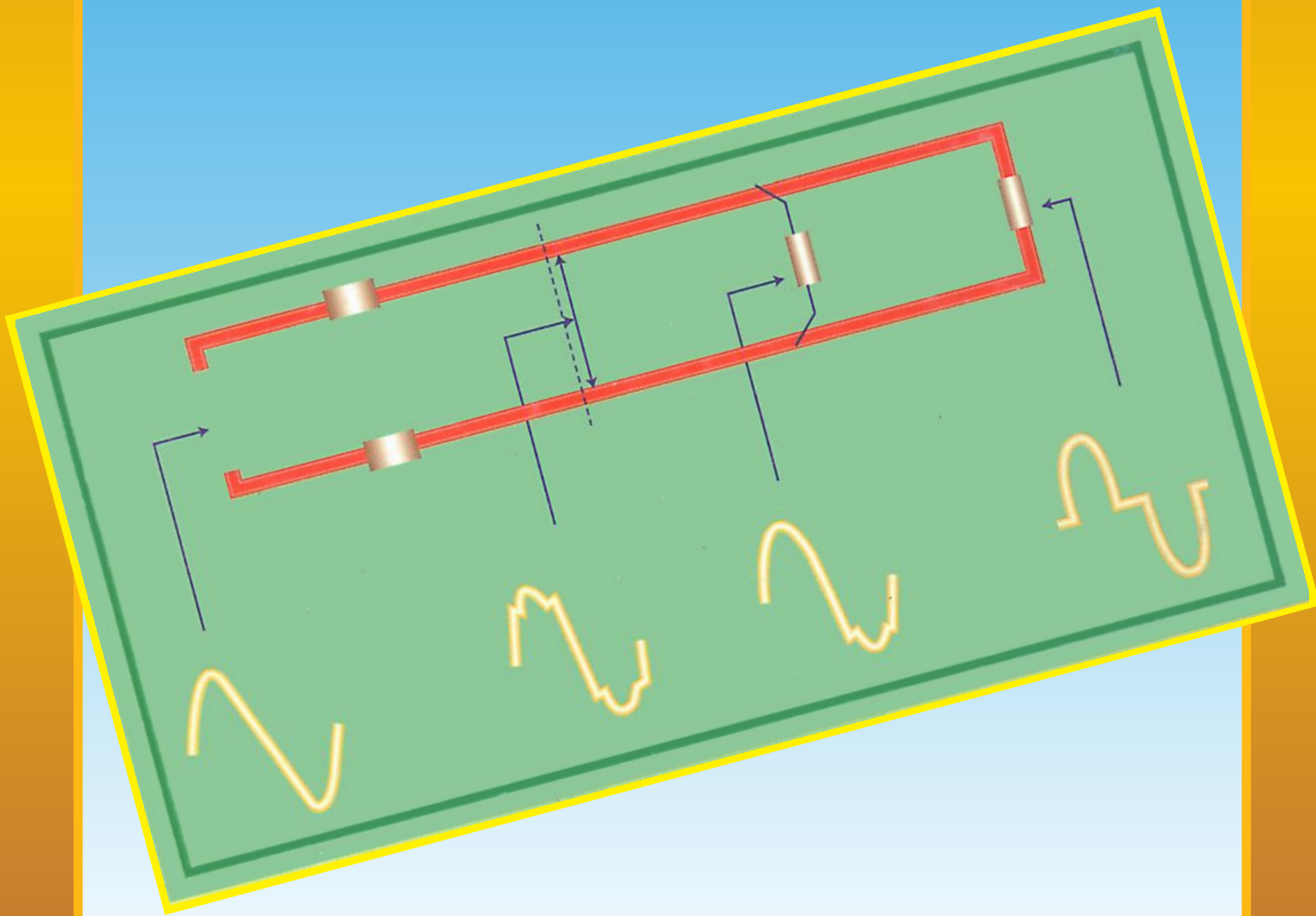


CONFIABILIDAD DE SISTEMAS ELECTRICOS



INDICE

1	INTRODUCCION	2
2	DEFINICIONES RELACIONADAS CON LA CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA ELECTRICO	3
	2.1 Disponibilidad de energía eléctrica o de un equipo eléctrico	3
	2.2 Confiabilidad de un equipo eléctrico	4
	2.3 Algunos elementos sobre probabilidad y estadística	4
	2.3.1 Método aproximado para la estimación de parámetros de una distribución de probabilidades	7
	2.4 Definición de confiabilidad	12
	2.4.1 Confiabilidad en sistemas serie y paralelo	12
	2.4.1.1 Sistemas serie	12
	2.4.1.2 Confiabilidad de elementos en paralelo	13
3	DISEÑO DE SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD TOMANDO EN CUENTA ASPECTOS DE CONFIABILIDAD	14
	3.1 Esquemas y opciones que mejoran la confiabilidad de un sistema	14
	3.2 Problemas de confiabilidad vinculados con la calidad de la red	14
	3.3 Registros históricos de problemas de calidad de redes eléctricas	15
	3.4 Definición de los principales tipos de anomalías de redes de suministro de electricidad	16
	3.5 Proyectos de mejoramiento de la red: Solución a cortes de energía	17
	3.6 Proyectos de mejoramiento de la red: Solución a los problemas de distorsión armónica	18
	3.7 Proyectos de mejoramiento de la red: Solución a los problemas de mallas de tierra	20

CONFIABILIDAD DE SISTEMAS ELECTRICOS

1. INTRODUCCION

Alrededor de un 30% de todas las fuentes mundiales de energía primaria son empleadas para generar energía eléctrica y casi toda ella, es transmitida y distribuida mediante sistemas de tensión alterna de 50 Hz o 60 Hz. Hoy día es más importante que nunca diseñar y operar sistemas eléctricos que, no sólo tengan la máxima eficiencia practicable, sino que, además, tengan el más alto grado de seguridad y confiabilidad. Este apunte trata de entregar los elementos para considerar, en el diseño, diversos mejoramientos de la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

En los sistemas eléctricos el hecho de, por ejemplo, no disponer de electricidad en momentos inesperados, trae graves consecuencias productivas. Un minuto sin electricidad causará: la pérdida de los datos almacenados en un computador; la detención de un motor, y por tanto de una cadena productiva; que una operación médica se vea interrumpida o alterada; es decir, en sistemas eléctricos se debe tender a tener la máxima confiabilidad posible debido a que las consecuencias son extraordinariamente relevantes.

Son numerosas las acciones que es posible realizar para reducir, al menos parcialmente, la incertidumbre de quedar sin electricidad en un proceso. Así por ejemplo, podemos distinguir los siguientes grupos de acciones:

a) Disponer elementos en paralelo en el sistema. Esta alternativa consiste en diseñar de tal modo que si falla un componente el sistema continúa funcionando. Son ejemplos de esta opción el disponer de un doble circuito de transmisión de electricidad entre el generador de electricidad y la ciudad o industria que se pretende alimentar; iluminar con dos ampollitas alimentadas independientemente un acceso peligroso; disponer más de un circuito de energización para una casa, etc.

b) Evitar los elementos en serie en el sistema. Esta alternativa consiste en evitar que el funcionamiento de un sistema dependa de la operación simultánea de varios elementos de confiabilidad baja. Un ejemplo de empleo de elementos en serie es el caso del movimiento de una correa transportadora con un solo motor y un solo convertidor de frecuencia; en este sistema basta que el motor o el convertidor de frecuencia falle para que la correa de transporte se detenga. Otro ejemplo es el de la iluminación de un aviso publicitario mediante múltiples focos en serie; basta que uno falle y el aviso queda totalmente apagado.

c) Mejorar la confiabilidad mediante el empleo de diseños y tecnologías adecuadas. En este aspecto, son múltiples las acciones que es posible llevar a cabo:

- Mejoramiento de instalaciones eléctricas domiciliarias e industriales. Es común observar instalaciones eléctricas en que los consumos son notablemente superiores a los límites de diseño debido al crecimiento del uso de la electricidad en todo tipo de actividad. Los enchufes múltiples conectados a un enchufe único son un ejemplo común que debe ser evitado.
- Mejoramiento de los sistemas de compensación de factor de potencia. Los condensadores entran en resonancia con las reactancias de los transformadores de alimentación e incrementan notablemente la cantidad de armónicas, superándose los límites establecidos por norma, llegando incluso a la explosión de equipos e interruptores.
- Mejoramiento de los sistemas de puestas a tierra y cables de neutro. Las corrientes armónicas que circulan por el neutro de los sistemas, provocan diferencias de voltaje entre neutro y tierra que pueden dañar diversos equipos electrónicos. Las mallas de tierra son diseñadas para proporcionar un camino definido de regreso a la fuente de energía con impedancia suficientemente baja, sin embargo, con las corrientes armónicas esta impedancia crece y, por tanto aparecen problemas no previstos por el diseñador.

d) Disponer de reservas de abastecimiento de potencia y energía mediante múltiples fuentes. Son ejemplos de estos mejoramientos: la construcción de tranques de reserva de energía hidroeléctrica, el disponer de baterías y/o generadores diesel de respaldo, etc.

e) Aplicar y cumplir las normativas y recomendaciones referentes a las características de la red eléctrica de alimentación. Son ejemplos de esta opción: emplear conductores adecuados para evitar calentamientos que aceleren su vida útil, impedir subidas y bajadas de voltaje más allá de las permitidas, impedir que la distorsión armónica sea superior a la permitida, etc.

En el apunte que se desarrolla a continuación se establecen las definiciones de confiabilidad de un sistema, lo que resulta útil para comparar, desde este punto de vista, un sistema con respecto a otro. También se da información respecto de cómo, al envejecer las componentes de un sistema, éste pierde confiabilidad. Finalmente se analizan diversas opciones de mejoramiento de la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

2. DEFINICIONES RELACIONADAS CON LA CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA ELECTRICO

2.1. Disponibilidad de energía eléctrica o de un equipo eléctrico

La disponibilidad de un sistema se define mediante la ecuación:

$$disp = \frac{t_{serv}}{t_{total}}$$

t_{serv} : tiempo con servicio con calidad adecuada.

t_{total} : tiempo total de observación.

$disp$: disponibilidad del equipo.

EJEMPLO

Un usuario de un sistema eléctrico no dispuso de energía durante 1 hora, del total 8760 horas que tiene un año. Así, la disponibilidad del sistema eléctrico es:

$$disp = \frac{8759}{8760} = 0,999886$$

Es decir, la disponibilidad del sistema fue de 99.986%. El período de no disponibilidad de energía pudo haber sido un solo evento (sin energía), en este caso de una hora de duración, o, por ejemplo, 360 eventos sin energía de 10 segundos de duración cada uno. Desde el punto de vista del usuario ambas situaciones no son idénticas ya que un corte de energía lleva asociado un tiempo de reposición del o los equipos que quedaron sin energía durante, por ejemplo, 10 segundos. Si este tiempo de reposición es 1 hora, la disponibilidad del sistema eléctrico, desde el punto de vista del usuario, en el caso que existan 360 eventos sin energía es:

$$disp = \frac{t_{total} - (t_{sin\ serv} - t_{rep})}{t_{total}}$$

CON $t_{sin\ serv}$: tiempo sin servicio

t_{rep} : tiempo de reparación.

Luego

$$disp = \frac{8760 * 60 * 60 - (360 * 3600 + 360 * 10)}{8760 * 60 * 60} = 0,959$$

Es decir, para el usuario, la disponibilidad sería de un 95,9% y no un 99,986%.

2.2. Confiabilidad de un equipo eléctrico

El concepto básico de confiabilidad se relaciona con la cantidad de componentes de un equipo que fallan en un período de tiempo t . Si bien la definición precisa de confiabilidad debe realizarse en función de la probabilidad de ocurrencia de fallas, tal como se explicará en el párrafo 2.4, es también útil emplear el siguiente cociente $kconf(t)$ como representativo de la confiabilidad de un componente:

$$kconf(t) = \frac{compviv(t)}{comptot(t)}$$

$compviv(t)$: componentes que sobreviven en buen estado, en un período t .

$compfall(t)$: componentes que fallan, en un periodo t .

$comptot(t)^{[1]}$: componentes probados, en un período t .

$kconf(t)$: confiabilidad, en un periodo t .

EJEMPLO

Al probar 1000 focos de filamento se comprueba que:

a) a las 100 horas de operación se han quemado sólo 5 focos

b) a las 500 horas de operación se han quemado 500 focos

Empleando la ecuación para el cálculo del coeficiente $kconf(t)$, se obtiene:

$$kconf(100 \text{ horas}) = \frac{1000 - 5}{1000} = 0,995 \text{ (99,5\%)}^{[2]}$$

$$kconf(500 \text{ horas}) = \frac{500}{1000} = 0,5 \text{ (50\%)}$$

2.3. Algunos elementos sobre probabilidades y estadística

a) Espacio muestral y eventos

Considérese un conjunto Ω formado por todos los resultados posibles de un experimento. Llamaremos a este conjunto *espacio muestral*. Si tomamos un subconjunto A de Ω , es decir, algunos resultados del experimento, este subconjunto lo llamaremos *evento*.

b) Variable aleatoria

Se entenderá por *variable aleatoria* a una función que asocia valores en el conjunto de los números reales a cada resultado del espacio muestral Ω . Usualmente la variable aleatoria se denomina por una letra mayúscula (X, Y , etc.).

[1] Por cierto que: $comptot(t) = compviv(t) + compfall(t)$

[2] Esto significa que en un lapso de 100 horas de operación continua, el 99,5% de los focos funcionan, o que el 0,5% de ellas, $(1-0,995)*100$, se queman.

c) Función de distribución de probabilidad acumulada o sencillamente función de distribución F(x)

Se llama función de distribución de probabilidad de la variable aleatoria X a una función que asigna una probabilidad de ocurrencia a un valor x de la variable aleatoria X. El valor de la función de distribución F(x) de una variable aleatoria es, por lo tanto, para cada valor del argumento de F(x), igual a la probabilidad de que X tome valores más pequeños o igual que dicho argumento. Por ejemplo, x puede ser 5000 horas y $F(5000)=0,8$; este resultado se debería interpretar como que *existe una probabilidad igual a 0,8 (o 80%) de que el equipo, descrito por F(x), falle antes o a lo sumo a las 5000 horas de operación*. Matemáticamente, el ejemplo anterior se expresa:

$$F(x) = \Pr (X \leq x) \rightarrow F(t = 5000) = \Pr (T \leq 5000) = 0,8$$

Cuando x crece, F(x) tenderá a 1, lo que debe interpretarse como que todo equipo fallará en un período entre 0 y un tiempo x muy grande.

d) Función de densidad de probabilidad

Esta función f(x), en que se emplea la letra f en minúscula a diferencia de la función acumulada que emplea F en mayúscula, representa probabilidades sólo si se la asocia a un intervalo que llamaremos Δx ; el producto de $f \cdot \Delta x$ es la probabilidad de que X tome el valor comprendido entre x y $x + \Delta x$. Teóricamente Δx es un valor infinitesimal.

Existen numerosas distribuciones probabilísticas las cuales se ajustan, unas mejor que otras, a la descripción de diversos fenómenos. El software EXCEL tiene dentro de sus funciones de distribución Weibull, Poisson, Normal, Exponencial, entre otras.

e) Histogramas

Una *tabla estadística* (por ejemplo de fallas en motores) es la expresión escrita de la distribución de frecuencias de los elementos de una muestra respecto a un carácter del experimento, por ejemplo, edad del motor en el momento en que la falla ocurrió. El carácter de la muestra se agrupa normalmente en *clases*, por ejemplo, motores entre 0 y un año de vida (clase 1), motores entre 1 y 2 años de vida (clase 2). Las frecuencias pueden expresarse en forma absoluta o en porcentajes. Un *histograma* es la figura plana que resultaría de representar cada elemento de la muestra por un rectángulo de las mismas dimensiones, de agrupar los rectángulos correspondientes a los individuos de cada clase para formar otro mayor y de disponer estos sobre una misma línea de tal forma de comparar su altura.

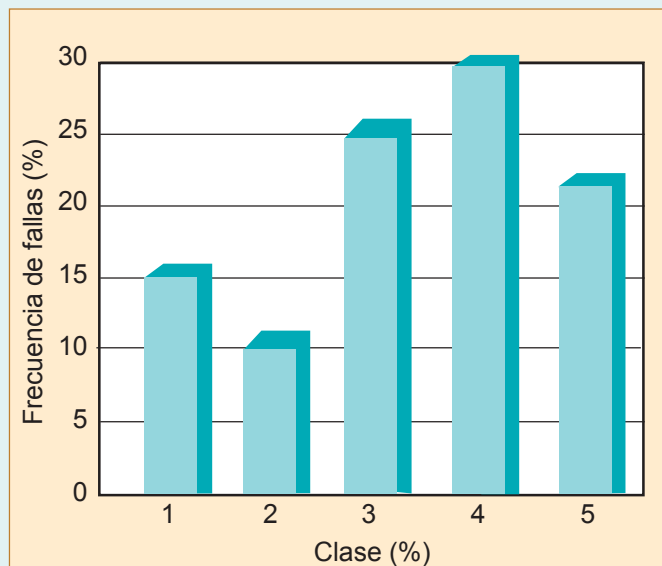
Si en una distribución de frecuencias se suma a la frecuencia de cada clase las frecuencias con marcas menores que la suya se obtiene una distribución de frecuencias de los elementos de la muestra con valores del carácter igual o menor que el correspondiente a cada clase. A estas distribuciones se las denomina distribuciones de frecuencias acumuladas.

EJEMPLO

La Tabla siguiente muestra la tabla estadística de fallas de 102 motores, de diversas edades.

Carácter Edad del motor	Clase	Frecuencia Absoluta de Fallas	Frecuencia Porcentual de fallas (%)
≥ 0 y < 1 año	1	15	14,7
≥ 1 y < 2 años	2	10	9,8
≥ 3 y < 4 años	3	25	24,5
≥ 5 y < 6 años	4	30	29,4
≥ 6 y < 7 años	5	22	21,6
	Total	102	100,0

El histograma correspondiente se muestra en la Figura siguiente



f) Algunas distribuciones utilizadas en la teoría de la duración

Las distribuciones más utilizadas en la teoría de la duración de elementos son la distribución exponencial y la distribución de Weibull.

La distribución exponencial tiene la siguientes expresiones

- función de distribución

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

- función densidad de probabilidad

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \quad x > 0$$

La distribución Weibull tiene la siguientes expresiones

- función de distribución

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

- función densidad de probabilidad

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{(\alpha-1)} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad x \geq 0$$

g) Media y valor esperado

Se entiende por *media* de un carácter en una muestra, al valor medio de ese carácter, es decir, la media aritmética de los valores del mismo en los individuos de la muestra. Se designa por $\bar{x}$. En el caso de distribuciones probabilísticas se define el *valor esperado* de la función, el que se puede definir como el valor que cabe esperar como valor promedio de un gran número de valores de x . No necesita ser un valor que pueda obtenerse como resultado concreto; nadie puede esperar que, por ejemplo, al cabo de un año el valor esperado es que se quemen 3,5 focos; pero, si se promedian los resultados de muchos eventos idénticos, el resultado más probable es precisamente 3,5.

Las planillas electrónicas permiten calcular los valores medios de las principales funciones de distribución. Así, en los ejemplos de los párrafos anteriores se tiene las siguientes expresiones y valores para los valores medios:

- Valor medio de la duración de un equipo regido por una función de distribución exponencial es:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \text{ (años)}$$

- Valor medio de la duración de un equipo regido por una función de distribución de Weibull es:

$$E(X) = \beta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \text{ (años)}$$

En esta expresión Γ es la función Gamma, la que se encuentra tabulada en los libros de probabilidades y, también aparece como función en las planillas electrónicas de uso común.

2.3.1. Método aproximado para la estimación de parámetros de una distribución de probabilidad

La estimación de los parámetros de función de distribución se debe realizar mediante métodos de inferencia estadística que escapan a los alcances de este texto. Por tal razón, se ha optado por una estimación aproximada en base a minimizar la suma cuadrática de la diferencia entre la función de distribución y los valores del histograma acumulado, ajuste que genéricamente se llama de mínimos cuadrados.

Para clarificar este método veamos dos ejemplos.

EJEMPLO 1: Duración de motores TIPO 1

Se realiza una estadística de funcionamiento de 200 motores. A cada uno de ellos se los hace funcionar hasta que falle y se anota el tiempo que se mantuvo operando. Los resultados se señalan en la tabla siguiente.

Duración	Clase	Nº de fallas
0-1 años	1	60
1-2 años	2	40
2-3 años	3	25
3-4 años	4	17
4-5 años	5	14
5-6 años	6	11
6-7 años	7	9
7-8 años	8	7
8-9 años	9	6
9-10 años	10	5
10-11 años	11	3
11-12 años	12	1
12-13 años	13	1
13-14 años	14	1
14-15 años	15	0
Total		200

Con esta tabla se construye la tabla con las frecuencias relativas, las frecuencias acumuladas y la función de distribución con que se modelará la vida de los motores, en este caso se utilizará una distribución exponencial. En la tabla siguiente se entrega los resultados del ajuste por mínimos cuadrados.

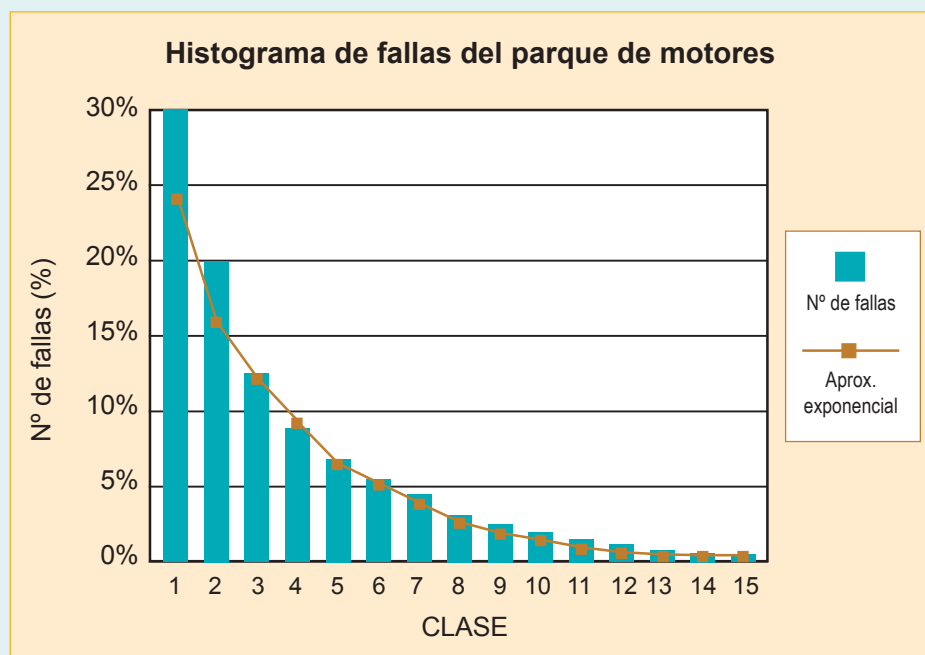
Clase	Nº de fallas	Nº de fallas	Nº de fallas acumuladas	Aproximación exponencial	
				Nº de fallas	Nº de fallas acumuladas
		%	%	%	%
1	60	30,00	30,00	23,32	27,50
2	40	20,00	50,00	16,90	47,44
3	25	12,50	62,50	12,25	61,89
4	17	8,50	71,00	8,88	72,37
5	14	7,00	78,00	6,44	79,97
6	11	5,50	83,50	4,67	85,48
7	9	4,50	88,00	3,39	89,47
8	7	3,50	91,50	2,45	92,37
9	6	3,00	94,50	1,78	94,47
10	5	2,50	97,00	1,29	95,99
11	3	1,50	98,50	0,94	97,09
12	1	0,50	99,00	0,68	97,89
13	1	0,50	99,50	0,49	98,47
14	1	0,50	100,00	0,36	98,89
15	0	0,00	100,00	0,26	99,20

De esta forma, la función densidad de probabilidad $f(x)$ y la probabilidad acumulada $F(x)$ son:

$$f(x) = 0,322e^{-0,322x}$$

$$F(x) = 1 - 0,322e^{-0,322x}$$

La figura siguiente muestra el histograma correspondiente a la estadística señalada en la tabla anterior. Simultáneamente se dibuja una función de densidad de probabilidad.



Por ejemplo, la probabilidad que un motor dure menos de 4 años es $F(4) = 1 - e^{-0,322 \cdot 4} = 1 - 0,2763 = 0,7237$.

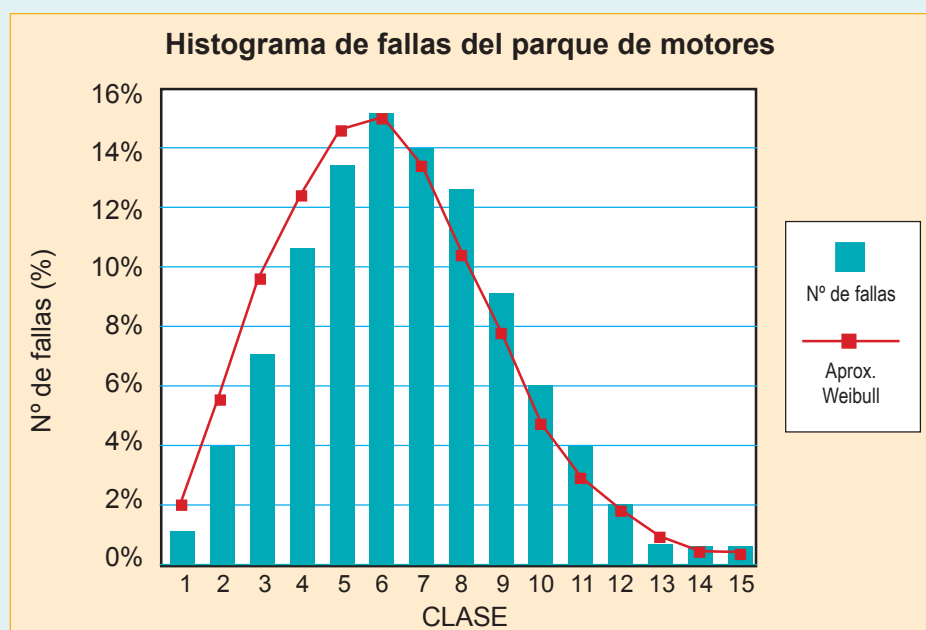
EJEMPLO 2: Duración de motores TIPO 2

Se realiza una estadística similar a la realizada en motores tipo 1, de funcionamiento de 200 motores. A cada uno de ellos se los hace funcionar hasta que falle, y se anota el tiempo que se mantuvo operando. Los resultados se señalan en la tabla siguiente.

Duración	Clase	Nº de fallas	Nº de fallas	Nº de fallas acumuladas	Aproximación Weibull	
					Nº de fallas	Nº de fallas acumuladas
			%	%	%	%
0-1 años	1	2	1,00%	1,00%	1,94%	0,77%
1-2 años	2	8	4,00%	5,00%	5,38%	4,35%
2-3 años	3	14	7,00%	12,00%	9,23%	11,66%
3-4 años	4	21	10,50%	22,50%	12,54%	22,63%
4-5 años	5	27	13,50%	36,00%	14,52%	36,29%
5-6 años	6	30	15,00%	51,00%	14,73%	51,07%
6-7 años	7	28	14,00%	65,00%	13,26%	65,19%
7-8 años	8	25	12,50%	77,50%	10,65%	77,21%
8-9 años	9	18	9,00%	86,50%	7,63%	86,35%
9-10 años	10	12	6,00%	92,50%	4,88%	92,57%
10-11 años	11	8	4,00%	96,50%	2,78%	96,34%
11-12 años	12	4	2,00%	98,50%	1,41%	98,38%
12-13 años	13	1	0,50%	99,00%	0,63%	99,36%
13-14 años	14	1	0,50%	99,50%	0,25%	99,77%
14-15 años	15	1	0,50%	100,00%	0,09%	99,93%

La aproximación empleada en este caso se realizó en base a la función de distribución de Weibull. Esto se debe a que estos motores, de un mejor diseño que los anteriores, presentan menos fallas en los primeros años de operación que los del tipo 1, lo que hace que la curva representativa de falla no sea posible ajustarla con error bajo con la curva exponencial.

Al igual que en el ejemplo anterior los parámetros α y β se determinaron por el método de mínimos cuadrados. Así con $\alpha = 1,57$ y $\beta = 5,395$ se puede afirmar que el histograma acumulado se aproxima a $F(x)$. La Figura siguiente muestra el resultado obtenido. Como en el ejemplo anterior la probabilidad que un motor dure menos de 4 años es $F(4) - 1 - e^{-(4/5,395)^{1,57}} = 0,465$. Es decir, este tipo de motores (tipo 2) tiene una probabilidad de fallas sustancialmente menor que los motores tipo 1. Prácticamente, motores obsoletos o viejos se pueden asimilar a motores tipo 1 y motores eficientes de diseño moderno, o antiguos pero muy bien operados y mantenidos, podrían asociarse a motores tipo 2.



El valor medio de la duración de motores tipo 1, regidos por una función de distribución exponencial es:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,322} = 3,11 \text{ (años)}$$

El valor medio de la duración de motores tipo 2, regidos por una función de distribución de Weibull es:

$$E(X) = \beta * \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) = 5,395 * \Gamma \left(1 + \frac{1}{1,57} \right) = 4,85 \text{ (años)}$$

De esta forma el valor esperado de que un motor funcione sin fallas es 3,11 años si es del tipo 1 y 4,85 años si es del tipo 2.

EJEMPLO 3: Sistemas industriales: funcionamiento de varios equipos (Cálculo de probabilidades de fallas)

En un sistema industrial es usual que siempre exista más de un equipo funcionando. Desde ese punto de vista la falla de un equipo, sin hacer colapsar todo el sistema industrial, provoca una perturbación no deseable. Por estar razón, se debe saber calcular la probabilidad de falla de un equipo perteneciente a un parque de equipos dentro de un lapso determinado.

Sea un sistema industrial con 5 motores funcionando. Se desea mostrar en una tabla todas las posibilidades que uno o más motores fallen en este sistema. La Tabla siguiente muestra todas las posibilidades mencionadas. La probabilidad de que un motor se queme en un período de análisis determinado depende, como se ha dicho en los párrafos anteriores, de sus características de diseño, operación, etc. Supongamos que los motores son del Tipo 1 (motores viejos, mal mantenidos) los que, como se ha dicho, se caracterizan según una función de probabilidad que permite calcular que la probabilidad que un motor dure menos de 4 años es $F(4) = 1 - e^{-0,322*4} = 1 - 0,2763 = 0,7237$. Complementariamente, la probabilidad que un motor no falle en el mismo periodo de 4 años es $1 - F(4) = 0,2763$. La probabilidad que ocurran 5 hechos en el citado período es el producto de cada una de las probabilidades de cada hecho. Este producto, así como la descripción de cada uno de los casos, se muestra en la Tabla siguiente. De esa Tabla se puede concluir lo siguiente:

- Que la probabilidad de que ningún motor se queme en el período es apenas 0,0016 (0,16%).
- Que la probabilidad de que se quemen los cinco motores en el período es 0,199 (19,9%).
- Que la probabilidad de que se quemen más de 4 motores es $0,1992 + 0,0759 = 0,2751$ (27,51%).
- Que, dado que la probabilidad de falla descrita en este ejemplo es tan alta, deberá hacerse mayor esfuerzo por disminuir la probabilidad de falla de un motor.

CASO	M1	M2	M3	M4	M5
1	X				
2		X			
3			X		
4				X	
5					X
6	X	X			
7	X		X		
8	X			X	
9	X				X
10		X	X		
11		X		X	
12		X			X
13			X	X	
14			X		X
15				X	X
16	X	X	X		
17	X	X		X	
18	X	X			X
19	X		X	X	
20	X		X		X
21	X			X	X
22		X	X	X	
23		X	X		X
24		X		X	X
25			X	X	X
26	X	X	X	X	
27	X	X	X		X
28	X	X		X	X
29	X		X	X	X
30		X	X	X	X
31	X	X	X	X	X
32					

Nota: El símbolo X significa un motor quemado. M1, M2, M3, M4 y M5 identifica a cada uno de los cinco motores existentes en el sistema industrial. Los casos del 1 al 5 corresponden a un motor quemado, cualquiera de los cinco. El caso 32 corresponde al caso ideal que ninguno de los motores se queme en el lapso de tiempo analizado.

Caso	Evento: Motores Quemados	Probabilidad de ocurrencia de cada caso	Probabilidad de ocurrencia del evento
1 a 5	1	$0,72 * 0,28 * 0,28 * 0,28 * 0,28 = 0,0042$	$5 * 0,00420 = 0,0209$
6 a 15	2	$0,72 * 0,72 * 0,28 * 0,28 * 0,28 = 0,0110$	$10 * 0,00110 = 0,1100$
16 a 25	3	$0,72 * 0,72 * 0,72 * 0,28 * 0,28 = 0,0289$	$10 * 0,0289 = 0,2889$
26 a 30	4	$0,72 * 0,72 * 0,72 * 0,72 * 0,28 = 0,0759$	$5 * 0,0759 = 0,3793$
31	5	$0,72 * 0,72 * 0,72 * 0,72 * 0,72 = 0,1992$	$1 * 0,1992 = 0,1992$
32	0	$0,28 * 0,28 * 0,28 * 0,28 * 0,28 = 0,0016$	$1 * 0,0016 = 0,0016$
Total			1,0000

2.4. Definición de confiabilidad

La confiabilidad de un sistema o equipo se relaciona con la idea de que la probabilidad que dicho equipo o sistema permanezca en funcionamiento por un número de horas (años) sin fallas sea alta. La Norma Británica BS 4778 (1991), la define como la característica de un ítem (o sea de un elemento de un equipo, de un equipo completo o de un sistema), expresada por la probabilidad de que efectúe una función requerida (es decir, que no falle), bajo ciertas condiciones (o sea en condiciones nominales de operación), en un período de tiempo establecido. Matemáticamente, en base a lo explicado en los párrafos anteriores, es posible expresar esta definición mediante la ecuación:

$$\text{Confiabilidad} = R(t) = P(X > t) = 1 - P(X \leq t)$$

2.4.1. Confiabilidad en sistemas serie y paralelo

2.4.1.1. Sistemas serie

Dos componentes de un sistema se consideran conectados en serie, en términos de confiabilidad, cuando la falla de uno ocasiona la falla del sistema completo. La probabilidad de que el sistema falle antes de t años es la probabilidad conjunta de que sólo el elemento 1 falle antes de t , que sólo el elemento 2 falle antes de t y que ambos elementos fallen antes de t :

$$P(T \leq t) = P_1(T \leq t) * P_2(T > t) + P_1(T > t) * P_2(T \leq t) + P_1(T \leq t) * P_2(T \leq t)$$

Si la confiabilidad de cada elemento puede ser descrita mediante una distribución exponencial:

$$P_k(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}$$

Entonces:

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

La confiabilidad se define como la probabilidad de que el sistema trabaje sin fallas durante un tiempo t :

$$R_k(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

El valor esperado que operará el sistema sin que falle se puede demostrar que es:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

EJEMPLO

Un aviso luminoso está compuesto por 40 lámparas todas conectadas eléctricamente en serie. Si una ampolla se quema el aviso queda totalmente a oscuras. La esperanza de vida media de cada ampolla es de 3000 horas. Esto significa que, si la distribución estadística se supone exponencial, se tendrá que:

$$\lambda_k = \frac{1}{3000}$$

La disponibilidad del sistema es:

$$R(t) = e^{-40/3000t}$$

Y el valor esperado que operará el sistema sin que falle (a veces llamado tiempo medio entre fallas del sistema) es:

$$E(T) = TMEF = \frac{1}{\sum_{k=1}^{40} \lambda_k} = \frac{1}{\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \dots + \frac{1}{3000}} = \frac{3000}{40} = 75 \text{ horas}$$

2.4.1.2. Confiabilidad de elementos en paralelo

Dos componentes de un sistema se consideran conectados en paralelo, en términos de confiabilidad, cuando la falla de uno no ocasiona la falla del sistema, el que, por el contrario continúa funcionando normalmente. Este esquema puede ser descrito como redundante por construcción. La probabilidad de que el sistema falle antes de t años es la probabilidad conjunta de que el elemento 1 falle antes de t y el elemento 2 también falle antes de t :

$$P(T \leq t) = P_1(T \leq t) * P_2(T \leq t)$$

Si la confiabilidad de cada elemento puede ser descrita mediante una distribución exponencial:

$$P_k(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}$$

Entonces:

$$P(T \leq t) = (1 - e^{-\lambda_1 t}) * (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

La confiabilidad se define como la probabilidad de que el sistema trabaje sin fallas durante un tiempo t :

$$R_k(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

El valor esperado que operará el sistema sin que falle se puede demostrar que es:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

EJEMPLO

Un equipo es alimentado, alternativamente, por la red eléctrica o por una unidad en base a baterías. La probabilidad de falla de la red eléctrica y del dispositivo de respaldo puede ser descrita mediante una distribución exponencial. El valor de λ de la red eléctrica es $3,4 * 10^{-4}$ (supone un valor esperado de 3 fallas en un año) y el del sistema de respaldo con baterías de $1,14 * 10^{-4}$. (supone un valor esperado de 1 fallas en un año) La disponibilidad del sistema será:

La confiabilidad o probabilidad de que el sistema trabaje sin fallas durante un tiempo t:

$$R_k(t) = e^{-3,4 \cdot 10^{-4}t} + e^{-1,14 \cdot 10^{-4}t} - e^{-(3,4+1,14) \cdot 10^{-4}t}$$

Al cabo de un año (t=8760 horas) la confiabilidad es R=38,03 %. Sin el sistema de respaldo la confiabilidad resulta igual a 5,09%.

El valor esperado que operará el sistema sin que falle resulta:

$$E(T) = \left(\frac{1}{3,4} + \frac{1}{1,14} - \frac{1}{3,4 + 1,14} \right) \cdot 10^4 = 9510 \text{ horas}$$

Sin el sistema de respaldo E(T) resulta 2941 horas.

3. DISEÑO DE SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD TOMANDO EN CUENTA ASPECTOS DE CONFIABILIDAD

Al diseñar un sistema de suministro de electricidad se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos relacionados con su confiabilidad:

1. Elevada confiabilidad de cada elemento del sistema. La confiabilidad del sistema está vinculada con la confiabilidad de cada elemento del sistema.
2. Resiliencia. En lo posible, la falla de un elemento no debiera dejar todo el sistema sin funcionar.
3. Mantenibilidad. Una adecuada mantención de los sistemas eléctricos al menos mantiene su confiabilidad en los valores de diseño de la instalación. Por el contrario una mantención no realizada o realizada en mala forma disminuye la confiabilidad del sistema.
4. Capacidad del sistema. El sistema debe estar diseñado para los consumos que abastecerá con una capacidad de sobrecarga transitoria.
5. Flexibilidad. El sistema debe ser flexible y prever que existirán aumentos del consumo, o un cambio en la ubicación de éstos, o que existirán cambios tecnológicos que requerirán de un sistema distinto del que fue proyectado inicialmente. En este escenario las modificaciones del sistema deben ser relativamente fáciles de realizar, sin que el sistema pierda confiabilidad.
6. Interfaz adecuado con la infraestructura existente.

3.1 Esquemas y opciones que mejoran la confiabilidad de un sistema

Dentro de los diversos esquemas que mejoran la confiabilidad se incluyen los siguientes:

- a) El uso de varios esquemas modulares en lugar de un solo gran esquema central.
- b) El empleo de equipos de reserva y de reemplazo para la alimentación de cargas críticas.
- c) El diseño de sistemas de distribución de electricidad en paralelo (esquemas de doble circuito) con interruptores automáticos de transferencia.
- d) El empleo de unidades de generación de electricidad de emergencia y de unidades de electricidad ininterrumpibles.

3.2 Problemas de confiabilidad vinculados con la calidad de la red

Los principales problemas de calidad de la red eléctrica son los siguientes:

- a) Interrupción del suministro de energía eléctrica. Estas interrupciones, causadas por fallas en las plantas generadoras, en cortes en las líneas de distribución o desconexión de la carga debido a sobrecarga del sistema, se caracterizan por la pérdida total del suministro por más de un minuto.

- b) Interrupción transitoria del suministro de energía eléctrica. Estas interrupciones, causadas generalmente por la apertura y cierre de interruptores, se caracterizan por la interrupción del servicio durante menos de un minuto.
- c) Transitorios. Se caracteriza por un voltaje impulsivo de alto valor, pero de corta duración, ocasionado en general por la conexión de condensadores o la desconexión de cargas inductivas, tales como motores de inducción, soldadoras de arco, etc.
- d) Mala regulación de voltaje. Se caracteriza por bajas o subidas de voltaje de duración superior a un minuto. Se debe, en general, a un mal ajuste de los transformadores de alimentación del sistema, particularmente su voltaje y a un diseño del sistema no apropiado a la demanda de los usuarios. Una demanda alta de los usuarios ocasiona una baja del voltaje y, por el contrario, una demanda baja hace subir el voltaje por sobre lo permitido.
- e) Desbalance de voltaje. Se caracteriza por la existencia de asimetría en una de las tres fases de un sistema trifásico. Se debe, en general, a que el consumo está conectado fundamentalmente a una sola de las fases del sistema.
- f) Flicker o parpadeo de la iluminación. Se caracteriza por una fluctuación del voltaje que ocasiona el centelleo de la iluminación, visible por el ojo humano. Se debe, fundamentalmente, a la conexión y desconexión de consumos relevantes, tales como el refrigerador o la calefacción intradomiciliaria, conexión de hornos y soldadoras de arco, etc.
- g) Distorsión armónica. Se caracteriza por una distorsión del voltaje de alimentación de los equipos, el que deja de ser perfectamente sinusoidal. Se debe, fundamentalmente a la conexión de cargas no lineales en el sistema, tales como equipos electrónicos industriales o domiciliarios: variadores de velocidad de motores, televisores, computadores, etc. El fenómeno puede acentuarse hasta el punto de ocasionar daños irreparables, caso en el que recibe el nombre de resonancia armónica, la que se debe fundamentalmente a la interacción entre los condensadores de compensación de factor de potencia y las reactancias de los transformadores de alimentación del sistema.
- h) Elevación de los voltaje de neutro y tierra. Se caracteriza por una diferencia de voltaje entre el neutro y la tierra del sistema. Se debe, fundamentalmente a que circulan corrientes elevadas por el conductor de neutro y/o por el conductor a tierra, o bien porque su dimensionamiento es inadecuado.

3.3. Registros históricos de problemas de calidad de redes eléctricas

De los problemas que afectan la confiabilidad y calidad de las redes eléctricas es siempre de interés saber cuales son más frecuentes que otros y, también, cuáles son las causas más frecuentes de que estos problemas se presenten. En las Tablas siguientes se da a conocer este tipo de antecedentes, obtenidos de estadísticas internacionales.

Tabla 1
Frecuencias de ocurrencias de fallas de sistemas eléctricos

Problema	Armónicas			Fuga a tierra			Perturbación de Voltaje		
Frecuencia de ocurrencia	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
Sector									
Comercial	71%	20%	9%	20%	31%	49%	51%	27%	22%
Público	60%	20%	20%	31%	31%	31%	31%	49%	20%
Industrial	60%	31%	9%	40%	31%	31%	40%	31%	29%

Significado de la magnitud de la frecuencia de ocurrencia indicada:

Alta: Mayor que doce incidentes al año con resultado de corte de energía eléctrica o de corte de procesos.

Media: Dos a doce incidentes por año.

Baja: Entre cero y un incidente al año.

tabla 2
Fuentes comunes de falla de sistemas eléctricos

Problema	Fuente(s)	Comercial	Público	Industrial
Armónicas	Sistemas computacionales	71%	78%	34%
	Conexión carga inductiva	5%	--	22%
	Fuentes de poder	10%	17%	22%
	Combinación de factores	14%	5%	22%
Fugas a tierra	Sistemas computacionales	100%	100%	41%
	Equipos de control de procesos	--	--	59%
Perturbación de voltaje Transitorios Voltajes impulsivos Ruido eléctrico	Rayos	--	--	--
	Conexión de carga inductiva	12%	31%	43%
	Falla en la red pública	88%	69%	57%
	Conexión carga elevada	--	20%	40%
	Cargas cíclicas	--	--	100%

Casos en que se aplica la aparición o fuente de algunos problemas:

Conexión de carga inductiva: motores, transformadores, encendido de tubos fluorescentes.

Cargas cíclicas: hornos y soldadoras al arco.

3.4. Definición de los principales tipos de anomalías de redes de suministro de electricidad

Ninguna red eléctrica puede considerarse ideal; todas ellas siempre presentarán algún grado de anomalía. Es entonces importante definir los límites a partir de los cuales esta anomalía comienza a afectar la confiabilidad de los equipos eléctricos que se conectan a esta red defectuosa. Conocidos y aceptados estos límites, los diseñadores y fabricantes de equipos deberán garantizar el funcionamiento de estos aparatos aun cuando la red no sea ideal. La tabla siguiente muestra una descripción de estos límites.

Tabla 3
Descripción de los principales tipos de perturbación de redes eléctricas

Tipos de perturbación	Descripción
1. Corte de energía	El voltaje baja a menos del 92,5% de su valor por un tiempo mayor que 10 segundos.
2. Regulación de voltaje: Bajada o subida de voltaje momentáneo	El voltaje baja en más de un 7,5% o sube más de un 7,5% por un tiempo superior a los 20 milisegundos e inferior a los 10 segundos.
3. Transitorios de voltaje (corta duración)	El voltaje baja a cero por más de 0,5 segundos o sube a más de un 150% durante más de 0,1 segundo o sube a más de un 200% durante más de 0,05 segundos o a más de un 300% durante más de 0,005 segundos.
4. Distorsión armónica	El voltaje deja de ser sinusoidal (distorsión de voltaje mayor que 5%). La corriente consumida por los equipos del usuario (UPS, computadores, televisores, etc.) es fuertemente no sinusoidal (distorsión de corriente superior al 20%).
5. Diferencial de voltaje entre neutro y tierra	No existe un estándar para este voltaje. La corriente por los cables de conexión a tierra debe ser nula. Por el conductor de neutro circula la corriente debida a los desequilibrios entre cada fase y componentes armónicas principalmente de orden 3. El voltaje en el conductor de neutro no debe ser superior a los 0,6 Volts. Puede medirse como voltaje entre neutro y tierra.
6. Ruido de alta frecuencia	El ruido de alta frecuencia (10 kHz a 100 MHz) debe ser inferior a 15 mV en el rango 10 kHz a 500 kHz, e inferior a 5 mV en el rango 500 kHz a 100 MHz.

3.5. Proyectos de mejoramiento de la red: Solución a cortes de energía, regulación y transitorios de voltaje

Si la red eléctrica de un determinado lugar excede de los límites permitidos por norma, el funcionamiento de los equipos que se conecten a ella no podrán ser garantizados por los fabricantes, tendrán una confiabilidad baja y una tasa de fallas alta. Por otra parte, la red eléctrica no puede tener una disponibilidad de un 100% de tal modo que el usuario deberá realizar un proyecto de mejoramiento de su instalación si desea que sus equipos funcionen aun cuando la red eléctrica falle. La Tabla siguiente muestra los proyectos de mejoramiento que pueden llevarse a cabo en cada caso.

Tabla 4
Soluciones a cortes de energía y voltaje fuera de norma

Tipos de perturbación	Proyecto de mejoramiento
1. Corte de energía	a) Voltaje alterno en base a baterías (UPS). b) Generador diesel de respaldo.
2. Regulación de voltaje	a) Voltaje alterno en base a baterías (UPS). b) Mejoramientos del sistema de distribución de electricidad. c) Reguladores de voltaje.
3. Transitorios de voltaje	a) Voltaje alterno en base a baterías (UPS). b) Filtros de línea (TVSS). c) Transformadores de aislación.

Un problema también frecuente en redes eléctricas lo constituye el desbalance o desequilibrio de voltaje de una de las fases de la red con respecto a otra. Este desequilibrio usualmente se mide según el valor de la llamada componente de secuencia negativa del voltaje, la que se mide con instrumentos especiales. La Norma establece que este valor, medido en forma porcentual, no debe exceder de un 2% para el 95% de los muestreos sobre un período de una semana. Una forma aproximada de determinar el desbalance es medir los tres voltajes de cada fase y determinar que ninguno de los voltajes difiere del valor promedio en más de un 2%. Un desequilibrio del voltaje provoca el calentamiento de los motores eléctricos trifásicos, lo que obliga a emplearlos en nivel de potencia inferior a su potencia nominal. La Figura siguiente muestra la disminución porcentual de potencia de un motor en función del desbalance de voltaje, para evitar que el motor se sobrecaliente. Así por ejemplo si el desbalance es de un 5% no es recomendable que el motor trabaje a más de un 75% de carga.

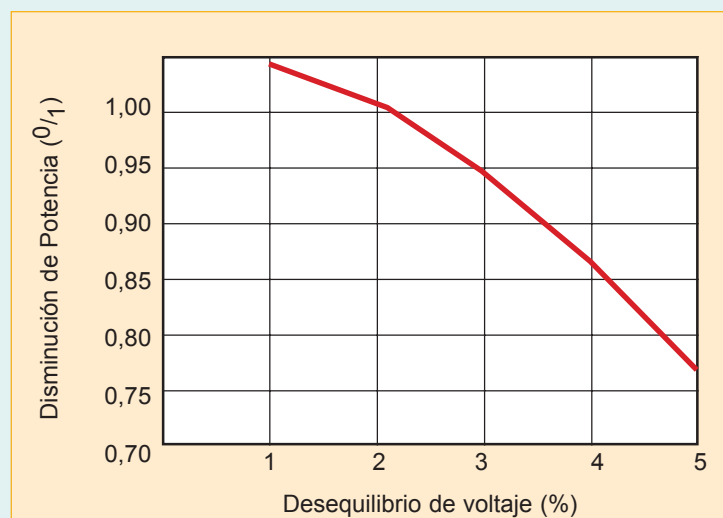


Figura 1
Disminución de la potencia de un motor en función del grado de desequilibrio

3.6. Proyectos de mejoramiento de la red: Soluciona los problemas de distorsión armónica

La red eléctrica debe ser idealmente sinusoidal. Sin embargo, debido a que los usuarios demandan corrientes que no son sinusoidales, el voltaje distorsiona su forma. Las características límites y la descripción de este problema se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 5
Distorsión de voltaje: características límites

Término empleado	Descripción
Distorsión armónica	El voltaje deja de ser sinusoidal: La distorsión de voltaje total es mayor que un 5%. La corriente consumida por el usuario es fuertemente no sinusoidal: la distorsión total de corriente es superior al 20%.
Diferencial de voltaje	Por el conductor de neutro circula la corriente debida a los desequilibrios entre cada fase y a componentes armónicas principalmente de orden 3. El voltaje en el conductor de neutro no debe ser superior a 0,6 Volts. Puede medirse como voltaje entre neutro y tierra.

La Norma establece con precisión los límites de distorsión armónica que deben cumplir las empresas distribuidoras de energía eléctrica. Si esto no se cumple, el usuario debería solicitar que el problema se solucione.

Tabla 6
Distorsión de voltaje: límites permitidos

Voltaje nominal en el punto de medida	Distorsión Individual [%]	Distorsión Total [%]
Menor o igual que 69 kV	3,0	5,0
Mayor que 69 001 V y menor que 161 kV	1,5	2,5
Mayor que 161 001 V	1,0	1,5

Si el problema de distorsión de voltaje persiste, se manifestarán los problemas señalados en la tabla siguiente, ya que los equipos eléctricos y el sistema en general, están diseñados para ser alimentados con voltaje sinusoidal.

Tabla 7
Distorsión de voltaje: efectos

Equipo	Efecto observados
Transformador	Sobrecalentamiento si el factor K es elevado (superior a 2,7) y la carga es superior al 90% de la nominal.
Condensadores	Los condensadores (de compensación del factor de potencia, de iluminación, por ejemplo), se queman si la corriente por ellos es más que 1,3 veces su corriente nominal.
Motores de inducción	Sobrecalentamiento y vibraciones excesivas si la distorsión de tensión es superior al 5%.
Cables de conexión	Sobrecalentamiento si el valor efectivo de la corriente (medido con un instrumento RMS verdadero) es superior a la que soporta el cable.
Equipos de computación	Pérdidas de algunos datos y daños en algunas componentes electrónicas debido a que el voltaje máximo es superior al nominal o a que existe un diferencial de voltaje entre neutro y tierra.

Si bien los distribuidores de electricidad tienen la obligación de mantener el voltaje dentro de los límites establecidos por norma, los usuarios no pueden tener consumos que alteren la forma de onda del voltaje en forma sustancial. Este hecho es también establecido por Normas, según lo que se muestra en la Tabla siguiente.

Tabla 8
Distorsión de corriente: límites permitidos

		Máxima distorsión armónica individual En [%] de la componente fundamental				Distorsión Total
Icc/I1	h < 11	h ≥ 11 h < 17	h ≥ 17 h < 23	h > 23 h < 35	h ≥ 35	DI [%]
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 a 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 a 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 a 1 000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Icc : Corriente de cortocircuito en el punto donde se inyectan las armónicas.

I1 : Corriente fundamental en el punto donde se inyectan las armónicas.

h : Número de la armónica.

Notas:

1. Las armónicas pares se limitan a un 25% de los valores indicados.

2. La tabla es válida para tensiones inferiores a 69 kv. Para tensiones entre 69 y 138 kV se deben multiplicar los valores por un factor 0,5.

3. Al aplicar los límites de la tabla a rectificadores de q pulsos, los valores señalados se pueden multiplicar por $\sqrt{q/6}$ en el caso de las armónicas características (o sea el límite aceptado es superior si q es mayor que 6), siempre que el límite de las armónicas no características se multiplique por 0,25 (o sea el límite aceptado para la armónica característica es inferior al indicado en la tabla). Las armónicas características en un rectificador de q pulsos se definen en el párrafo 2.

El peor caso, desde el punto de vista de un constructor de equipos, es conectarlo a una barra débil (Icc bajo). En este caso, la norma exige una baja inyección de armónicas. Por esta razón, muchos fabricantes, se ponen en el peor caso (Icc/I1 < 20), indican que su equipo tiene una distorsión armónica inferior a 5% y, por tanto, cumple con las máximas exigencias de la Norma. En otras palabras, tratan que el equipo que venden cumpla con la primera línea de la Tabla.

Cuando en un sistema eléctrico existen problemas relacionados con armónicas, como los descritos en párrafos anteriores, será necesario solucionarlos. La tabla siguiente muestra algunos de los proyectos o mejoramientos en el sistema para que el sistema trabaje dentro de los límites establecidos por las normas.

Tabla 9
Distorsión de corriente: soluciones

Equipo o instalación	Proyecto o mejoramiento
Distribución de electricidad	Dimensionamiento de conductores considerando armónicas. Disminución de las corrientes por el neutro mediante el balance de cargas. Disminución de las corrientes armónicas mediante filtros y transformadores de aislación. Tableros separados para equipos sensibles.
Condensadores	Sustitución por condensadores antiresonantes.
Equipos contaminantes	Mejoramiento de los equipos (exigencia a los fabricantes de ubicar filtros de línea o reactancias en serie). Empleo de transformadores de aislación.

3.7 Proyectos de mejoramiento de la red: Solución a los problemas de mallas de tierra

Las tablas siguientes muestran tanto los problemas de mallas de tierra que afectan la confiabilidad de los sistemas eléctricos como los proyectos de solución de estos problemas.

Tabla 10
Efectos de un mal diseño de mallas de tierra

Tipos de perturbación	Efectos en equipos de computación
1. Diferencial de voltaje entre neutro y tierra	Ocurre pérdida de algunos datos y daños en algunas componentes electrónicas.
2. Ruido de alta frecuencia	Ocurre pérdida de algunos datos, interferencias en telecomunicaciones, pantallas de computadores con defectos visibles.

Tabla 11
Solución a problemas de mallas de tierra

Tipos de perturbación	Proyecto de mejoramiento
1. Diferencial entre neutro y tierra	a) Disminución de las corrientes por el neutro mediante balance de cargas. b) Disminución de las corrientes por el neutro mediante filtros o transformadores de aislación en equipos contaminantes (UPS, computadores). c) Dimensionamiento de los conductores de neutro.
2. Ruido de alta frecuencia	a) Supresores de ruido en las principales fuentes de generación de ruido radioeléctrico. b) Supresores de ruido a la llegada de la red pública.

El Centro de Promoción de Usos del Cobre, **PROCOBRE**, es una organización de derecho privado sin fines de lucro. Es patrocinado por los productores y fabricantes de cobre y su misión es promover el uso del cobre y sus aleaciones, especialmente en Chile y en Latinoamérica, fomentando una disposición favorable hacia su utilización e impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

PROCOBRE colabora y trabaja en forma coordinada con las empresas, el gobierno y los organismos relacionados con el cobre para materializar una acción convergente, con visión de largo plazo a nivel mundial.

En el cumplimiento de sus fines, **PROCOBRE** colabora con la edición del presente texto como un apoyo para la correcta manipulación de los productos de cobre.

EL COBRE ES ETERNO



Colombia: E-mail: colombia@copper.org <http://www.procobrecolombia.org>
Venezuela: E-mail: venezuela@copper.org <http://www.procobrevenezuela.org>
Ecuador: E-mail: ecuador@copper.org <http://www.procobreecuador.org>
Bolivia: E-mail: bolivia@copper.org <http://www.procobrebolivia.org>
Coordinación Perú: E-mail: peru@copper.org <http://www.procobreperu.org>
Dirección: Francisco Graña N° 671, Magdalena del Mar, Lima 17 - Perú.
Teléfonos: (51-1) 460-1600, Anexo 229. 261-4067 / 261-5931 / 461-1826
Fax: (51-1) 460-1616