

CAPITULO 4.

Análisis práctico y cálculo de los índices de Confiabilidad en un sistema de distribución.

4.1 Parámetros de la energía eléctrica.

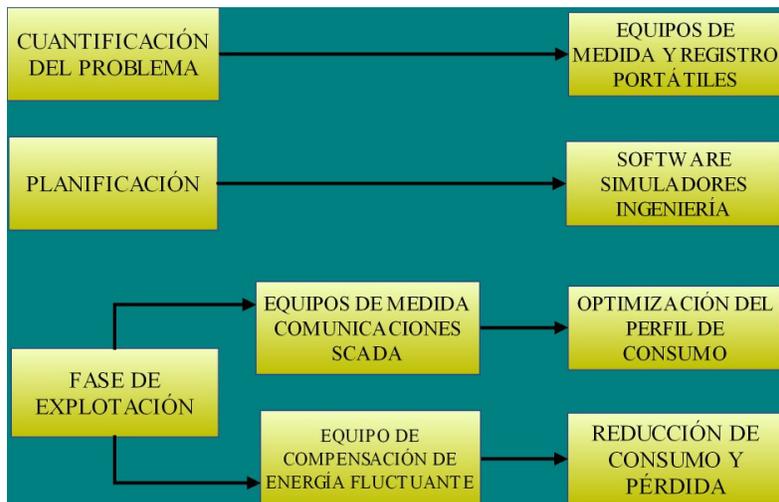
Las redes eléctricas cada día se encuentran más contaminadas, por efecto de las cargas que se conectan a las mismas, que no siempre cumplen con compatibilidad electromagnética; por otro lado el nivel de calidad de la red debe ser cada día mejor para que sea compatible con los equipos electrónicos, que conectamos a la misma.

Como la energía eléctrica tiene el inconveniente de no poder ser almacenada en cantidades significativas, se tiene que generar y transportar al momento para su uso. Esto obliga a dimensionar las instalaciones para prever la demanda máxima y los momentos de menor demanda. Por lo tanto, es un aspecto fundamental generar y transportar solo la energía útil, compensado con las cargas otros tipos de energías fluctuantes como son la energía reactiva y las distorsiones. Además, deben repartirse los consumos en el tiempo, evitando picos innecesarios y aprovechando al máximo la infraestructura de generación y periodos normales.

Otro aspecto a considerar es el de la distorsión causada por algunos equipos con componentes no lineales conocidos como interferencias electromagnéticas, que ocasionan una pérdida de rendimiento en la mayor parte de las cargas convencionales y sobrecargan innecesariamente las líneas de transmisión. Pero el mayor problema es el deterioro que producen en la calidad de la tensión, superponiendo perturbaciones, algunas de carácter periódico y otras de carácter transitorio. Dichas perturbaciones ponen muchas veces en peligro el buen funcionamiento de una serie de equipos electrónicos, informáticos y de comunicaciones, originando un problema denominado compatibilidad.



Las acciones a tomar para un uso óptimo de la energía es cuantificar el sistema a mejorar, es decir, primero hay que medir todos los parámetros eléctricos. Cualquier acción que tienda a optimizar el consumo debe partir de un conocimiento a fondo del perfil de cargas y del factor de utilización de las instalaciones. Después, con base a los resultados de los parámetros eléctricos, deberá hacerse una planificación de consumos, así como las medidas correctoras que tienden a evitar disturbios. Y finalmente, se deberá controlar automáticamente la planificación de consumos y trabajar sobre el sistema de distribución si es necesario optimizarla.



4.2 Calidad de la energía, confiabilidad y disponibilidad.

Desde la perspectiva del cliente, el problema de la calidad de la energía es poder definir, como alguna condición de suministro de energía eléctrica causa el mal funcionamiento de sus aparatos eléctricos o impiden su uso. Pero para las empresas suministradoras de energía la perspectiva es, poder percibir como se da el incumplimiento de varios estándares y normas tal como los rangos permitidos de tensión y distorsión de armónicas.

La calidad de la energía es mejor comprendida a través de la calidad de la tensión. Es decir, el mejor suministro de energía es aquel que se hace al cliente con una perfecta onda sinusoidal. Y el punto interesante es que las empresas suministradoras no tienen control sobre las distorsiones que esta presenta y generalmente suele reflejarse en las formas de onda de la corriente.

Se define a la calidad de energía como la ausencia de desviaciones en la fuente que producirá una onda de tensión sinusoidal perfecta. La perfección en la calidad de la energía es una senoide perfecta con frecuencia y amplitud constante. Y ya no existe una perfecta calidad de la energía cuando una forma de onda de tensión está distorsionada por distintas razones como: transitorios, armónicos, cambios en la amplitud o cuando la frecuencia se desvía.

Según esta definición son los clientes quienes sufren de ausencia de calidad de la energía cuando existen interrupciones, en realidad se manifiestan con la reducción de la magnitud de la tensión que se va a cero. La confiabilidad se refiere principalmente a la interrupción que sufre el cliente y, por lo tanto, esta se representa a través de un subconjunto dentro de la calidad de la energía. Y es que el conjunto principal está formado por la calidad de la energía y dentro existen dos subconjuntos uno llamado confiabilidad y otro conocido como disponibilidad y es así que las diferentes distorsiones atacan estos dos subconjuntos. Las interrupciones de duración sostenida (más de unos minutos) siempre han sido clasificadas como una cuestión de poca confiabilidad, pero para la mayoría de los servicios públicos se han clasificado otro tipo de interrupciones las conocidas como las interrupciones momentáneas (menos de unos minutos), como una cuestión de una baja calidad de la energía. Las razones son muchas y variadas para que se den estas interrupciones momentáneas ya que son el resultado de prácticas intencionales y no

intencionales, sin embargo no generan un gran número de quejas por parte de los clientes y son difíciles de medir. Hoy en día, las interrupciones momentáneas en los clientes son un importante problema de distribución y la mayoría de los ingenieros las consideran una cuestión de confiabilidad. Por lo tanto, se define a estas interrupciones como todos los aspectos de baja o alta confiabilidad en los clientes y se incluyen todos los tipos de interrupciones existentes.

Disponibilidad se define como el porcentaje de tiempo en una fuente de tensión sin interrupciones. Su complemento, la falta de disponibilidad, que es el porcentaje de tiempo de una fuente con tensión interrumpida. Dado que la disponibilidad y la no disponibilidad dependen estrictamente de las interrupciones, estas se clasifican como un subconjunto de la confiabilidad. La jerarquía de calidad de la energía es el siguiente orden primero la confiabilidad y dentro de la misma está la disponibilidad.



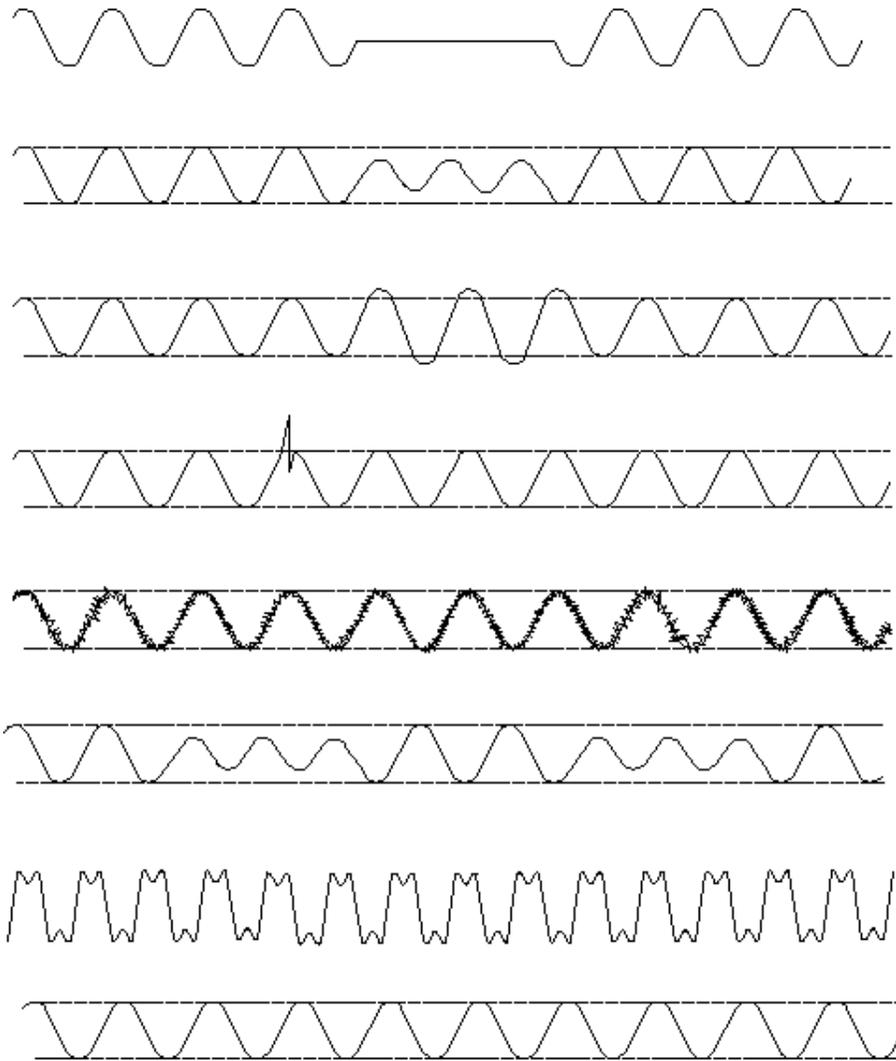
En la diagrama se visualiza a la disponibilidad como un subconjunto de la confiabilidad y la confiabilidad es un subconjunto de calidad de la energía. La calidad de la energía se refiere a cualquier desviación o modificación en la fuente de energía y produce como consecuencia una onda de tensión sinusoidal defectuosa. La confiabilidad se refiere a las interrupciones y la disponibilidad se refiere a la probabilidad de ser interrumpido.

4.3 Calidad de la energía.

Para alcanzar la calidad de energía, una compañía suministradora de energía puede gastar grandes cantidades de dinero para renovar sus redes eléctricas y dar cabida a los equipos eléctricos de alta potencia con tecnología de punta y con grandes necesidades de calidad de la energía. Por otra parte, una compañía suministradora puede gastar lo menos posible para cumplir con lo que requieren los clientes para compensar la energía perdida resultante de problemas de calidad. Dado que ninguno de los dos extremos, es conveniente, los servicios públicos y compañías suministradoras deben encontrar un equilibrio entre el costo y el nivel de calidad de la energía hacia sus clientes. Y es que los problemas surgen cuando los niveles de la calidad de la energía no se ajustan a las necesidades de equipos y sus usuarios.

Calidad de la energía también tiene relación con la frecuente proliferación de equipos electrónicos sensibles y de procesos automatizados. Una gran parte de este problema se debe a la falta de comunicación entre las compañías suministradoras y los fabricantes de este tipo de productos.

Los problemas de la calidad de la energía pueden dividirse en varias categorías, tales como interrupciones, bajas tensiones (sags), sobretensiones (swells), transitorios, ruido, parpadeos en la tensión (flicker), distorsión armónica y variación de la frecuencia. Formas de onda correspondientes a estos problemas de calidad de la energía se pueden observar en una grafica que ejemplifica cada caso.



En primer instancia en el dibujo de la parte superior hacia la inferior se muestra los siguientes problemas comunes de calidad de energía: interrupción, bajas tensiones (sag), sobretensiones (swell), transitorio (Spike), ruido, parpadeos en la tensión (flicker), distorsión armónica, variación de frecuencia. Las compañías suministradoras por lo general tratan de mantener la tensión dentro de las tolerancias de calidad definidos en las normas de la industria tales como NOM, ANSI, IEEE e IEC.

Rangos constantes del tensión aceptables por ANSI C84.1				
	Rango A (normal)		Rango B (poco frecuente)	
	minimo	maximo	minimo	maximo
uso del tensión	0.92	1.05	0.87	1.06
tensión de servicio < 600V	0.95	1.05	0.92	1.06
tensión de servicio > 600V	0.975	1.05	0.95	1.06

4.4 Desarrollo de los índices de la confiabilidad.

Los índices de la confiabilidad son análisis de conjuntos de datos bien definidos de una carga, componentes del sistema eléctrico y usuarios de la red eléctrica. La mayoría de los índices de la confiabilidad son los valores medios de la confiabilidad que caracterizan a todo un sistema eléctrico, a una región, territorio o una subestación eléctrica.

4.4.1 Desarrollo de la confiabilidad en sistemas de distribución.

En el aspecto de la calidad de la energía eléctrica, la compañía suministradora debe garantizar un servicio que cumpla con ciertos requerimientos mínimos, de tal forma que los usuarios puedan tener la certeza de que sus equipos no sufrirán daños y funcionarán correctamente.

- ✓ Continuidad del servicio.
- ✓ Regulación de la tensión.
- ✓ Control de la frecuencia.
- ✓ Contenido de armónicas.
- ✓ Desbalance de la tensión.
- ✓ Confiabilidad.

Existen cuatro factores relacionados directamente con lo que es la confiabilidad.

Un valor numérico es la probabilidad de que el producto no falle durante determinado tiempo. Por ejemplo, el valor 0.93 indicará la probabilidad de que 93 de 100 productos funcionen por un lapso previamente establecido y de que siete productos fallen antes de ese mismo lapso. Para representar la tasa de falla por unidad de producto se utilizan distribuciones probabilísticas.

El segundo factor esta relacionado con la función que desempeñará el producto. Los productos se diseñan para una aplicación determinada y de ellos se espera que sean capaces de realizarla. Por ejemplo, de un equipo eléctrico se espera que sea capaz de suministrar cierta carga eléctrica que se especifica en su diseño, no es de esperar que pueda soportar una carga que exceda lo especificado en su diseño.

El tercer factor se refiere a la vida del producto, es decir, cuanto tiempo se espera que dure éste. Por ejemplo, la vida de los neumáticos de los autos se especifica mediante diversos valores, como sería el de 36 meses dependiendo del tipo de armazón de los mismos. La vida de un producto se especifica en términos de uso, tiempo y ambos.

El último factor tiene que ver con las condiciones ambientales. No se puede esperar que un producto destinado a servir en interiores, como sería una silla tapizada, funcione adecuadamente en exteriores expuesta al sol, aire y lluvia. Dentro de las condiciones ambientales se toman en cuenta aspectos como el almacenamiento y el transporte pues, muchas veces su efecto es más severo que el uso mismo.

Son muchos los factores o las razones por las que la evaluación de la confiabilidad, se ha ido desarrollando en diversas áreas, como es el caso de la ingeniería. Algunas de estas razones son las siguientes.

- Recursos económicos limitados.
- Aumento de la complejidad en los sistemas (mayor número de componentes).
- Aumento en la intensidad del trabajo en los equipos (altas temperaturas, altas presiones, altas corrientes, etc).
- Exigencias a la calidad de trabajo del sistema, (centros de cómputo, salas de control aéreo, etc).
- Aumento del valor técnico y económico de las fallas, (por ejemplo, la falla de un revelador o un transformador, puede ser causa típica de interrupciones del servicio de energía eléctrica, en grandes extensiones geográficas).
- La automatización parcial o total de los procesos, lo que implica la desaparición de la supervisión del sistema.

4.4.2 Objetivo de la teoría de la confiabilidad.

En los cálculos de ingeniería se utilizan ampliamente los factores de seguridad que con cierta frecuencia llegan a convertirse en factores de inseguridad. Y es por esto, que el objetivo de la teoría de la confiabilidad es tener bases cuantitativas para predecir el comportamiento de la

pieza, ensamble, equipo, componente o sistema y determinar el grado óptimo de reserva sin caer en el exceso o en el defecto.

Y es que hay que tener consideraciones básicas de diseño en instalaciones eléctricas. Ya que toda instalación eléctrica debe proyectarse atendiendo criterios básicos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

Seguridad, flexibilidad, confiabilidad, simplicidad de la operación, facilidades de mantenimiento, eficacia, y bajo costo (inicial y global).

Al evaluar la confiabilidad de un sistema se persigue de cierta forma predecir el comportamiento de este, y si es necesario modificar el estado actual del sistema, de forma tal que se alcance el valor deseado de eficiencia.

Para medir el grado de confiabilidad de un sistema eléctrico, es necesario definir y evaluar uno o más indicadores, los cuales, a partir de la estadística de fallas del sistema y de sus componentes, permitan concluir si el grado de confiabilidad es aceptable o requiere modificarse.

Esto depende de un gran número de variables, pues el accionar de la mayoría de los departamentos de una empresa eléctrica, redundan en el valor de confiabilidad del servicio. No obstante lo anterior, se puede citar como variables fundamentales, las siguientes.

- La calidad y confiabilidad de los componentes
- El diseño de los componentes o su tecnología
- La arquitectura del sistema y su redundancia
- El análisis y atención de las causas recurrentes.

Cuando se evalúa la confiabilidad a nivel sistema, los indicadores pueden ser de muy diversos tipos, como por ejemplo uno de ellos el “tiempo de interrupción por usuario anual (TIU)”.

Generalmente son necesarios dos clases de indicadores: los de “diseño” y los de “operación”. Los primeros, son el resultado de un proceso analítico previo a la existencia del sistema,

obtenidos a partir del comportamiento de equipos similares; los segundos, resultan de la medida del desempeño de un sistema existente, a partir de una estadística de fallas o de interrupciones.

Los indicadores de diseño son útiles para estimar el grado de confiabilidad esperado; los indicadores de operación, para mejorar el grado de continuidad del servicio y contrarrestar las causas sistemáticas o recurrentes.

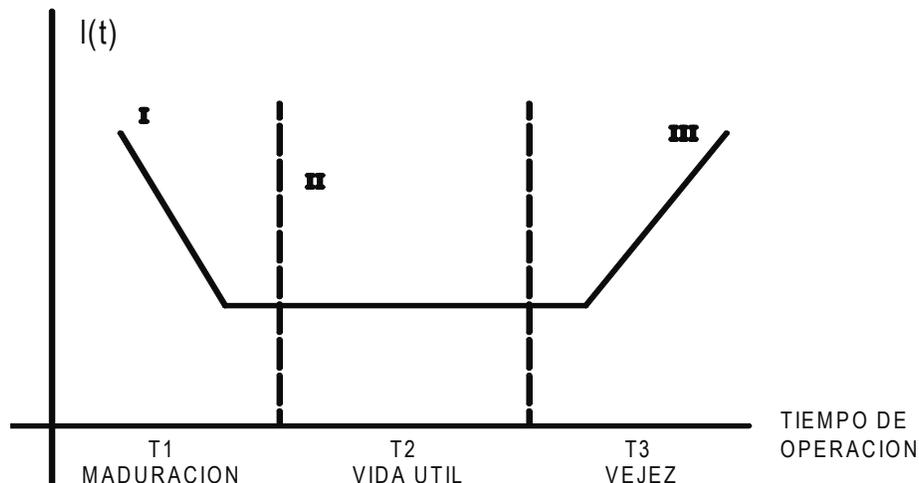
Si se evalúa la confiabilidad del sistema eléctrico por subsistema, será posible observar la incidencia de cada parte del sistema en el resultado global y con ello, decidir dónde se requiere dedicar una atención prioritaria.

Los aspectos importantes al evaluar en la confiabilidad:

- El grado de confiabilidad no puede ser el mismo para todas las instalaciones y todos los usuarios.
- Existe la posibilidad de que con menos inversión se obtenga mayor confiabilidad, producto del análisis de diversas alternativas de solución.

4.4.3 Parámetros de confiabilidad.

La curva de la tasa de riesgo tiene una forma que es característica de diversos componentes físicos. Esta forma puede ser dividida en tres regiones distintas.



Para componente reparables si T_i es la variable aleatoria que describe los tiempos de vida al termino del i -ésimo tipo de distribución utilizada ($i=1,2, 3$), el tiempo de vida resultante T del dispositivo en cuestión es una variable aleatoria definida por $T=\min(T_1, T_2, T_3)$.

Región I

- Fase de depuración
- Región de maduración
- Periodo de mortalidad.

La tasa de riesgo decrece en función del tiempo

Tipos de fallas típicas: Errores en el diseño,
Falta de cuidado en la fabricación.

Región II

- Periodo de vida útil
- Fase de operación normal

La tasa de riesgo permanece constante.

Tipo de fallas típicas: Fallas que ocurren puramente al azar.

Región III

- Fase de desgaste
- Fase de fatiga
- Periodo de envejecimiento

Tasa de riesgo que se incrementa rápidamente con el tiempo.

Tasa de fallas típicas: Fallas por envejecimiento.

4.4.4 Tipos de componentes.

Existen diversos tipos de componentes, los cuales se pueden clasificar en forma general en tres grupos.

Componentes no reparables.

Son los que son observados solo hasta que fallan, debido a que no pueden ser reparados, la reparación es muy costosa o solamente es de interés su vida útil hasta la primera falla. Sus fallas son llamadas catastróficas.

Componentes reparables.

Son aquellos que son reparados hasta que fallan y por lo tanto su vida operativa consiste en periodos alternados de operación y reparación.

Componentes ideales o con tiempo de reparación cero.

Es un grupo de componentes en el que su vida útil es muy larga, sin fallas que obliguen al sistema completo a salir de operación, pero cuando ocurre una falla se considera que el tiempo de reparación, comparado con el de operación, es prácticamente despreciable.

4.4.5 Ciclo de operación – falla – reparación – operación.

Los elementos en el sistema de distribución caen dentro del concepto general de la confiabilidad que se denomina de “*elementos reparables*” es decir que se comportan dentro del esquema OPERACIÓN – FALLA – REPARACIÓN – OPERACIÓN.

El estudio de confiabilidad se centra en el análisis simple, basado en componentes reparables, que es aplicable no solo a equipo eléctrico sino también a componentes electrónicos y mecánicos.

Para analizar y evaluar la confiabilidad es necesario conocer las formas en que los equipos y sistemas fallan a lo largo de su tiempo de operación.

De observaciones hechas a las fallas que ocurren frecuentemente en los equipos, tenemos como resultado que la gran mayoría de las fallas siguientes:

Tipo 1.- Fallas que se presentan en la fase de maduración, las cuales se deben principalmente a la condición de ajuste de los componentes nuevos a las condiciones de operación del sistema.

Tipo 2.- Fallas naturales de los componentes durante su operación o vida útil.

Tipo 3.- Fallas debidas a alteraciones de las condiciones preestablecidas de operación.

Tipo 4.- Fallas debidas a errores en el diseño original o por fabricarse con partes defectuosas.

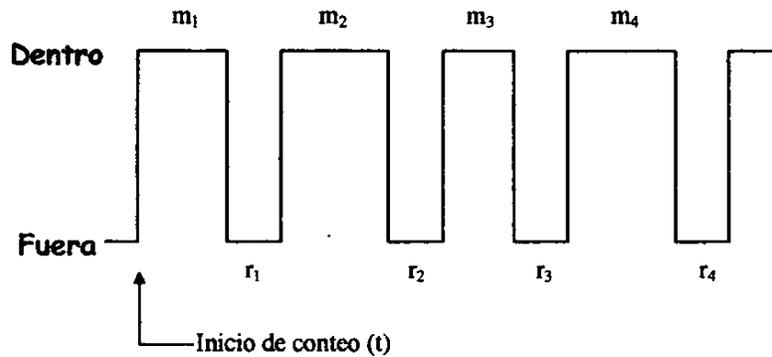
Tipo 5.- Fallas debidas a envejecimiento natural de los componentes donde algunos dispositivos del sistema van acumulando daños por fatiga y/o desgaste y no pueden seguir funcionando correctamente.

El proceso de renovación se aplica únicamente a sistemas con componentes reparables durante su vida útil, logrando con eso una operación continua. Algunas de las características que tienen los sistemas que operan continuamente son:

- Operación continua
- Mantenimiento preventivo
 - Tasa de falla baja
 - Reparaciones rápidas
 - Respaldos o redundancia

Para analizar la confiabilidad de un sistema de distribución, se debe estudiar el ciclo “operación – falla – reparación – operación”. Este concepto se basa en lo siguiente.

Si un componente es observado por un cierto periodo de tiempo en el que ocurren N ciclos de fallas y de reparaciones como se observa:



Podemos definir las siguientes variables:

m_1 = tiempo dentro.

r_1 = tiempo fuera.

También de lo anterior podemos deducir que el tiempo total en operación y el tiempo total de falla están dados por:

- Tiempo total en operación (m_T).

$$m_T = \sum m_i \text{ (horas / años)}$$

- Tiempo total de falla o de reparación (r_T).

$$r_T = \sum r_i \text{ (horas / años)}$$

La suma del tiempo total de operación y el tiempo total de reparación nos representa el periodo (T).

$$T = m_T + r_T \text{ (años)}$$

Considerando además que:

n = número de ciclos en el periodo (número de fallas)

Hasta el momento la variable ha sido el tiempo. A continuación cambiaremos el marco de referencia del tiempo a la probabilidad.

$$P_0 = R = \frac{m_T}{r_T} = \frac{m_T}{m_T + r_T}$$

$$P_1 = Q = \frac{r_T}{T} = \frac{r_T}{m_T + r_T}$$

A la probabilidad P_0 se le conoce como la probabilidad de estar dentro o confiabilidad (R) y a la probabilidad P_1 como la probabilidad de estar fuera o no confiabilidad (Q).

Ya que la confiabilidad y la no confiabilidad son complementarias tenemos:

$$R + Q = 1$$

Un ejemplo de la utilización de las ecuaciones anteriores es el siguiente. ¿Cuál es la confiabilidad de un componente que ha estado fuera de servicio 10 horas en un periodo de 10 años?

De la ecuación de la confiabilidad tenemos:

$$Q = \frac{r_T}{T} = \frac{10}{2(8760)} = 0.00057$$
$$R = 1 - Q = 1 - 0.00057 = 0.99943$$

Otro ejemplo es el siguiente. Considerando que un sistema tiene una confiabilidad de 0.9999 ¿Cuál sería su tiempo total de falla anual?

De la ecuación:

$$R + Q = 1$$

La confiabilidad es:

$$Q = 1 - R = 1 - 0.9999 = 0.0001$$

De la ecuación de la no confiabilidad despejamos a r_T tenemos:

$$r_T = (0.0001)(8760 \text{ horas/años})$$
$$r_T = 0.876 \text{ hrs/año} = 52.56 \text{ min/año}$$

4.4.6 Tasa de falla de riesgo.

La tasa de falla de riesgo está representada por (λ) y es una medida de la frecuencia con la que ocurren las fallas.

La tasa de falla la podemos calcular tanto para componentes discretos como para componentes continuos de la siguiente forma.

- Para componentes discretos:

$$\lambda = \frac{n}{NT}$$

Donde:

n= número de fallas

N= número de componentes expuestos a la falla

T= período de años.

- Para componentes continuos

$$\lambda = \frac{n}{LT}$$

Donde:

n= número de fallas

L= longitud total de componentes expuestos a la falla

T= período de años.

4.4.7 Tiempo medio de reparación.

El tiempo medio de reparación esta representado con la letra (r) y es el valor promedio de las n reparaciones en un periodo dado. Su ecuación es la siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} = \frac{U}{n}$$

Donde:

U=indisponibilidad

n= número de fallas o reparaciones

4.5 Evaluación de la confiabilidad de sistemas simples.

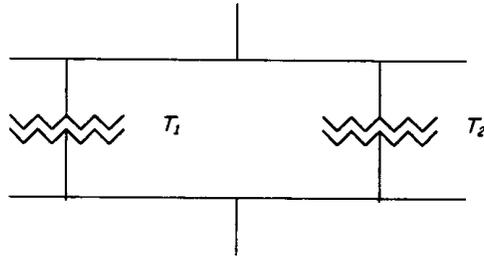
4.5.1 Modelado de sistemas simples.

En la práctica un sistema se presenta normalmente como una red en la cual los componentes del sistema están conectados en serie, paralelo, malla o combinación de éstos.

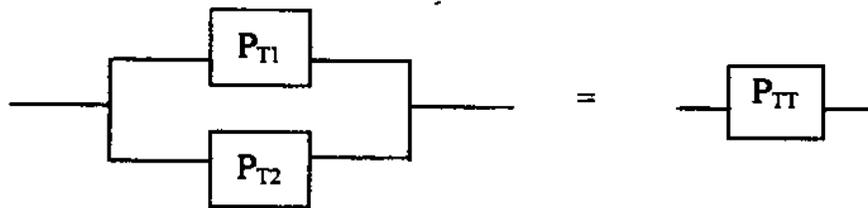
Es muy importante modelar correctamente el sistema para ello hay que entender a fondo su comportamiento y esto último deberá ser tomado en cuenta antes de evaluar la confiabilidad del sistema por medio de cualquier técnica.

Otra consideración que debe ser tomada en cuenta, es que la estructura topológica del sistema actual y la red de confiabilidad empleada para modelar al sistema no serán necesariamente las mismas.

A continuación se describe el arreglo de dos transformadores en paralelo.

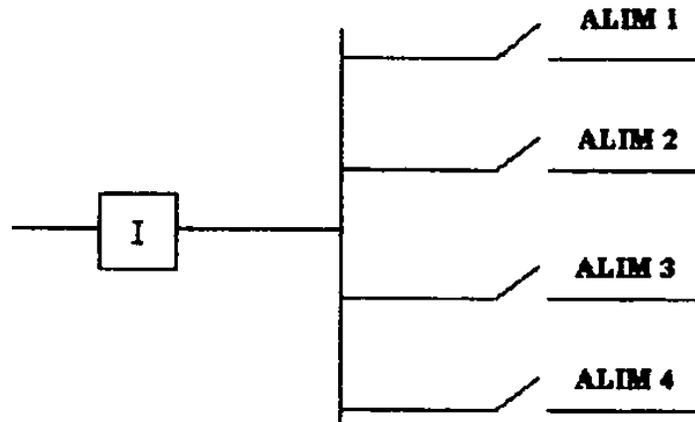


En este caso la estructura topológica de confiabilidad asociada a este sistema es representado de la siguiente manera:

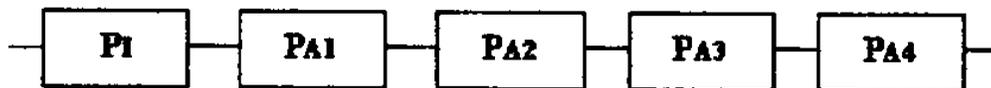


En este caso la estructura topológica del sistema es la misma que la de la red de confiabilidad.

Ahora un segundo caso, el cual está representado a continuación, que corresponde al caso de un sistema de distribución consistente de un interruptor que alimenta a cuatro ramales, entonces se considera que si alguna de las líneas falla el sistema falla.



La red que representa la confiabilidad asociada a este sistema es la siguiente:



Como puede apreciarse la topología de la red real es un circuito en paralelo, mientras que la topología de confiabilidad es un circuito serie. Por lo tanto no coincide la topología del sistema con la red de confiabilidad asociada.

Para poder evaluar un sistema simple podemos representar a éste como la interconexión de un conjunto de subsistema en serie y paralelo. Entonces la confiabilidad de cualquier sistema dependerá fundamentalmente de dos aspectos:

- La estructura topológica de sus componentes.
- El valor asociado de confiabilidad de cada uno de sus componentes.

Al evaluar la confiabilidad de un sistema se persigue de cierta forma predecir el comportamiento de un sistema y en muchos casos modificar el sistema actual, de forma tal que por medio de esta modificación se alcance el valor de confiabilidad deseado.

Se dice que un conjunto de componentes está en serie desde el punto de vista de confiabilidad si todos ellos trabajan para que el sistema funcione bien o simplemente, con que uno de los componentes falle, el sistema falla.

En cambio un sistema está en paralelo, desde el punto de vista de confiabilidad si solamente un componente necesita trabajar para que el sistema funcione.

Un sistema en serie representa un sistema no redundante, mientras que un sistema paralelo constituye un sistema completamente redundante.

4.5.2 Sistemas serie.

Considérese un sistema en serie que consiste de dos componentes independientes A y B conectados en serie, desde el punto de vista de confiabilidad. Este arreglo implica que ambos componentes deberán trabajar para asegurar que el sistema funcione.



Sean R_A , R_B las probabilidades de éxito en la operación de los componentes A y B respectivamente y Q_A , Q_B la probabilidad de falla de los componentes A y B respectivamente.

Debido a que la operación y falla son mutuamente exclusivas y complementarios.

$$R_A + Q_A = 1 \quad R_B + Q_B = 1$$

El requerimiento básico para que el sistema funcione es que los componentes A y B deberán estar trabajando. De la probabilidad condicional.

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Si los eventos A y B son independientes

$$P(A/B) = P(A)$$

Y por lo tanto:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B)$$

Lo cual implica que la confiabilidad de un sistema formado por los componentes A y B es igual al producto de sus confiabilidades, es decir.

$$R_S = R_A R_B$$

La ecuación anterior puede ser generalizada, de forma tal que.

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i$$

En algunas aplicaciones puede ser ventajoso evaluar la confiabilidad o probabilidad de que el sistema falle, por lo que la no confiabilidad de un sistema en serie será.

$$Q_S = 1 - R_A R_B = Q_A + Q_B - Q_A Q_B$$

Para n componentes

$$Q_S = 1 - \prod_{i=1}^n R_i$$

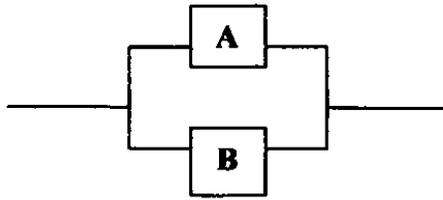
Para obtener el equilibrio de dos componentes en serie (1y2) en función de λ 's y r 's se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_S = \lambda_1 + \lambda_2 \quad r_S = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}{\lambda_S} \quad U_S = \lambda_S r_S$$

La confiabilidad de un sistema serie decrece al incrementar el número de componentes y ésta crece al reducir el número de estos componentes.

4.5.3 Sistemas paralelo.

Considérese un sistema de dos componentes independientes A y B, conectados en paralelo como se observa:



En este caso el sistema requiere solamente que un componente este trabajando para que el sistema se considere que trabaja exitosamente. Para este caso la probabilidad de éxito se evalúa del complemento de la confiabilidad del sistema.

$$R_p = 1 - Q_A Q_B = R_A + R_B - R_A R_B$$

Para n componentes del sistema se tiene que

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i$$

También se puede definir la no confiabilidad Q_p del sistema como.

$$Q_p = Q_A Q_B$$

Y en forma generalizada como.

$$Q_p = \prod_{i=1}^n Q_i$$

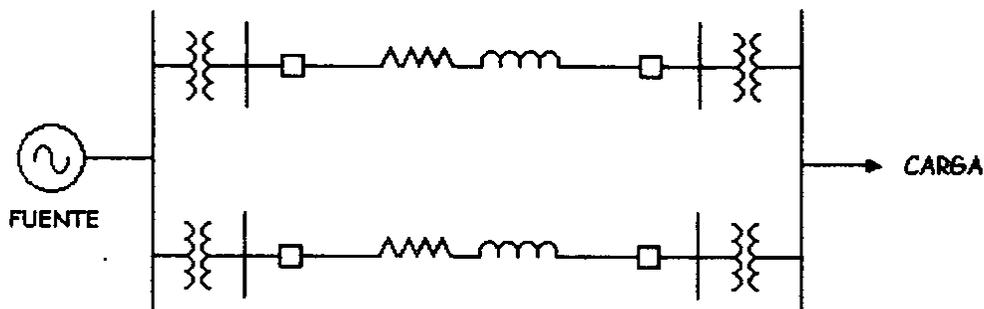
Al igual que para los sistemas en serie, para obtener el equivalente de dos componentes (1 y 2) conectados en paralelo se tienen las siguientes ecuaciones en función de λ 's y r 's.

$$\lambda_p = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \qquad r_p = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \qquad U_p = \lambda_p r_p$$

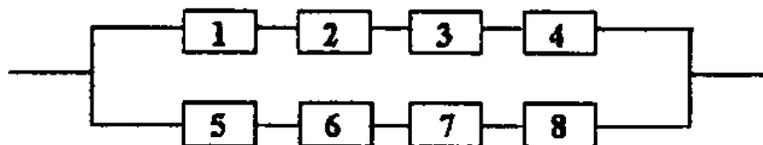
La confiabilidad del sistema crece al incrementar el número de componentes en paralelo y esto implica que se incremente el costo inicial, el peso y el volumen del sistema; por lo tanto aumenta el mantenimiento, debiéndose analizar todo esto cuidadosamente.

4.5.4 Sistemas serie – paralelo.

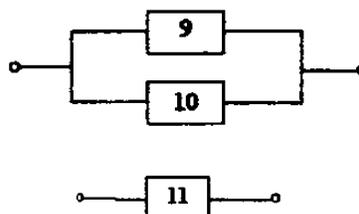
En este caso se trata de obtener la confiabilidad o la no confiabilidad a partir de la reducción de subsistemas en serie y en paralelo.



Entonces si consideramos el sistema mostrado puede reducirse a dos componentes equivalentes 9 y 10, como se puede apreciar a continuación.



A su vez los componentes 9 y 10 pueden ser reducidos al componente 11 a través de una evaluación de la confiabilidad o la no confiabilidad de dos componentes en paralelo.

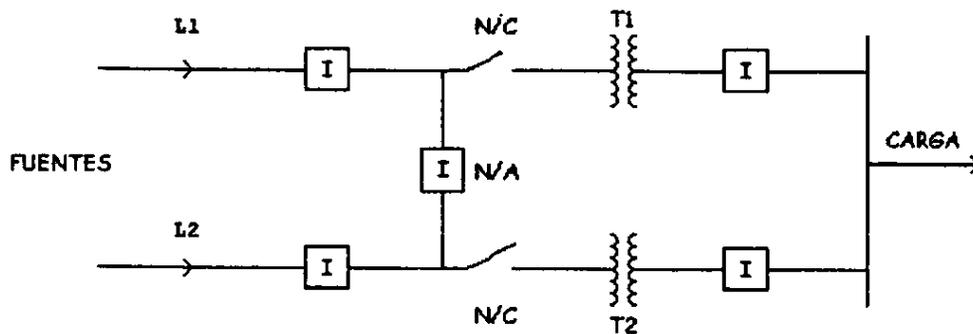


4.6 Evaluación de la confiabilidad de sistemas complejos.

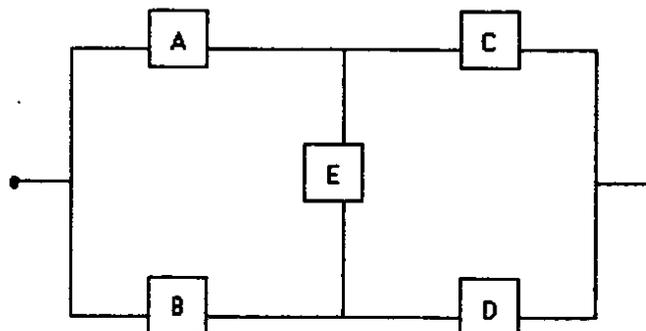
Las técnicas descritas anteriormente, están limitadas en su aplicación a sistemas y redes que tienen una estructura tipo serie y paralelo.

Muchos sistemas o no tienen este tipo de estructura simple o tienen una lógica operacional compleja, por lo que es necesario emplear un modelo adicional y técnicas de evaluación para determinar su confiabilidad.

Un sistema típico que no presenta una estructura serie / paralelo es la red tipo puente y es la que ocurre frecuentemente en diversas aplicaciones de ingeniería.



Se puede observar que ninguno de los componentes está conectado en un arreglo simple serie / paralelo.



Existen técnicas para resolver este tipo de redes como el método de la probabilidad condicional, el de cortes y conexiones mínimas, diagramas de árbol, entre otros.

La mayoría de estas técnicas son métodos formalizados para transformar la operación lógica del sistema, o la topología del sistema, en una estructura formada únicamente con componentes en serie y paralelo, trayectorias o ramas.

Los diversos métodos son similares en conjunto, la principal diferencia entre ellos radica en la presentación formal o lógica del método. Cuando se efectúan cálculos manuales, el método de solución deberá ser tan simple y directo como sea posible. Cuando se utilizan computadoras, puede ser ventajoso utilizar la misma programación básica y la misma técnica para ambos, sean sistemas simples o complejos.

4.6.1 Diagramas lógicos.

La confiabilidad de muchos sistemas puede ser evaluada con la ayuda de diagramas lógicos (llamados también diagramas de bloques de confiabilidad). De manera opuesta a los diagramas físicos, los cuales únicamente describen las conexiones físicas actuales entre los componentes.

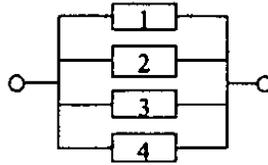
Los diagramas lógicos están arreglados para indicar que combinaciones de componentes producen la falla del sistema total. Los diagramas lógicos están por lo tanto, basados en un análisis de los efectos de falla de los elementos. Los bloques en estos diagramas representan componentes de trabajo, y la falla de un componente es indicada por la remoción del bloque correspondiente.

Si en un diagrama son removidos los bloques suficientes para interrumpir la conexión entre los puntos de entrada y salida, el sistema ha fallado.

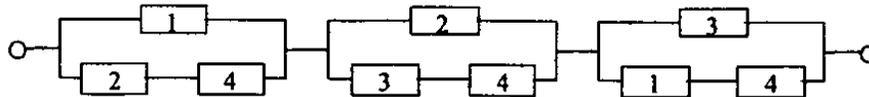
Las siguientes figuras nos muestran los diagramas físicos y lógicos para cuatro líneas de transmisión entre dos sistemas eléctricos.

- (a) Diagrama físico y diagrama lógico (para capacidades individuales de línea al menos iguales a la carga del sistema).
- (b) Diagrama lógico, si al menos 3 de las 4 líneas deben estar en servicio para prevenir sobrecarga.

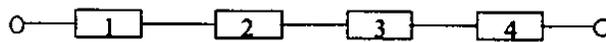
(c) Diagrama lógico, si las líneas no tienen margen de capacidad para soportar más carga.



(a)



(b)



(c)

4.6.2 Método de la probabilidad condicional

Una técnica que puede ser utilizada para evaluar la confiabilidad de un sistema complejo consiste en reducir secuencialmente el sistema en subsistemas que tengan estructuras conectadas en serie / paralelo y entonces recombinar estos subsistemas usando el método de la probabilidad condicional.

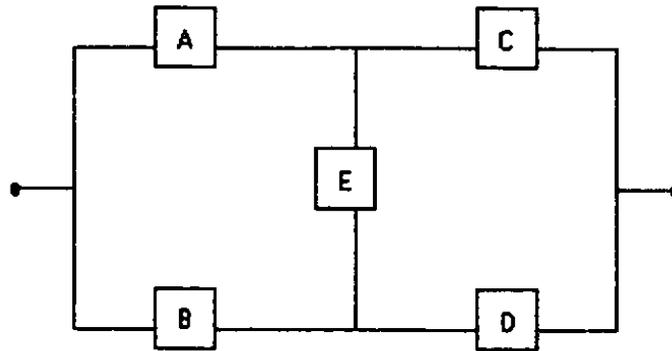
Esta técnica emplea la ecuación de la probabilidad condicional.

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/B_i)P(B_i)$$

$P(\text{éxito o falla del sistema}) = P(\text{éxito o falla del sistema si el componente X está bien}) * P(X \text{ esté bien}) + P(\text{éxito o falla del sistema si el componente X está mal}) * P(X \text{ esté mal})$.

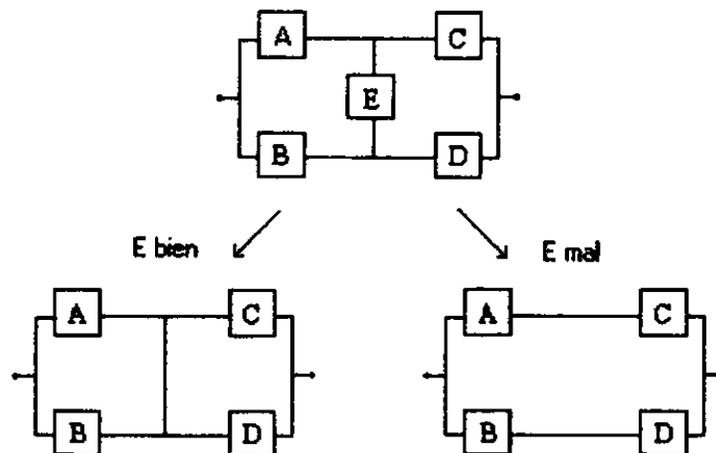
La aplicación de esta técnica se ilustra mediante los siguientes ejemplos:

Considere el nuevo sistema siguiente, en la cual el éxito requiere que al menos una de las trayectorias, AC, BD, AED, BEC estén bien. Evaluar una expresión general para el éxito del sistema y la confiabilidad del mismo si cada componente tiene una confiabilidad de 0.99.



Para aplicar el método de la probabilidad condicional es necesario primeramente escoger el componente X el cual será considerado "bien" o considerado "mal". Pueden escogerse cualquiera de los componentes desde A hasta E sin embargo, la "correcta" selección del componente puede simplificar enormemente la solución. El mejor componente para escoger como X es E para este caso.

El sistema de la figura se subdivide en dos subsistemas, uno con E considerada bien, que significa que no puede fallar, y el otro con E considerada mal, que significa que siempre está fallado. Esa subdivisión queda de la siguiente manera.:



El sistema original ha sido descompuesto en dos subsistemas cada uno de estos con estructuras simples serie / paralelo. Con E considerado bien, A y B están en paralelo, C y D están en paralelo y las dos ramas paralelas están en serie. Con E considerada mal, A y C están en serie, B y D están en serie y las dos ramas serie están en paralelo.

Estos dos subsistemas son mutuamente exclusivos ya que ninguno puede existir simultáneamente y por tanto ellos pueden ser recombinados usando el principio de la probabilidad condicional.

En algunos sistemas de ingeniería, uno o más de los subsistemas pueden necesitar subdivisiones subsecuentes antes de obtener una estructura serie / paralelo. Después de crear un grupo de subsistemas en los cuales todos los componentes están conectados en serie y paralelo, éstos pueden ser evaluados usando los principios de sistemas serie / paralelo y la confiabilidad total utilizando la probabilidad condicional.

Para este caso, la confiabilidad total del sistema será:

$$R_s = R_s (\text{si E está bien})R_E + R_s (\text{si E está mal})Q_E$$

(a) Condición: Dado que E está bien

$$R_s = (1 - Q_A Q_B)(1 - Q_C Q_D)$$

(b) Condición: Dado que E está mal

$$R_s = 1 - (1 - R_A R_C)(1 - R_B R_D)$$

Por lo tanto la confiabilidad del sistema es

$$\begin{aligned} R_s &= (1 - Q_A Q_B)(1 - Q_C Q_D)R_E + (1 - (1 - R_A R_C)(1 - R_B R_D))Q_E \quad (1) \\ &= R_A R_C + R_B R_D + R_A R_D R_E + R_B R_C R_E - R_A R_B R_C R_D - R_A R_C R_D R_E \\ &\quad - R_A R_B R_C R_E - R_B R_C R_D R_E - R_A R_B R_D R_E + 2R_A R_B R_C R_D R_E \end{aligned}$$

Si consideramos $R_A = R_B = R_C = R_D = R_E = R$ tenemos:

$$R_s = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5 \quad (2)$$

y si $R = 0.99$, se obtiene:

$$R_s = 0.99979805$$

El método de probabilidad condicional es una herramienta útil para la evaluación de la confiabilidad y es utilizada en diversas aplicaciones.

4.6.3 Método de cortes mínimos.

Se presentan las principales características de este método.

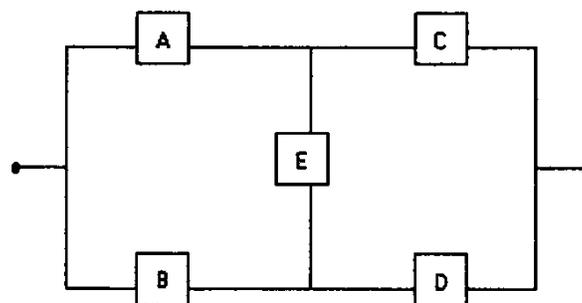
4.6.3.1 Concepto de cortes.

El método de cortes mínimos es una poderosa herramienta para evaluar la confiabilidad de un sistema por dos razones principales:

1. Este puede ser fácilmente programado en una computadora proporcionando una solución eficiente y rápida de cualquier red eléctrica.
2. Los cortes están directamente relacionados con los modos de falla del sistema y por tanto se identifican las distintas formas en las que un sistema puede fallar.

Los cortes son un conjunto de componentes que, cuando fallan, provocan la falla del sistema. En términos de una red de confiabilidad conocido igualmente como diagrama de bloques o diagrama lógico, la anterior definición puede ser interpretada como un grupo de componentes que deben fallar para interrumpir todas las trayectorias entre la entrada y la salida. El mínimo subgrupo de cualquier grupo de componentes que causan la falla del sistema es conocido como los cortes mínimos.

Los cortes mínimos son un conjunto de componentes del sistema que, cuando fallan causan la falla del sistema pero cuando cualquier componente del grupo no ha fallado no causan la falla del sistema. Esta definición significa que todos los componentes de un corte mínimo deben estar en el estado de falla para causar la falla del sistema. Para la aplicación de este método, consideramos lo siguiente:



Utilizando la definición dada anteriormente, los corte mínimos del sistema se muestran en la tabla:

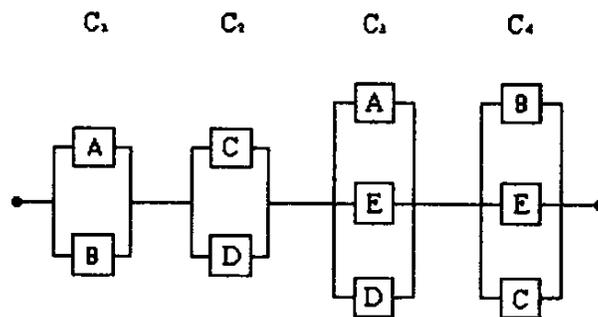
Numero de cortes mínimos	Componentes de los cortes
C_1	AB
C_2	CD
C_3	AED
C_4	BEC

4.6.3.2 Aplicación de cortes.

Con el objeto de evaluar la confiabilidad del sistema (o la no confiabilidad), se deben identificar los cortes que se presentan en el diagrama lógico.

De la definición de cortes mínimos es evidente que todos los componentes de cada corte deben fallar para provocar la falla del sistema. Consecuentemente, los componentes de los cortes están efectivamente conectados en paralelo y la probabilidad de falla de éstos puede ser combinada usando el principio de sistemas paralelos. Adicionalmente, el sistema falla si cualquiera de los grupos de corte falla y consecuentemente cada corte está efectivamente en serie con todos los otros cortes.

Con el uso de estos principios se obtiene el diagrama lógico, que corresponde a los posibles cortes mínimos del sistema en estudio, y que son los mencionados en la tabla.



Aunque estos cortes están en serie, el concepto de sistemas serie no pueden ser usado porque un mismo componente puede aparecer en dos o más cortes, como es el caso del componente A, que aparece en los cortes C_1 y C_3 .

El concepto de unión sin embargo se aplica y si el i -ésimo corte se designa como C_i y su probabilidad de ocurrencia como $P(C_i)$, entonces la confiabilidad del sistema está dada por:

$$Q_s = P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup \dots \cup C_i \cup \dots \cup C_n) \quad (3)$$

Con ayuda de esta ecuación y del diagrama lógico podemos evaluar la confiabilidad del sistema de la siguiente manera.

$$Q_S = P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4)$$

$$Q_S = P(C_1) + P(C_2) + P(C_3) + P(C_4) - P(C_1 \cap C_2) - P(C_1 \cap C_3) - P(C_1 \cap C_4) - P(C_2 \cap C_3) - P(C_2 \cap C_4) - P(C_3 \cap C_4) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_4) + P(C_1 \cap C_3 \cap C_4) + P(C_2 \cap C_3 \cap C_4) - P(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4)$$

Donde:

$$P(C_1) = Q_A Q_B$$

$$P(C_2) = Q_C Q_D$$

$$P(C_3) = Q_A Q_D Q_E$$

$$P(C_4) = Q_B Q_C Q_E$$

$$P(C_1 \cap C_2) = P(C_1)P(C_2) = Q_A Q_B Q_C Q_D$$

$$P(C_1 \cap C_3) = P(C_1)P(C_3) = Q_A Q_B Q_D Q_E$$

$$P(C_1 \cap C_4) = P(C_1)P(C_4) = Q_A Q_B Q_C Q_E$$

$$P(C_2 \cap C_3) = P(C_2)P(C_3) = Q_A Q_C Q_D Q_E$$

$$P(C_2 \cap C_4) = P(C_2)P(C_4) = Q_B Q_C Q_D Q_E$$

$$P(C_3 \cap C_4) = P(C_3)P(C_4) = Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E$$

$$P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) = P(C_1 \cap C_2 \cap C_4)$$

$$= P(C_1 \cap C_3 \cap C_4)$$

$$= P(C_2 \cap C_3 \cap C_4)$$

$$= P(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4) = Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E$$

Por lo tanto

$$Q_S = Q_A Q_B + Q_C Q_D + Q_A Q_D Q_E + Q_B Q_C Q_E - Q_A Q_B Q_C Q_D - Q_A Q_B Q_D Q_E - Q_A Q_B Q_C Q_E - Q_A Q_C Q_D Q_E - Q_B Q_C Q_D Q_E + 2Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E \quad (4)$$

Esta expresión (4) puede ser comparada con la ecuación (1).

Si consideramos $Q_A = Q_B = Q_C = Q_D = Q_E = Q$, entonces:

$$Q_S = 2Q^2 + 2Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5 \quad (5)$$

Esta (5) a su vez, podemos compararla con la forma de la ecuación (2), y si también consideramos $R=0.99$, tendremos los siguientes resultados:

$$Q = 1 - R = 1 - 0.99 = 0.01$$

Y sustituyendo el valor Q en la ecuación (5)

$$Q_S = 0.00020195$$

Entonces:

$$R_S = 1 - 0.00020195 = 0.99979805$$

4.6.3.3 Evaluación aproximada.

Existen dos aproximaciones básicas, la primera supone que la ecuación (3) puede ser reducida a la suma de no confiabilidades.

$$Q_S = P(C_1) + P(C_2) + \dots + P(C_i) + \dots + P(C_n)$$
$$Q_S = \sum_{i=1}^n P(C_i)$$

Reconsiderando el ejemplo visto para cortes mínimos, la confiabilidad del sistema es ahora:

$$Q_S = Q_A Q_B + Q_C Q_D + Q_A Q_D Q_E + Q_B Q_C Q_E$$

la cual, si consideramos a $Q_A = Q_B = Q_C = Q_D = Q_E = Q$ obtenemos:

$$Q_S = 2Q^2 + 2Q^3$$

La segunda aproximación es despreciar los cortes de orden mayor. Esta aproximación supone que éstos son mucho menos probables que los de orden menor.

Otra vez reconsiderando el ejemplo usado para cortes mínimos y despreciando los cortes de tercer orden, la no confiabilidad del sistema está dada ahora por:

$$Q_S = Q_A Q_B + Q_C Q_D$$

la cual si $Q_A = Q_B = Q_C = Q_D = Q_E = Q$ se vuelve

$$Q_S = 2Q^2$$

y si $Q = 0.01$

$$Q_S = 0.0002 \text{ y } R_S = 0.9998$$

En este caso el error introducido en R_S y Q_S es $+2 \times 10^{-4}\%$ y -1% respectivamente.

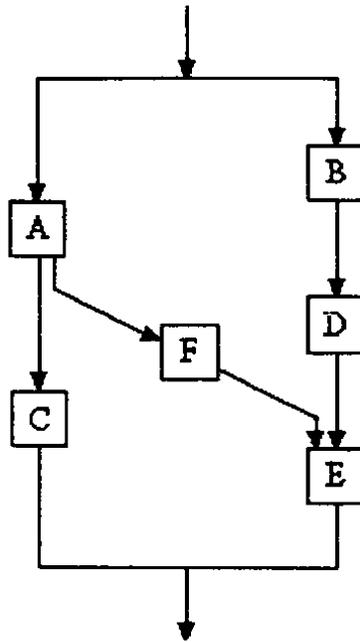
4.6.4 Aplicación y comparación de técnicas.

El siguiente ejemplo ilustra la aplicación del método de probabilidad condicional y la técnica de cortes mínimos a su sistema de red diferente al clásico puente.

Al evaluar la confiabilidad del sistema mostrado, usando los métodos de:

- (a) Probabilidad condicional.
- (b) Cortes mínimos.

Considere que cada componente tiene una confiabilidad de 0.99

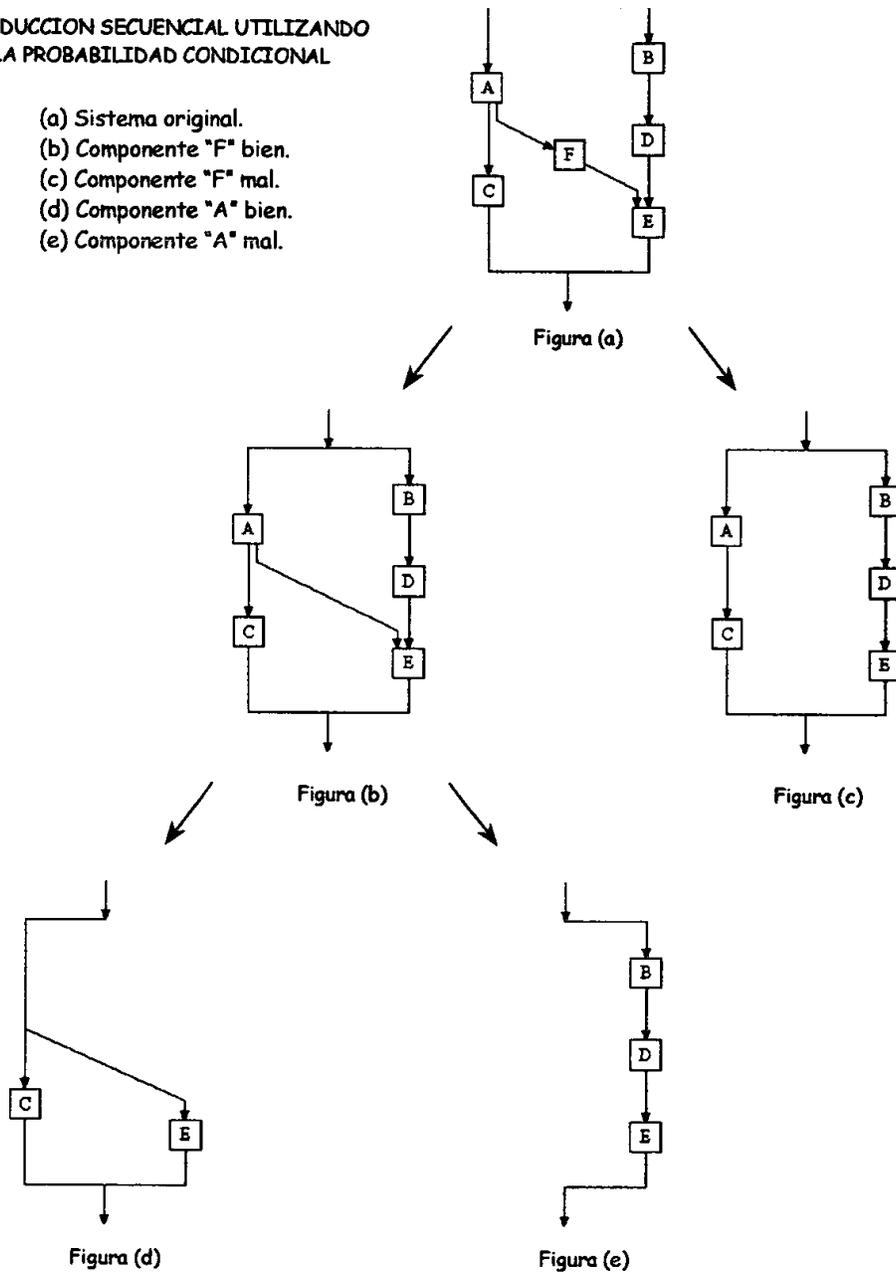


4.6.4.1 Método de probabilidad condicional.

La selección del componente F reduce el sistema original a los dos subsistemas mostrados en la figura (b) y (c). Aunque la figura (c) ahora consiste de componentes en serie / paralelo, la figura (b) no, y este subsistema debe ser posteriormente descompuesto.

REDUCCION SECUENCIAL UTILIZANDO LA PROBABILIDAD CONDICIONAL

- (a) Sistema original.
- (b) Componente "F" bien.
- (c) Componente "F" mal.
- (d) Componente "A" bien.
- (e) Componente "A" mal.



La selección del componente A para que sea considerado "bueno" y "malo" produce los dos subsistemas mostrados en las figuras (d) y (e). En el caso de la figura (d), los componentes B y

D no aparecen porque, cuando A es "bueno", la señal alcanza E independientemente que B y D estén bien o mal y por lo tanto éstos se vuelven irrelevantes.

La confiabilidad del sistema puede ser ahora deducido como sigue:

$$R_S = R_S(\text{si F está bien})R_F + R_S(\text{si F está mal})Q_F$$

$$R_S(\text{si F está mal}) = 1 - (1 - R_B R_D R_E)(1 - R_A R_C)$$

$$R_S(\text{si F está bien}) = R_S(\text{si A está bien})R_A + R_S(\text{si A está mal})Q_A$$

$$R_S(\text{si A está bien}) = 1 - Q_C Q_E$$

$$R_S(\text{si A está mal}) = R_B R_D R_E$$

sustituyendo se obtiene

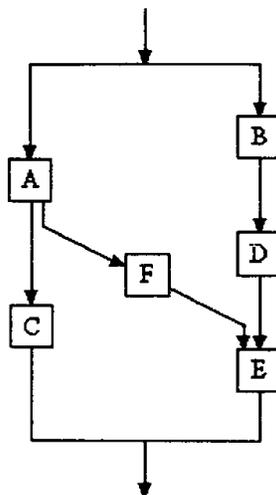
$$R_S = [(1 - Q_C Q_E)R_A + R_B R_D R_E Q_A]R_F + [1 - (1 - R_B R_D R_E)(1 - R_A R_C)]Q_F$$

sustituyendo valores numéricos

$$R_S = 0.999602 \text{ y } Q_S = 0.000398$$

4.6.4.2 Método de cortes mínimos.

Mediante una inspección visual, los cortes de la red mostrada:



Son (AB), (AD), (AE), (CE), (BCF) y (CDF). La evaluación del valor exacto de la confiabilidad del sistema utilizando las técnicas rigurosas descritas anteriormente (aplicación de los cortes), se vuelve muy tediosa mediante cálculos manuales ya que en el caso de este sistema con 6 cortes, el número de términos en la ecuación exacta es de 63.

Los resultados obtenidos utilizando la aproximación sugerida es como sigue:

Considere el resultado que se obtendrá si únicamente se utilizan eventos de segundo orden y la evaluación se reduce a la suma de las probabilidades de corte. En este caso:

$$Q_S = Q_A Q_B + Q_A Q_D + Q_A Q_E + Q_C Q_E = 0.0004$$
$$R_S = 0.9996$$

La imprecisión es de +1.0% y de -0.0004% en los valores de la no confiabilidad y la confiabilidad respectivamente.

Si los tres grupos de resultados se comparan, el método de cortes mínimos, aun con las aproximaciones, da resultados que son suficientemente precisos para la mayoría de aplicaciones.

4.7 Confiabilidad en sistemas de distribución.

En un sistema eléctrico, en forma general, los subsistemas que pueden ser considerados son: Generación, que vienen siendo la central generadora, Transmisión, el cual incluye las subestaciones de potencia y las de subtransmisión y Distribución, donde se incluye la distribución primaria únicamente.

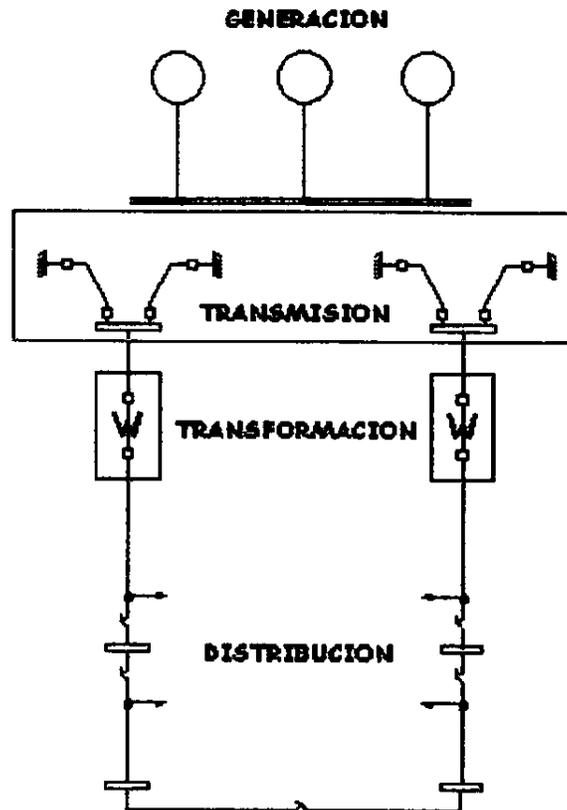
Cada subsistema tiene su "grado de confiabilidad natural", el cual depende de sus características y del comportamiento de cada uno de sus componentes, así como de su configuración.

Creemos que el análisis de confiabilidad de distribución debe examinarse como un tópico diferente y como una parte del análisis de confiabilidad de generación y transmisión, porque las responsabilidades de distribución, transmisión y generación generalmente están divididas en las compañías eléctricas y porque la confiabilidad de distribución necesita diferentes datos y metodología a los empleados en el análisis de la confiabilidad de generación y transmisión.

Desde hace mucho tiempo la confiabilidad en distribución, no se le a dado gran importancia ni a capturado la imaginación de los científicos e ingenieros como lo hace la confiabilidad de la generación. En parte esto se debe a que las consecuencias de una falla en distribución es

localizable y reparable y además afecta solo a una pequeña parte de los usuarios y nunca va a causar una ruina financiera o política como es el caso cuando ocurre una falla en generación.

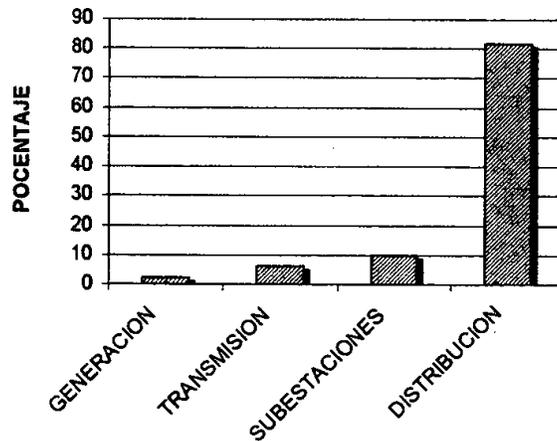
Sin embargo en años recientes ha resurgido el interés en el análisis de la confiabilidad en distribución y esto se debe a que las fallas en distribución dominan las causas de falta de energía de los usuarios, como se observa:



La configuración del sistema de distribución y su filosofía de operación afectan la confiabilidad, más aún los gastos de operación y mantenimiento dobla a los de transmisión, esto no nos sorprende dado el cambio de necesidades y de expectativas respecto a la confiabilidad del suministro, en una era de oficinas en casa, computadoras personales, equipo electrónico, fabricación de electrónicos, servicios prioritarios para un país, etc.

Además el análisis de la confiabilidad en la distribución puede ayudar a mejorar la confiabilidad del sistema, dirigiendo los gastos y evitando la sobre inversión.

El análisis de confiabilidad en el sistema de generación de potencia tiene objetivos simples, como podría ser, el tratar de minimizar lo más posible los costos de producción. En el caso de una planta nuclear los objetivos están enfocados a la operación segura.



Porcentaje de horas-cliente afectadas por fallas en los subsistemas.

En contraste el análisis de confiabilidad en distribución es más complejo y ambiguo en su intento, aunque el objetivo del análisis esta naturalmente relacionado con la confiabilidad del sistema para suministrar la energía eléctrica a la carga, la definición precisa del objetivo no es tan simple.

Una primera cuestión básica que debemos tomar en cuenta, es si nuestro estudio esta enfocado a la confiabilidad de un solo usuario o vamos a considerar a todo el sistema. Aunque los grados de confiabilidad pueden ser calculados en ambos casos, la medición más apropiada y la mejor metodología, puede cambiar según sea el caso.

Aunque las medidas de la confiabilidad del sistema en forma general, pueden ser satisfactorias, no necesariamente significa que en lo que se refiere a un usuario específico sea satisfactoria o lo contrario.

Al hacer el análisis de confiabilidad en distribución, nos damos cuenta que este ofrece varios beneficios. En particular nos permite determinar la confiabilidad, el costo, la identificación de la falla y los factores que más contribuyen a ésta, de una manera lógica y consistente. Tal proceso facilita la comparación de alternativas posibles y protege contra el hacer inversiones o cargos sin una justificación coherente.

Vamos ahora a ver más allá de estas generalidades para examinar posibles objetivos para el análisis de la confiabilidad en más detalle. Un objetivo puede ser predecir índices de confiabilidad para un suministro de energía a usuarios específicos o para el sistema completo.

Una comparación de estos índices podría indicarnos dónde la confiabilidad del suministro de estos usuarios o sistema es adecuada y dónde debe hacerse mejoras.

Este análisis simple de la confiabilidad puede entonces extenderse a la identificación de los puntos débiles en el diseño, operación o mantenimiento del sistema de distribución, al identificar las causas dominantes de las fallas y acertar dónde son necesarias las mayores mejoras en confiabilidad al menor costo o con pasos simples (podar árboles, reemplazar aisladores rotos, poner tierras faltantes, etc.).

También es posible usar este análisis para predecir algún cambio en cuanto a confiabilidad, que puede resultar de cambios en el diseño, operación y mantenimiento del sistema de distribución. Esto es, el impacto en la confiabilidad al agregar dispositivos de protección, o implantar un programa de poda, instalar un sistema de localización de rayos para estimar la severidad de las tormentas, la movilización del personal tanto de instalación como de mantenimiento, tomar acciones para reducir el tiempo de restauración después de las fallas, o reemplazar equipo obsoleto y deteriorado, etc. Todo esto puede determinarse, logrando con esto identificar que tan buenos son los efectos de las mejoras.

Los índices de confiabilidad pueden ser usados para valorar los planes de salidas, prediciendo la confiabilidad del sistema, y reconfigurándolo para acciones de mantenimiento. Tal análisis puede ayudar a determinar dónde el mantenimiento propuesto tiene mayores problemas y desarrollar posibles alternativas.

Se pueden introducir los costos y la economía a la confiabilidad de tres maneras:

La primera es identificar qué conjunto de cambios y mejoras importantes para los procedimientos de operación y mantenimiento nos permiten alcanzar las metas de confiabilidad predichos al mínimo costo. Puede ser a veces estresante que no está implicada una correlación entre esto y

confiabilidad. Buscamos solamente como mejorar un nivel predicho de confiabilidad a costo mínimo.

Una variación en este tema de integración de costos y confiabilidad es la identificación del conjunto de medidas que resultarán en el, la más grande mejora de confiabilidad para un dado gasto presupuestado. Este asunto es claramente aquel que puede tomarse si una suma dada de presupuesto esta acotada para mejorar la confiabilidad.

El final y más comprensible modo o manera en la cual integrar confiabilidad y economía es asignar un valor a la confiabilidad (o costo de las fallas) y entonces optimizar el sistema con respecto a la confiabilidad al mismo tiempo que se minimiza el costo total.

El valor de la confiabilidad o costo de la no confiabilidad, se refleja como el costo sobre la compañía a los usuarios, de las interrupciones.

También se puede apreciar del análisis que no hay soluciones simples y baratas con las cuales mejorar significativamente la confiabilidad. Aun más, no hemos mirado de cerca el impacto que en los usuarios tiene la no confiabilidad. Las fallas en el sistema de distribución resultan de la salida de interrupciones en el suministro de energía a los usuarios.

4.7.1 Índices de confiabilidad.

La máxima confiabilidad del servicio a los consumidores se calcula y aplica en la mayoría de los proyectos realizados por las empresas eléctricas, procurando desarrollar cálculos de confiabilidad para diferentes estructuras de redes con objeto de localizar puntos de baja confiabilidad y evaluar las mejoras factibles de implementar en las mismas. Al mismo tiempo se efectúan comparaciones de costos con la finalidad de determinar cuál esquema o combinación de éstos pueden mejorar la continuidad del servicio al menor costo.

Dos son los parámetros prácticos y más comúnmente empleados en la actualidad por las compañías de electricidad para estos cálculos. La tasa de salidas por año designada por λ y definida por el número medio de interrupciones que el consumidor puede esperar por año, independientemente del tiempo de las mismas, y la duración de la interrupciones designadas por d , definida por el tiempo total que el consumidor estará sin servicio eléctrico durante un año,

independientemente del número de interrupciones que contribuyan para conformar el “tiempo total de interrupción”. Estos dos parámetros están relacionados por un tercero denominado tiempo de separación r , que es el tiempo medio empleado para poner en operación la componente que falló o restablecer el servicio. La ecuación que relaciona estos parámetros quedará:

$$d = \lambda r \text{ (h/año)}$$

Como puede observarse la medida tradicional de la confiabilidad de un sistema eléctrico es un índice que señala la disponibilidad media anual del fluido eléctrico. Este índice normalmente oscila en 0.989 para una gran parte de las empresas eléctricas, lo que significa que el servicio estará disponible durante el 98.9% del tiempo durante un periodo de un año.

Estudios recientes muestran que este índice tradicional no es suficiente para evaluar la confiabilidad de un sistema, tornándose necesario desarrollar otros métodos que determinen la frecuencia y duración de las interrupciones para cada consumidor o grupo de consumidores conectados al sistema. Si la tasa de salidas fuese adoptada como índice, deberán ser evaluadas todas las tasas de salida o falla de los diversos componentes del sistema a partir de sus datos históricos de operación cuando menos durante 5 años. La tasa de salidas de líneas de distribución o subtransmisión deberá ser establecida por km por año para cada tipo, estructura, construcción y tensión de alimentación; para otros equipos tales como transformadores, interruptores, banco de capacitores, etc., deberá ser determinada por unidades existentes y por año.

Una interpretación correcta de los registros de la tasa de salida de los diversos componentes del sistema revelará puntos débiles en relación con la confiabilidad, y servirán al mismo tiempo para determinar los valores medios que son empleados para calcular la confiabilidad en futuros proyectos.

Existen dos métodos mediante los cuales la confiabilidad puede ser mejorada. El primero consiste en la sustitución o mejoría de un determinado componente que esté causando una tasa de salida exageradamente alta en líneas o equipo; este método también incluye un mayor o mejor seccionamiento de líneas, con la consecuente reducción de áreas expuestas a interrupciones. El segundo método consiste en la utilización de redundancias en el sistema, el cual en la mayoría de los casos es más efectivo que el primero, pero mucho más costoso; la interrupción del servicio implica que ambas fuentes fallen simultáneamente.

En una línea que contenga varias componentes en serie, la falla de cualquiera de ellas tendrá por resultado la interrupción de esa línea en el sistema, quedando fuera de servicio hasta que se pueda reemplazar o reparar la parte componente que falló. Sin embargo, en una línea que contenga dos o más componentes que actúen en paralelo, ocurrirá una interrupción sólo cuando todas las componentes en paralelo estén fuera de servicio o cuando la carga exceda la capacidad de las componentes que queden todavía en servicio.

La línea en paralelo quedará fuera de servicio hasta que se restaure una componente capaz de soportar la carga requerida.

Cada uno de los elementos del sistema está expuesto a una interrupción por causa de alguna de las siguientes razones:

- Una falla causal.
- Una tormenta de intensidad y duración suficientes para provocar una falla de la componente.
- Que se realice un mantenimiento preventivo que requiera la desenergización de un elemento.
- Una sobrecarga de una componente que pueda dar como resultado la interrupción de otras componentes en un sistema en paralelo.

Para llevar a cabo un análisis de confiabilidad del sistema, los datos que se requieren para cada uno de ellos son:

- Las tasas de falla en el servicio, asociadas con cada uno de los incisos anteriores.
- Los tiempos de reparación asociados con las suspensiones de energía por mantenimiento y debidas a condiciones atmosféricas adversas.

Es posible hacer una estimación de las tasas de falla y los tiempos de reparación para todos los equipos que componen un sistema de distribución a partir de datos estadísticos y de registros que se elaboren de todas las suspensiones en el servicio.

A continuación se da una lista de algunas medidas de confiabilidad que tienen interés y significado y que pueden calcularse con los métodos descritos.

λ = Número promedio de interrupciones por consumidor por año.

r = Tiempo promedio de restauración del servicio a los consumidores.

d = Tiempo promedio total de interrupción por consumidor por año.

λ_{\max} = Número máximo esperado de interrupciones que experimenta un consumidor cualquiera.

r_{\max} = Tiempo máximo de restauración que se espera y que experimenta un consumidor cualquiera.

P = Probabilidad de que un consumidor cualquiera se quede sin servicio en cualquier momento por más tiempo del especificado.

D = Indisponibilidad del servicio que será calculada considerando (d) y el periodo (T) establecido para su análisis.

C = Confiabilidad del sistema.

Los primeros tres parámetros en esta lista expresan medidas de confiabilidad media del servicio en un sistema que proporciona energía a un gran número de consumidores.

Nótese que estas cantidades podrían expresarse también en términos de unidades de carga en lugar de consumidores.

Los dos parámetros que siguen indican la confiabilidad del servicio más deficiente que se puede proporcionar a un consumidor en el sistema.

El valor de confiabilidad (P) establece también una medida del servicio más deficiente que se puede proporcionar a un consumidor cualquiera. La medida (P) puede ser de interés si uno de los objetivos en el diseño del sistema es asegurar, con un cierto grado de probabilidad, que ningún consumidor quede fuera del servicio más allá de un cierto tiempo especificado.

Las cantidades λ , r , d , λ_{\max} y r_{\max} pueden estimarse para sistemas ya existentes si se tienen registros de la duración de cada interrupción en el servicio, así como el número de consumidores a quienes afecta.

Las siguientes son expresiones para estimar los valores de λ , r y d .

Los valores que deben asignarse a λ_{\max} y r_{\max} son obvios a partir de sus definiciones.

$\hat{\lambda}$ = Número de interrupciones al consumidor por año / Número de consumidores servidos.

\hat{r} = Número de horas de interrupción al consumidor al año / Número de interrupciones al consumidor al año.

d = Número de horas de interrupción al consumidor al año / Número de consumidores servidos.

Nótese que el signo $\hat{\lambda}$ denota una estimación del valor de un parámetro.

El grado promedio de satisfacción de un consumidor es una función de las cantidades λ , r y d . En última instancia, las ventas de la energía y las ganancias obtenidas son funciones de dichas cantidades; sin embargo, la satisfacción de los consumidores, las ventas de energía y las ganancias no se pueden evaluar para la mayoría de las empresas suministradoras, dado que existen varias medidas de confiabilidad.

Las relaciones involucradas en este aspecto no están definidas totalmente en la actualidad como para permitir que se escriban las expresiones analíticas que las determinen.

En algunos sistemas industriales la relación entre la confiabilidad y la producción se ha formulado de tal manera que cabe en lo posible asignar un valor definido en el costo de la misma a diferentes grados de confiabilidad.

Puesto que, en general, no se puede asignar un valor económico definido al grado de confiabilidad en los sistemas de las compañías suministradoras, éstas se ven forzadas a buscar apoyo en la experiencia para poder establecer niveles aceptables de confiabilidad de sus sistemas.

En consecuencia, al estudiar estos sistemas, por lo general es necesario tener estimaciones de varias medidas de confiabilidad de los sistemas ya existentes. Dichas estimaciones definirán niveles de bondad en el servicio, que serán utilizadas para comparar la confiabilidad calculada de los sistemas propuestos.

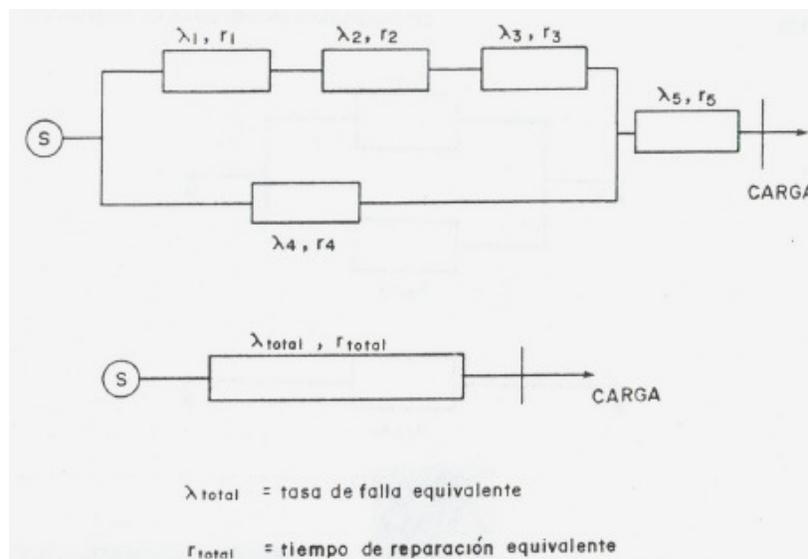
El enfoque que hay que adoptar en el análisis de confiabilidad consiste en considerar el sistema como un grupo de trayectorias desde el punto de suministro de la energía (S) hasta los puntos de carga específicos.

Mediante la combinación sucesiva en serie y paralelo de las confiabilidades de cada una de las componentes se obtiene una tasa equivalente de falla (λ_{total}) y un tiempo de reparación (r_{total}) para cada bus de carga.

Cuando se evalúa la confiabilidad del suministro a usuarios individuales o al sistema de distribución independientemente del costo de la confiabilidad, se calculan normalmente los índices de confiabilidad.

Estos índices son usados para fijar el comportamiento futuro. Típicamente son medidas de la tasa media de fallas, la duración media de salida y tiempo medio anual de salidas que a su vez determina la disponibilidad de energía de los consumidores.

Aunque estos índices se presenten en la literatura especializada, las compañías en la práctica usan índices diferentes de donde se tienen equivalencias.



4.7.2 ACI (Anual Customer Interruption)

Interrupciones anuales al usuario.

$$ACI = \sum N_i \lambda_i \left[\frac{\text{usuarios}_{-} \text{falla}}{\text{año}} \right]$$

Donde: λ_i = tasa de falla.

N_i = número de usuarios en el punto de carga i .

4.7.3 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index).

Índice promedio de frecuencia de las interrupciones del sistema.

Este índice es definido como el promedio de interrupciones por consumidor servido por unidad de tiempo. Se estima dividiendo en número acumulado de usuarios – interrupción en el año entre el número de usuarios servidos.

$$SAIFI = \frac{\text{Número de interrupciones anuales al usuario}}{\text{Número total de usuarios servidos}}$$

$$SAIFI = \frac{ACI}{\sum N_i} \left[\frac{\text{fallas}}{\text{años}} \right]$$

donde: N_i = número de usuarios en el punto de carga i .

4.7.4 CID (Customer Interruption Duration).

Duración total de las interrupciones del usuario.

$$CID = \sum N_i U_i \left[\frac{\text{horas}_{\text{-usuario}}}{\text{años}} \right]$$

donde: U_i = Tiempo anual fuera en el punto i de carga.

N_i = número de usuarios en el punto de carga i .

4.7.5 SAIDI (System Average Interruption Durations Index)

Índice promedio de duración de las interrupciones del sistema.

$$SAIDI = \frac{\text{Duración Total de las interrupciones al usuario}}{\text{Número total de usuarios}}$$

$$SAIDI = \frac{CID}{\sum N_i} \left[\frac{\text{minutos}}{\text{año}} \right]$$

donde: N_i = número de usuarios en le punto de carga i .

4.7.6 CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index).

Índice promedio de duración de las interrupciones por usuario

Este índice es definido como la duración de la interrupción entre los usuarios afectados durante el año, se determina dividiendo la suma de todos los usuarios que han sufrido interrupciones por su duración entre únicamente el número de usuarios que han sufrido las interrupciones en el año.

$$CAIDI = \frac{\text{Duración total de las interrupciones al usuario}}{\text{Interrupciones anuales al usuario}}$$

$$CAIDI = \frac{CID}{ACI} \left[\frac{\text{horas}}{\text{falla}} \right]$$

4.7.7 ASAI (Average Service Availability Index).

Índice promedio de disponibilidad del servicio.

Este índice proporciona una medida del tiempo medio de salida anual o la disponibilidad de la energía suministrada y es la relación del número total de usuarios – hora que estuvo disponible durante el año entre el total de usuarios – hora demandados (se determina de los usuarios servidos multiplicando por 8760).

$$ASAI = \frac{\text{Horas de servicio disponible del usuario}}{\text{Horas demandadas por el usuario}}$$

$$ASAI = \frac{[(\sum N_i)(8760)] - CID}{(\sum N_i)(8760)}$$

donde:

$\sum N_i$ = Número total de usuarios.

8760= horas que tiene un año.

El complemento de este índice es la indisponibilidad (ASUI=1-ASAI).

4.7.8 CAIFI (Customer average interruption frequency index).

Promedio del índice de la frecuencia de interrupción al cliente.

Este índice se basa en el número de clientes que han experimentado una o más interrupciones en el año en análisis.

$$CAIFI = \frac{\text{Numero total de interrupciones por cliente (fallas / año)}}{\text{Experiencias de los clientes}}$$

4.7.9 CTAIDI (Customer total average interruption duration index).

Promedio total del índice de duración de interrupción al cliente.

$$CAIDI = \frac{\sum \text{Duraciones de interrupciones al cliente (hora / año)}}{\text{Numero de interrupciones}}$$

4.7.10 TIU Tiempo de interrupción por usuario.

Este índice es definido como el tiempo que el usuario (s) no cuenten con el servicio de energía eléctrica debido a distintos tipos de fallas. Y este índice tiene un periodo de medición anual:

$$TIU = \frac{\sum_{i=1}^T \sum_{l=1}^{M_i} D_{lil} U_{Ail}}{\sum_{i=1}^T N U_i}$$

D_{lil} = Duración de la interrupción (l) en minutos acaecida durante el mes (i) en un circuito de distribución de la zona de que se trata.

UA_{il} = Usuarios afectados por la interrupción (l) acaecida durante el mes de (i) en un circuito de distribución de la zona de que se trata.

NU_i = Número total de consumidores del sistema o alimentador.

i= Mes de que se trata, seriando desde 1 hasta T, en donde l corresponde al mes del mes del inicio del periodo y T al término.

l= Número ordinal en que aconteció la interrupción (l) durante el mes (i), variando desde 1 hasta M_i , en donde M_i es la última interrupción acaecida durante el mes (i).