

## **Medición de la Calidad de la Energía**

### **Análisis sobre la calidad de la energía en redes eléctricas**

#### **Antecedentes**

En los últimos años se está registrando en todos los países industrializados una creciente preocupación hacia la “calidad del producto de la energía eléctrica” o, dicho de otra forma, hacia la “calidad de la onda de tensión”.

Las alteraciones de la “calidad de la onda” tienen lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, así como en su utilización por determinados tipos de receptores. En los últimos años el tema de calidad se está convirtiendo en un motivo de preocupación, tanto para las distribuidoras como para los usuarios. Y ello, por dos causas:

- Por un lado, los procesos industriales requieren, -cada vez más-, una mayor calidad de todos los productos utilizados y, en particular, de la electricidad, haciéndose más sensibles a las alteraciones que puedan existir.
- Por otro lado, la creciente utilización de receptores que generan perturbaciones hace que el nivel de contaminación general de las redes eléctricas esté aumentando, lo que puede así incidir en el normal funcionamiento de los demás receptores a ellas conectados y, en definitiva, extendiendo el problema.

Las propias empresas eléctricas han de intentar reducir en lo posible el impacto de las alteraciones existentes, asesorando a sus clientes sobre la forma más correcta de utilizar la energía eléctrica, especialmente en receptores que generan perturbaciones.

Los fabricantes de aparatos y receptores tienen que diseñarlos y fabricarlos para que su utilización no altere la compatibilidad electromagnética entre la red a la que se van a conectar y los equipos a ella conectados.

Los propios usuarios tienen que preparar sus instalaciones eléctricas teniendo en cuenta las características de la red a la que se van a conectar, su entorno electromagnético y los requerimientos de inmunidad de sus propios equipos.

Finalmente, las Administraciones Públicas competentes deberán organizar el marco legal adecuado que regule las relaciones entre todos ellos.

#### **Introducción**

La energía eléctrica es suministrada en la forma de un sistema trifásico de tensiones de naturaleza sinusoidal.

Hay cuatro parámetros que caracterizan a la onda de tensión y que permiten medir su grado de pureza:

- Frecuencia
- Amplitud
- Forma
- Simetría

Las centrales eléctricas producen una onda sinusoidal de 50 ciclos por segundo prácticamente perfecta, por lo que, desde el punto de vista del suministro al cliente, los parámetros mencionados se consideran constantes en la generación.

Sin embargo, en el proceso de transporte y distribución de la energía desde las centrales hasta los puntos de consumo final, que tiene lugar a través de las redes eléctricas, estas magnitudes sufren alteraciones que pueden afectar a determinados usuarios.

Estas alteraciones tienen su origen en las propias instalaciones eléctricas –como consecuencia de

maniobras, averías, etc. —, en fenómenos naturales —descargas atmosféricas— y en el funcionamiento normal de determinados receptores —puentes rectificadores, hornos de arco, etc.— que las transmiten a los demás receptores a través de la red eléctrica.

Su eliminación completa resulta, por lo tanto, imposible. Por ello, es necesario adecuar los receptores, con el fin de disminuir al máximo las emisiones que generan y que pueden afectar al funcionamiento de otros receptores, así como reducir en lo posible las repercusiones que pueden tener dichas alteraciones sobre su propio funcionamiento normal.

## **Variaciones de frecuencia**

### **Definición**

Se dice que existen variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico de corriente alterna cuando se produce una alteración del equilibrio entre carga y generación. La frecuencia, en un sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones por minuto de los alternadores. Dado que la frecuencia es común a toda la red, todos los generadores conectados a ella girarán de manera síncrona, a la misma velocidad angular eléctrica.

### **Valores de referencia**

La frecuencia nominal de la tensión es de 50 Hz. En condiciones normales de operación, el valor promedio de la frecuencia fundamental en los sistemas de distribución, durante 10 segundos, es, según normas europeas:

Con sistema interconectado:

—50 Hz  $\pm$  1% (49,5... 50,5 Hz) durante el 95% de una semana.

—50 Hz - 6%, +4% (47... 52 Hz) durante el 100% de una semana.

### **Causas que las originan**

En condiciones normales de funcionamiento, la capacidad de generación conectada a una red eléctrica es superior al consumo. Para ello, se mantiene una reserva de energía rodante, es decir, una capacidad no utilizada que puede compensar las variaciones bruscas de carga y mantener la frecuencia dentro de un margen de tolerancia. No obstante, son posibles condiciones excepcionales en las que se produzca un desequilibrio importante entre la generación y la carga, dando lugar a una variación de la frecuencia. Pueden darse los dos casos siguientes:

- La carga es superior a la generación. En este caso, la frecuencia disminuye. Su velocidad de caída dependerá:

- De la reserva de energía rodante.

- De la constante de inercia del conjunto de los generadores conectados a la red.

En tales condiciones, si la disminución de la frecuencia se sitúa por encima del margen de tolerancia y los sistemas de regulación no son capaces de responder de forma suficientemente rápida para detener la caída de la misma, puede llegar a producirse un colapso en el sistema. La recuperación del mismo se lograría mediante un deslastre rápido, selectivo y temporal de cargas.

Asimismo, un incremento brusco de la carga hará que los alternadores pierdan algo de velocidad.

En tales casos, los sistemas de regulación de los alternadores detectan esas variaciones de velocidad y suministran energía mecánica adicional a las turbinas.

Así, el incremento de carga se reparte entre todos los generadores conectados a la red y se alcanza un nuevo equilibrio entre carga y generación.

- La carga es inferior a la generación.

En este caso, la frecuencia aumenta. El equilibrio se restablece mediante un proceso análogo al anterior, actuando sobre los sistemas de regulación de los alternadores para disminuir su capacidad de generación. El equilibrio se alcanza de forma mucho más sencilla que en el caso anterior.

La relación entre la variación de carga y la variación de frecuencia depende del número y capacidad de los generadores conectados a la red. Es más desfavorable en sistemas aislados, que en grandes redes interconectadas.

### Efectos que producen

En los márgenes normales de tolerancia, el principal efecto de las variaciones de frecuencia es el cambio en la velocidad de las máquinas rotativas. En tales condiciones, pueden producirse los siguientes fenómenos:

- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Los relojes eléctricos sincronizados con red, atrasan o adelantan.

También tienen efecto sobre otros equipos:

- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.
- Las turbinas de las centrales eléctricas se encuentran sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga.
- Posibles problemas en el funcionamiento de instalaciones de autogeneración.

### Variaciones lentas de tensión

#### Definición

Se produce una variación de tensión cuando hay una alteración en la amplitud y, por lo tanto, en el valor eficaz de la onda de tensión. Una variación de tensión tiene:

- un valor de partida
- un valor final
- una duración, es decir, el tiempo que emplea en pasar del valor inicial al valor final (Fig. 1).

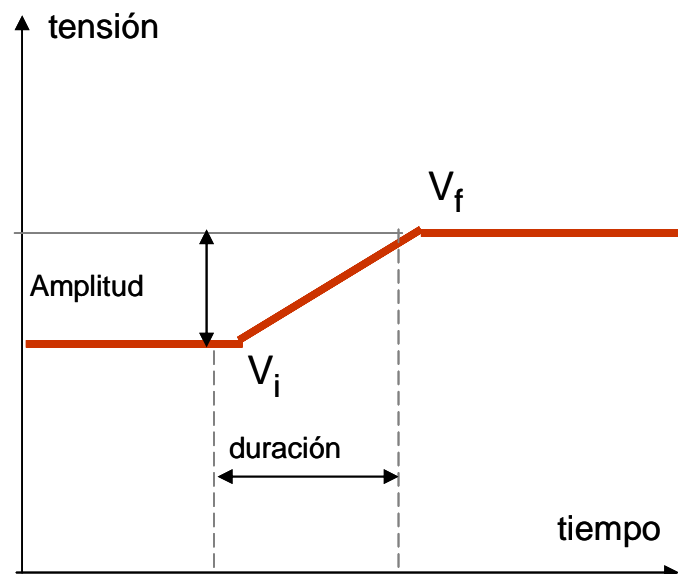


Figura 1

En otras palabras, amplitud y duración son los parámetros característicos de una variación de tensión. Pues bien, se considera una variación lenta de tensión a aquella cuya duración es superior a 10 segundos. Cabe distinguir aquí entre las variaciones lentas y las fluctuaciones que se verán más adelante. La diferencia estriba en que, en estas últimas, la duración va desde varios milisegundos hasta los 10 segundos.

En una red eléctrica ideal, la tensión de suministro debería tener un valor concreto y constante igual al de la tensión nominal. Sin embargo, en la práctica, no hay redes ideales, por lo que la tensión de servicio puede presentar valores diferentes en un período de tiempo determinado, si bien cabe esperar que éstos se encuentren casi siempre dentro de unos márgenes razonables de variación respecto de la tensión nominal.

### Valores de referencia

Según las disposiciones del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), las variaciones de tensión admitidas son las siguientes:

Alta Tensión	$\pm 5 \%$
Alimentación aérea (MT o BT)	$\pm 8 \%$
Alimentación subterránea (MT o BT)	$\pm 5 \%$
Rural	$\pm 10 \%$

### Causas que las originan

Para analizar las causas que originan las variaciones lentas de tensión, es útil determinar los factores de los cuales depende el valor de la tensión de una red. Desde el punto de vista de la conexión de un receptor, el sistema de distribución de energía eléctrica puede quedar representado mediante el esquema indicado en la Figura 2.

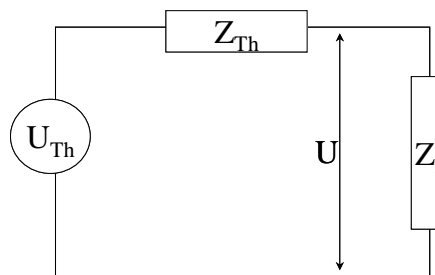


Figura 2

En este circuito, la tensión en los terminales del receptor responderá a la expresión:

$$U = \frac{Z_r}{Z_r + Z_{Th}} U_{Th}$$

En consecuencia, el valor de la tensión  $U$  en el receptor depende de los siguientes factores:

- La tensión del generador ( $U_{th}$ )
- La impedancia en serie de la red ( $Z_{th}$ )
- El valor de la impedancia del receptor ( $Z_r$ )

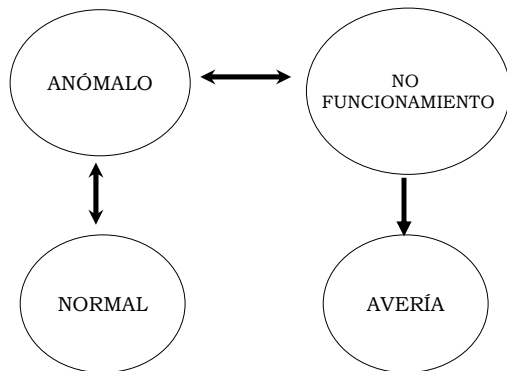
De todos los factores que influyen en las variaciones de tensión, el más importante es la impedancia del receptor, que depende a su vez de la carga conectada. Esta puede variar por diversas razones, entre las cuales cabe destacar las siguientes:

- El consumo de energía no se realiza de forma constante. A lo largo del día, hay períodos de consumo intenso, a los que se denomina "horas punta", y períodos de bajo consumo, a los que se llaman "horas valle".
- Los receptores no son iguales y sus diferencias condicionan asimismo las características del consumo. Así, no es lo mismo que el consumo se concentre en una zona con una importante componente industrial, a que lo haga en una mayoritariamente residencial.

La variación del consumo en un tiempo determinado recibe el nombre de curva de carga. Las variaciones de tensión se encuentran estrechamente ligadas a ella, de forma que es de esperar que la tensión de la red sea mayor en los momentos de bajo consumo, que en los de alto.

### Efectos que producen

Para estudiar los efectos de las variaciones lentas de tensión sobre los receptores, conviene tener en cuenta los posibles estados de su funcionamiento: normal, anómalo, no funcionamiento y avería (Figura 3).



**Figura 3**

Los tres primeros estados pueden evolucionar entre sí, mientras que el último, el de avería, es fijo y no permite el paso a ninguno de los demás de manera normal. Los receptores deben estar dotados de protecciones que eviten el paso al estado de avería.

Una vez definida una tensión nominal y su margen de tolerancia, pueden darse dos tipos de variaciones de tensión:

- Las que se sitúen por debajo de dicho margen o "tensión baja".
- Las que se sitúen por encima del mismo o "tensión alta".

Veamos a continuación los efectos ligados a unas y otras.

### Efectos de tensión baja

La mayor parte de los receptores pasan de un estado de funcionamiento normal a uno "anómalo" o a uno de "no funcionamiento" cuando se ven sometidos a una tensión baja, recuperando el estado "normal" cuando el valor de la tensión vuelve a situarse dentro de los márgenes de tolerancia.

Así, en la mayoría de los casos, los efectos no suelen ser especialmente perjudiciales. Cabe citar algunos ejemplos:

- En el momento del arranque, un motor no podrá iniciar el giro si la tensión no es suficiente para proporcionar el par mecánico que requiere el eje. Sufrirá un calentamiento que podría provocar su avería.
- En las lámparas incandescentes, se observa una disminución en la intensidad lumínica. Las que funcionan en base a descarga de gases pueden llegar a no cebarse en el momento de la conexión, permaneciendo apagadas. Si se encontraran funcionando, podrían apagarse y no se encenderían hasta que la tensión volviera a los límites de funcionamiento.
- Contactores o relés pueden producir actuaciones incorrectas, afectando al proceso que estén controlando.

### Efectos de tensión alta

La tensión alta produce fundamentalmente un efecto de calentamiento de los receptores. En determinadas circunstancias, este calentamiento puede ocasionar la avería de los equipos si se supera el límite térmico que toleran. Es más difícil detectarla, ya que los receptores no dejan de funcionar instantáneamente y no es fácil apreciar de inmediato su sobrecalentamiento.

## Fluctuaciones de tensión y Flicker

### Definición

#### Fluctuaciones de tensión

Se dice que hay fluctuaciones de tensión cuando se producen variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de la red eléctrica. A su vez, las variaciones de tensión se definen como las variaciones del valor eficaz o valor de pico de tensión entre dos niveles consecutivos que se mantienen durante un tiempo finito no especificado. Su duración va desde varios milisegundos hasta unos 10 segundos y con una amplitud que no supera el  $\pm 10\%$  del valor nominal.

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) clasifica las fluctuaciones de tensión en cuatro tipos –Figura 4–:

- Tipo a: Variaciones rectangulares de tensión de período constante.

Por ejemplo, las ocasionadas por interrupciones de cargas resistivas.

- Tipo b: Escalones de tensión que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en sentido positivo, como negativo.

- Tipo c: Cambios en la tensión claramente separados que no siempre llevan aparejados escalones de tensión. Por ejemplo, las originadas por acoplamientos de cargas no resistivas.

- Tipo d: Series de fluctuaciones esporádicas o repetitivas. Por ejemplo, las producidas por cambios cíclicos o aleatorios de cargas.

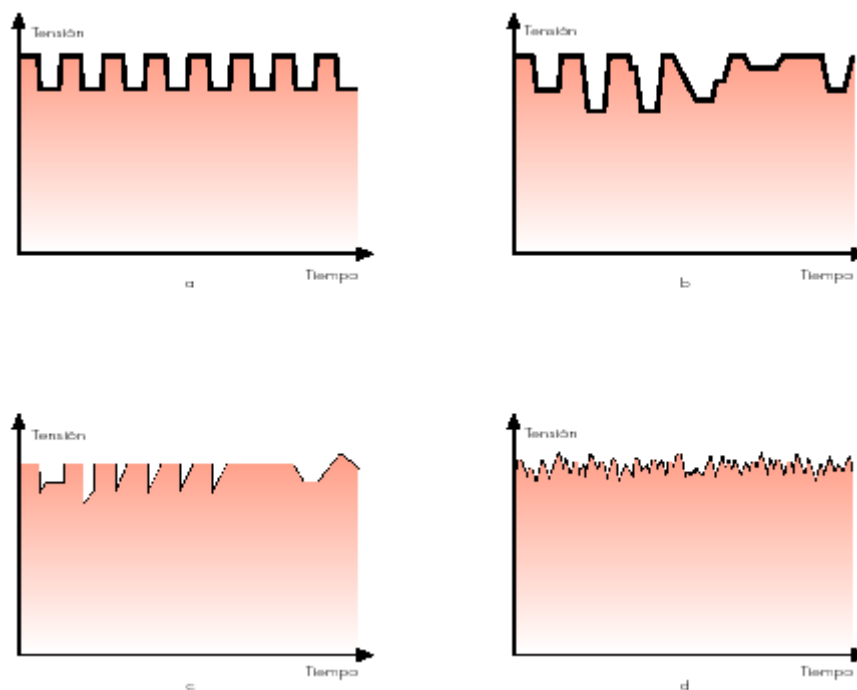


Figura 4

### Flicker

Se define el Flicker como la impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia, ocasionada por una serie de variaciones de tensión –Figura 5–, o por la variación cíclica de la envolvente de la onda de tensión, originando a quien lo percibe una sensación desagradable.

El “flicker” depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan. Estas oscilan entre los 0,5 Hz y los 30 Hz de frecuencia.

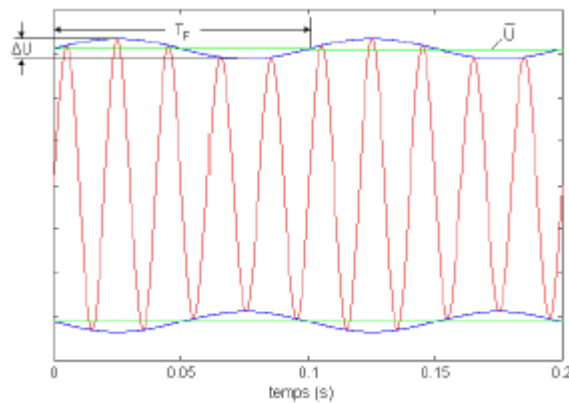


Figura 5

### Causas que las originan

Las fluctuaciones de tensión son originadas por los receptores conectados a la red cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo. En determinadas circunstancias, y dependiendo de su punto de conexión, pueden dar lugar a “flicker”.

Los principales dispositivos perturbadores son de tipo industrial:

- Máquinas de soldadura por resistencia.
- Molinos trituradores.
- Ventiladores de minas.
- Hornos de arco.
- Plantas de soldadura por arco.
- Compresores.
- Laminadoras.
- Máquinas herramientas.
- Cargas controladas por impulsos.

### Efectos que producen

Las fluctuaciones de tensión pueden afectar a gran cantidad de consumidores que reciben suministro eléctrico de la misma red.

Estas fluctuaciones de tensión no suelen tener una amplitud superior a  $\pm 10\%$ , por lo que muchos equipos no se ven afectados por ellas. El “flicker”, que no se puede evitar, es el efecto más perjudicial.

Los aparatos que producen mayor “flicker” son:

- Las lámparas de incandescencia y de descarga
- Los monitores y receptores de televisión.

## Huecos de tensión y cortes breves

### Definición

#### Huevo de tensión

Se dice que ha tenido lugar un huevo de tensión en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente por debajo de un límite establecido –generalmente, el 90%– y se recupera al cabo de un tiempo determinado, que oscila entre los 10 milisegundos y varios segundos.

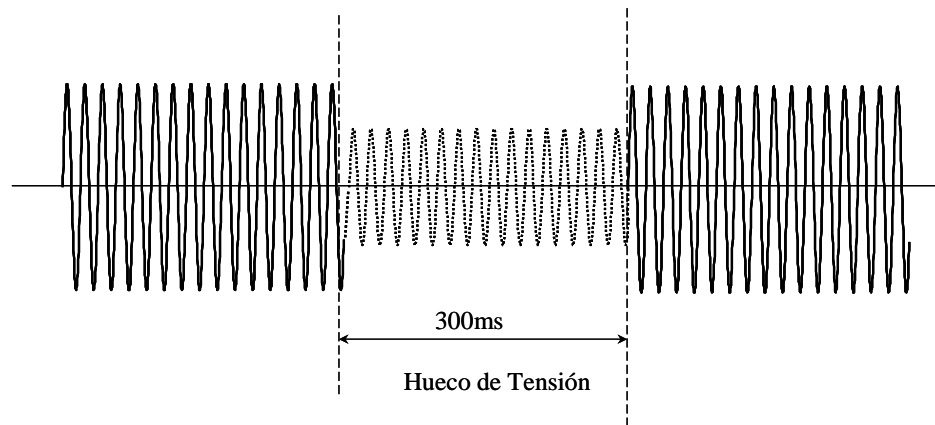


Figura 6

El límite máximo de este período es el punto más controvertido en la definición de hueco de tensión:

- Si se atiende a la causa más típica que lo produce –la aparición y eliminación de fallas–, su duración debiera estar relacionada con el tiempo máximo de permanencia de la falla. Por consiguiente, en el caso de las fallas más habituales, sería razonable establecer ese valor máximo en unos pocos segundos.
- Sin embargo, hay fallas –como las que ocasionalmente se derivan del arranque directo de motores asincrónicos– en las que el tiempo de recuperación de la tensión puede llegar a las decenas de segundos. Por ello, algunas definiciones consideran que existe hueco cuando la duración es de hasta un minuto.

### Corte breve de tensión

Se dice que ha tenido lugar un corte breve de tensión cuando se Huecos de tensión y cortes breves produce la desaparición total de la tensión de las tres fases durante un tiempo superior a 10 milisegundos e inferior a 1 minuto (Fig. 7). Es equivalente a un hueco de tensión que afecte a las tres fases y tenga una profundidad del 100%.

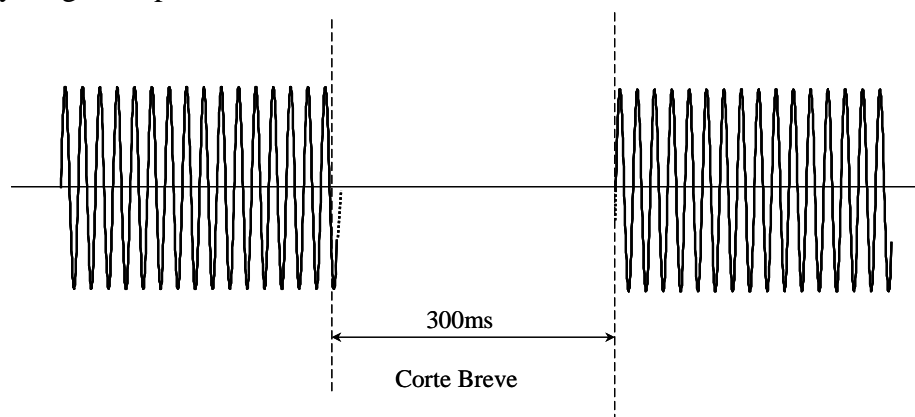


Figura 7

### Valores de referencia

#### Huecos de tensión

Las dos magnitudes que permiten clasificarlos, y que son de gran utilidad a la hora de estimar sus posibles repercusiones y las medidas preventivas que se pueden aplicar, son:

- Profundidad: Valor al que cae la tensión. En función de esta magnitud se suelen hacer tres grupos:
  - Entre 10% y 30%



—Entre 30% y 80%

—Superior al 80%

• **Duración:** Tiempo que tarda en recuperarse la tensión. Se suelen dividir en dos grupos:

—Entre 0,01 segundos y 1 segundo

—Entre 1 segundo y varios segundos

### **Cortes breves**

Reciben la denominación de cortes breves de corta duración los que no se prolongan más de 0,4 segundos; y cortes breves de larga duración, cuando superan ese límite.

Dado que existen aspectos comunes a los huecos de tensión y a los cortes breves, y que tanto sus efectos como las técnicas de inmunización son semejantes, se va a dar a ambas perturbaciones un tratamiento común.

### **Causas que los originan**

Las causas más típicas de los huecos y cortes de tensión son las fallas en la red eléctrica o en las instalaciones de los clientes. Las corrientes de cortocircuito que se originan en una falla producen la caída de la tensión en una o más fases durante el tiempo que aquella permanece. Esta caída de tensión se manifiesta en toda la red, pero su magnitud será mayor a medida que la proximidad a la falla sea mayor. El origen de las fallas puede ser:

- Interior al sistema eléctrico: fallos de aislamiento, falsas maniobras, etc.
- Exterior al sistema: descargas atmosféricas, excavadoras, etc.

Por ello, los huecos y cortes de tensión tienen un carácter fundamentalmente aleatorio. No es posible su eliminación total, ni tampoco reducirlos a partir de un cierto límite.

### **Efectos que producen**

#### **Motores asincrónicos**

##### **• Sobre el accionamiento:**

Cuando se produce un hueco de tensión, disminuye el par motor, que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la tensión, dando lugar a una ralentización –que se prolonga hasta que se recupera la tensión– o, incluso, a la propia parada del motor. Cuanto mayor sea el valor y la duración del hueco, mayor será la ralentización del motor:

##### **• Sobre el control**

—Mediante contactores en alterna. En su variante más simple y extendida, al poner en marcha el motor, se actúa sobre un contactor, que se autoalimenta.

Si la tensión se sitúa por debajo de un determinado nivel durante el funcionamiento normal del motor, el contactor cae y hay que reponerlo manualmente.

—Mediante interruptores y relés de mínima tensión. Para evitar que tenga lugar el arranque de la instalación entera cuando vuelve la tensión tras un cero, se suele dotar a ésta de relés de mínima tensión o de bobinas tensión nula, que desconectan motores en función de la profundidad y duración del hueco. En caso de cortes breves de corta duración, el proceso sería el mismo. En los de larga duración, el relé de mínima tensión actúa con toda seguridad.

### **Computadoras**

Tanto las computadoras que realizan funciones administrativas, como las de vigilancia y control de procesos industriales, son sensibles a los huecos de tensión, que pueden ocasionar en ellos pérdidas de información o interpretaciones erróneas de órdenes.

## Impulsos de tensión

### Definición

Un impulso de tensión es una variación brusca del valor instantáneo de la amplitud de la tensión. Puede llegar a ser varias veces superior al valor nominal de ésta y su duración oscila entre algunos microsegundos y diez milisegundos, lo que equivale a medio ciclo de la onda senoidal. Por su amplitud y duración, los impulsos de tensión tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión y no mediante valores promediados, que son los que habitualmente se utilizan para medir otro tipo de perturbaciones que afectan a la amplitud de la onda. Los impulsos de tensión suelen aparecer de forma esporádica, pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo. Pueden manifestarse en cualquier punto de la red. A partir de éste, tienden a desplazarse a lo largo de la misma con la velocidad de propagación de una onda en un medio conductor. Por ello, en la práctica, suele considerarse que aparecen en todos los puntos de dicha red en el mismo instante en el que es generado, aunque con parámetros diferentes, especialmente en lo que se refiere al valor de pico –y, por tanto, a su energía asociada–, que disminuye cuanto más se aleja del punto de generación. En consecuencia, es posible que ciertos impulsos generados en líneas de alta tensión se propaguen por ellas, se transmitan a través del acoplamiento inductivo de los transformadores y aparezcan, atenuados, en las líneas de tensiones más bajas.

### Clasificación

En función del instante de la evolución de la onda de tensión en el que se producen, pueden ser clasificados en:

- Positivos
- Negativos

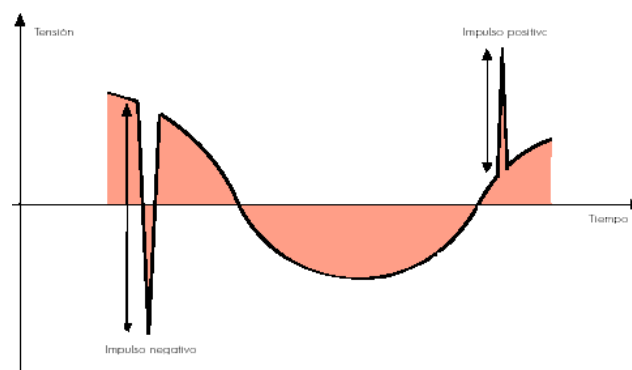


Figura 8

Los efectos de unos y otros son equivalentes. En función de su forma pueden ser clasificados en

- Simples. Presentan un frente de subida y un frente de bajada, a partir del cual, y sin oscilaciones posteriores, la tensión vuelve a su valor normal (Fig. 9).
- Complejos. Se caracterizan por un frente de subida, seguido de oscilaciones que van amortiguándose en un determinado periodo de tiempo (Fig. 10).

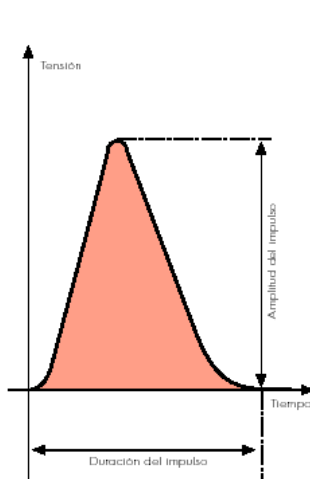


Figura 9

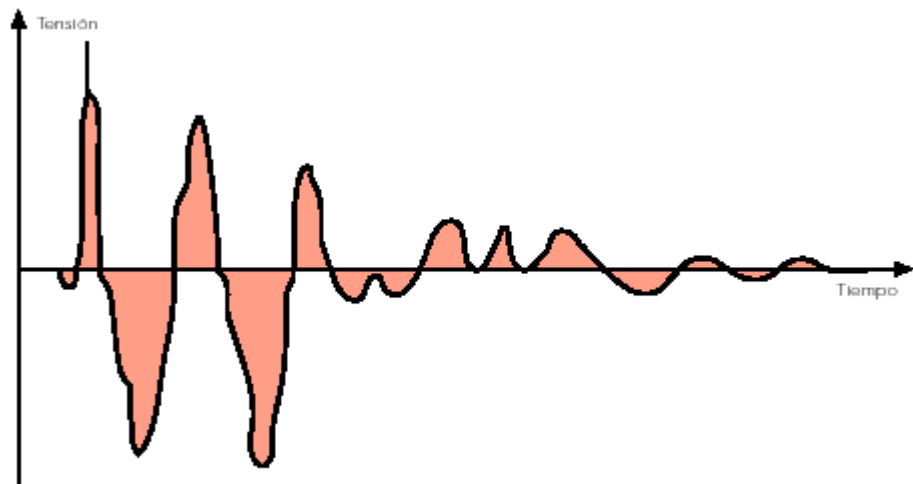


Figura 10

### Parámetros característicos

Los parámetros que caracterizan un impulso de tensión son los siguientes:

- Tiempo de subida. Intervalo de tiempo existente entre el 10% y el 90% de la amplitud máxima del impulso. Es del orden de microsegundos.
- Tiempo de bajada. Intervalo existente entre el punto de amplitud máxima del impulso y un valor determinado de su decrecimiento, normalmente el 50%. Es también del orden de microsegundos.
- Duración. Diferencia absoluta entre los instantes de inicio y final del impulso. Como antes se ha señalado, oscila entre varios microsegundos y algunos milisegundos.
- Valor de pico. Amplitud máxima del impulso. Su orden de magnitud es de 1 a 5 veces el valor nominal de la tensión.

### Causas que los originan

En función de su origen, se pueden distinguir dos tipos de causas o fuentes generadoras de impulsos de tensión:

- Fuentes de generación de impulsos exteriores al sistema eléctrico.
- Fuentes de generación de impulsos interiores del sistema eléctrico.

### Fuentes de generación de impulsos exteriores al sistema eléctrico

La fuente principal es la descarga atmosférica o rayo. Puede provocar impulsos, básicamente:

- Por el impacto directo del rayo en la red eléctrica
- Por la inducción producida por la descarga a tierra de un rayo en las proximidades de la red eléctrica.

Los parámetros de los impulsos generados por fuentes externas –es decir, los impulsos “de tipo rayo”– tienen magnitudes diferentes según sea la forma en la que hayan sido ocasionados. En general, son de mayor energía los originados por el impacto directo. La probabilidad y la frecuencia de aparición de estos impulsos depende de las características geográficas de cada zona, definidas por los niveles isoceráunicos, que determinan la frecuencia de las descargas atmosféricas.

### Fuentes de generación de impulsos interiores del sistema eléctrico.

Existen elementos en la red eléctrica y en los receptores conectados a ella que pueden generar impulsos de tensión. Las fuentes más habituales son:

- Actuación de un elemento de corte (operación de conexión o desconexión). El impulso de

tensión se produce como consecuencia de un cambio brusco de la intensidad que circula por la red derivado de la conexión o desconexión de cargas. En los casos de desconexión, se pueden generar impulsos de forma compleja cuando en el elemento de corte se producen “reigniciones” en la extinción del arco eléctrico. Por ejemplo, se producen impulsos en la: —Conexión “energización”) y desconexión de líneas eléctricas mediante seccionadores o interruptores. El impulso es atribuible a la existencia de las inductancias equivalentes de las líneas eléctricas.

—Conexión y desconexión de transformadores. El impulso de tensión se produce como resultado de la existencia de un núcleo magnético.

—Conexión de baterías de condensadores. Se utilizan habitualmente para regular la tensión en las redes eléctricas, corregir el factor de potencia, etc. Su “energización” ocasiona impulsos de tensión a consecuencia de las características transitorias de la carga de un condensador.

—Conexión y desconexión de cargas. Ciertos receptores –incluidos electrodomésticos tales como motores, lámparas de descarga, etc. – pueden generar impulsos de tensión a causa de sus características técnicas.

- Fusión de fusibles. Los fusibles de limitación de corriente generan impulsos de tensión al actuar, debido a la inductancia equivalente de la red que protegen.
- Conmutaciones de convertidores electrónicos de potencia. Generan impulsos de tensión periódicos, al producirse cortocircuitos momentáneos en el proceso de conmutación, seguidos de un rápido cambio en la tensión. Los parámetros de los impulsos de tensión generados por cada una de estas fuentes son característicos, de modo que es posible asociar la forma del impulso a su fuente de origen. En general, tienen una energía superior a los de tipo rayo, ya que, aunque su valor de tensión de pico es menor, su duración suele ser mayor.

### **Efectos que producen**

Los impulsos de tensión pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, tanto redes como receptores. Su consecuencia más directa es la aparición, en la mayoría de los casos, de una sobretensión cuyos efectos negativos dependerán de la magnitud de la misma.

### **Efectos sobre las redes eléctricas y equipos asociados**

Los niveles de aislamiento dieléctrico que incorporan actualmente los diseños de las redes y equipos asociados permiten que éstos soporten sin daño los impulsos de tensión previsible en función de su localización geográfica y de sus propias características técnicas. Así ocurre, entre otros, con los siguientes elementos:

- Cables
- Aisladores en general
- Condensadores
- Transformadores
- Interruptores

Estos y otros elementos de la red tienen asignado un límite máximo admisible de sobretensión transitoria, denominado habitualmente “tensión de choque”, que se obtiene a partir de ensayos.

El grado de cumplimiento de estos límites, mediante una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento en los diferentes estados de la red, determinará que estos equipos sean más o menos inmunes a los impulsos de tensión.

### **Efectos sobre los receptores**

Los nuevos equipos que aparecen en el mercado incluyen dispositivos electrónicos, fabricados con elementos semiconductores, lo que hace que presenten un bajo nivel de inmunidad frente a los impulsos de tensión. Los efectos de este tipo de perturbaciones sobre los receptores pueden ser clasificados en función del riesgo de que éstos sufran averías o anomalías de funcionamiento.

- Receptores con riesgo de avería. Básicamente, son los equipos que incorporan semiconductores de potencia, por ejemplo:

- Rectificadores con diodos
- Controladores de velocidad de motores mediante tiristores
- Controladores de velocidad mediante Triacs

Estos receptores pueden sufrir daños por impulsos de tensión del orden de nanosegundos. La probabilidad de que se produzcan averías depende de diversos factores, entre ellos:

- Amplitud el impulso
- Duración del impulso
- Polaridad
- Características de la red a la que están conectados.

- Receptores con riesgo de anomalías de funcionamiento.

Son, fundamentalmente, receptores con circuitos electrónicos para señales de baja potencia.

En general, no están conectados directamente a la red de baja tensión, sino que se acoplan mediante una conversión corriente alterna/corriente continua. Esta puede llegar a transmitir los impulsos de tensión que llegan a través de la red y afectar a los circuitos electrónicos, alterando su funcionamiento. Algunos de los receptores más sensibles son los siguientes:

- Sistemas digitales en general. Estos receptores (computadoras, sistemas controlados por microprocesadores, etc.) pueden sufrir alteraciones en los programas, almacenamiento incorrecto de datos en la memoria, etc.
- Sistemas de control. Cuando están contruidos con microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.
- Instrumentación. Es posible la generación de indicaciones incorrectas.
- Alarmas y sistemas e disparo. Pueden actuar de manera no deseada.
- Equipos de control de velocidad de motores. Cuando el control se realiza mediante semiconductores de potencia, la velocidad puede verse alterada de forma involuntaria.

## Distorsión armónica

### Definición

Se dice que existe distorsión armónica cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios.

Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de intensidad que no es sinusoidal pura –aunque sí periódica, con 50 Hz de frecuencia–, se recurre a su análisis frecuencial. Este se lleva a cabo normalmente mediante la transformada rápida de Fourier, un algoritmo de cálculo que nos proporciona los contenidos de las diferentes ondas sinusoidales puras que componen la onda deformada. Estos contenidos se refieren a:

- La componente fundamental de la onda (50 Hz de frecuencia).
- Las componentes de frecuencias armónicas (múltiplos de 50 Hz), que reciben la denominación de armónicos de tensión o de intensidad. Su presencia debe limitarse.

Los contenidos o tasas de los diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de cuerdo con la siguiente relación:

$$U_n \% = \frac{U_n}{U_1} 100$$

En esta expresión,  $U_n$  es la amplitud del armónico de tensión de orden  $n$  y  $U_1$  la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

## Valores de referencia

### Evaluación

En relación con los armónicos, se han definido tasas que no deben ser sobrepasadas, en el tiempo, en un determinado porcentaje:

- Tanto la normativa internacional como la argentina establecen unas tasas para cada armónico cuya probabilidad de no ser sobrepasadas ha de ser, como mínimo, del 95%. En la tabla siguiente se fijan los valores normados por el ENRE:

**Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión en BT (U 1kV), que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.**

Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	2,0			12	0,5
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 0,5 x 15/n				

**Tasa de Distorsión Total: TDT 8%**

- También se ha establecido una tasa de distorsión total que tiene en cuenta simultáneamente todos los armónicos de tensión existentes. La probabilidad de que no sea sobrepasada en el tiempo ha de ser también, como mínimo, del 95%. Esta tasa de distorsión total se expresa en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental a partir de la siguiente fórmula, en la cual se tiene en cuenta hasta el armónico de orden 40:

$$TDT = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1}$$

### Causas que la originan

Se puede considerar que, en su mayor parte, los equipos y elementos que componen los sistemas de distribución de energía eléctrica son lineales. En otras palabras, que su característica de intensidad/tensión se mantiene constante.

No obstante, hay algunos equipos que tienen características no lineales, es decir, cuya intensidad demandada no es sinusoidal pura y sí, por tanto, una onda deformada. Estos equipos emiten armónicos a la red general de alimentación eléctrica en el punto de conexión común (PCC). Las principales fuentes de intensidades armónicas son:

- Receptores de uso industrial.

Entre ellos cabe destacar:

—Los rectificadores. Son los equipos mediante los cuales se efectúa el proceso básico de conversión de la energía eléctrica, de corriente alterna a corriente continua.

—Los hornos de inducción y los hornos de arco. Las alteraciones de la onda de tensión más características de estos receptores son, además de la distorsión armónica, las fluctuaciones de tensión que, en general, producen “flicker”.

- Receptores de uso doméstico. No poseen una potencia unitaria elevada, pero son en conjunto una importante fuente de armónicos, ya que gran número de ellos suelen ser utilizados simultáneamente durante largos períodos de tiempo. Destacan:

- Los receptores de televisión.
- Los aparatos controlados mediante elementos electrónicos (electrodomésticos, reguladores de luminosidad, etc.).
- Las lámparas fluorescentes.
- Las lámparas de descarga de vapor de sodio.
- Elementos de instalaciones eléctricas. Se pueden citar:
  - Los dispositivos electrónicos de control y mando que regulan la intensidad absorbida. Estos aparatos interrumpen el paso de ésta en ciertos momentos, produciendo componentes armónicas en el sistema de alimentación.
  - Los equipos que poseen núcleos magnéticos. Cuando funcionan en condiciones de saturación, originan armónicos de tensión. Se encuentran, entre ellos, los transformadores de potencia, que sufren situaciones de saturación cuando las tensiones que se aplican son superiores a la nominal. Producen entonces armónicos de tensión que, en su mayor parte, son de orden impar.

Cabe subrayar que los armónicos de tensión de una red pueden verse amplificados, incluso en puntos alejados de la carga perturbadora que los origina, si se dan condiciones de resonancia. Estas pueden aparecer en un punto determinado de la red, cuando son conectados en él condensadores para la corrección del factor de potencia.

### **Efectos que produce**

La magnitud de los problemas que causan las tensiones armónicas en los equipos instalados en un determinado entorno electromagnético depende del valor de las tasas de las componentes armónicas –es decir, del grado de deformación de la onda– y de la sensibilidad de dichos equipos este tipo de alteraciones. En cualquier caso, la incidencia de la distorsión armónica generada por un receptor perturbador será menor cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito en el PCC. Entre los equipos sensibles a los efectos de este tipo de perturbaciones, se encuentran:

- Los condensadores. Registran pérdidas adicionales y calentamientos capaces de ocasionar un importante deterioro.
- Los fusibles de protección. Pueden sufrir asimismo procesos de calentamiento o, incluso, fusión en situaciones de intensidad normal.
- Los cables. Los armónicos de alta frecuencia dan lugar a fallos en el aislamiento, gradientes de tensión elevados y efecto corona.
- Los balastos inductivos que se utilizan en el alumbrado con lámparas fluorescentes o con lámparas de descarga. El circuito resonante formado por la inductancia de los mismos y por la capacidad instalada en el sistema de alumbrado ocasiona una amplificación de armónicos que produce, a su vez, un aumento de calor capaz de causar fallos prematuros en estos dispositivos.
- Los relés de protección. En ocasiones, pueden actuar de manera intempestiva –es decir, sin que exista falla– como consecuencia del valor de cresta de la onda resultante o de su desfase respecto el paso por cero.
- Los equipos que están diseñados para utilizar la onda de tensión de la forma más pura posible. Tal es el caso de los que se emplean en sistemas de comunicaciones, manipulación de datos, control de procesos electrónicos, etc. Sus correspondientes fuentes de alimentación eléctrica están proyectadas de manera que no den lugar a la generación de armónicos hasta un determinado nivel. No obstante, si éste es superado, se pueden producir pérdidas de datos o aparición de datos erróneos en las computadoras, operaciones fuera de secuencia en máquinas herramienta o robots controlados por computadora, etc.
- Los equipos de medida de inducción. La presencia de armónicos en la red produce en ellos pequeños errores de lectura, ya que suelen estar calibrados para una onda sinusoidal pura.
- Los sistemas de transmisión de señales por la red. Pueden verse afectados cuando existen componentes armónicas cuya frecuencia es parecida a la de la corriente portadora.

- Las redes eléctricas. Los armónicos incrementan sus pérdidas por calentamiento, especialmente en conductores neutros de baja tensión, transformadores y motores, degradando los aislamientos y acortando su vida útil.

### Desequilibrios de tensión

#### Definición

Se dice que existe desequilibrio de tensión, o que hay un sistema trifásico desequilibrado o asimétrico, cuando los módulos de los tres vectores representativos de las tensiones o los desfases relativos existentes entre ellos no son iguales.

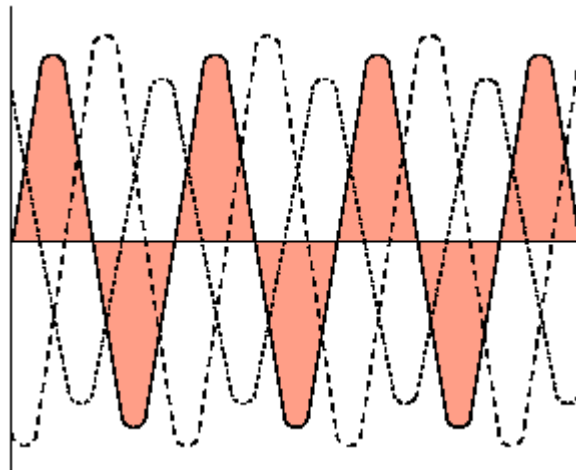


Figura 11

#### Valores de referencia

##### Cálculo

Las tensiones asimétricas que aparecen en el punto de conexión común (PCC), como consecuencia de la conexión de cargas asimétricas trifásicas o cargas fase-fase, pueden ser calculadas mediante la siguiente expresión:

$$U_{\text{asim}} \% = \frac{\text{Potencia aparente de las cargas conectadas}}{\text{Potencia de cortocircuito en el punto PCC}}$$

##### Medida

Partiendo de medidas reales de la tensión compuesta de línea, se pueden obtener valores aproximados del grado de asimetría mediante esta fórmula:

$$U_{\text{asim}} \% = \frac{\text{Desviación máxima respecto del valor medio de cargas tensión}}{\text{Valor medio de tensión}}$$

Así por ejemplo para medir el grado de asimetría en un punto de la red en el que se registran las siguientes tensiones compuestas: 15.25Kv, 15.05 Kv y 14.50 Kv:

$$V_{\text{medio}} = 14.93\text{Kv}$$

Desviaciones:



$$\begin{aligned}15.25-14.93 &= 0.316 \\15.05-14.93 &= 0.116 \\14.50-14.93 &= -0.433\end{aligned}$$

El grado de asimetría será:

$$U_{\text{asim}} = \frac{0.433}{14.93} 100 = 2.9\%$$

### Causas que los originan

La conexión de cargas monofásicas en baja, media y alta tensión absorbe en cada fase intensidades diferentes que producen tensiones asimétricas. Así ocurre, por ejemplo, con la conexión de hornos monofásicos. Las cargas monofásicas entre conductor de fase y conductor neutro, que sólo son posibles en las redes de baja tensión, no tienen, en general, especial relevancia. Esto se debe a que, en el PCC, la relación entre la potencia de las cargas conectadas y la potencia de cortocircuito es baja: normalmente, 1/150. Aun así, debe evitarse el efecto que generan varias cargas monofásicas sobre una misma fase. Para conseguirlo, es necesario efectuar un reparto adecuado de dichas cargas entre las tres fases de la red de baja tensión. Las principales cargas monofásicas conectadas entre dos fases que producen asimetrías en las redes de alta y media tensión son las siguientes:

- Hornos de inducción (cuando trabajan a la frecuencia de la red).
- Hornos de fusión de resistencia.
- Instalaciones inductivas por calentamiento.
- Hornos de resistencia para la fabricación de electrodos.
- Instalaciones de calentamiento por arco voltaico.
- Máquinas de soldadura por resistencia.
- Hornos de fusión de acero de arco voltaico.
- Sistemas de tracción eléctrica, por la conexión fase-tierra.

### Efectos que producen

Las tensiones asimétricas producen diferentes efectos según cuál sea el tipo de receptor:

- Transformadores y líneas. Para una misma carga activa, la intensidad causada por la asimetría puede ser el doble de la que existiría en situación de simetría.
- En los motores asíncronos, los aumentos de temperatura por calentamiento son significativos para valores de  $U_{\text{asim}}$  superiores a un 1%. Y son especialmente perjudiciales cuando se llega al 2% en máquinas totalmente cargadas.
- Equipos de regulación y control. Como señala la norma CEI 146, deben estar preparados para aceptar un grado de asimetría de hasta el 2%. En caso de que este nivel sea superado, su funcionamiento puede verse afectado de manera significativa.