV, Report n° 39, 1930.
- [11] Schau, H. Stade, D.; Requirements to be met by protection and switching devices from the arcing protection point of view: Fifth ICEFA, Ilmenau, Germany, September 1995.