

---

## Calidad de la Energía

### 2.1 La importancia de la calidad de la energía

La principal razón por la que hay interés en los estudios de calidad de energía es de tipo económico. En los últimos años, se ha incrementado el número de cargas sensibles a las variaciones de los parámetros en el suministro de energía eléctrica.<sup>1</sup>

No sólo los consumidores domésticos o comerciales se ven afectados en este sentido, también se ven inmersos los consumidores industriales y las propias empresas suministradoras y distribuidoras de energía eléctrica que utilizan, en la mayor parte de los casos, los avances de la electrónica de potencia.

### 2.2 ¿Qué es la calidad de la energía?

La calidad de la energía puede definirse como la ausencia de problemas manifestados en tensión, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.<sup>2</sup>

La calidad del suministro está definida por tres factores importantes: continuidad del servicio (considerando el mínimo de fallas del suministro de potencia), limitación de las variaciones de tensión y control de la frecuencia eléctrica a su valor nominal.<sup>3</sup>

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida y la forma en que repercuten los problemas de calidad del servicio, podemos decir que el propósito de la calidad de la energía es encontrar métodos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de tensión que afectan a los usuarios, así como proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el sistema eléctrico de la compañía suministradora.<sup>4</sup>

### 2.3 Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia

#### 2.3.1 Transitorios

El término transitorio es utilizado para denotar las variaciones indeseables y momentáneas en la forma de onda de corriente o tensión.<sup>5</sup>

El transitorio puede aparecer en la instalación del usuario debido a disturbios en el sistema de distribución de la empresa suministradora o a disturbios dentro de la propia instalación del usuario. La duración de los transitorios puede ser de nanosegundos a varios milisegundos.

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en el sistema de distribución de la empresa suministradora son:

- Rayos que inciden en las fases de las líneas de transmisión y en los hilos de guarda
- Operación de interruptores, cuchillas y switcheo de bancos de capacitores
- Operación de recierre en alimentadores adyacentes

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en las instalaciones del usuario son:

- Descargas atmosféricas
- Switcheo de capacitores
- Conmutación de diodos y tiristores
- Switcheo de cables
- Operación de interruptores y cuchillas
- Operación de fusibles limitadores de corriente

Los transitorios pueden clasificarse en dos categorías: transitorios de impulso y transitorios oscilatorios.

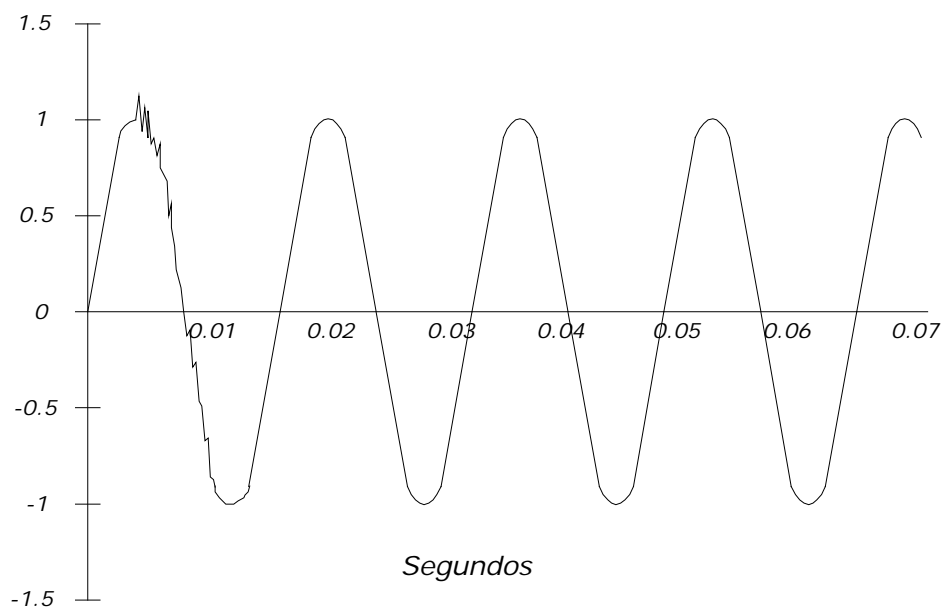
### ***Transitorios de impulso***

Es un cambio súbito de tensión, corriente o ambas, a una frecuencia distinta de la fundamental; es unidireccional en su polaridad. Se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja. Por ejemplo, un transitorio de impulso de  $1.2 \times 50$  [ $\mu\text{s}$ ], 2000 [V] nominales se eleva desde cero a su valor pico de 2000 [V] en 1.2 [ $\mu\text{s}$ ] y después decae a la mitad de su valor pico en 50 [ $\mu\text{s}$ ]. La causa más común de los transitorios de impulso son las descargas atmosféricas.<sup>6</sup>

Los transitorios de impulso pueden excitar la frecuencia natural de los circuitos del sistema de potencia y producir transitorios oscilatorios.

### ***Transitorios oscilatorios***

Transitorios cuyo valor instantáneo de tensión o corriente cambia rápidamente de polaridad. Pueden ser causados, por ejemplo, por la desconexión de líneas, bancos de capacitores o energización de transformadores.<sup>7</sup>



*Ejemplo de un transitorio oscilatorio*

En base a la magnitud de frecuencia y su duración, los transitorios oscilatorios se clasifican en tres categorías: transitorios de baja, media y alta frecuencia.

### 2.3.2 Variaciones de tensión de larga duración

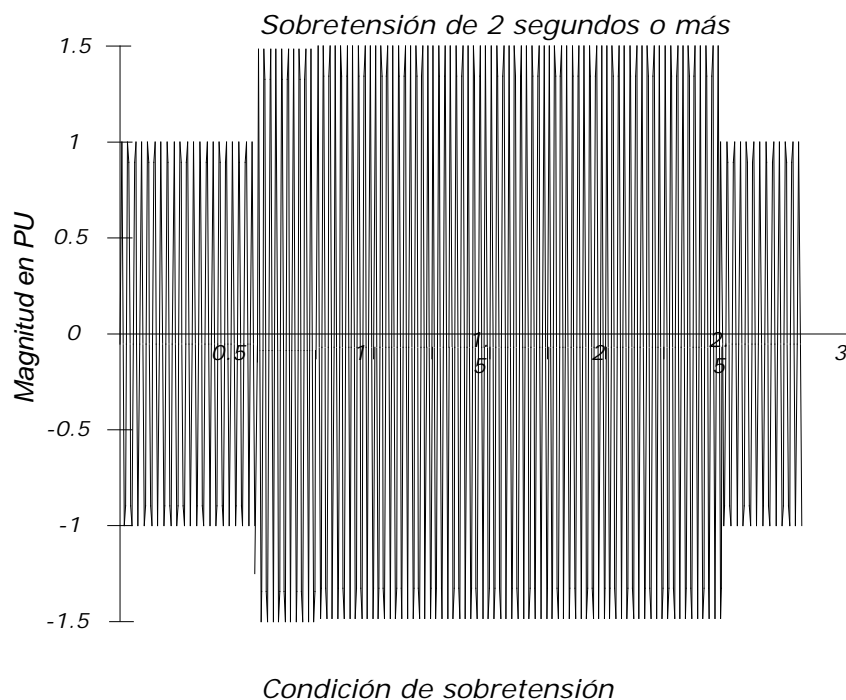
Son variaciones de tensión a la frecuencia del sistema por tiempos mayores a 1 minuto. Estas variaciones son causadas por variaciones en la carga y por las operaciones de switcheo en el sistema.<sup>8</sup>

La duración de estas variaciones depende de la operación del equipo para soporte de tensión; por ejemplo, reguladores de tensión o sistemas de excitación de generadores.

Las variaciones de larga duración pueden ser sobretensiones o bajas tensiones; generalmente, no son consecuencia de una falla en el sistema, pero son causadas por variaciones en la carga y operaciones de switcheo.

#### **Sobretensión de larga duración**

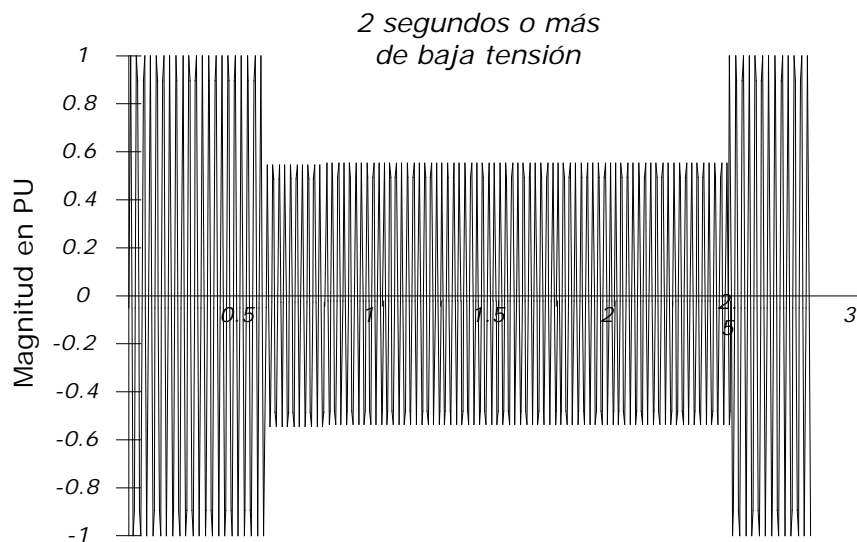
Una sobretensión es un incremento en el valor de tensión RMS mayor del 110% por más de 1 minuto.<sup>9</sup>



Usualmente, las sobretensiones son producto del switcheo de cargas, como la desenergización de cargas muy grandes o la energización de bancos de capacitores. También son causadas por la debilidad en el sistema y una inadecuada regulación y control del mismo.

### **Baja tensión de larga duración**

La baja tensión es un decremento en el valor de tensión RMS menor al 90% por más de 1 minuto.<sup>10</sup>



*Condición severa de baja tensión*

Las bajas tensiones también son producto del switcheo de cargas, pero con efectos opuestos a las sobretensiones. Por ejemplo, la energización de una carga conduce a una caída de tensión, hasta que el equipo de regulación u otro dispositivo compensen dicho cambio.

En el arranque de motores, la corriente típica de arranque de un motor puede variar de 6 a 10 veces la corriente de carga nominal. El bus detecta una impedancia muy baja durante el arranque originando una baja tensión en el sistema.

### **Interrupciones sostenidas**

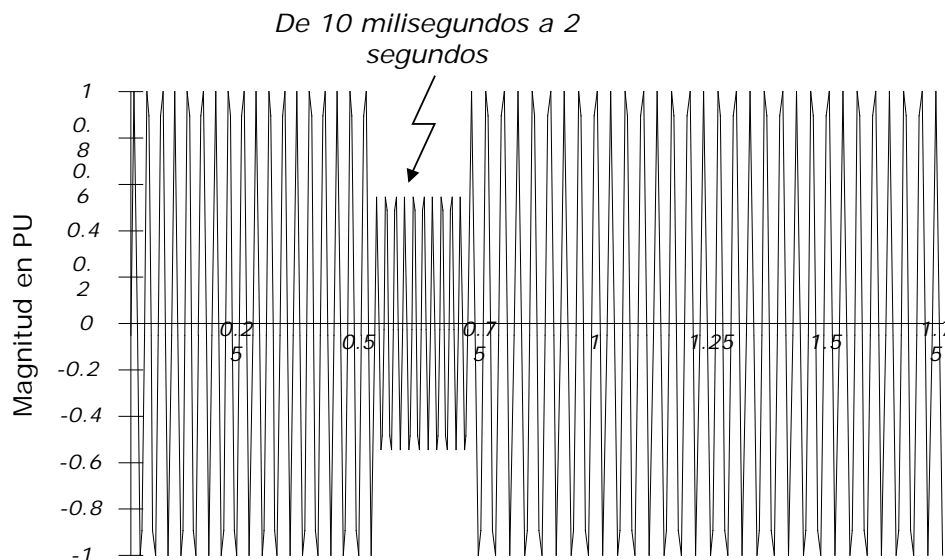
Interrupciones de tensión con una duración mayor a un minuto y que requieren de la intervención del personal para restaurar el sistema.<sup>11</sup>



## Sags

Un sag es un decremento entre 0.1 y 0.9 pu en el valor de tensión RMS a la frecuencia fundamental, con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.<sup>15</sup>

La duración típica de los sags es de 10 a 500 milisegundos, pero podrían alcanzar los 2 segundos (120 ciclos).



*Sag debido a una falla en un alimentador*

Los sags generalmente son asociados con fallas en el sistema, pero también pueden ser causados por arranque de motores, energización de cargas pesadas o por fallas en alimentadores adyacentes y su duración depende de los tiempos de libramiento de la corriente de falla. Los sags más comunes son debidos a fallas de línea a tierra, pero los más severos son debidos a fallas trifásicas.

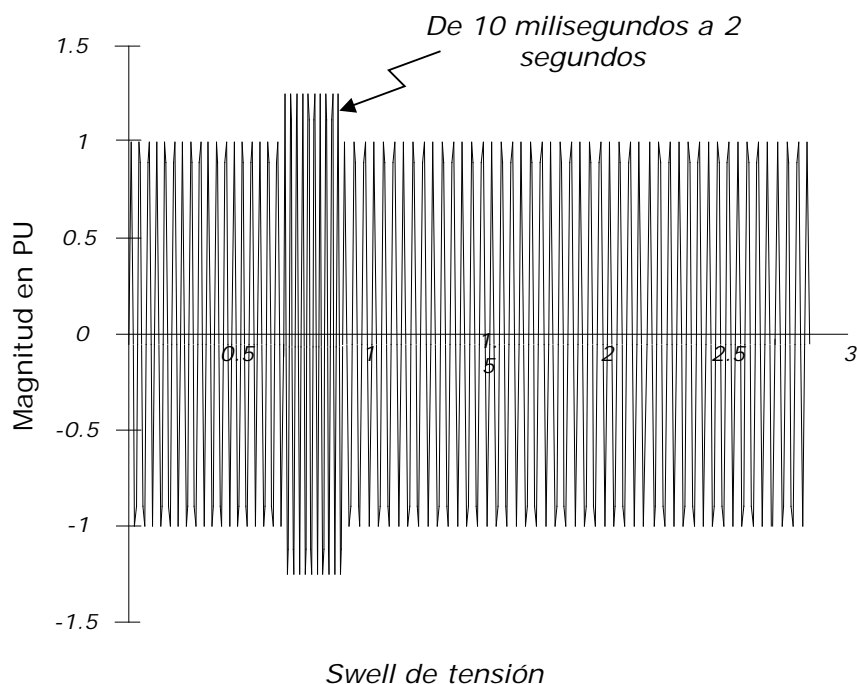
El problema más común causado por el sag es el disparo indeseado de los controladores de proceso y apertura de contactos de contactores.

## Swells

Un swell es un incremento entre el 1.1 y 1.8 pu en la magnitud de la tensión RMS en cualquiera de las fases del sistema. La duración del swell puede ser de 0.5 ciclos a 1 minuto.<sup>16</sup>

El swell puede ser causado por fallas en el sistema, aunque no son tan comunes como en los sags, energización de bancos de capacitores y switcheo de cargas.

Los swells son caracterizados por su magnitud y duración; la severidad de un swell de tensión durante una falla depende de la localización de la falla, la impedancia y el aterrizamiento del sistema.



### 2.3.4 Desbalance de tensión

Condición en la cual las tensiones de las tres fases difieren en amplitud o están desplazadas a diferente ángulo de su defasamiento normal ( $120^\circ$ ).<sup>17</sup>

El desbalance de tensión está definido como la relación de la componente de secuencia negativa o cero a la componente de secuencia positiva.<sup>18</sup> Las tensiones de secuencia negativa o cero en un sistema de potencia, generalmente resultan del desbalance de cargas que originan corrientes de secuencia negativa o cero.

El desbalance puede ser estimado como la desviación máxima del promedio de las tensiones o corrientes trifásicas, dividido por el promedio de los mismos, expresado en %.

### 2.3.5 Distorsión en la forma de onda

Es una distorsión en estado estable de una onda senoidal ideal a la frecuencia fundamental, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la distorsión.<sup>19</sup>

Existen cinco tipos principales de distorsión en la forma de la onda:

#### **Componente de DC**

Es la presencia de corriente directa en un sistema de corriente alterna. Esto puede ocurrir por convertidores electrónicos conectados a la red de suministro o por dispositivos que contengan diodos.<sup>20</sup>

En los núcleos de transformadores, la presencia de corriente directa tiene efectos perjudiciales, debido a que se incrementa la saturación en operación normal, calentamiento y disminución en la vida útil del equipo.





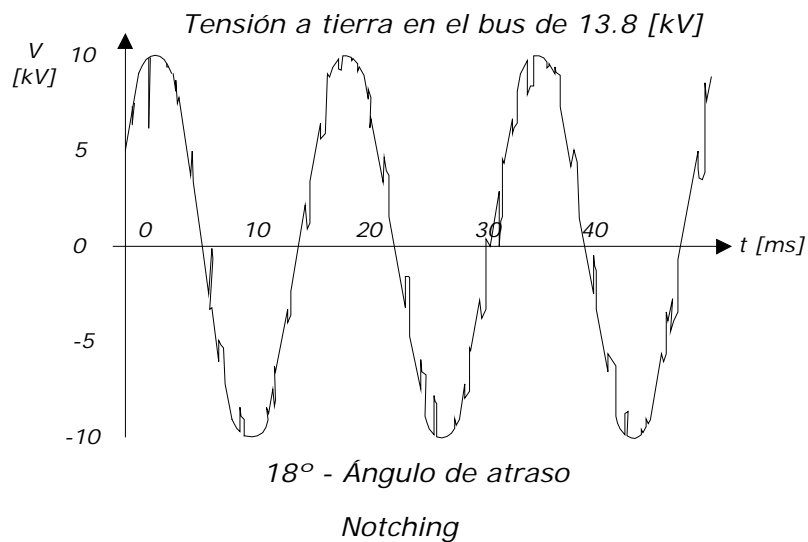
## Interarmónicas

Las interarmónicas son tensiones o corrientes senoidales con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.<sup>22</sup>

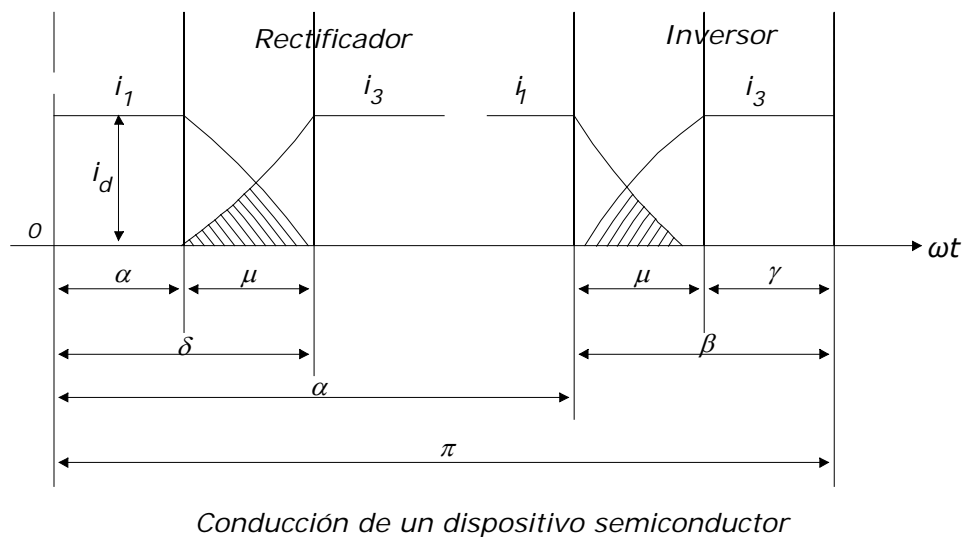
La distorsión interarmónica puede ocurrir en redes de todos los niveles de tensión. Las principales fuentes de ella son los convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, hornos de inducción y dispositivos de arco.

## Notching

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de tensión, causado por el traslape en la conducción de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.<sup>23</sup>



El Notching es más pronunciado en sistemas débiles y no está confinado solo al bus donde el equipo no lineal está conectado.



## Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con ancho de banda menor a 200 [kHz] superpuesta a la señal de corriente o tensión del sistema.<sup>24</sup>

El rango de la frecuencia y nivel de magnitud del ruido depende de la fuente que produce el ruido y la característica del sistema. Una magnitud típica de ruido medido en la tensión es menor de 1% de la magnitud de tensión RMS.

Generalmente, el ruido resulta de los dispositivos de electrónica de potencia, arqueos entre conductores o cargas con rectificadores de estado sólido.

Puede existir ruido en cualquiera de las dos siguientes formas:

- a) **Modo normal del ruido.** Para el caso donde los conductores de fase son contaminados con ruido.
- b) **Modo de ruido común.** Donde los conductores de fase y los conductores a tierra son contaminados con el ruido.

El modo de ruido común puede con frecuencia ser eliminado a través del uso de transformadores de aislamiento. El modo normal de ruido requiere filtros o líneas acondicionadoras.

El método apropiado para controlar el ruido depende de la susceptibilidad del equipo, método de acoplamiento y el rango de frecuencia del ruido.

### 2.3.6 Fluctuaciones de tensión (Flicker)

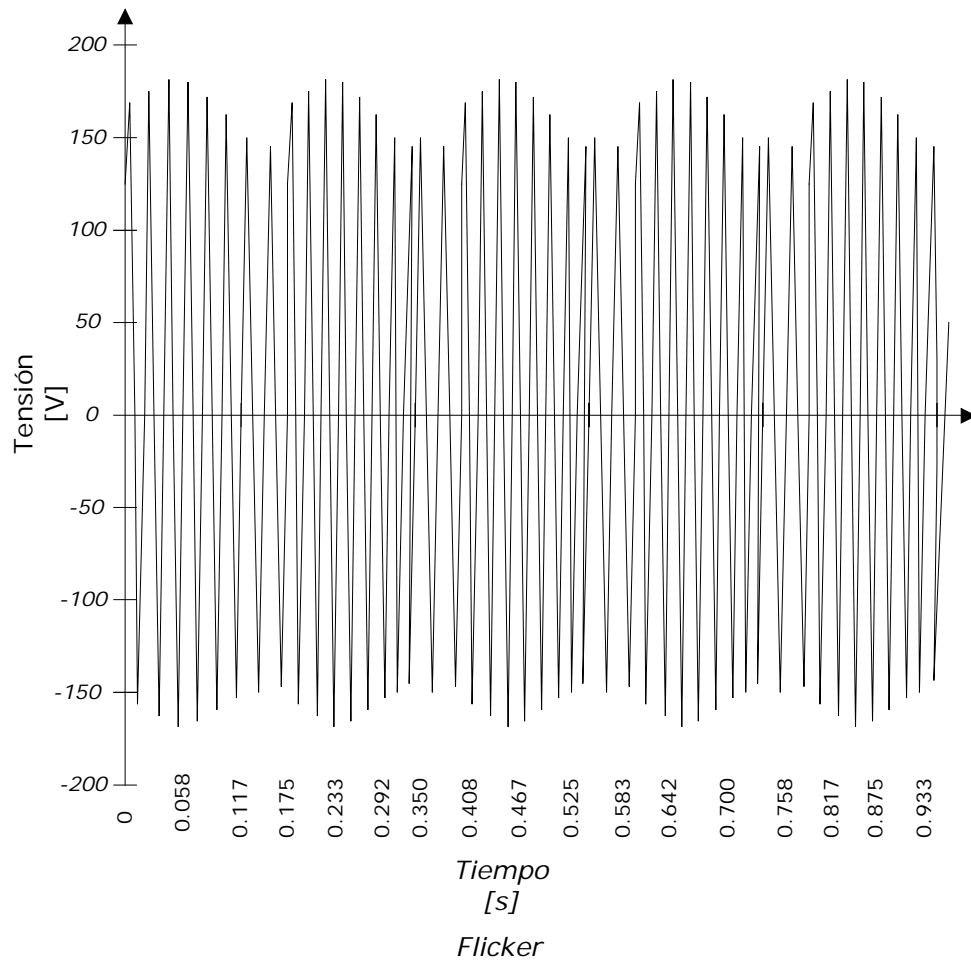
Son una serie de cambios continuos en la tensión, los cuales regularmente no exceden el rango de 0.9 a 1.1 pu.<sup>25</sup>

Las variaciones de tensión originadas por cargas no lineales que demandan altas y variables corrientes, se denominan flicker. Si las variaciones de tensión se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones en la iluminación perceptibles para el ojo humano, principalmente de aquella emitida por lámparas incandescentes.<sup>26</sup>

Las fluctuaciones de tensión de este tipo afectan el funcionamiento de muy pocos equipos, sin embargo, es perceptible una variación en la luminosidad de las lámparas incandescentes, lo cual es una sensación visible molesta.

Los hornos de arco eléctrico así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de tensión en el sistema de transmisión y distribución. En instalaciones residenciales, el efecto de flicker es producido por el arranque automático de refrigeradores o al energizarse calefactores o estufas eléctricas.<sup>27</sup>

En general, la forma de solucionar éste problema conduce a alimentar estas cargas a través de circuitos derivados exclusivos o dimensionar los cables o transformadores de alimentación considerando los efectos de las variaciones rápidas de tensión.



### 2.3.7 Variaciones en la frecuencia

La frecuencia de un sistema eléctrico está definida por la relación entre la carga y la capacidad de generación; si éste balance cambia, se presentan ligeros cambios en la frecuencia. La magnitud de las variaciones y su duración dependen de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación.<sup>28</sup>

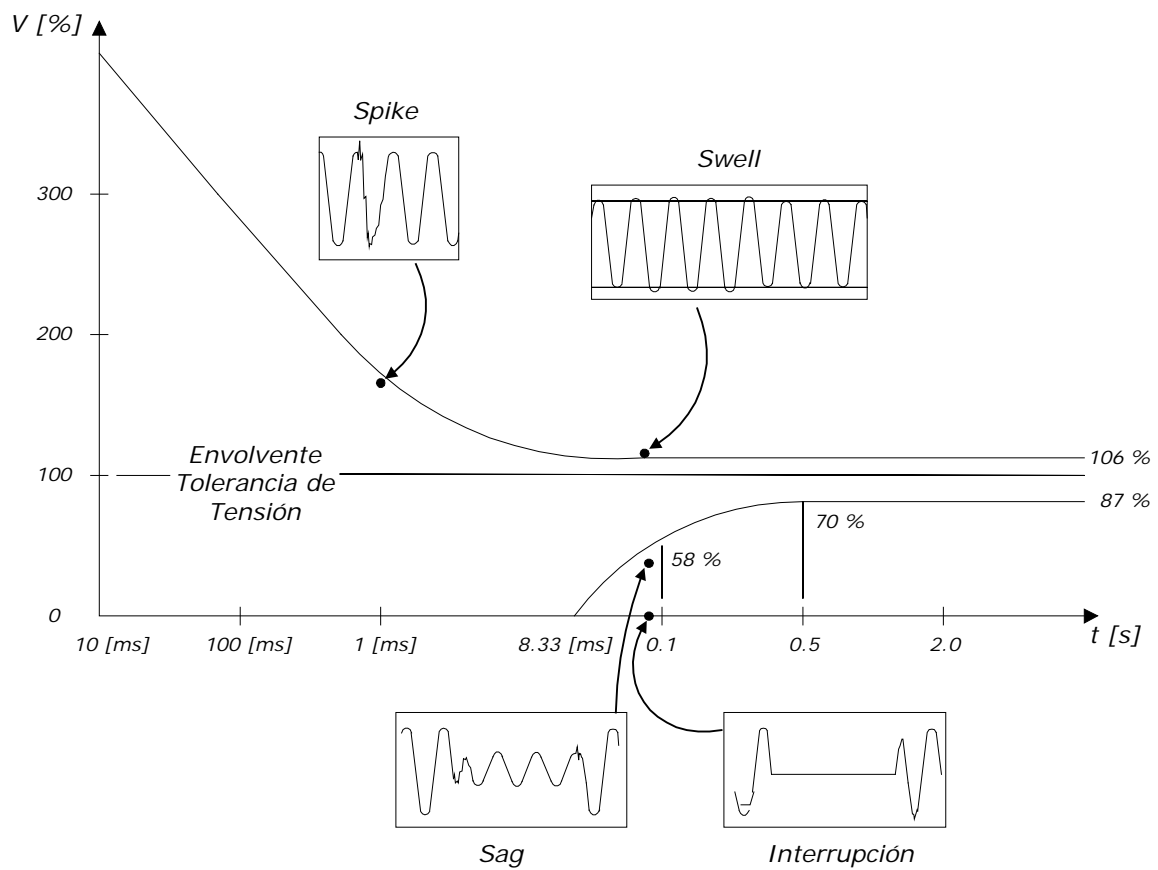
Las variaciones en la frecuencia pueden ser causadas por fallas en el sistema de transmisión, desconexión de grandes cargas o paro de alguna fuente de generación.

## 2.4 Curva CBEMA

La curva CBEMA define los límites, en estado estable y transitorio, dentro de los cuales la tensión de alimentación puede variar sin afectar el funcionamiento o causar algún daño a los equipos de cómputo.<sup>29</sup>

Los equipos pueden funcionar adecuadamente para un rango de +6% a -13% de la tensión nominal. En la figura se observa que para espacios de tiempo corto, las tolerancias de tensión son grandes.

Los puntos debajo de la envolvente son causados por la pérdida de energía o disminución de la carga. Los puntos arriba de la envolvente son causados por fallas de aislamiento, sobretensión y sobreexcitación.<sup>30</sup>



Curva CBEMA

## 2.5 Referencias

- <sup>1</sup> ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica”*. México, Limusa, 1999, p. 15
- <sup>2</sup> Ibidem, p. 20 y DUGAN, Roger C. (et al). *“Electrical Power Systems Quality”*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 3
- <sup>3</sup> VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 17
- <sup>4</sup> Enríquez, op. cit., p. 21
- <sup>5</sup> Dugan, op. cit., p. 15
- <sup>6</sup> Dugan, op. cit., p. 15
- <sup>7</sup> Ibidem, pp. 16-17
- <sup>8</sup> Ibidem, p. 17
- <sup>9</sup> Ibidem, p. 19
- <sup>10</sup> Idem
- <sup>11</sup> Idem
- <sup>12</sup> Ibidem, p. 20
- <sup>13</sup> Idem
- <sup>14</sup> Ibidem, p. 14
- <sup>15</sup> Ibidem, pp. 20-23
- <sup>16</sup> Ibidem, p. 23
- <sup>17</sup> Ibidem, p. 24
- <sup>18</sup> Enríquez, op. cit., p. 47
- <sup>19</sup> Dugan, op. cit., p. 24
- <sup>20</sup> Ibidem, p. 25
- <sup>21</sup> Ibidem, pp. 25-27
- <sup>22</sup> Ibidem, pp. 27
- <sup>23</sup> Idem
- <sup>24</sup> Ibidem, pp. 28
- <sup>25</sup> Idem
- <sup>26</sup> PROCOBRE, *“Calidad de Energía”*, [www.procobreperu.org](http://www.procobreperu.org), pp. 31-32
- <sup>27</sup> Dugan, op. cit., pp. 28-29
- <sup>28</sup> Ibidem, p. 30
- <sup>29</sup> BURKE, James J. *“Power Distribution Engineering: Fundamentals and applications”*. USA, Marcel Dekker Inc, 1994, p. 293
- <sup>30</sup> Dugan, op. cit., pp. 40-41