



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de Calidad de la Energía Eléctrica en  
los Anillos E y F de la Red Eléctrica Subterránea  
de Distribución en 23 kV de Ciudad Universitaria,  
UNAM**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A (N)**

Oropeza Soto José Armando  
Quintero Ramírez Mark Kevin

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Alberto Cortez Mondragón



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



### **Índice.**

- Índice de tablas.
- Índice de figuras.
- Índice de gráficas.

### **Introducción.**

### **Justificación.**

### **Objetivo general.**

### **Objetivos particulares.**

## **Capítulo 1.-Marco teórico y antecedentes históricos.**

### 1.1 Sistemas Eléctricos de Potencia.

- 1.1.1 Definición.
- 1.1.2 Composición.

### 1.2.- Conformación de la red eléctrica de Ciudad Universitaria.

## **Capítulo 2.- Calidad de Energía Eléctrica.**

### 2.1 Conceptos básicos para el estudio de Calidad de la Energía.

### 2.2 Estabilidad de la tensión.

- 2.2.1 Variaciones de tensión largas.
- 2.2.2 Variaciones de tensión cortas.
- 2.2.3 Desbalance de tensión.
- 2.2.4 Fluctuaciones de tensión.
- 2.2.5 Variaciones en la frecuencia del sistema.

### 2.3 Distorsión de la forma de onda.

- 2.3.1 Transitorios.
- 2.3.2 DC offset.
- 2.3.3 Muestras en la tensión (Coaching).
- 2.3.4 Ruido (poise).
- 2.3.5 Armónicos
- 2.3.6 Inter-armónicos.

### 2.4 Efectos de la calidad de energía.

### 2.5 Ventajas de una buena calidad de energía.

## **Capítulo 3.- Estándares Nacionales e Internacionales.**

### 3.1 Límites permisibles para la distorsión Armónica.

- 3.1.1 Estándar del IEEE.
- 3.1.2 Estándar IEC.
- 3.1.3 Normas Europeas EN.
- 3.1.4 Estándar Nacional.



#### **Capítulo 4.-Soluciones típicas a problemas de calidad de energía.**

- 4.1 Puesta a tierra.
- 4.2 Línea dedicada.
- 4.3 Transformadores de aislamiento.
- 4.4 Filtros.
- 4.5 Supresores de sobretensión transitoria (o de picos).
- 4.6 Transformador de tensión constante o Ferro resonante.
- 4.7 Acondicionador o regulador de línea.
- 4.8 Sistemas de Energía Ininterrumpida.
- 4.9 Comparación entre métodos.

#### **Capítulo 5.-Breve estudio de la calidad de energía en el sistema de 6.6 kV.**

- 5.1 Resumen del estudio.
- 5.2 Reporte de mediciones.

#### **Capítulo 6.- Análisis de calidad de energía en las cargas de los anillos E y F del sistema de distribución de 23 kV.**

- 6.1 Metodología
- 6.2 Resumen del estudio.
- 6.3 Reporte de mediciones.

#### **Capítulo 7.- Conclusiones.**

#### **Capítulo 8.- Apéndices.**

- 8.1 Normas ANCE.
- 8.2 Normas
- 8.3 Datos técnicos del analizador de redes trifásico.
- 8.4 Diagramas Unifilares anillos E y F.
- 8.5 Bibliografía



## ÍNDICE DE TABLAS.

### Capítulo 3

- **Tabla 3.1.** Límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia fundamental.
- **Tabla 3.2.** Niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en la red pública de Baja Tensión según IEC61000-2-2.
- **Tabla 3.3.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A.
- **Tabla 3.4.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C.
- **Tabla 3.5.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase D.
- **Tabla 3.6.** Límites de corrientes armónicas según norma IEC 61000-3-4.
- **Tabla 3.7.** Niveles de compatibilidad de voltajes armónicos (En porcentaje fundamental) para sistemas de BT y MT.
- **Tabla 3.8** Niveles de planificación de voltajes armónicos (En porcentaje fundamental) para sistemas de MT.
- **Tabla 3.9.** Límites de voltajes armónicos (en porcentaje fundamental o p.u.) para sistemas de BT y MT.
- **Tabla 3.10.** Límites de distorsión en voltajes.
- **Tabla 3.11** Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida.

### Capítulo 4

- **Tabla 4.8.** Resumen de soluciones.

### Capítulo 5

- **Tabla 5.1.** Resumen de los valores representativos del estudio en el año 2009.
- **Tabla 5.2.** Comportamiento de voltaje.
- **Tabla 5.3.** Comportamiento de corriente.
- **Tabla 5.4.** Comportamiento de corriente en el neutro.
- **Tabla 5.5.** Comportamiento de potencia real y factor de potencia.
- **Tabla 5.6.** Comportamiento de la potencia reactiva.
- **Tabla 5.7** Comportamiento de la potencia aparente.
- **Tabla 5.8** Valores obtenidos del factor k.

### Capítulo 6

- **Tabla 6.1.** Capacidad de los transformadores.
- **Tabla 6.2.** Comportamiento de tensión Anillo E
- **Tabla 6.3** Comportamiento de corriente en el Anillo E.
- **Tabla 6.4.** Comportamiento de corriente en el neutro.
- **Tabla 6.5** Comportamiento de la potencia real.
- **Tabla 6.6** Comportamiento de la Potencia Reactiva.
- **Tabla 6.7.** Comportamiento de la potencia Aparente.
- **Tabla 6.8.** Comportamiento del Factor de Potencia.
- **Tabla 6.9.** Distorsión Armónica Total en Tensión.
- **Tabla 6.10.** Distorsión Armónica Total en Corriente.



- **Tabla 6.11** Capacidad de los Transformadores.
- **Tabla 6.12.** Comportamiento de la tensión en el Anillo F.
- **Tabla 6.13.** Comportamiento de la Corriente en el Anillo F.
- **Tabla 6.14.** Comportamiento de la corriente de neutro del Anillo F.
- **Tabla 6.15.** Potencia Real Anillo F.
- **Tabla 6.16.** Factor de Potencia en el Anillo F.
- **Tabla 6.17.** Potencia Reactiva en el Anillo F.
- **Tabla 6.18.** Potencia Aparente en el Anillo F.
- **Tabla 6.19.** Distorsión Armónica total en tensión Anillo F.
- **Tabla 6.20.** Distorsión Armónica Total en corriente.
- **Tabla 6.21** Frecuencia en el Anillo F.

## ÍNDICE DE FIGURAS.

### Capítulo 1

- **Figura1.1.** Representación esquemática de un sistema de energía eléctrica de potencia.
- **Figura 1.2.** Representación gráfica de un sistema eléctrico de potencia.
- **Figura1.3.** Representación de una carga lineal. Gráfica de Lámpara Incandescente.
- **Figura1.4.** Representación de una carga no lineal. Gráfica del Diodo Zener.
- **Figura1.5.** Diagrama unifilar de las Subestaciones Generales 1 y 2.

### Capítulo 2

- **Figura 2.1.** Tipos de conexión.
- **Figura 2.2.** Diagrama fasorial del desfase entre voltajes en conexión Y-Y.
- **Figura 2.3.** Sistema trifásico en Y-Y.
- **Figura 2.4.** Diagrama fasorial de la conexión  $\Delta$ - $\Delta$ .
- **Figura 2.5** Sistema trifásico en  $\Delta$ - $\Delta$ .
- **Figura 2.6** Conexiones Estrella-Delta (Y- $\Delta$ ) y Delta-Estrella ( $\Delta$ -Y)
- **Figura 2.7.** Tensión y corrientes senoidales.
- **Figura 2.8.** Intensidad de la corriente con respecto al voltaje.
- **Figura 2.9.** Plano de Gauss y fasor de corriente.
- **Figura 2.10.** Espectro de corriente.
- **Figura 2.11.** Representación de una sobre tensión.
- **Figura 2.12.** Representación de una Interrupción Corta.
- **Figura 2.13.** Representación de un sags.
- **Figura 2.14.** Representación de swell.
- **Figura 2.15** Representación de un pulso.
- **Figura 2.16** Corriente transitoria provocada por la conmutación de capacitores.
- **Figura 2.17.** Representación originada al energizar un banco de capacitores.
- **Figura 2.18.** Representación de muescas en la tensión.
- **Figura 2.19.** Esquema de un punto de acometida.
- **Figura 2.20.** Espectros de corriente y de tensión de diferentes inter-armónicos.



### Capítulo 3

- **Figura 3.4.** Diagrama de Flujo utilizado para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la norma IEC61000-3-2.

### Capítulo 4

- **Figura 4.1.** Representación esquemática de un sistema con puesta a tierra.
- **Figura 4.2.a.** Representación de un sistema sin Línea Dedicada.
- **Figura 4.2.b.** Representación de una Línea Dedicada.
- **Figura 4.3.** Representación de un Transformador de Aislamiento.
- **Figura 4.4.** Representación de un Supresor de Sobre tensión.
- **Figura 4.5.** Diagrama simplificado de un transformador de tensión constante.
- **Figura 4.6.** Diagrama de un acondicionador de línea.
- **Figura 4.7.** Representación de un Sistema de Energía Ininterrumpida.

### ÍNDICE DE GRÁFICAS.

#### Capítulo 5

- **Gráfica 5.1.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase A.
- **Gráfica 5.2.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase B.
- **Gráfica 5.3.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase C.
- **Gráfica 5.4.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase A.
- **Gráfica 5.5.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase B.
- **Gráfica 5.6.** Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase C.
- **Gráfica 5.7.** Comportamiento de la tensión y la corriente en el neutro.
- **Gráfica 5.8.** Comportamiento de la potencia real y factor de potencia en las fases de la Torre de Rectoría
- **Gráfica 5.9.** Comportamiento de la potencia reactiva en la Torre de Rectoría.
- **Gráfica 5.10.** Comportamiento de la potencia aparente en la Torre de Rectoría.
- **Gráfica 5.11.** Comportamiento del factor de distorsión armónica de voltaje de Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.12.** Comportamiento del factor de distorsión armónica de voltaje de Torre de Rectoría.
- **Gráfica 5.13.** Comportamiento del factor de distorsión armónica de corriente en Dirección General de Publicaciones.
- **Gráfica 5.14.** Comportamiento del factor de distorsión armónico de corriente en Relaciones Laborales.
- **Gráfica 5.15.** Gráfica representativa de forma de onda y espectro armónico de tensión en Torre de Rectoría.
- **Gráfica 5.16.** Gráfica representativa de forma de onda y espectro armónico de corriente en Torre de Rectoría.
- **Gráfica 5.17.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.18.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.19.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.



- **Gráfica 5.20.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, transitorio en el Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.21.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, transitorio en el Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.22.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, transitorio en el Posgrado de Psicología.
- **Gráfica 5.23.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.
- **Gráfica 5.24.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.
- **Gráfica 5.25.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.

## Capítulo 6

- **Gráfica 6.1.** Tensión en Torre de Humanidades II.
- **Gráfica 6.2.** Comportamiento de tensión de fase a neutro Torre de Humanidades.
- **Gráfica 6.3** Corriente por fase y neutro en Torre de Humanidades II.
- **Gráfica 6.4.** Corriente por fase en Torre de Humanidades.
- **Gráfica 6.5.** Potencia reactiva por fase Facultad de Química D Talleres.
- **Gráfica 6.6.** Potencia reactiva por fase Facultad de Química E Gobierno
- **Gráfica 6.7.** Potencia reactiva por fase en Facultad de Química E Alimentos.
- **Gráfica 6.8.** Potencia total por fases en Torre de Humanidades Y Facultad de Filosofía y Letras.
- **Gráfica 6.9.** Potencia total por fase Instituto de Física.
- **Gráfica 6.10.** Potencia total por fase Facultad de Química E Alimentos.
- **Gráfica 6.11.** Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase A.
- **Gráfica 6.12.** Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase B.
- **Gráfica 6.13.** Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase C.
- **Gráfica 6.14.** Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase A.
- **Gráfica 6.15.** Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase B.
- **Gráfica 6.16.** Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase C.
- **Gráfica 6.17.** Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase A.
- **Gráfica 6.18.** Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase B.
- **Gráfica 6.19.** Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase C.
- **Gráfica 6.20.** Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase A.
- **Gráfica 6.21.** Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase B.
- **Gráfica 6.22.** Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase C.
- **Gráfica 6.23.** Comportamiento de la corriente promedio en el neutro en la Facultad de Medicina D.
- **Gráfica 6.24.** Comportamiento de la corriente promedio en el neutro del CCADET.
- **Gráfica 6.25.** Máximo valor de Potencia Real promedio en la DGTIC.



- **Gráfica 6.26.** Mínimo valor de Potencia Real promedio en la CUAED.
- **Gráfica 6.27.** Máximo valor de Factor de Potencia promedio en el Instituto de Geofísica.
- **Gráfica 6.28.** Mínimo valor de Factor de Potencia promedio en la Facultad de Medicina Investigación.
- **Gráfica 6.29.** Máximo valor de Potencia Reactiva promedio en la DGTIC.
- **Gráfica 6.30.** Mínimo valor de Potencia Reactiva promedio en el Instituto de Geofísica.
- **Gráfica 6.31.** Máximo valor de Potencia Aparente promedio en la DGTIC.
- **Gráfica 6.32.** Mínimo valor de Potencia Aparente promedio en la CUAED.
- **Gráfica 6.33.** Máximo valor de DATT en la Facultad de Medicina D.
- **Gráfica 6.34.** Mínimo valor de DATT en la Facultad de Medicina B y C.
- **Gráfica 6.35.** Máximo valor de DATC en la Facultad de Medicina D.
- **Gráfica 6.36.** Mínimo valor de DATC en la Facultad de Medicina B y C.
- **Gráfica 6.37.** Transitorios de Voltaje y Corriente en la Facultad de Medicina B y C.
- **Gráfica 6.38.** Transitorios de Voltaje y Corriente en la Facultad de Medicina, Torre de Investigación.



## *Dedicatoria:*

*A mis padres José Luis Quintero Ortega y Verónica Ramírez Méndez por brindarme todo su apoyo y comprensión durante todo este proceso.*

*A mi hermano con quien comparto momentos muy alegres.*

*Y sobre todo a mi abuela Hortensia Méndez E.D.P., quien significa todo para mí, gracias a ella estoy aquí y soy quien soy, al cuidarme y enseñarme a luchar por mis sueños, te amo por siempre mi tENCHITA.*

*Quintero Ramírez Mark Kevin.*



## *Dedicatoria:*

*Con gran orgullo y felicidad agradezco a mi familia por el apoyo, que día a día me inspira a lograr mis objetivos. A todas esas personas que han contribuido en mi formación académica y profesional, profesores, compañeros y amigos.*

*A mis hermanos que siempre están ahí en cada paso que doy y que siempre tienen un consejo o unas palabras de aliento para cada prueba que me ha puesto la vida, un agradecimiento en especial a mi madre, amiga, inspiración y ejemplo Josefina Soto Ortiz.*

*Oropeza Soto José Armando*



## INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente documento es proporcionar información sobre los transitorios de voltaje y de corriente, variaciones de voltaje, distorsión en la forma de onda y fluctuaciones de tensión que ocurren en circuitos de potencia en baja tensión del campus universitario, para poder evaluar la operación del sistema eléctrico y determinar si existe la necesidad de aplicar dispositivos de protección y corrección.

Los transitorios considerados están limitados a perturbaciones cuya duración es menor a medio ciclo de la forma de onda y que pueden aparecer en cualquier combinación entre los conductores de línea, neutro y tierra.

Es difícil asignar los valores límites a algunas de las características de los transitorios debido a su efecto y por lo tanto su impacto, depende de la naturaleza del equipo sometido a esta perturbación, ya que los equipos sufren daños, a otros puede modificar temporalmente su desempeño y a otros no les causa ningún problema.

Es importante resaltar que las mediciones de los parámetros se realizaron en el lado secundario de los transformadores conectados a los anillos E y F de Ciudad Universitaria, en la actual red subterránea de 23 kV.

## JUSTIFICACIÓN

La norma IEEE C62.41-1991 (IEEE Recommended Practice for Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits) no busca establecer los parámetros de desempeño de equipos de protección, sino que presenta lineamientos sobre los parámetros de aplicación, así como las acciones correspondientes a ser implementadas por los usuarios para alcanzar la protección contra transitorios deseada. Se analizan las señales de variación de voltaje, fluctuaciones de tensión y distorsión de la forma de onda para determinar su efecto en el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas.

El estudio se realizó en base a un análisis previo, presentado por una empresa privada en el año 2009, el cual proporciona los valores de los parámetros más representativos de las mediciones en el lado secundario de algunos transformadores los cuales se alimentaban a 6.6 kV, así como una serie de observaciones y recomendaciones (capítulo 5). Por otra se efectuaron mediciones más recientes en el secundario de los transformadores de los anillos E y F alimentados de la actual red a 23 kV para efectuar el análisis de calidad de la energía (capítulo 6).



### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar los parámetros eléctricos obtenidos de las mediciones con la finalidad de verificar las condiciones en las que operan las distintas dependencias conectadas a los anillos E y F, efectuar un análisis de calidad de la energía y tomar las debidas acciones preventivas y correctivas para su correcta operación.

### **OBJETIVO PARTICULAR**

Identificar los casos particulares más representativos de problemas de calidad de energía y determinar las soluciones adecuadas, así como soluciones generales a problemas significativos que deben ser considerados para tener un funcionamiento óptimo en las cargas conectadas a la Red de Distribución Subterránea de Ciudad Universitaria a 23 kV de la UNAM, en los anillos E y F del sistema.

Realizar las respectivas observaciones y recomendaciones, a partir de los resultados obtenidos, que permitan mejorar las condiciones de operación de las instalaciones, de tal manera que se beneficie a los usuarios finales.

## CAPÍTULO 1

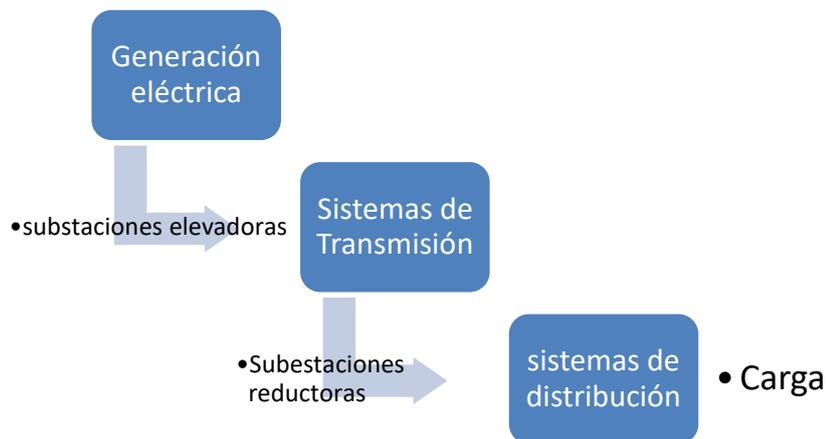
### MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

#### 1.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

##### 1.1.1 DEFINICIÓN.

Definiremos a un Sistema Eléctrico de Potencia como toda máquina eléctrica o elemento de maniobra, protección y de transporte de energía, que sea usado para suministrar energía eléctrica a los consumidores, el cual es conformado como se muestra en el diagrama de la Figura 1.1, otorgando una cierta calidad de energía en dicho suministro energía. <sup>[1]</sup>

##### 1.1.2 COMPOSICIÓN.



**Figura 1.1.** Representación esquemática de un sistema de energía eléctrica de potencia.

[1] **Título:** Redes Eléctricas Tomo 1,2. **Autor:** Jacinto Vaqueira Landa.

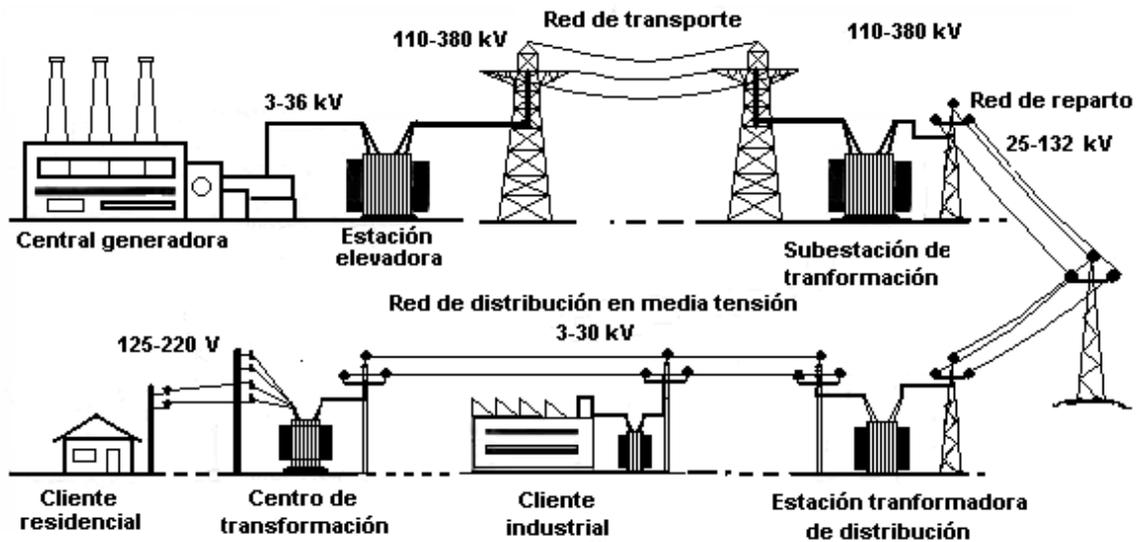


Figura 1.2. Representación gráfica de un sistema eléctrico de potencia.

## SISTEMAS DE GENERACIÓN.

La generación eléctrica consiste en la transformación de diversos tipos de energía como la química, cinética, térmica o lumínica entre otras, en energía eléctrica. A este proceso se le considera el primer paso de un sistema eléctrico de potencia. Para realizar esta acción se recurre a diversos métodos y diferentes tipos de máquinas entre las que están generadores síncronos y asíncronos. Ver figura 1.2.

### - Subestaciones elevadoras de tensión

Estos elementos que componen al sistema eléctrico de potencia tienen como función manejar y transportar de una manera más eficiente la energía eléctrica y reducir las pérdidas de energía eléctrica.

### - Sistema de transmisión

En este proceso del sistema eléctrico de potencia es necesario que se realice a una alta tensión por las largas distancias que las líneas de transmisión recorren para poder llevar la energía desde el punto de generación a los diversos puntos de distribución.

### - Subestaciones reductoras de tensión

Elementos eléctricos que, al disminuir la tensión en el sistema eléctrico, permiten manejar y distribuir de una manera más segura, eficiente, económica y sencilla la energía eléctrica.



## **SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.**

Estos sistemas tienen como función suministrar a los consumidores la energía eléctrica producida en las plantas generadoras, mediante un sistema que alimenta las subestaciones de distribución.

## **SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.**

Los sistemas de distribución abarcan desde los alimentadores primarios que parten de las subestaciones de distribución, pasando por los transformadores de distribución para reducir la tensión al valor de utilización por los clientes y finalmente los circuitos secundarios hasta la entrada de la instalación del consumidor.

Los sistemas de distribución más usuales son:

- Sistemas radiales aéreos: Se usan generalmente en las zonas suburbanas y en las zonas rurales.
- Sistemas radiales subterráneos: Se usan en zonas urbanas de densidad de carga media y alta.
- Sistemas de red automática secundaria: Se utiliza en zonas urbanas de gran densidad de carga y proporciona un grado de continuidad de servicio muy elevado.

## **CARGA**

La carga global de un sistema está constituida por un gran número de cargas individuales de diferentes clases (industriales, comerciales y residenciales).

En general, una carga absorbe potencia real y potencia reactiva, las cargas puramente resistivas (lámparas incandescentes, calefactores eléctricos) absorben únicamente potencia real.

### **Carga lineal**

Una carga eléctrica que, en operación de estado estable, presenta una impedancia de carga esencialmente constante a la fuente de poder durante todo el ciclo del voltaje aplicado.

En pocas palabras, una carga lineal es la que tiene una relación constante entre el voltaje y la corriente (la mayoría de las veces), por ejemplo, la gráfica de un foco incandescente de voltaje contra corriente es una línea recta, la relación pues es la resistencia del foco, la cual prácticamente no cambia<sup>[2]</sup>. Ver figura 1.3.

---

[2] **Título:** Sistemas de potencia, Análisis y diseño. **Autor:** Duncan Glover/Mulukutla S. Sarna.

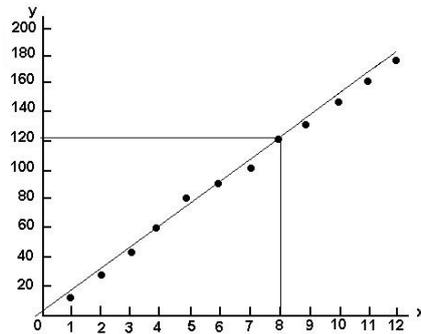


Figura 1.3. Representación de una carga lineal. Gráfica de Lámpara Incandescente.

### Carga no lineal

Carga eléctrica que demanda corriente discontinuamente o cuya impedancia varía durante el ciclo de la forma de onda del voltaje alterno aplicado.

Por otro lado, una carga no lineal, es aquella en la que la relación entre el voltaje que le aplicas y la corriente que demanda no es constante, un ejemplo clásico es una fuente de poder de computadora, la corriente tiene una forma de onda muy diferente a la del voltaje [3]. Otro ejemplo es un diodo, que para voltajes negativos tiene una impedancia muy grande (no conduce) y para voltajes positivos su impedancia es muy baja: Ver figura 1.4.

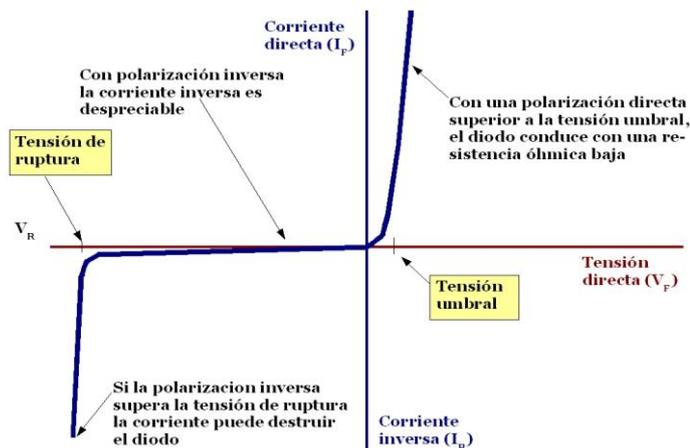


Figura 1.4. Representación de una carga no lineal. Gráfica del Diodo Zener.

[3] **Título:** Manual de equipos eléctricos. **Autor:** Enríquez Harper.



## **1.2.- CONFORMACIÓN DE LA RED ELECTRICA DE CIUDAD UNIVERSITARIA.**

### **ANTECEDENTES HISTÓRICOS.**

### **ESTRUCTURA Y CONSTRUCCIÓN.**

La red de distribución de Ciudad Universitaria desde sus inicios, fue diseñada con el propósito de abastecer a la comunidad, tomando en cuenta el constante crecimiento de la población universitaria.

El proyecto contemplaba el diseño y construcción de una subestación principal (No.1), la cual sería suministrada por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro S.A., (actualmente Comisión Federal de Electricidad) por medio de alimentadores aéreos de 23 kV, los cuales estaban alimentados por las subestaciones Olivar del Conde y Taxqueña.

Para su construcción fue diseñada a base de tres anillos con dos alimentadores cada uno, este tipo de configuración proporciona mayor confiabilidad en sus instalaciones y contribuye a restablecer el servicio en un menor tiempo en caso de un percance, lo cual fue diseñado de la mejor manera para esta gran comunidad.

### **EVOLUCIÓN DE LA RED ELÉCTRICA EN EL CAMPUS.**

La red eléctrica de Ciudad Universitaria fue construida y puesta en servicio en los años 50's, alimentada por la subestación No.1 ubicada en la parte norte (lo que es hoy en día las espaldas de la Facultad de Psicología), estaba compuesta por 2 transformadores trifásicos de 2500 kVA de 23 kV a 6.6 kV cada uno, proporcionando una capacidad integral de 5000 kVA en conjunto.

Ciudad Universitaria fue una parte fundamental en la realización de los Juegos Olímpicos de 1968, por lo cual se tenía que adaptar a la situación y a la demanda que esto implicaba, es por ello que fue necesario realizar las modificaciones necesarias a la subestación No 1, por lo cual se diseñaron y construyeron dos nuevos circuitos de abastecimiento, los circuitos "D" y "E", alimentados por un transformador de 2500 kVA.

Teniendo como base la construcción de nuevas instalaciones en el campo y el constante crecimiento de la población universitaria, fue necesario actualizar los equipos existentes por unos más actuales y con mayor capacidad que permitieran satisfacer la demanda de energía y así poder contar con un margen de capacidad instalada para un futuro, por lo que se cambiaron los transformadores de 2500 kVA por unos de 7500 kVA.



Considerando la capacidad de los nuevos transformadores y al buen estado de las instalaciones permitieron el diseño y la proyección de una nueva subestación (No. 2), la cual fue construida en el circuito exterior frente a la Escuela de Trabajo Social y a un costado del Centro de Instrumentos. Con todo lo anterior se tenía instalada una red de distribución de dos anillos (I y II) con dos alimentadores cada uno los cuales alimentaban a 12 subestaciones derivadas.

Durante el transcurso del tiempo se modificaron las instalaciones para abastecer el consumo en el Campus, lo cual llevo a tener 4 subestaciones generales:

- No. 1. Ubicada a espaldas de la Facultad de Psicología (6kV).
- No. 2. Ubicada a un costado del Centro de Instrumentos, actualmente CCADET (6kV).
- No. 3. Ubicada en Av. Del Imán en la Zona Cultural (23kV).
- No. 4. Ubicada en el Instituto de Investigaciones Biomédicas (23kV).

Es necesario resaltar que el paso del tiempo provocó que la red de distribución subterránea de las subestaciones No. 1 y No. 2 en cuanto a su obra civil se refiere, presentara problemas, como son: registros dañados, oxidación, inundaciones, invasión de naturaleza y basura en los mismos, otro problema es el bloqueo de registros por obras nuevas ya sea mobiliario o construcciones.

Todo lo anterior se refleja en el daño a los conductores que principalmente eran de Kerite de 8kV de tres conductores con pantalla individual para cada fase. Los conductores con los que se contaba eran de calibres 4 AWG, 2 AWG, 4/0 y 1/0 AWG, los cuales presentaban problemas en los soportes o exceso de aceite en los alrededores.

La distribución del cableado en los registros presentaba cierto desorden y no tenían una distribución correcta; otros problemas eran los falsos contactos, perforaciones y falta de conexión a tierra en la mayoría de las pantallas, así como la carencia de identificación.

En el caso de los seccionadores, algunos presentaban fugas de aceite y con las descargas parciales que podían llegar a tener, se provocaría el disparo inesperado de alguno de estos equipos. En muchos casos, tampoco contaban con conexiones de tierra y la corrosión externa que presentaban algunos tanques era de consideración.

En algunas subestaciones derivadas se presentaba un problema muy importante ya que en ciertos casos eran utilizadas como bodegas y muchas de ellas no contaban con la correcta señalización de peligro de alta tensión, ni de posibles riesgos a la salud; esto podía llevar a accidentes fatales por la falta de conocimiento del personal que pudiera ingresar a ellas.

Los equipos eléctricos internos contaban con un estado favorable gracias a su mantenimiento teniendo en consideración el tiempo de trabajo que llevaban en servicio, algunos transformadores ya tenían fugas y carecían de placa de identificación.

La renovación que se requería en estos equipos era necesaria ya que la antigüedad (más de 50 años en algunos casos) no permitía encontrar refacciones de algunos componentes, además de estar fuera de las normas.

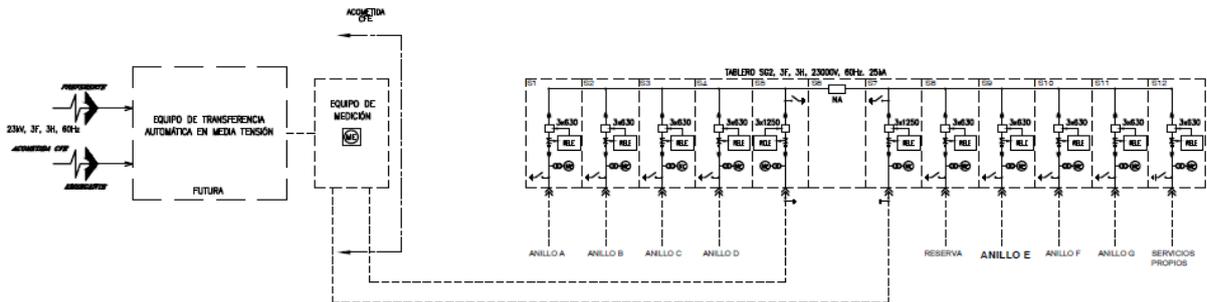
Es evidente el gran deterioro que el equipo ha presentado a lo largo del tiempo, como pueden ser falsos contactos en las terminales, desgaste de los aislamientos, registros en mal estado, lo cual, nos permite llegar a la conclusión que el mantenimiento que se ha llevado a cabo en las instalaciones es insuficiente, y en ocasiones erróneo; por lo tanto, no tiene un óptimo y garantizado servicio en el suministro eléctrico.

### INTEGRACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA EN LA ACTUALIDAD.

En la actualidad la red eléctrica del campus universitario está conformada por dos subestaciones generales de 23kV y de 25kA de capacidad de corriente interruptiva, a su vez estas subestaciones están divididas por 7 anillos entre los cuales encontramos los anillos E y F estudiados en este documento. Ver Figuras 1.5.

**DIAGRAMA UNIFILAR  
SUBESTACIÓN  
GENERAL No. 2**

**DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO**



**DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO**

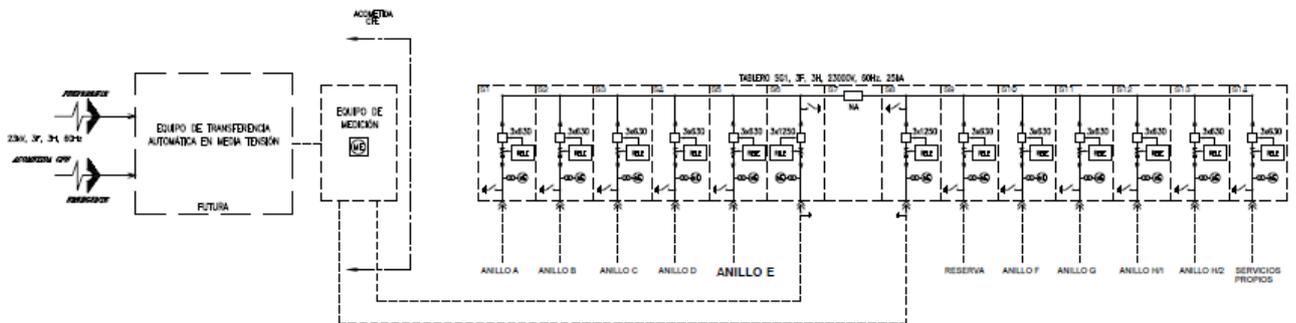


Figura1.5. Diagrama unifilar de las Subestaciones Generales 1 y 2.



## CAPÍTULO 2

### **CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

La calidad de energía considera cada uno de los aspectos que pudieran provocar algún cambio o perturbación en un sistema eléctrico. Primero a la que corresponde al lado de los consumidores o carga final, en el sentido del impacto de los disturbios en los equipos. Después lo que corresponde a los fabricantes de equipos que deben conocer los niveles de estos disturbios y la frecuencia con que ocurren para determinar una tolerancia razonable para los equipos y así beneficiar al consumidor. Por último, la que se refiere a como los disturbios ocasionados por un consumidor afectan a otros consumidores que estén conectados a la misma red de suministro.

La compañía de suministro tampoco puede darse el lujo de suponer que provee una excelente calidad de energía, ya que algunos de los disturbios quedan fuera de control de la empresa. Los fabricantes deben diseñar y construir equipos que pueden resistir a niveles razonables de disturbios.

Entonces la calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario<sup>[18]</sup>.

### **CALIDAD DEL SERVICIO**

El suministro de energía eléctrica debe realizarse con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que utilizan la energía funcionen correctamente. La calidad del suministro de energía eléctrica queda referida a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico<sup>[18]</sup>.

La calidad eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un funcionamiento fiable de sus cargas. Una perturbación eléctrica o evento puede afectar a la tensión, la corriente o la frecuencia. Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en las instalaciones del usuario, las cargas del usuario o la compañía eléctrica.

Las perturbaciones eléctricas se definen en términos de magnitud y duración, varían desde transitorios que duran micro-segundos pasando por cortes de servicio que se prolongan durante horas hasta problemas en estado permanente como las armónicas.

---

[18] **Título:** Calidad de la Energía. **Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, coinvestigador.

Cuando se produce una perturbación eléctrica que hace que el suministro supere los límites de operación, los equipos instalados pueden funcionar de forma incorrecta, dejar de funcionar o incluso pueden dañarse.

Los costes de un mal suministro eléctrico pueden ser notables y se reflejan como pérdidas de producción, cada vez que se interrumpe la producción, una empresa pierde dinero debido a los productos que no se fabrican ni se venden, productos dañados, posibles daños en los equipos de las líneas de producción y al pago de los salarios de los trabajadores aunque el proceso este detenido.

Las interrupciones pueden dañar los productos en proceso de fabricación, haciendo que tengan que ser procesados o rechazados, lo que implica pérdidas monetarias para las empresas y como consecuencia afectar a los trabajadores.

## 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.

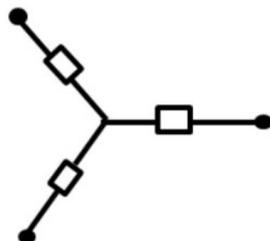
Es de suma importancia retomar algunos de los conceptos básicos de Calidad de Energía que nos permitan comprender cada uno de los parámetros obtenidos, además de aquellos que intervienen en un sistema de potencia como el analizado en este documento.

En los sistemas de potencia, por razones económicas y técnicas ya sea en la generación, transmisión y distribución se consideran los circuitos trifásicos y en condiciones normales de operación estos son trifásicos balanceados, es decir, sus fasores de tensión en cualquier punto poseen igual magnitud, solo que desfasados  $120^\circ$ , al igual que ocurre con la corriente.

La mayoría de los sistemas de potencia se ven expuestos a ciertos estados de operación que producen desbalances en el sistema, como los son las cargas y las fallas asimétricas. Para lograr un estudio de este tipo de sistemas es necesario emplear una herramienta matemática la cual permite que la condición de desbalance sea estudiada en forma balanceada, este método se conoce como componentes simétricas.

Debemos considerar que existen dos tipos de cargas trifásicas de acuerdo a como se interconectan los elementos que las constituyen y pueden ser en estrella (Y) o en delta ( $\Delta$ ).

En estrella



En delta

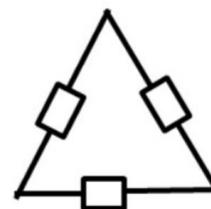


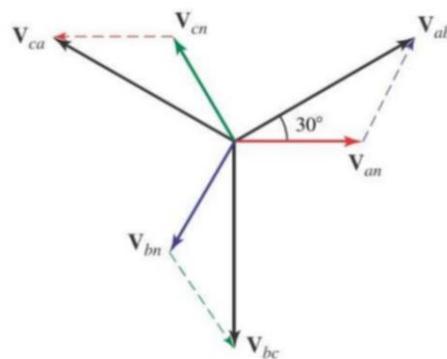
Figura 2.1. Tipos de conexión.

Considerando lo anterior se puede definir que un sistema trifásico es balanceado cuando se cumple que las tensiones de línea, de fase y corrientes de línea y de fase son iguales en módulo y desfasados  $120^\circ$  entre sí. En caso de que lo anterior no suceda entonces el sistema está desbalanceado <sup>[1]</sup>.

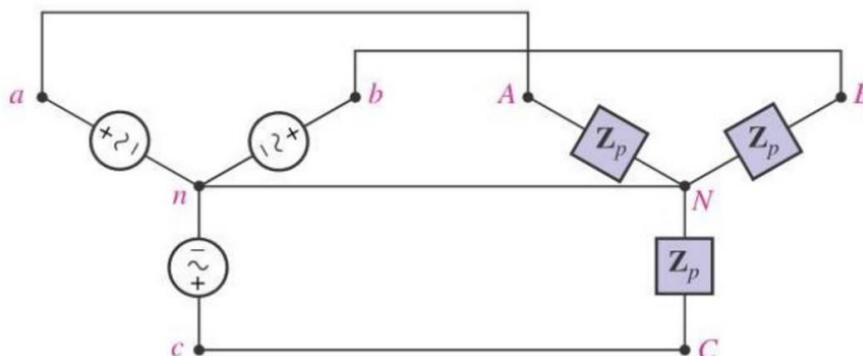
Los alternadores de las centrales eléctricas generan sistemas trifásicos equilibrados en tensiones, de frecuencia 60 Hz y donde las tensiones tienen el mismo valor eficaz pero desfasadas  $120^\circ$ . A lo largo de la red eléctrica este equilibrio se pierde y la calidad del suministro disminuye por lo cual es necesario implementar soluciones que permitan mejorar esta situación.

Las conexiones presentes entre los generadores y las cargas trifásicas pueden ser del tipo Estrella-Estrella las cuales pueden tener cuatro líneas de conexión entre el generador y la carga, esta cuarta, a parte de las tres de cada fase, es la conexión de un neutro. Teniendo así, que las tensiones localizadas entre una línea y el neutro son denominadas voltajes de fase del generador o la carga, las cuales cumplen de manera fasorial el desfase de  $120^\circ$  eléctricos.

También es necesario considerar la secuencia o cambio de fase del sistema, es decir, si la secuencia sigue el desfase de  $120^\circ$  se dice que es positiva o ABC si, por el contrario, el desfase es de  $240^\circ$  se dice que la secuencia es negativa o CBA.



**Figura 2.2.** Diagrama fasorial del desfase entre voltajes en conexión Y-Y.



**Figura 2.3.** Sistema trifásico en Y-Y.

[1] **Título:** Redes Eléctricas Tomo 1,2. **Autor:** Jacinto Vaqueira Landa.

Para conexión Delta-Delta se considera que para cargas balanceadas las corrientes de línea son distintas a las de la fase, con la diferencia de que los voltajes de línea, son igual al de las fases. Mediante un análisis fasorial se establece que las corrientes de línea y de fase presentan un desfase de  $30^\circ$ .

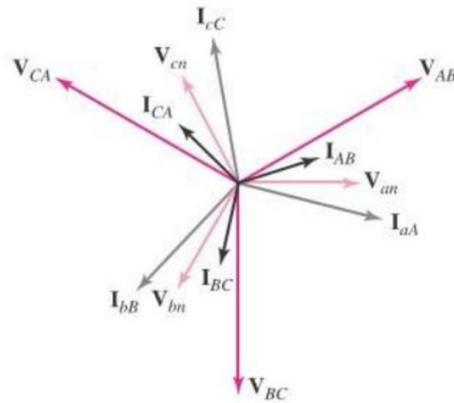


Figura 2.4. Diagrama fasorial de la conexión  $\Delta$ - $\Delta$ .

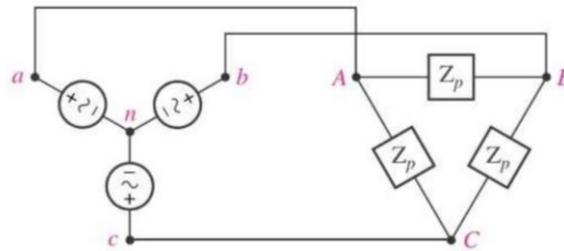


Figura 2.5 Sistema trifásico en  $\Delta$ - $\Delta$ .

Existen otras conexiones entre el generador y la carga, las cuales son combinaciones de las analizadas anteriormente, Estrella-Delta ( $Y$ - $\Delta$ ) y Delta-Estrella ( $\Delta$ - $Y$ ), a continuación, se ejemplifican cada una de ellas:

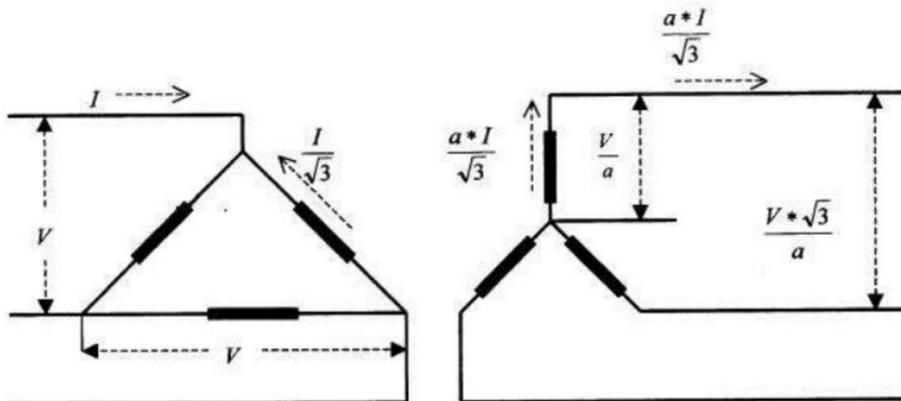


Figura 2.6 Conexiones Estrella-Delta ( $Y$ - $\Delta$ ) y Delta-Estrella ( $\Delta$ - $Y$ )

Otro punto importante es la representación de tensiones y corrientes senoidales, las cuales, por ser funciones periódicas, completan un ciclo cada  $T$  segundos y cumplen:

$$v(t) = v(t + T) \tag{1}$$

$$i(t) = i(t + T) \tag{2}$$

Donde  $T$  es el periodo y  $t$  es el tiempo, esto significa que la tensión y la corriente se repiten cada  $T$  segundos, de forma que toman el mismo valor que tenían en el ciclo anterior, las ecuaciones que las describen son:

$$v(t) = V_p \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$i(t) = I_p \cos(\omega t - \varphi_i) \quad (4)$$

Donde:

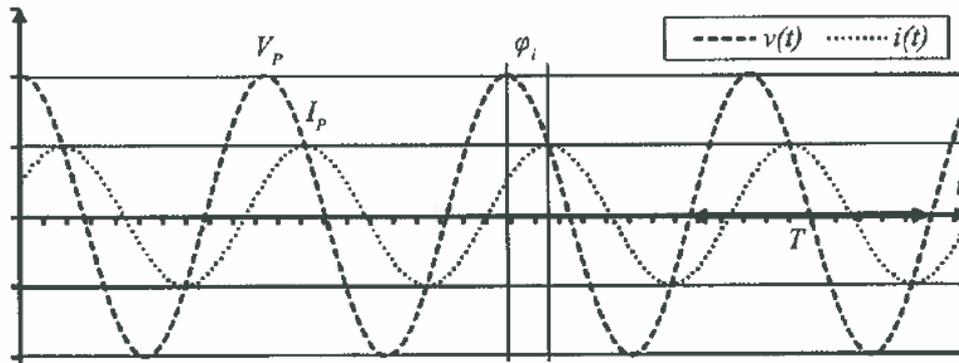
$V_p$ : Magnitud máxima de la señal de voltaje.

$I_p$ : Magnitud máxima de la señal de corriente.

$\omega$ : Frecuencia angular.

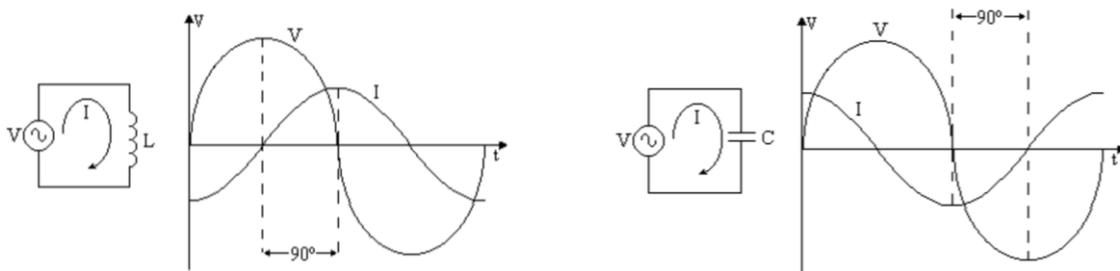
$\varphi_i$ : Desfasamiento o ángulo de fase de la corriente respecto a la tensión.

En la figura 6.7, se muestran las gráficas de una tensión y una corriente. De esta manera se señalan los valores pico, el ángulo de desfasamiento y el periodo  $T$ .



**Figura 2.7.** Tensión y corrientes senoidales.

Se puede observar que el comportamiento del voltaje y la corriente permite analizar un sistema de potencia, por lo que es necesario también considerar si dentro del mismo sistema la corriente está atrasada o adelantada con respecto al voltaje. Si dentro del sistema eléctrico la carga conectada a él es mayormente inductiva como la de los motores y transformadores, la señal de la corriente se atrasa o desfasa en relación con la tensión, de lo contrario si la carga en su mayoría está constituida de carga capacitiva ocurrirá todo lo contrario al caso anterior, es decir, la señal de corriente se desfasará adelantándose con respecto a la señal de voltaje.



**Figura 2.8.** Intensidad de la corriente con respecto al voltaje.



Otra forma de expresar estos parámetros es mediante una forma fasorial, empleando la identidad de Euler:

$$e^{j\theta} = \cos(\theta) + j\text{sen}(\theta) \quad (5)$$

Y con la ayuda de la siguiente identidad:

$$\cos(\theta) = \text{Re}\{e^{j\theta}\} = \text{Re}\{\cos(\theta) + j\text{sen}(\theta)\} \quad (6)$$

Donde  $\text{Re}\{\}$  significa que es la parte real. La ecuación (4) se puede expresar como la parte real de una corriente exponencial compleja.

$$i(t) = \text{Re}\{\hat{i}(t)\} = I_P \cos(\omega t - \varphi_i) = \text{Re}\{I_P \cos(\omega t - \varphi_i) + jI_P \text{sen}(\omega t - \varphi_i)\} \quad (7)$$

Considerando (5) y (7):

$$\hat{i}(t) = I_P e^{j\omega t - j\varphi_i} = I_P e^{j\omega t} e^{-j\varphi_i} \quad (8)$$

La corriente exponencial compleja tiene un término  $e^{j\omega t}$ , que representa la parte que varía con el tiempo y otro término  $e^{j\varphi_i}$ , que representa el ángulo de fase de la corriente. La corriente exponencial compleja es:

$$\hat{i}(t) = I e^{j\omega t} \quad (9)$$

Donde  $I$  es un número complejo, el cual puede expresarse como:

$$I = I_P \angle -\varphi_i \quad (10)$$

Esta expresión es conocida como el fasor de corriente, el cual es un número complejo cuya magnitud es  $I_P$  y su ángulo de fase es  $\varphi_i$ . De la misma manera se puede expresar la tensión mediante la siguiente ecuación:

$$v(t) = V_P \cos(\omega t - \varphi_v) \quad (11)$$

$$\tilde{v}(t) = V e^{j\omega t} \quad (12)$$

Donde  $V$  es el fasor de tensión, cuya magnitud es  $V_P$  y su Angulo de fase es  $\varphi_v$ . Este fasor se expresa como un número complejo en la forma:

$$V = I V_P \angle -\varphi_v \quad (13)$$

La tensión y la corriente senoidales se expresan como números complejos mediante una magnitud y un ángulo de fase, entonces pueden ser representados en el plano de Gauss, el cual tiene un eje real y uno imaginario, ver Figura 2.9.

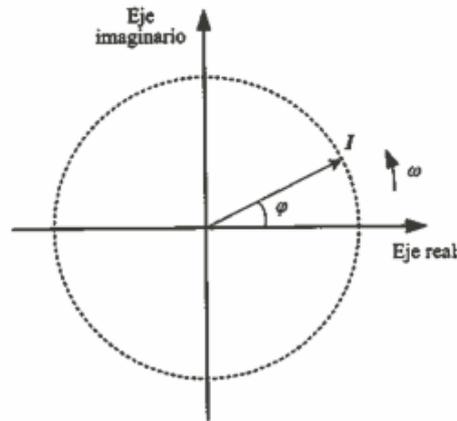


Figura 2.9. Plano de Gauss y fasor de corriente.

En los circuitos de CA, la corriente y la tensión son cantidades que varían en forma senoidal a través del tiempo, por lo tanto, el producto de ambas es también una cantidad variable y se expresa:

$$p = vi \quad (14)$$

Debido a que la tensión y la corriente son funciones periódicas, la potencia instantánea también es una función periódica de forma tal que, al igual que la corriente y la tensión, se repite cada T segundos. Con la ecuación (14) podemos determinar lo siguiente:

Para un circuito resistivo:

$$v_R = V_P \cos(\omega t) \quad (15)$$

$$i_R = I_P \cos(\omega t) \quad (16)$$

$$p = \frac{V_P I_P}{2} + \frac{V_P I_P}{2} \cos(2\omega t) \quad (17)$$

Para un circuito inductivo:

$$v_L = V_P \cos(\omega t) \quad (18)$$

$$i_L = I_P \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (19)$$

$$p = \frac{V_P I_P}{2} \text{sen}(2\omega t) \quad (20)$$

Para un circuito capacitivo:

$$v_C = V_P \cos(\omega t) \quad (21)$$

$$i_C = I_P \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (22)$$

$$p = -\frac{V_P I_P}{2} \text{sen}(2\omega t) \quad (23)$$

De esta manera podemos calcular la potencia para cada uno de los tipos de sistemas, resistivo, inductivo y capacitivo. Por otro lado, en los sistemas de potencia se requiere conocer la cantidad promedio de potencia entregada o absorbida en un lapso de tiempo, por lo cual es posible calcular el valor promedio, valor eficaz y factor de cresta para un sistema eléctrico mediante las siguientes ecuaciones:



$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt \quad (24)$$

Para un resistor:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{V_P I_P}{2} + \frac{V_P I_P}{2} \cos(2\omega t) \right) dt \quad (25)$$

$$P = \frac{V_P I_P}{2} \quad (26)$$

Para un inductor:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_P I_P}{2} \sin(2\omega t) dt = 0 \quad (27)$$

Para un capacitor:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T -\frac{V_P I_P}{2} + \frac{V_P I_P}{2} \cos(2\omega t) dt = 0 \quad (28)$$

De lo anterior podemos concluir que la potencia instantánea para el caso del resistor nunca toma valores negativos, y por lo tanto su valor promedio es igual al término constante, alrededor del cual oscila la componente senoidal de la potencia instantánea del resistor. Para el caso del inductor no hay un valor promedio de potencia transferido de la fuente hacia la carga, esto implica que se trata de un ir y venir periódico de energía, cuyo resultado a lo largo de un tiempo T es cero. Y finalmente para un capacitor la conclusión es la misma que para el inductor, cuyo resultado final al cabo de un tiempo T es nulo.

El valor eficaz en un sistema se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (29)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{V_P^2}{T} \left( \int_0^T \cos(2\omega t) dt + \int_0^T dt \right)} \quad (30)$$

De donde se obtiene que:

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

Y para la corriente:

$$I_{RMS} = \frac{I_P}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

Los valores que se obtienen de las ecuaciones (31) y (32) representan cantidades que varían continuamente, las cuales son de gran importancia dependiendo del tipo de



aplicación en estudio. Conociendo el valor eficaz de la tensión y la corriente, se puede determinar una relación entre este valor y los valores máximos o de pico mediante la constante  $\sqrt{2}$ , a esta relación se le conoce como factor de cresta:

$$f_c = \frac{\text{valor de pico}}{\text{valor eficaz}} \quad (33)$$

Cuando las señales son senoidales, el factor de cresta es  $\sqrt{2}$  mientras que para la mayoría de las señales cuya forma de onda no es senoidal el factor de cresta es distinto a este valor.

Otro concepto importante es el modelado de la tensión y la corriente con distorsión armónica, en este sentido es de suma importancia emplear una herramienta matemática denominada serie trigonométrica de Fourier, la cual permite evaluar numéricamente la distorsión armónica.

La siguiente ecuación describe la forma de onda de la familia de funciones periódicas senoidales puras:

$$f(t) = \sqrt{2} F \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (34)$$

Donde:

F: Es el valor eficaz.

$\omega$ : Es la frecuencia angular.

$\varphi$ : Es el desfase respecto al origen de la senoide.

La ecuación anterior se utiliza para expresar analíticamente la tensión y corriente ideales de un sistema eléctrico, cosa que no es de mucha utilidad, ya que actualmente los equipos electrónicos y las cargas no lineales provocan distorsión en las señales. Para realizar un análisis más simple se pueden considerar estas señales distorsionadas como la superposición de señales sobre la de frecuencia fundamental. La principal característica de éstas es que son senoidales con una frecuencia múltiplo de la fundamental y se les denomina armónicas.

Si  $y(t)$  es una función periódica, se puede expresar analíticamente por medio de la siguiente serie de Fourier:

$$y(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos(h\omega t) + b_h \text{sen}(h\omega t)) \quad (35)$$

Donde:

$\omega$ : Es la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi f$ )

$a_0, a_h, b_h$ : Son los coeficientes de la serie.

Los coeficientes de la serie se obtienen de la siguiente manera:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad (36)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(h\omega t) dt \quad (37)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \text{sen}(h\omega t) dt \quad (38)$$



Donde  $T$  es el periodo de  $y(t)$  y es el recíproco de la frecuencia  $f$ . Siendo  $a_0$  el valor promedio de la función  $y(t)$ , mientras que los coeficientes  $a_h$  y  $b_h$  son las componentes rectangulares u ortogonales de un fasor, cuya representación compleja es:

$$A_h \angle \phi_h = a_h + jb_h \quad (39)$$

Y cuya magnitud y ángulo de fase son:

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (40)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{b_h}{a_h} \right) \quad (41)$$

Considerando las ecuaciones anteriores, se puede reescribir como:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} Y_h \text{sen}(h\omega t - \phi_h) \quad (42)$$

Donde  $Y_h$  es el valor eficaz de  $A_h$  y  $Y_0 = A_0$ .

Podemos concluir que la reconstrucción de la función periódica original es una suma infinita de funciones básicas que a excepción de la componente de directa  $a_0$ , son todas senoides. La frecuencia de dichas senoides es un múltiplo entero positivo de la frecuencia de la función periódica distorsionada.

De este modo, la componente fundamental, tendrá la misma frecuencia de la función periódica distorsionada, es decir  $h=1$ . Al conjunto de senoides que componen la serie de Fourier, a excepción de la fundamental, se les conoce como armónicas. A la senoide cuya frecuencia es el doble de la fundamental ( $h=2$ ), se le conoce como segunda armónica; a la senoide cuya frecuencia es igual al triple de la fundamental ( $h=3$ ), se le denomina tercera armónica, y así sucesivamente.

El análisis de Fourier aplicado a la tensión y la corriente distorsionadas en un sistema eléctrico, consiste en calcular la magnitud y fase de la fundamental y de cada una de las armónicas. Los resultados del análisis se suelen presentar en forma de un histograma denominado espectro de magnitud, ver Figura 2.10, donde en el eje de las abscisas se encuentra “h” como variable independiente, mientras que en el eje de las ordenadas se anotan los porcentajes que guardan las magnitudes de las armónicas respecto a la componente fundamental.

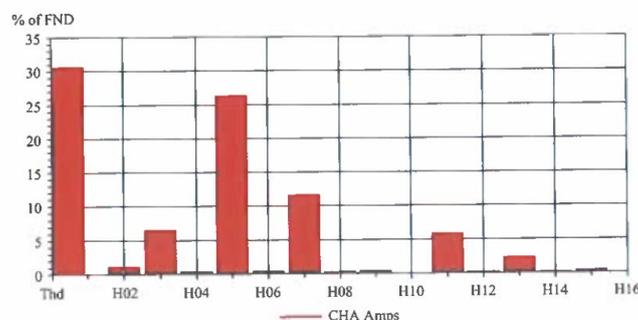


Figura 2.10. Espectro de corriente.



Al tener distorsión armónica de la tensión y la corriente de un sistema eléctrico, resulta útil representar analíticamente a dichos parámetros por medio de la serie de Fourier, como a continuación se indica:

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \text{sen}(h\omega t - \phi_h) \quad (43)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \text{sen}(h\omega t - \phi_h) \quad (44)$$

A partir de los conceptos anteriores es posible emplear el equipo de medición, “Analizador de redes eléctricas y calidad de energía”, ya que dentro de su programación incluye una serie de fórmulas que permiten la obtención de los parámetros que son necesarios para el análisis. A continuación, se muestran algunas de las ecuaciones empleadas por el equipo:

#### VALORES RMS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN SEMIPERÍODO

$$Vdem[i] = \sqrt{\frac{2}{NSHC}} \cdot \sum_{n:Zero}^{Next\ Zero} V[i][n]^2 ; \text{un solo voltaje rms semiperíodo } i + 1 \text{ fase}$$

$$Adem[i] = \sqrt{\frac{2}{NSHC}} \cdot \sum_{n:Zero}^{Next\ Zero} A[i][n]^2 ; \text{corriente rms semiperíodo } i + 1 \text{ fase}$$

Donde:

NSHC: número de muestras por semiciclo (entre dos ceros consecutivos).

N: muestra (0; 255).

i: Fase (0; 1; 2).

#### VALORES DE VOLTAJE Y DE CORRIENTE MIN/MAX

$$Vmax[i] = \max(Vdem[i]), Vmin[i] = \min(Vdem[i]), Vavg = \frac{1}{6000} \sum Vdem[i]$$

$$Amax[i] = \max(Adem[i]), Amin[i] = \min(Adem[i])$$

Podemos observar que los valores que se registran dentro de la memoria del equipo son muestras que se obtienen en un intervalo de tiempo, las cuales varían por los parámetros que se ingresan en la programación del equipo antes de efectuar las mediciones (tipo de sistema que queremos analizar, voltaje, número de fases, tipo de conexión, etc.), dando como resultado un número de muestras en un tiempo determinado.

Considerando lo anterior es posible realizar el análisis completo de las distintas dependencias, ya que podemos considerar que nuestro sistema eléctrico es



desbalanceado, considerando que las señales de voltaje y de corriente son distintas en magnitud en todo momento, es decir, presentan las características de un sistema de este tipo. Además de que se tienen las bases necesarias para comprender el comportamiento de las señales y la manera en que se procesa y se obtiene la información para el análisis.

## 2.2 ESTABILIDAD DE LA TENSIÓN.

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad que el sistema tiene de mantener un punto de equilibrio sobre condiciones normales de operación y permanecer en un estado aceptable de operación después de haber sufrido una perturbación, en pocas palabras se puede decir que la estabilidad es una condición de equilibrio entre fuerzas opuestas que permanecen activas en el sistema. Es conveniente resaltar que el problema de inestabilidad en los SEP (Sistemas Eléctricos de Potencia) es muy concreto y excluyente; por lo que se dice que el sistema es estable o inestable.

Para analizar un problema de inestabilidad particular, es necesario identificar los factores clave que la causan y para ejecutar una solución óptima de estabilidad de voltaje se hace casi indispensable clasificar primero los problemas.

### 2.2.1 VARIACIONES DE TENSIÓN LARGAS.

Son variaciones de la tensión en su valor rms (raíz media cuadrática), a la frecuencia del sistema. Estas variaciones pueden ser sobre-tensiones y bajas-tensiones y son causados por conmutación en las cargas u operaciones de mantenimiento en el sistema, representadas en la Figura 2.11.

- **Sobre-tensión**

Es el incremento de la tensión a un nivel superior al 110% del valor nominal por una duración mayor de un minuto. Las sobretensiones son usualmente el resultado de la desconexión de grandes cargas o debido a la conexión de bancos de capacitores. Generalmente se observa cuando el sistema es muy débil para mantener la regulación de la tensión o cuando el control de la tensión es inadecuado. La incorrecta selección del TAP en los transformadores ocasiona sobretensión en el sistema<sup>[19]</sup>.

- **Baja-tensión**

Es la reducción en el valor rms de la tensión a menos del 90% del valor nominal por una duración mayor de un minuto. La conexión de una carga o la desconexión de un banco de capacitores pueden causar una baja tensión hasta que los equipos de regulación actúen correctamente para restablecerlo. Los circuitos sobrecargados pueden producir baja tensión en los terminales de la carga<sup>[19]</sup>.

---

[19] **Título:** Sistemas de distribución. **Autor:** Espinosa Lara Roberto.

- **Interrupción sostenida**

Es la ausencia de tensión, se manifiesta por un período superior a un minuto. Este tipo de interrupciones frecuentemente son permanentes y requieren la intervención del hombre para restablecer el sistema <sup>[19]</sup>.

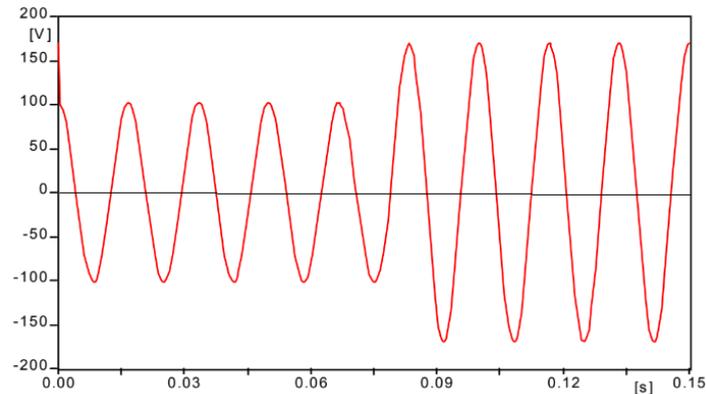


Figura 2.11 Representación de una sobre tensión.

### 2.2.2 VARIACIONES DE TENSIÓN CORTAS.

Son variaciones en el valor rms de la tensión nominal, por un tiempo mayor a medio ciclo (segundos) de la frecuencia del sistema sin llegar a exceder un minuto, son generalmente causados por fallas, energización de cargas grandes con corrientes de arranque muy elevadas o conexiones intermitentes en los cableados de potencia. Dependiendo la localización de la falla y las condiciones del sistema se pueden causar temporalmente, caídas de tensión (sags), elevaciones de tensión (swells) o una completa pérdida de tensión (interrupciones cortas) <sup>[18]</sup>.

- Interrupciones Cortas: Una interrupción ocurre cuando la fuente de tensión o la corriente de carga disminuye a menos del 10% por un periodo no mayor a un minuto <sup>[18]</sup>. Ver Figura 2.12.

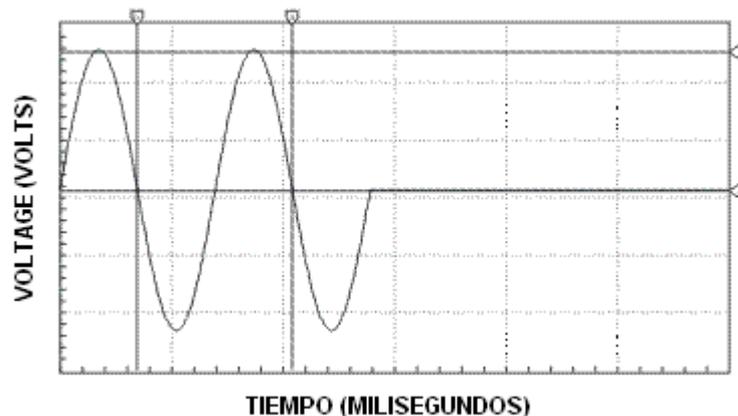


Figura 2.12. Representación de una Interrupción Corta.

[18] **Título:** Calidad de la Energía. **Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, coinvestigador.

[19] **Título:** Sistemas de distribución. **Autor:** Espinosa Lara Roberto.

- Caída de tensión (Sags): Es un decremento en el valor rms de la tensión o la corriente a la frecuencia fundamental, que se encuentra entre el 10% y el 90% y tiene una duración de medio ciclo hasta un minuto<sup>[18]</sup>, como se muestra en la Figura 2.13.

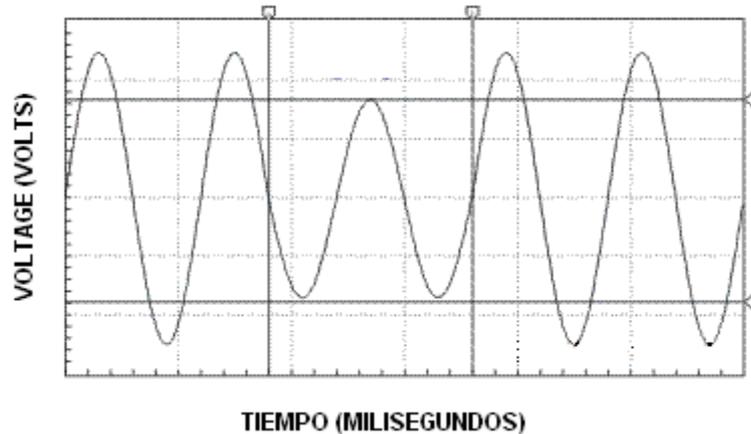


Figura 2.13. Representación de un Sags.

- Elevaciones de tensión (Swells): Es un incremento del 110 % hasta el 180% del valor rms de la tensión o de la corriente a la frecuencia nominal, con duraciones desde medio ciclo hasta un minuto<sup>[18]</sup>. Ver Figura 2.14.

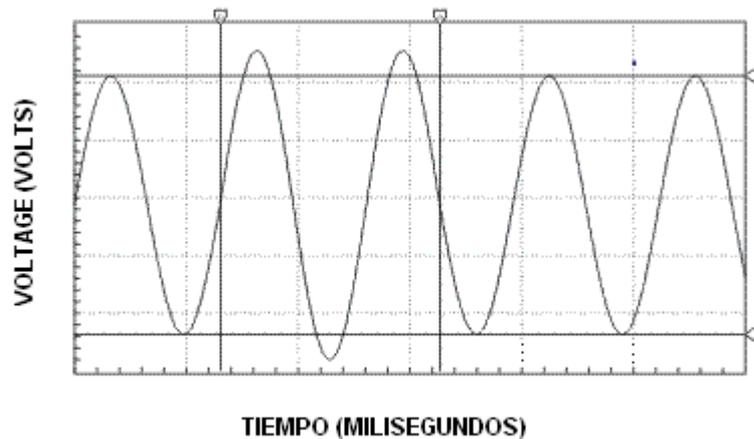


Figura 2.14. Representación de Swell.

[18] **Título:** Calidad de la Energía. **Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, coinvestigador.



### **2.2.3 DESBALANCE DE TENSIÓN.**

Se considera que se tiene desbalance de tensión cuando las tensiones de una fuente trifásica no son idénticas en magnitud o el desplazamiento entre fases no es de 120 grados eléctricos o ambas. Esto afecta a los motores y otros dispositivos que dependen del adecuado balanceo de la fuente de suministro trifásica.

### **2.2.4 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN.**

Las fluctuaciones de tensión, tienen como consecuencia el parpadeo (flicker) del alumbrado. Son uno de los mayores problemas de regulación de tensión en la industria eléctrica. Son variaciones sistemáticas o una serie de cambios aleatorios en la magnitud de la tensión sin exceder los límites de 90% a 110%.

El flicker es la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por las fluctuaciones en la red. Esta origina en quien las percibe una situación desagradable.

### **2.2.5 VARIACIONES EN LA FRECUENCIA DEL SISTEMA.**

Están definidas como la desviación del valor nominal de la frecuencia fundamental del sistema.<sup>[4]</sup>

La frecuencia que se maneja en la mayoría de los países de Latinoamérica es de 60 ciclos/segundo y se recomienda una variación en más o en menos del 0.8%.

Las variaciones de frecuencia se originan directamente desde su generación en plantas de la compañía suministradora o con el uso de plantas de emergencia las cuales fácilmente pueden producir variaciones de frecuencia, por lo cual se debe tener cuidado con las cargas conectadas a ésta.

Dentro de sus consecuencias encontramos:

- Apagado de equipo y repercusión en otros equipos conectados en la misma línea.
- Sobrecalentamiento
- Circulación de corrientes por neutro (en sistemas no balanceados).
- Pérdida de transformadores.
- Activación de protecciones de sub-frecuencia.

## **2.3 DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA**

Se entiende por distorsión de la forma de onda como la diferencia entre la señal que entra a un equipo o sistema y la señal que sale del mismo. Por tanto, puede definirse como la "deformación" que sufre una señal tras su paso por un sistema. Los tipos de distorsión se clasifican en transitorios, DC offset, muescas en la tensión (notching), ruido, armónicos e inter-armónicos.

---

[4] **Título:** Sistemas de distribución. **Autor:** Espinosa Lara Roberto.

### 2.3.1 TRANSITORIOS.

Son desviaciones de la tensión o corriente normal, repentino y significativo, típicamente tienen una duración de 20 [micro-segundos] hasta 0.5 [segundos] <sup>[18]</sup>, existen dos tipos:

- **Pulsos**

Es un cambio súbito y unidireccional (Representado en la Figura 2.15) en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos y de frecuencia diferente a la del sistema de potencia. Son de moderada y elevada magnitud, pero de corta duración medida en micro-segundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 micro-segundos) y descenso (20 a 150 micro-segundos) y por su contenido espectral <sup>[18]</sup>.

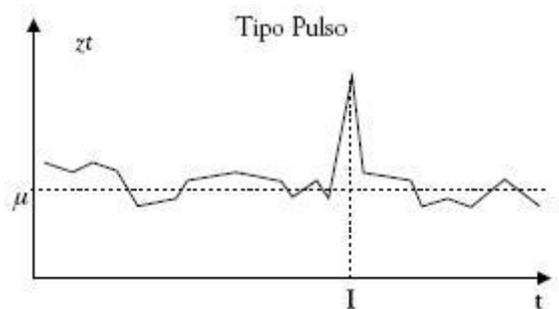


Figura 2.15. Representación de un pulso.

- **Transitorios oscilatorios**

Este tipo de transitorio se describe por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia se clasifican en: transitorios de alta, media y baja frecuencia. Ver figura 2.16. Los transitorios oscilatorios con una frecuencia mayor de 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos son considerados transitorios oscilatorios de alta frecuencia. Cuando la frecuencia se encuentra entre 5 y 500 kHz se considera un transitorio de frecuencia media <sup>[18]</sup>.

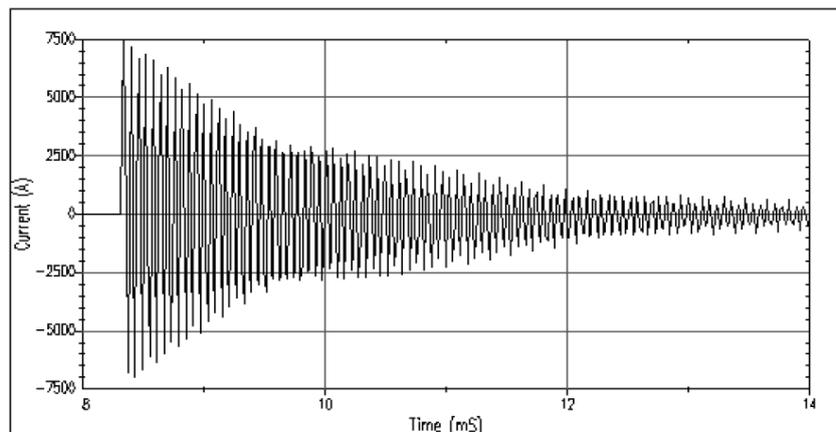


Figura 2.16. Corriente transitoria provocada por la conmutación de capacitores.

[18] **Título:** Calidad de la Energía. **Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, coinvestigador.

Un transitorio con una frecuencia inferior a 5 kHz, y una duración de 0,3 ms a 50 ms, se considera un transitorio de baja frecuencia. Se presentan en los niveles de subtransmisión y distribución de una red eléctrica; así como, en los sistemas industriales [18]. Ver figura 2.17.

Son causados por diversos eventos, el más frecuente es la energización de bancos de capacitores que hacen oscilar la tensión con una frecuencia primaria entre 300 y 900 Hz. La magnitud pico observada normalmente es de 1,3 -1,5 p.u. con una duración entre 0,5 y 3 ciclos dependiendo del amortiguamiento del sistema.

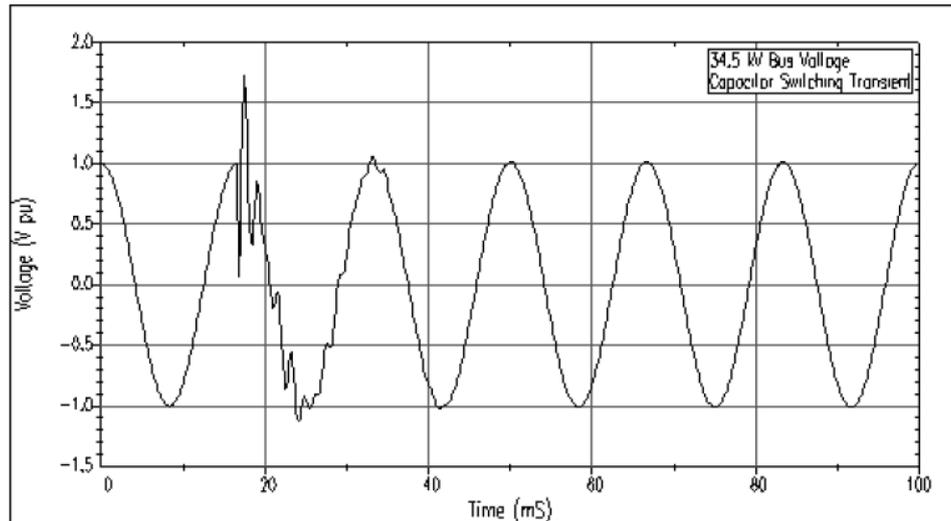


Figura 2.17. Representación originada al energizar un banco de capacitores.

### 2.3.2. DC OFFSET.

La presencia de una tensión o corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia se denomina corrimiento DC (DC offset).

Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda, controladores de luces incandescentes. Este tipo de controlador, por ejemplo, puede consistir en diodos que reducen el valor R.M.S. de la tensión de alimentación por rectificación de media onda.

### Efectos de la presencia de DC en redes de AC:

La corriente directa en redes de corriente alterna produce efectos perjudiciales al polarizar los núcleos de los transformadores de forma que se saturan en operación normal causando el calentamiento y la pérdida de vida útil en estos equipos.

La corriente directa es una causa potencial del aumento de la corrosión en los electrodos de puesta a tierra y en otros conductores y conectores.

[18] **Título:** Calidad de la Energía. **Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, coinvestigador.

### 2.3.3. MUESCAS EN LA TENSIÓN (NOTCHING).

Conocidas también como hendiduras, las muescas son perturbaciones periódicas en la forma de onda de tensión, causadas por la operación normal de los dispositivos de electrónica de potencia, cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Ver figura 2.18.

Generalmente son tratadas como un caso especial ya que los componentes de frecuencia asociados a ellas pueden ser tan altos que no son fácilmente detectados por los equipos de medición normalmente utilizados para el análisis armónico.

Las muescas de tensión causan fallas en las CPU, impresoras láser y mal funcionamiento de algunos equipos electrónicos.

La eliminación de las muescas de tensión implica el aislamiento, de los equipos sensibles, de la fuente que las está produciendo. La inserción de reactancias inductivas también puede servir como solución, para mitigar el efecto de las muescas.

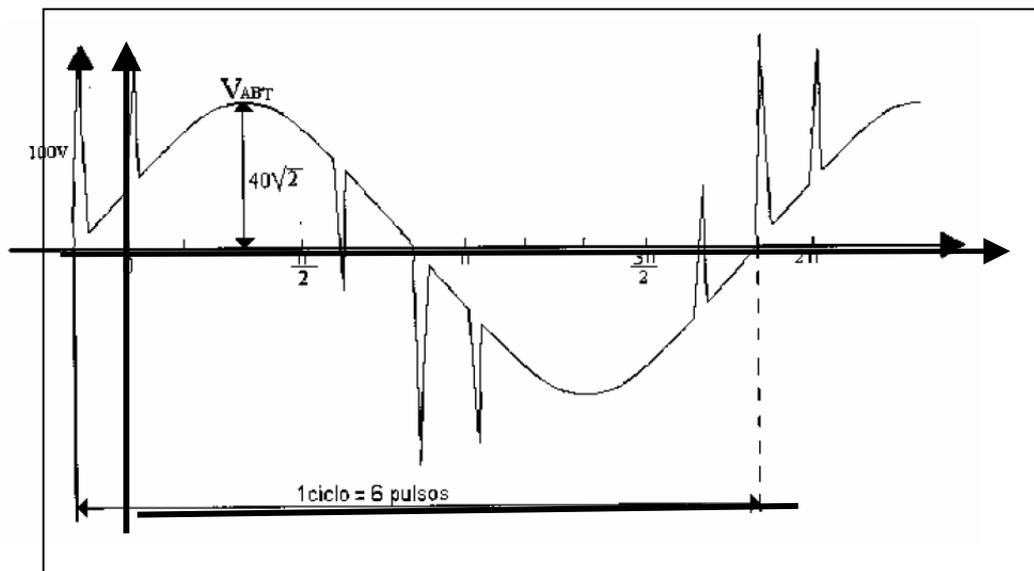


Figura 2.18. Representación de muescas en la tensión.

### 2.3.4. RUIDO (NOISE).

El ruido es una señal eléctrica indeseable con un contenido espectral inferior a 200 kHz superpuesto a la tensión o a la corriente del sistema en los conductores de las fases o en los conductores neutros o líneas de señales.

Puede ser causado por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas.



Una de las causas más frecuente de ruidos son las plantas de emergencia de baja calidad donde se manifiesta el efecto de las ranuras en la forma de onda del voltaje de salida.

### 2.3.5. ARMÓNICOS.

Las cargas no lineales originan corrientes armónicas que se propagan en las redes de transmisión y distribución eléctrica, afectando los índices de calidad de suministro. Esto puede ser peligroso para algunos equipos y cargas sensibles además de los problemas de calentamiento que originan en las líneas y transformadores de distribución.

- **Factor de diversidad (FD)**

Las dispersiones en el ángulo de fase de los armónicos de cargas individuales provocan una disminución de las corrientes armónicas en la red. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a diferencias en los parámetros del sistema de distribución y a los de la propia carga.

- **Factor de diversidad de corriente (FD)**

Se define para cualquier armónico k y un conjunto de n cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico.

$$FD_K = \frac{\left| \sum_{i=1}^n I_{k(i)} \right|}{\sum_{i=1}^n |I_{k(i)}|} \quad (1)$$

Este factor varía su valor entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis.

- **Índice de distorsión armónica total (THD)**

Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, THD (Total Harmonic Distortion), y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. Así para la onda de corriente es:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad (2)$$

Donde

k: número de armónica

$I_1$ : valor eficaz de la onda fundamental de corriente

$I_k$ : valor eficaz del armónico k.

El  $THD_1$  puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100% como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas.

Generalmente las armónicas de voltaje son pequeñas y las de corriente toman valores significativos para las armónicas de bajo orden y valores poco significativos para las armónicas de alto orden. Así para la onda de voltaje será;

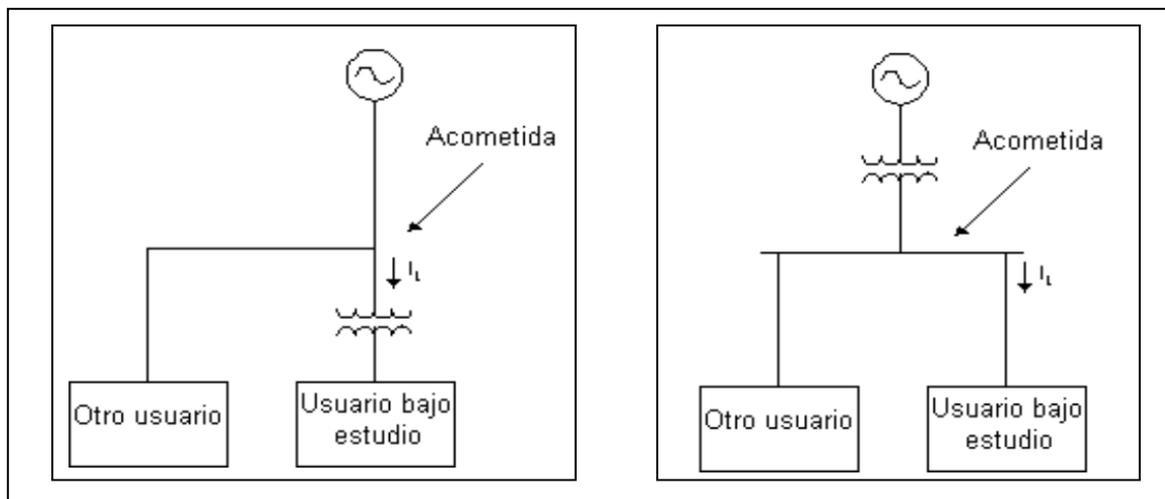
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad (3)$$

- **Punto de acometida (PA)**

Se entiende por acometida, la parte de la instalación eléctrica que se construye desde las redes de distribución, hasta las instalaciones del usuario, y estará conformada por los siguientes componentes: punto de alimentación, conductores, ductos, tablero general de acometidas, interruptor general, armario de medidores o caja para equipo de medición como se observa en la Figura 2.19.

Los conductores de la acometida deberán ser continuos, desde el punto de conexión de la red hasta los bornes de la entrada del equipo de medición.

No se aceptarán empalmes, ni derivaciones, en ningún tramo de la acometida. En la caja o armario de medidores deberá reservarse en su extremo una longitud del conductor de la acometida suficiente que permita una fácil conexión al equipo de medición.



**Figura 2.19.** Esquema de un punto de acometida.

Los límites establecidos en la norma IEEE 519-2014 deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario. La norma no puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación.



- **Corriente máxima de demanda ( $I_L$ )**

La determinación de la corriente máxima de demanda requiere un conocimiento detallado de la operación de la carga, el cual se puede obtener a partir de los recibos de facturación o bien *a posteriori* a partir de las mediciones de calidad de la energía. El IEEE 519-2014 establece que la corriente máxima de demanda es el valor máximo de la componente fundamental durante la condición de demanda máxima, entonces el problema principal de obtener la corriente máxima de demanda a partir de los recibos de facturación es que probablemente estos involucren a las armónicas de voltaje y corriente para la obtención de potencias y energías, por lo cual resulta más recomendable obtener el valor de  $I_L$  a partir del monitoreo.

- **Corriente de corto circuito en el punto de acometida ( $I_{CC}$ )**

El valor de la corriente de cortocircuito para una acometida viene determinado por la potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la red que alimenta dicha acometida

Para conocer el valor de la corriente de corto circuito de una instalación se hace a partir de la potencia del transformador y su impedancia en por unidad, generalmente descrita en la placa de datos del mismo, mediante el método de bus infinito en el secundario del transformador, aunque esta práctica no es recomendable ya que el cálculo de la corriente de corto circuito debe realizarse en el lado primario del transformador. La manera más sencilla y correcta es solicitar el nivel de corto circuito a CFE o al suministrador y de esta manera tener el valor de la corriente de corto circuito en el punto de acometida.

- **Distorsión de la demanda total ( $T_{DD}$ )**

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye también es baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_l} \times 100\% \quad (4)$$



En donde:

$I_h$ = Magnitud de la armónica individual

$H$ = Orden armónico

$I_l$ = Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como promedio máximo mensual de demanda de corriente de componente fundamental de los 12 últimos meses o puede estimarse.

- **Punto de acoplamiento en la planta (IPC)**

Se debe tomar en cuenta que la IEEE 519 está limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica. Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión del voltaje, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas. El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.

2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía distribuidora de electricidad puede suministrar al consumidor.

- **Impedancia relativa ( $I_{cc}/I_l$ )**

El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños. El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito.

$$SCR = \frac{I_{cc}}{I_l} \quad (5)$$

Donde:

- $I_{cc}$  Corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.
- $i_l$  Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.
- SCR Relación de cortocircuito.

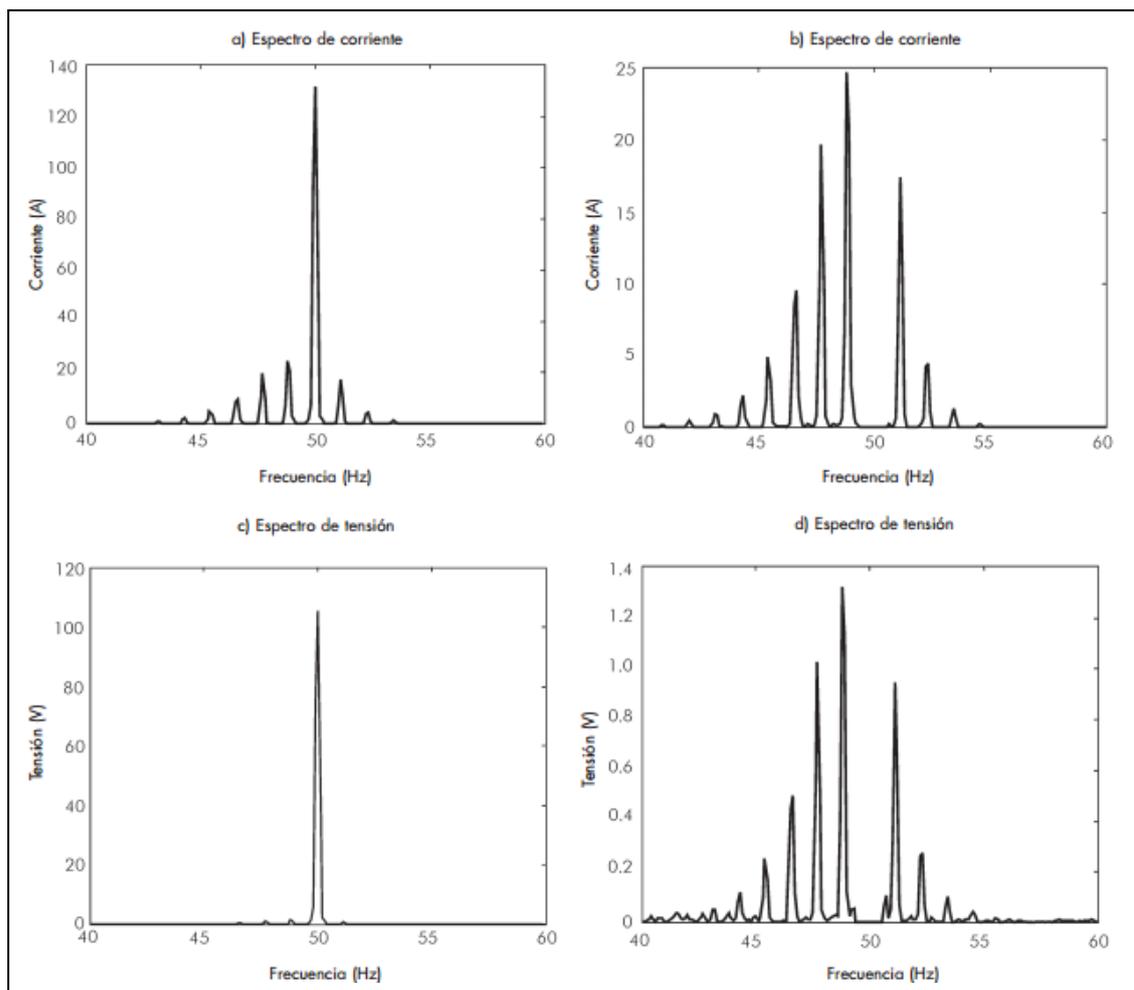
### 2.3.6. INTER-ARMÓNICOS.

Se llaman inter-armónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema.

Los inter-armónicos se pueden encontrar en redes de todas las clases de tensiones. Las principales fuentes de inter-armónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, el ciclo-convertidor, los motores asíncronos y los dispositivos de arco.

Efectos de calentamientos, similares a los producidos por los armónicos, son causados por los inter-armónicos. Debido a que los inter-armónicos son el resultado de una forma de onda de corriente aperiódica, la cual típicamente se caracteriza por tener fuertes fluctuaciones, entonces dicho comportamiento al impactar en la impedancia del sistema origina fluctuaciones de voltaje, especialmente en sistemas débiles, las cuales pueden ocasionar el parpadeo en la iluminación o flicker.

La mitigación de los efectos de los inter-armónicos se realiza con filtros pasivos. Ver Figura 2.20.



**Figura 2.20.** Espectros de corriente y de tensión de diferentes inter-armónicos.



## 2.4 EFECTOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA.

Los efectos de los armónicos se dividen en tres categorías generales: efectos sobre el sistema de potencia mismo, efectos sobre la carga del consumidor y por último efectos sobre circuitos de comunicación <sup>[20]</sup>.

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son el problema principal, ocasionando calentamiento y pérdida de vida útil en motores o transformadores principalmente <sup>[20]</sup>.

El impacto de la resonancia de la red está determinado en la manera en que se presenta, si la resonancia es en paralelo se amplifican las armónicas de corriente y como consecuencia se amplifican también las de voltaje, por otro lado, si la resonancia es en serie las armónicas de voltaje se amplifican y como consecuencia se amplifican también las de corriente. Los armónicos pueden también interferir en la operación de los equipos de protección y mediciones.

Los armónicos pueden ocasionar también errores de disparo a los tiristores, en equipos convertidores, inexactitudes en las mediciones, y falsos disparos en los dispositivos de protección. El desempeño de los equipos de los consumidores, tales como controladores de velocidad de motores y fuentes de alimentación, pueden ser adversamente afectados por los armónicos.

Además, las corrientes armónicas que fluyen sobre las líneas de potencia pueden inducir ruido sobre líneas cercanas de comunicación. La distorsión armónica de voltaje puede ocasionar esfuerzos en el aislamiento de equipos, particularmente en condensadores. Cuando los armónicos deforman el voltaje en el banco de condensadores, el voltaje pico puede ser lo suficientemente alto como para ocasionar una descarga parcial, o efecto corona, dentro del dieléctrico del condensador. Esto puede producir eventualmente un cortocircuito entre bornes y carcasa y hacer fallar al condensador.

Las corrientes armónicas altas también ocasionan el disparo de fusibles en bancos de condensadores. Esto ocasiona la pérdida de una fuente de alimentación reactiva al sistema, lo que puede ocasionar otros problemas.

## 2.5 VENTAJAS DE UNA BUENA CALIDAD DE ENERGÍA.

### Seguridad y fiabilidad

Un estudio de carga se puede utilizar para garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad local y mucho más importante aún, el realizar un estudio de carga antes de añadir nuevas cargas puede evitar la sobrecarga de una toma existente, lo que te garantiza mayor seguridad y fiabilidad.

---

[20] **Título:** Armónicos en las Redes Eléctricas. **Autor:** Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador..



### **Ahorro en costos energéticos**

Sabemos que los gastos energéticos son una parte importante del costo operativo total. Sin embargo, muchas empresas no conocen en qué gastan sus recursos de manera específica, normalmente las empresas solo pagan el monto total de la factura, pero no pueden evaluar si su gasto es normal o excesivo en comparación con las operaciones de otros meses.

Hoy en día, es posible ver qué cantidad de energía consume la empresa, cuándo, en qué y a qué costo horario con solo registrar el uso energético en las actividades primarias y secundarias. Estos datos nos servirán para descubrir diferentes gastos de energía, que se pueden rectificar únicamente con cambios operativos, como la desconexión de determinadas cargas, reducción de cargas durante los periodos en los que la tarifa es más cara o modificando los horarios de funcionamiento a periodos más baratos.

El registro de los datos proporciona un argumento de peso a la hora de comparar los datos de facturación con el consumo real de energía, una diferencia significativa entre la cantidad facturada y los datos del registrador, indicarán que se debe realizar una revisión a la configuración y/o instalación eléctrica.

### **Incentivos financieros**

Actualmente, algunas organizaciones gubernamentales ofrecen incentivos y descuentos para fomentar una reducción del consumo energético. Existen diferentes incentivos y descuentos por la modernización de edificios; como soluciones de iluminación eficiente y motores de alta eficiencia. Así como, la sustitución de arrancadores de motor por unidades de frecuencia variable. Para conceder dichos beneficios las empresas requieren la verificación de sus ahorros energéticos: el escenario ideal para un estudio de carga.

Un estudio de carga previo a dicha modernización servirá para documentar el gasto energético actual y para proporcionar una línea base, mientras que un estudio posterior servirá para verificar los ahorros logrados a la finalización de las mejoras.

### **Solución a problemas**

Algunas veces, la única forma de resolver un problema es capturar y analizar los datos durante un amplio periodo de tiempo. En estos casos tan complicados, los registradores de energía son una excelente opción, así como lo es un analizador de calidad eléctrica.



## CAPÍTULO 3

### ESTÁNDARES NACIONALES E INTERNACIONALES.

Existen distintas organizaciones tanto nacionales como internacionales trabajando conjuntamente con ingenieros, investigadores y fabricantes de equipos para proponer normas, prácticas recomendadas y establecer límites en cuanto a la distorsión armónica. El principal objetivo de las normas es proveer una guía común a todas las partes involucradas para trabajar juntas.

Los límites de distorsión armónica son establecidos con el fin de asegurar la compatibilidad entre los equipos de uso final y los sistemas de distribución de energía eléctrica.

#### 3.1. LÍMITES PERMISIBLES PARA LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.

Uno de los problemas más comunes que afectan a la Calidad de la Energía en sistemas eléctricos, es la deformación de la onda, producida en gran medida por el fenómeno denominado “Distorsión Armónica”, problema que afecta tanto a las redes eléctricas de distribución como a los consumidores finales.

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía.

Existe una relación entre el usuario y la compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución de energía, en cuanto al usuario, tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible. Entiéndase el término contaminación como perturbaciones en la señal de corriente, como lo son interrupciones, bajo voltaje o la presencia de corrientes armónicas.

Las normas actuales están diseñadas para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en voltaje en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

- **Suministrador.** Es su responsabilidad que, en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje THDV se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que, condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.



- **Usuarios.** Deben de asegurar que, en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD.

### 3.1.1. ESTÁNDAR DEL IEEE.

#### IEEE STANDARD 519-2014

La finalidad de esta norma es proporcionar las medidas necesarias para limitar la inyección de armónicos de los clientes individuales de manera que no se generen niveles inaceptables de distorsión en voltaje bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total del voltaje proporcionado por el proveedor. Los límites de distorsión de voltaje y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para los casos más desfavorables en condiciones de operación normales.

Los límites de corriente y voltaje armónicos para este estándar son analizados en el PCC (Punto de Acoplamiento Común). Este es el punto dónde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. La norma busca una justa asignación de cuota de los límites de armónicos para cada cliente. La norma asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito. La relación de cortocircuito está definida como la proporción de corriente de cortocircuito máximo en el PCC para la máxima demanda de corriente de carga (Componente de Frecuencia Fundamental) en el PCC.

Para limitar la generación de armónicas de voltaje en niveles admisibles es necesario limitar las cantidades de armónicas de corriente que los usuarios le inyectan a la red. Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de voltaje máxima

En cargas más pequeñas (valores con relación de cortocircuito típicamente más grandes) es permitido un porcentaje mayor de corrientes armónicas que en las cargas más grandes con valores menores de relación de cortocircuito. Las cargas más grandes deben ser sometidas a límites más estrictos de distorsión dado que ocupan una porción más grande de la capacidad de carga de sistema. Los límites de corriente toman en cuenta la diversidad de corrientes armónicas de las cuales algunas armónicas tienden a cancelarse mientras que otras se suman.

Para limitar los voltajes individuales de distorsión y las distorsiones totales de voltaje THDV se establecieron los límites, ver Tabla 3.1, puesto que de la distorsión de voltaje depende la impedancia del sistema, la clave de controlar la distorsión de voltaje es controlar la impedancia. Dos condiciones principales que producen una impedancia alta son cuando el sistema es demasiado débil para alimentar la carga adecuadamente o cuando el sistema está en resonancia en paralelo, el último es el más común. Por consiguiente, si se mantiene el voltaje de distorsión en valores reducidos aseguramos que el sistema se mantenga fuera de resonancia.



Ocasionalmente, nuevos transformadores y líneas tendrán que ser agregadas para incrementar la robustez del sistema.

Voltaje nominal en el PCC $V_n$ (kV)	Voltaje de distorsión armónica individual (%)	Voltaje distorsión armónica total THDV $_n$ (%)
$V_n \leq 69$	3	5
$69 \leq V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 69$	1	1.5

**Tabla 3.1.** Límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia fundamental.

La norma IEEE 519-2014 representa un consenso general de pautas y prácticas recomendadas por los distribuidores y sus clientes en un esfuerzo por minimizar y controlar el impacto de armónicos generados por cargas no lineales.

### 3.1.2. ESTÁNDAR IEC.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), ha definido una categoría de normas de compatibilidad electromagnética (EMC) que tratan problemas de la calidad de la energía eléctrica. El término “compatibilidad electromagnética” incluye las preocupaciones tanto para interferencias radiadas como para interferencias conducidas en equipos terminales. Las normas de IEC están divididas en seis partes:

#### **Parte 1: General.**

Estas normas tratan consideraciones generales como introducción, principios fundamentales, razón, definiciones y terminologías. También pueden describir la aplicación e interpretación de definiciones fundamentales y condiciones. Su número de designación es IEC 61000-1-x.

#### **Parte 2: Ambiente.**

Estas normas definen las características del ambiente en donde funcionará el equipo, la clasificación de tal ambiente y sus niveles de compatibilidad. Su número de designación es IEC 61000-2-x.

#### **Parte 3: Límites.**

Estas normas definen los niveles permisibles de emisiones que pueden ser generadas por el equipo conectado en el ambiente. Establecen límites numéricos de emisión y también límites de inmunidad. Su número de designación es IEC 61000-3-x.



#### **Parte 4: Técnicas de prueba y medida.**

Estas normas proporcionan pautas detalladas para el equipo de medida y procedimientos de prueba para asegurar la conformidad con otras partes de las normas. Su número de designación es IEC 61000-4-x.

#### **Parte 5: Instalación y formas de mitigación.**

Estas normas proporcionan las pautas en aplicación de equipo como aterramiento y cableado de sistemas eléctricos y electrónicos para asegurar la compatibilidad electromagnética entre aparatos o sistemas eléctricos y electrónicos. También describen conceptos de protección para medios civiles contra impulsos electromagnéticos de alta magnitud debido a explosiones nucleares. Se designan con IEC 61000-5-x.

#### **Parte 6: Misceláneos.**

Estas son las normas genéricas de definición de inmunidad y niveles de emisiones requeridas para equipos en categorías generales o para tipos de equipos específicos. Se designan con el número IEC 61000-6-x.

Las normas IEC relacionadas a las armónicas al contrario de las normas IEEE para armónicos en donde hay una sola publicación que cubre todos los problemas relacionados a este tema, las normas IEC para armónicos están separadas en varias publicaciones. Hay estándares que tratan acerca de los ambientes y límites que por ser muy extensos están separados, basados en los niveles de voltaje y corriente. Estas normas son las mostradas a continuación:

**IEC 61000-2-2 (1993):** EMC Parte 2. Ambiente. Sección 2: Niveles de compatibilidad para perturbaciones dirigidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de alimentación de baja tensión.

**IEC 61000-3-2 (2000):** EMC Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para emisiones de corrientes armónicas (Equipos con entrada de corriente igual superior a 16 amperes por fase).

**IEC 61000-3-4 (1998):** EMC Parte 3: Límites. Sección 4: Limitación de emisión de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de energía de baja tensión para equipos con rango de corriente mayor que 16A.

**IEC 61000-3-6 (1996):** EMC Parte 3: Límites. Sección 6: Valoración de los límites de emisión para cargas distorsionadas en redes de Media y Alta Tensión. Publicación EMC básica.

Hasta 1997 estas normas eran conocidas como las normas de la serie 1000. Por ejemplo, IEC 61000-2-2 era conocida como IEC 1000-2-2. Estos estándares de



armónicos son generalmente adoptados por la Comunidad Europea (CENELEC); Por eso, también se designan como la serie EN 61000. Por ejemplo, IEC 61000-3-2 también es conocida como EN 61000-3-2.

### IEC 61000-2-2

IEC 61000-2-2 define niveles de compatibilidad para perturbaciones de baja frecuencia y señalización en redes de suministro eléctrico de baja tensión como sistemas monofásicos y trifásicos a 50 o 60 Hz con voltajes nominales de hasta 240 y 415 V, respectivamente. Los niveles de compatibilidad están definidos empíricamente de modo que reducen el número de demanda de mala operación a un nivel aceptable. Estos niveles no son rígidos y puede excederse en algunas condiciones excepcionales. Los niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en redes de baja tensión son mostrados en la Tabla 3.2. Éstos son determinados en porcentaje del voltaje fundamental.

N° de Múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden impar h	Voltaje Armónico (%)	Orden impar h	Voltaje armónico (%)	Orden par h	Voltaje Armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/h$				

\*En el TDH de la tensión de alimentación se considera que los componentes armónicos mayores a 40th son menores al 0.8%.

**Tabla 3.2.** Niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en la red pública de baja tensión según IEC61000-2-2.

### IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4

Tanto IEC 61000-3-2 como 61000-3-4 definen límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de visualización de corrientes de entrada de hasta 16A y mayores a 16A por fase, respectivamente. Estos estándares están destinados a limitar las emisiones de armónicos para los equipos conectados a la red pública de Baja Tensión, de manera que conforme con los límites seguros de voltaje en la red pública satisfaga los límites de compatibilidad definidos en IEC 61000-2-2. El estándar IEC 61000-3-2 es la evolución de la norma IEC 555-2 (EN 60555-2). La norma clasifica los equipos en cuatro categorías:

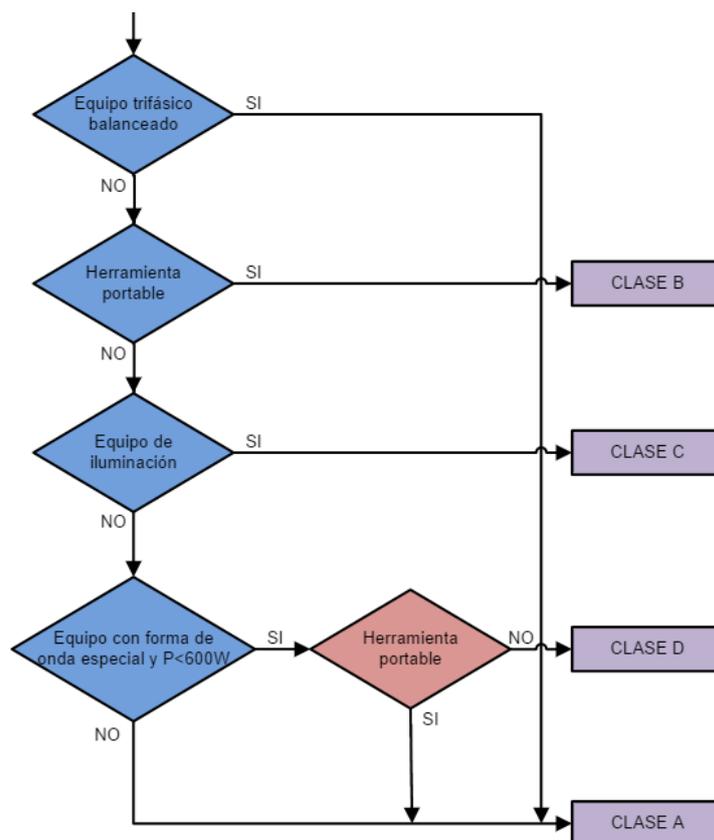
**Clase A:** Equipos trifásicos balanceados y todos los demás equipos no pertenecientes a las clases B, C y D.

**Clase B:** Herramientas portátiles.

**Clase C:** Equipos de iluminación incluyendo dispositivos de atenuación (dimer).

**Clase D:** Equipo con entrada de corriente con “forma de onda especial” y con consumo de potencia activa menor a 600 W.

La Figura 3.4 puede usarse para clasificar los equipos en IEC 61000-3-2. Debe notarse que los equipos de clases B y C y equipos de control de motores no son considerados equipos clase D si no se toma en cuenta la forma de onda de su entrada de corriente.



**Figura 3.4.** Diagrama de Flujo utilizado para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la norma IEC61000-3-2.

La máxima corriente armónica permisible para las clases A, B, C y D es determinada con la medida de corriente real tomada en la entrada de corriente del equipo. El límite de corriente de armónicos para equipos de clase B es el 150% de los de clase A.

Los límites de corrientes armónicas acordes a IEC 61000-3-2 se muestran en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5. Los límites de corrientes armónicas para equipos de clase D están especificados en números absolutos y valores relativos a la potencia activa. Estos límites sólo aplican a equipos con consumos de potencia de hasta 600 W.



Orden Impar h	Máximo valor de corriente permitido	Orden par h	Máximo valor de corriente permitido (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.4	6	0.3
11	0.33	8--40	.23*8/h
13	0.21		
15-39	0.15*15/h		

**Tabla 3.3.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A.

Orden del armónico h	Máximo valor de corriente permitido (%)
2	2
3	30*Factor de potencia del circuito
5	10
7	5
9	7
11-39	3

\*Porcentaje de la corriente fundamental de ingreso

**Tabla 3.4.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C.

Armónico de orden n	Máxima corriente armónica permitida (%)	
	Por Volt (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1	0.77
9	0.5	0.40
13	0.35	0.33
11-39	3.86/h	Ver tabla

**Tabla 3.5.** Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase D.



La norma IEC 61000-3-4 limita las emisiones de equipos de visualización de corrientes mayores a 16 A y hasta 75 A. Conexiones de este tipo de equipos no requiere la aprobación de la empresa de distribución. Límites de armónicos de corrientes basado en esta norma se muestra en la Tabla 3.6.

Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)	Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)
2	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

Tabla 3.6. Límites de corrientes armónicas según norma IEC 61000-3-4.

### IEC 61000-3-6

IEC 61000-3-6 especifica límites de emisión de corriente armónica para equipos conectados a sistemas de Media Tensión MT y Alta Tensión AT. En el contenido de la norma, MT y AT se refieren a voltajes entre 1 y 35 kV y entre 35 y 230 kV, respectivamente. Un voltaje superior a 230 kV es considerado Extra Alta Tensión (EAT), mientras que un voltaje menor a 1 kV es considerado Baja Tensión (BT). Para nuestro caso solamente se analizará la normativa referente a BT.

La norma proporciona niveles de compatibilidad y planificación de voltajes armónicos en sistemas de BT y MT. Nivel de compatibilidad se refiere a un nivel donde la afinidad entre el equipo y su ambiente se logra. El nivel de compatibilidad es normalmente establecido empíricamente para que un equipo sea compatible con su ambiente la mayoría del tiempo. Los niveles de compatibilidad generalmente son basados en el 95% de nivel de probabilidad, la Tabla 3.7 muestra los niveles de compatibilidad para los voltajes armónicos como un porcentaje del voltaje fundamental en sistemas de BT y MT.



Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+1,3*25/h$				

**Tabla 3.7.** Niveles de compatibilidad de voltajes armónicos (En porcentaje fundamental) para sistemas de BT y MT.

Los niveles de planificación son criterios especificados por la compañía de suministro y son más severos que los niveles de compatibilidad, es decir, los niveles de planificación son más bajos que los niveles de compatibilidad. Los niveles de planificación para voltaje armónico expresado en porcentaje para MT son determinados en la Tabla 3.8

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	5	3	4	2	1,6
7	4	9	1,2	4	1
11	3	15	0,3	6	0,5
13	2,5	21	0,2	8	0,4
17	1,6	>21	0,2	10	0,4
19	1,2			12	0,2
23	1,2			>12	0,2
25	1,2				
>25	$0,2+0,5*25/h$				

**Tabla 3.8** Niveles de planificación de voltajes armónicos (En porcentaje fundamental) para sistemas de MT.



### 3.1.3. NORMAS EUROPEAS EN.

#### EN 50160

EN 50160 es un estándar europeo que trata los requerimientos de calidad del suministro para proveedores de ese continente. La norma define los niveles específicos de voltaje característicos que deben ser entregados por los distribuidores de energía eléctrica y métodos para evaluar la conformidad del suministro. EN 50160 fue aprobado por el Comité Europeo para la Estandarización Electrotécnica (CENELEC) en 1994.

EN 50160 prescribe características de voltaje en los puntos de suministro a clientes o en las redes de distribución de Baja y Media Tensión bajo condiciones normales de operación. En otros términos, EN 50160 se confina a características de voltaje en el PCC y no especifica los requisitos de Calidad de la Energía dentro del sistema del suministro o dentro de la instalación del cliente. Los límites de voltaje armónico para EN 50160 son dados en porcentaje del voltaje fundamental. Éstos se aplican a sistemas alimentados ya sea con BT o MT, o sea para voltajes de hasta 35 kV. Los límites de voltajes armónicos se muestran en la Tabla 3.9. La distorsión armónica total del voltaje de alimentación que incluye todos los armónicos hasta el 40 no debe exceder el 8%. Valores de distorsión de orden superior no son tomados en cuenta ya que son demasiado pequeños como para establecer un valor de la referencia significativa.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6-24	0,5
13	3	21	0,2		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

**Tabla 3.9.** Límites de voltajes armónicos (en porcentaje fundamental o p.u.) para sistemas de BT y MT.

Los límites en EN 50160 son casi idénticos a los niveles de compatibilidad para los voltajes armónicos según la norma IEC 61000-3-6 correspondientes a sistemas de BT y MT, salvo la ausencia de los límites armónicos de orden superior en EN 50160.



### 3.1.4 ESTÁNDAR NACIONAL.

En México existe la especificación CFE L0000-45 denominada “Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica” concerniente a la distorsión armónica permisible.

#### ESTÁNDAR DE LA CFE.

#### Límites de distorsión en Voltaje

Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida		
Tensión kV	Componente armónico individual máximo de tensión (CAIMT) %	Distorsión armónica total de tensión (DATT) %
Menor de 1	6	8
de 1 a 35	5	6.5
Mayor de 35	2	3

Tabla 3.10. Límites de distorsión en voltajes.

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

$V_h$ : Magnitud de la componente armónica individual.

h: Orden armónico.

$V_n$ : Voltaje nominal fundamental del sistema.



### Límites de distorsión en Corriente

Los sistemas más robustos pueden transmitir mayores niveles de corrientes armónicas sin producir una distorsión excesiva de voltaje que los sistemas más débiles.

$I_{cc}/I_L$	TDD	$h < 11$	$11 \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 68 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	6.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
$50 < I_{cc}/I_L < 100$	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
$50 < I_{cc}/I_L < 100$	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 50$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$I_{cc}/I_L \geq 50$	3.75%	3.0%	1.5%	1.15%	0.45%	0.22%

**Tabla 3.11** Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida.

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- Los límites deben ser usados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites en 50%
- No se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

$I_h$ : Magnitud de la armónica individual.

$h$ : Orden armónico impar.

$I_L$ : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga.

## CAPÍTULO 4

### SOLUCIONES TÍPICAS A PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA.

Existen diversos problemas relacionados con la calidad de la energía y para cada problema la solución es diferente. Sin embargo, en este capítulo trataremos de dar algunas soluciones típicas a este tipo de problemas, para prevenir o mitigar los efectos dañinos de las cargas no lineales.

#### 4.1 PUESTA A TIERRA.

Independientemente de las medidas de seguridad que actualmente equipen los aparatos eléctricos, se ha visto que todas las instalaciones eléctricas deben incorporar redes de tierra, como medida de protección contra contactos indirectos.

Se puede definir la puesta o conexión a tierra como la conexión eléctrica directa de todas las partes metálicas de una instalación representada en la Figura 4.1, además de la conexión de un cable de tierra aislada, el cual va directamente a la subestación y se conecta con el electrodo de tierra o bien en uno de los puntos de la unión neutro - tierra. Esto soluciona problemas de ruido en la línea e impulsos en modo común provenientes de otros equipos en el sistema de puesta a tierra.

Su principal función es limitar la tensión con respecto a tierra, que puedan presentar en un momento dado las masas metálicas, además de asegurar la operación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados.

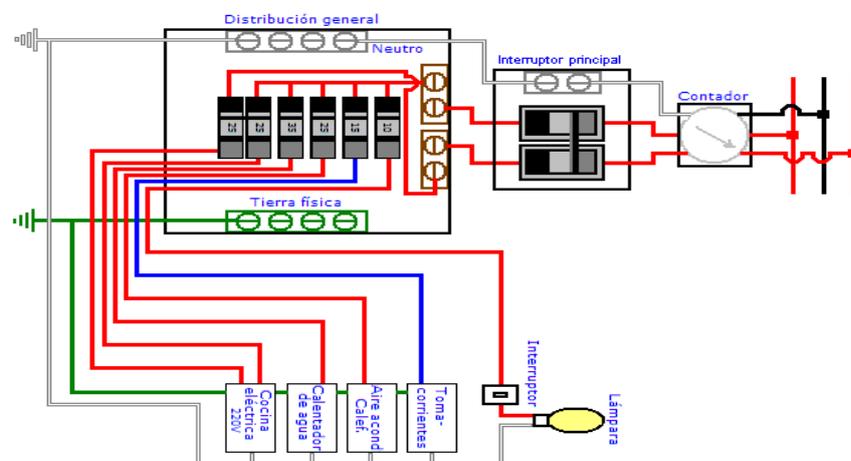


Figura 4.1. Representación esquemática de un sistema con puesta a tierra.

## 4.2 LÍNEA DEDICADA.

A diferencia de la mayoría de las líneas eléctricas que suministran energía a varios equipos ver Figura 4.2.a, una línea dedicada proporciona energía a una sola, es decir se extiende desde la toma de corriente al centro de carga o tablero y se utiliza para las fuentes de tipo no lineal. Esto nos soluciona los problemas de impulsos o cortes momentáneos de energía provenientes de equipos conectados al mismo circuito o tablero, en la figura 4.2.b, vemos un ejemplo de una línea dedicada para equipo sensible únicamente y una que es común en la cual se conectan indistintamente tanto equipo sensible como otra clase de equipo.

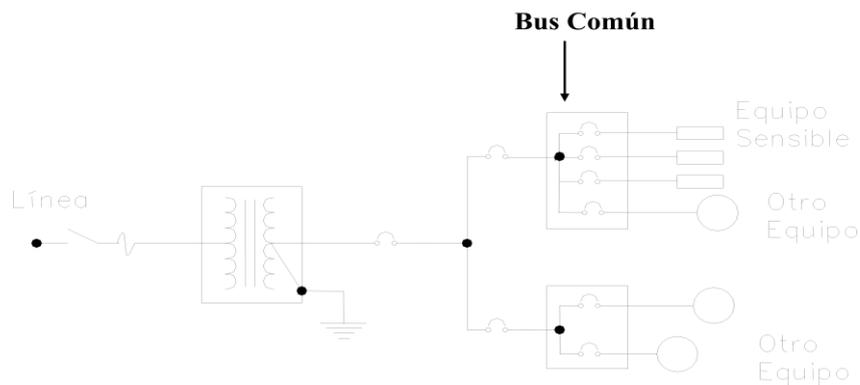


Figura 4.2.a. Representación de un sistema sin Línea Dedicada.

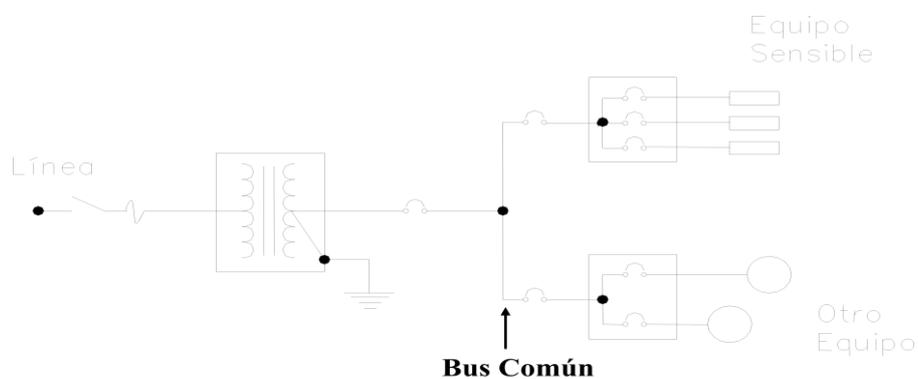


Figura 4.2.b. Representación de una Línea Dedicada.

### 4.3 TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO.

Los transformadores de aislamiento son máquinas eléctricas las cuales sirven para solucionar la presencia de ruido, contaminación de armónicas (secuencia cero) y finalmente las caídas de tensión, éstos lo logran acoplado los voltajes en un sistema eléctrico, lo cual les permite resolver problemas de calidad de energía y mejorar las condiciones de operación de las cargas eléctricas.

Éstos pueden ser de tipo normal o con un factor K, el cual además de brindar la protección mencionada, es capaz de soportar las corrientes armónicas, e incluso se pueden encontrar con filtros para la mitigación de las mismas.

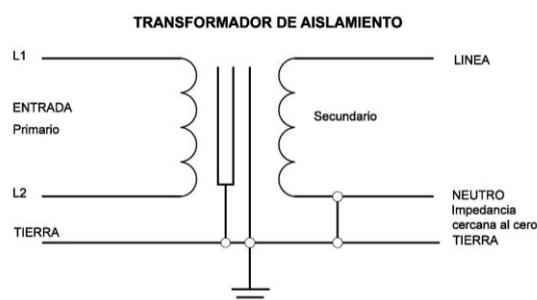
El contenido de armónicos en un sistema de distribución es indicado por un número llamado Factor “K”. Valores muy altos de “K” indican la presencia de armónicos de alto orden en la carga, de los que solo pueden ser medidos utilizando instrumentos especiales.

La potencia equivalente del transformador es la correspondiente a la sinusoidal que provoque las mismas pérdidas, que las producidas con la corriente no sinusoidal aplicada. Esta potencia equivalente es igual a la potencia basada en el valor eficaz de la corriente no sinusoidal multiplicada por el factor “K”. Por tanto, como una forma de cuantificar el calentamiento producido en los transformadores cuando se presentan armónicos, se define el Factor “K” como aquel valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador.

Los transformadores de aislamiento (Figura 4.3) con protección electrostática se utilizan para proteger el equipo eléctrico sensible a señales de alta frecuencia de modo común las cuales se pueden pasar del primario al secundario del transformador a través de su capacitancia parásita entre devanados. Al poner una coraza electrostática entre ambos devanados y ponerla a tierra se elimina la capacitancia parásita y se evita que las señales de modo común pasen de un devanado al otro. Estas señales de modo común son generadas por los rayos, las ondas inducidas por el encendido de interruptores, los motores y variadores de velocidad que inducen ruido en la línea.

Las funciones primordiales de los transformadores de aislamiento son:

- Proveer aislamiento de un circuito a otro.
- Supresión de ruido que viaja de la fuente a las cargas sensibles.
- Supresión de ruido en el punto donde se originan, previniendo su inducción de la fuente a los alimentadores.



**Figura 4.3.** Representación de un Transformador de Aislamiento.

#### 4.4 FILTROS.

Los filtros son elementos eléctricos lineales que impide el paso de una determinada frecuencia o gama de frecuencias dependiendo de las características del filtro y su capacidad. Solucionan problemas de corrientes armónicas, al drenar la corriente armónica de la frecuencia en la que se encuentre sintonizado. Pero la colocación de los filtros se debe realizar con cuidado, ya que están muy limitados por la capacidad de corriente que son capaces de filtrar y, adicionalmente pueden provocar resonancias en el sistema eléctrico.

- **Filtros pasivos.** Construidos principalmente con inductancias y capacitores ajustados para bloquear o absorber determinados armónicos. Pueden crear resonancias en el sistema eléctrico.
- **Filtros activos.** Sofisticados sistemas electrónicos todavía costosos y delicados de una aceptación parcial. Pueden mitigar múltiples armónicas y no generen resonancias.

#### 4.5 SUPRESORES DE SOBRETENSIÓN TRANSITORIA (O DE PICOS).

Un supresor es capaz de bloquear sobretensiones que se producen en el suministro eléctrico o por descargas atmosféricas, además tiene la capacidad de llevarlas de forma segura lejos de los equipos a proteger. Éste nos protege contra elevaciones repentinas y de corta duración en la tensión, aunque si ésta se presenta con una duración mayor a la establecida el equipo se puede quemar, al igual si el valor de tensión RMS que se tiene en la línea es mayor al que se especifica en el equipo, representado en la Figura 4.4.

Los supresores de picos se clasifican en tres tipos los cuales son:

Tipo 1: Se instala inmediatamente donde llega la acometida del sistema o el interruptor principal, es comunmente llamado apartarayos secundario.

Tipo 2: Por su funcion va instalado en el centro de carga o tablero de distribución y se usa como una proteccion en cascada, en el caso de un circuito dedicado a cargas sensibles.

Tipo 3: Es instalado directamente en el punto de contacto, sirven principalmente para prevenir que el usuario pueda insertar picos al conectar o utilizar la carga, ademas de cuidar a un equipo en especifico.



Figura 4.4. Representación de un Supresor de Sobretensión.

#### 4.6 TRANSFORMADOR DE TENSION CONSTANTE O FERRORRESONANTE.

Son transformadores que cuentan con devanados secundarios que compensan y neutralizan los cambios en la tensión, además de tener un condensador conectado. Con lo que se proporciona una realimentación magnética. Éstos son capaces de aislar la carga y de regular la salida de tensión, por lo que protegen contra impulsos, ruidos, sobretensiones, caídas de tensión y corrientes armónicas.

Características:

- Ideal para cargas ligeras constantes.
- Normalmente tienen relación de transformación 1.1.
- Generalmente se especifica con capacidad cuatro veces más grande que la carga.
- Si es sobrecargado se colapsa el voltaje a cero.
- Diagrama en la Figura 4.5.

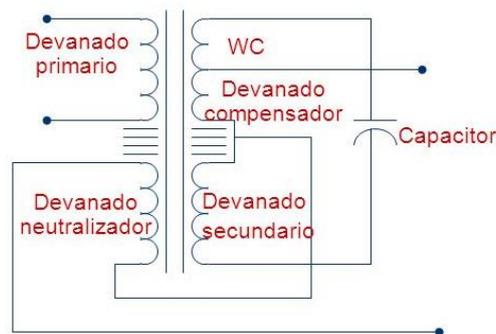


Figura 4.5. Diagrama simplificado de un transformador de tensión constante.

#### 4.7 ACONDICIONADOR O REGULADOR DE LÍNEA.

Son dispositivos electrónicos que controlan la salida de tensión mediante dispositivos electrónicos brindando una salida con menor variación. Estos tienen la capacidad de solucionar los problemas de sags, swells, transitorios y aíslan las cargas de otras fuentes.

Los acondicionadores ferromagnéticos son exclusivamente monofásicos, trabajan con el principio de saturación del núcleo (histéresis), este tipo de acondicionadores es muy usado para trabajos donde las condiciones de energía son muy adversas y no se les puede estar dando mantenimiento constante, generalmente son muy utilizados en la industria para alimentar centros de carga de equipo de cómputo.

Los acondicionadores electrónicos cuentan con un sofisticado sistema de control, el cual constantemente monitorea el voltaje de entrada al acondicionador y por medio de su sistema de control ajusta internamente al transformador para que entregue el voltaje que se requiere de salida.

Para poder seleccionar un acondicionador de línea ideal, primero se tiene que tener bien definido el uso que se le va a dar, sobre todo en un sistema monofásico, para poder determinar si se instala un ferorrsonante o un electrónico.

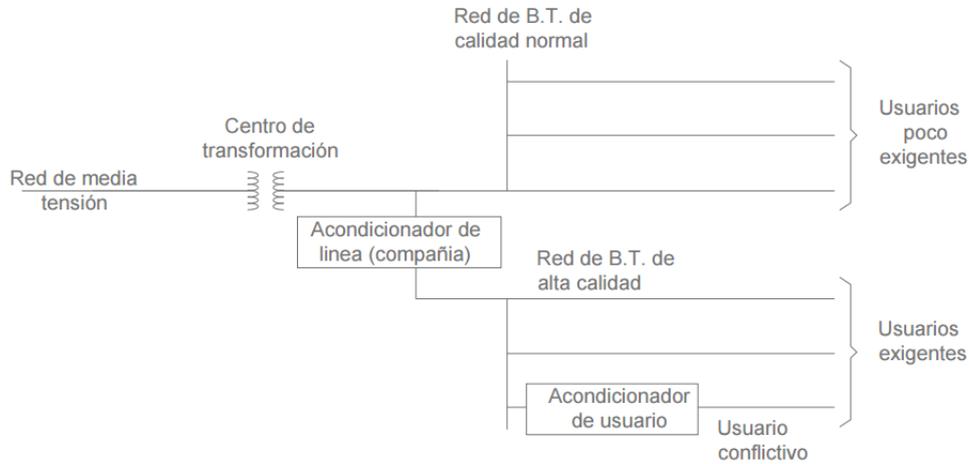


Figura 4.6 Diagrama de un acondicionador de línea.

#### 4.8 SISTEMAS DE ENERGÍA ININTERRUMPIDA.

Un UPS o sistema de energía ininterrumpida es una fuente de suministro eléctrico que posee una batería con el fin de seguir dando energía a un dispositivo en el caso de interrupción eléctrica, los denominados off-line se encargan de monitorear la entrada de energía, cambiando a la batería si detecta problemas con el suministro.

Cualquiera que sea el tipo estos sistemas proveen protección contra transitorios, sags, swells, aíslan cargas, ruidos y algunos pueden filtrar armónicos.

Estos equipos son utilizados normalmente para proteger de los cortes de energía, pero además brindan protección a los equipos, en la siguiente imagen vemos en representación su uso.

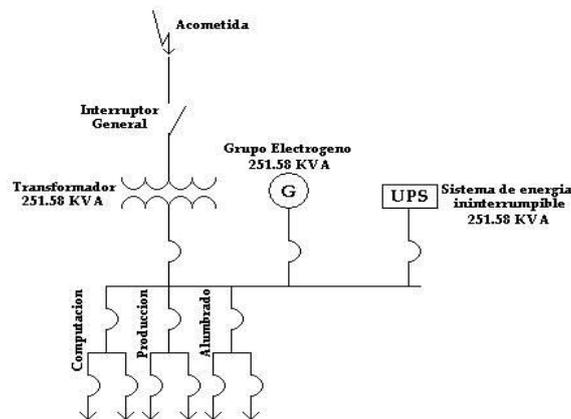


Figura 4.7. Representación de un Sistema de Energía Ininterrumpida.



#### 4.9 COMPARACIÓN DE MÉTODOS.

Los métodos que nos pueden ayudar a mitigar los diferentes tipos de disturbios y problemas de calidad de energía, dependiendo del tipo de instalación y el tipo de conexión. En la Tabla 4.8., de muestra una solución a cada tipo de problemas presentados.

	Impulso	Sobretension	Sags	Swells	Armonicos	Ruidos	Corte del suministro
Puesta a tierra	si	no	no	no	no	si	no
Linea dedicada	si	no	no	no	no	si	no
Transformador de aislamiento	si	no	no	no	no	no	no
Filtros	no	no	no	no	si	no	no
Supresores	si	no	no	no	no	no	no
Transformadores ferrosonantes	si	si	si	si	si	si	no
Acondicionador de linea	si	si	si	si	si	si	no
UPS	si	si	si	si	si	si	si

Tabla 4.8. Resumen de soluciones.



## CAPÍTULO 5

### **BREVE ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE 6.6 kV.**

#### **5.1 RESUMEN DEL ESTUDIO.**

En este reporte realizado en el año 2009 por la empresa privada COEMSA Constructora Electromecánica S.A. de C.V., se encuentra de manera general la información más importante de las mediciones que se realizaron, así como las propuestas para la mejora de las instalaciones eléctricas y calidad de la energía que se dieron en ese momento.

Es importante mencionar que gracias a este tipo de estudios se pudo determinar el cambio del voltaje de distribución en Ciudad Universitaria, el cual era de 6.6 kV al que se tiene actualmente de 23 kV.

En la siguiente tabla, se anotaron los parámetros eléctricos de mayor importancia registrados durante las mediciones, del análisis de la información se pudo concluir que la operación del sistema eléctrico de la UNAM no presentaba graves problemas de calidad de la energía, pero debía mejorarse. A continuación, se mencionan las anomalías más importantes detectadas:

- Los niveles de distorsión armónica en voltaje y en corriente sobrepasaban los niveles sugeridos por el IEEE en varios transformadores.
- Se presentaban bajos factores de utilización en la mayoría de los transformadores.
- En caso de que se contemplara cambiar el transformador por alguno de diferente capacidad se recomendaba realizar nuevamente el cálculo con los datos del nuevo transformador.
- Al llevar a cabo estas sugerencias se mejoraría la operación del sistema eléctrico de las subestaciones de los diversos edificios de Ciudad Universitaria UNAM.

Subestación	Capacidad del Transformador [kVA]	Demanda promedio [kW]	Demanda máxima [kW]	Demanda promedio [A]	Demanda máxima [A]	Factor de potencia	% Factor de utilización (kVA)	Transitorios	% Distorsión Armónica en Corriente	% Distorsión Armónica en Voltaje
Posgrado Psicología	500	45.21	72.95	123.63	615.83	0.94	15.53	1A y 7D	15.99	1.78
Dirección General de Publicaciones	500	121.3	199.8	309.7	553.26	0.95	40.86	1A y 3D	21.09	1.23
Torre de Rectoría	500	134.9	249.5	368.53	676.4	0.92	51.28		20.74	1.54
Relaciones Laborales	225	14.9	27.77	87.81	163.4	0.5	25.6		12.82	1.45
Extienda UNAM	300	61.49	106.1	171.03	294.13	0.92	36.5		19.12	1.41

**Tabla 5.1.** Resumen de los valores representativos del estudio en el año 2009.



## 5.2. REPORTE DE MEDICIONES.

### GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE VOLTAJE.

Para simplificar el análisis realizado por la empresa privada COEMSA se resaltaron los casos más representativos, así como las gráficas obtenidas ya que no es necesario duplicar el estudio, para el caso de análisis, sino solo mostrar los problemas que se pudieron determinar a partir de ese estudio realizado en el lado secundario de algunos transformadores alimentados en el sistema de 6.6 kV en el año 2009.

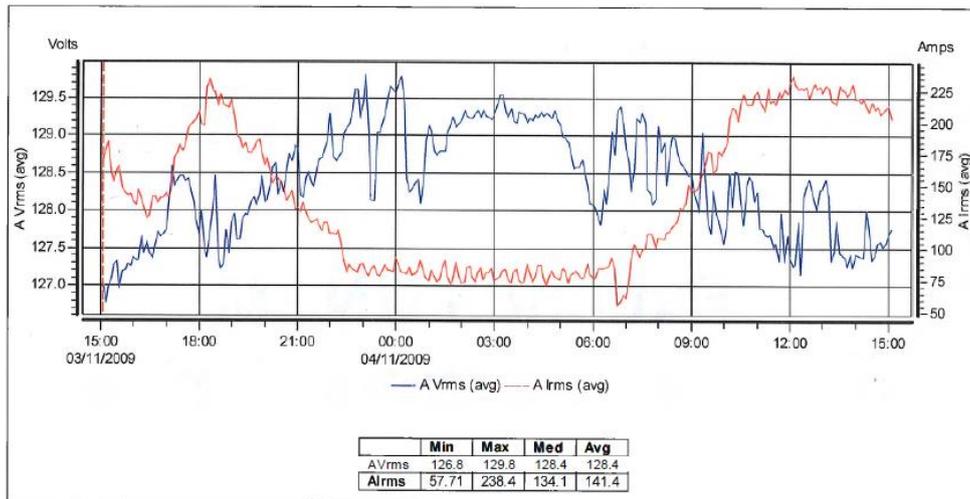
Valores RMS Promedio entre las 3 Fases			
Subestacion	Voltaje Promedio [V]	Variación	Desbalance
Extienda UNAM	127.63	0.49%	1.09%
Posgrado psicología	128.43	1.11%	0.31%
Direccion general publicaciones	127.8	0.62%	0.70%
Torre de rectoria	127.16	0.12%	0.70%
Relaciones laborales	128.5	1.16%	0.15%

Tabla 5.2. Comportamiento de voltaje.

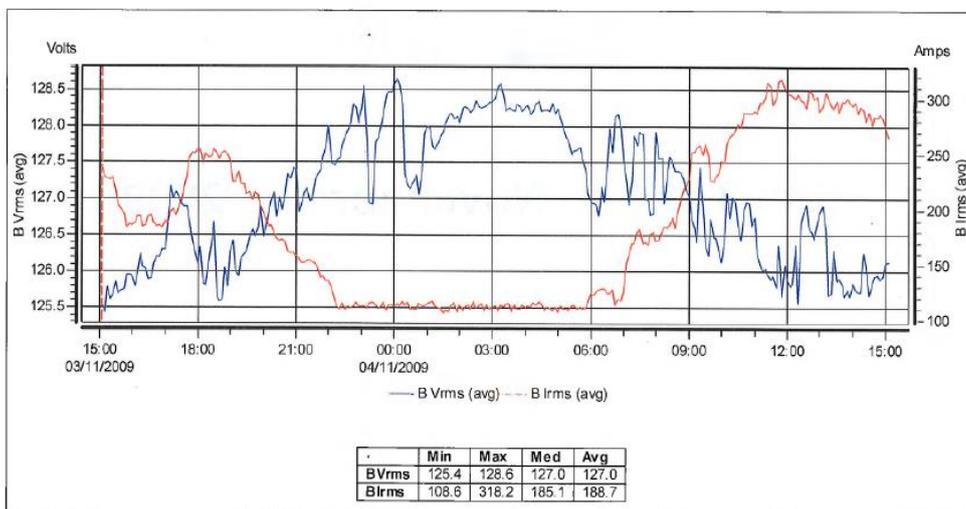
De las cinco subestaciones estudiadas, la subestación con valores promedio de voltaje más altos encontrados fue la de Relaciones Laborales, con un promedio de 128.5V el cual es un valor aceptable, pero se encuentra un 1.166% arriba del voltaje nominal, en el caso contrario la subestación con el promedio más bajo es Torre de Rectoría con un valor promedio de 127.16v que corresponde a un 0.12% arriba del voltaje nominal.

Por otro lado, la subestación que presenta el mayor desbalance de voltaje entre fases del sistema es Ex Tienda UNAM con un desbalance de 1.09% lo cual es prácticamente despreciable mientras que la subestación con menos desbalance presenta un 0.15% que nuevamente es Relaciones Laborales.

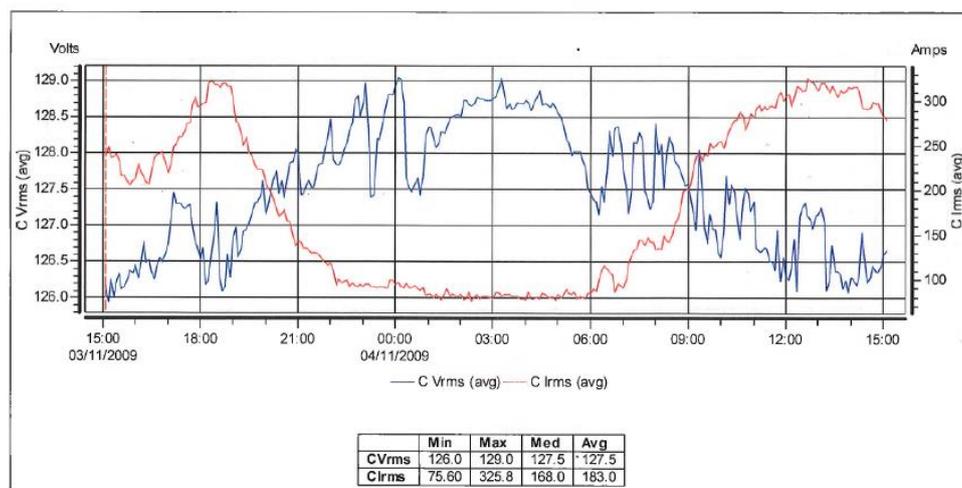
A continuación, mostramos las gráficas correspondientes a Extienda UNAM para este estudio.



Gráfica 5.1. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase A.



Gráfica 5.2. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase B.



Gráfica 5.3. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase C.

## GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE CORRIENTE POR FASE.

De la misma manera que en el punto anterior únicamente remarcaremos aquellos valores sobresalientes durante el estudio, comenzando con el transformador que presenta la mayor corriente con 368.53 A en el caso de Torre de Rectoría, el mayor desbalance entre fases A y B está dado por el transformador de Relaciones Laborales el cual presenta un 26.26% de desbalance y el valor máximo promedio fue alcanzado por el transformador de la subestación de Torre de Rectoría con 676.4 A.

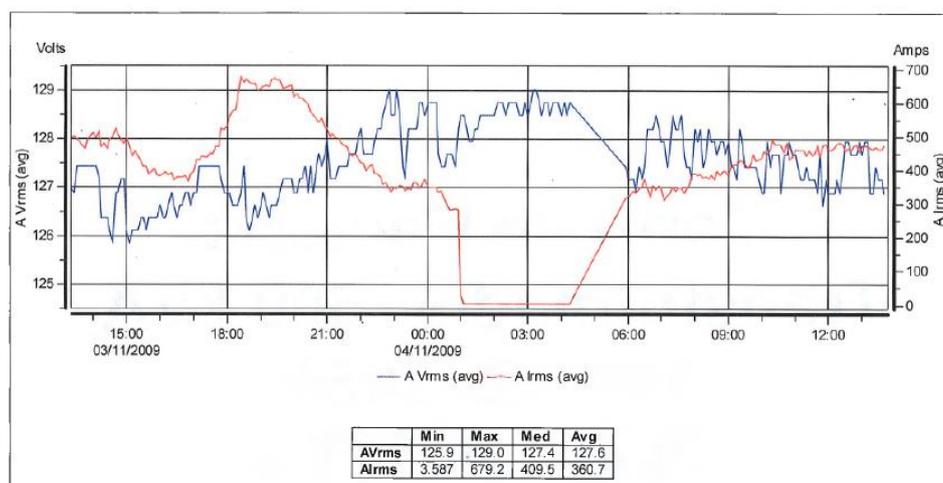
Corriente total promedio en el transformador			
Subestación	Corriente [A]	Desbalance entre fases	Valores máximos promed
Extienda UNAM	171.03	25.06%	294.13
Posgrado Psicología	123.63	12.05%	615.83
Dirección General Publica	329.7	8.88%	553.26
Torre de Rectoría	368.53	8.01%	676.4
Relaciones Laborales	87.81	26.26%	163.4

Tabla 5.3. Comportamiento de corriente.

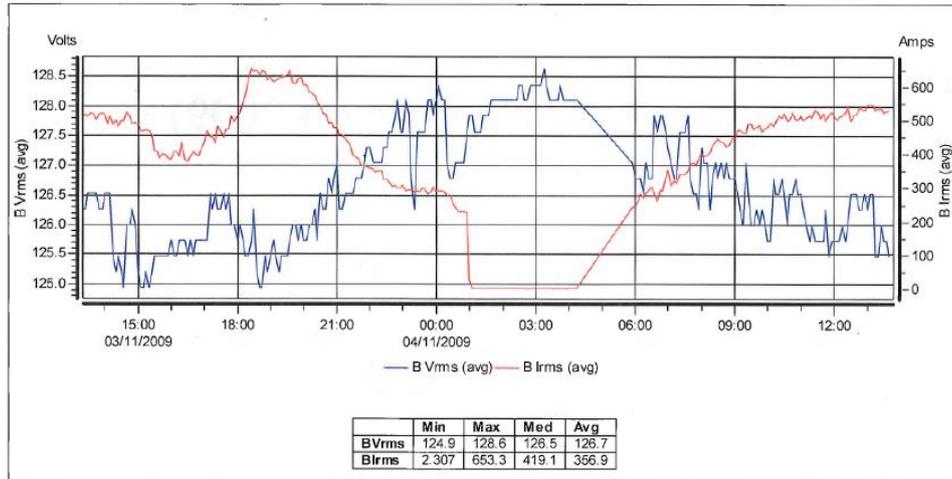
Corriente total promedio en el trasformador en el neutro		
Subestacion	Corriente[a]	maximo promedio plena carga
Extienda UNAM	101	178.7
Posgrado psicologia	40.76	68.91
Direccion general publicaciones	148.6	247.3
Torre de rectoria	91.89	127.2
Relaciones laborales	36.75	79.53

Tabla 5.4. Comportamiento de corriente en el neutro.

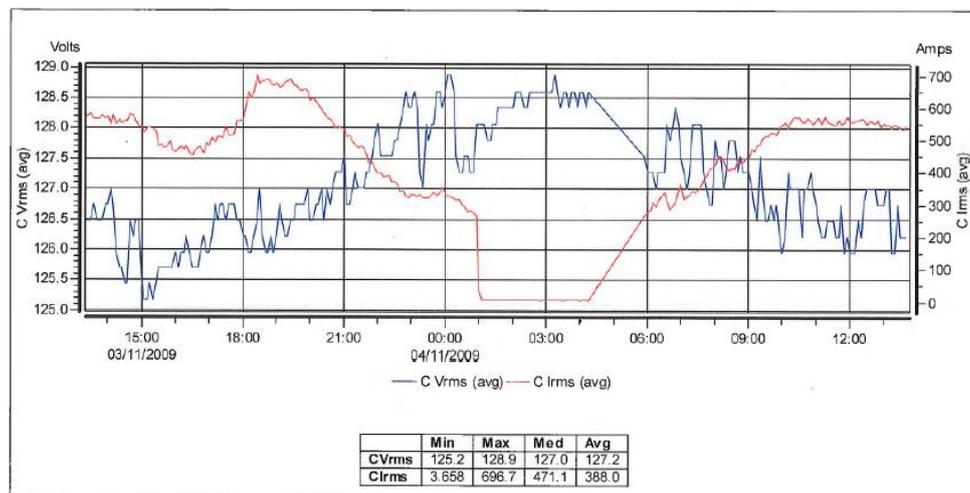
Para ilustrar el caso de las mediciones de corriente tomaremos como ejemplo el caso de Torre de Rectoría en donde se registraron los valores más altos de la misma.



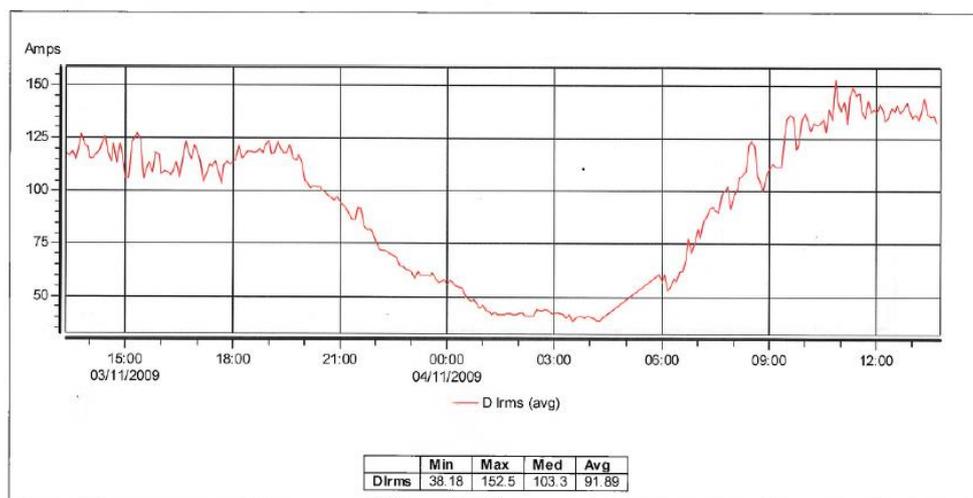
Gráfica 5.4. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase A.



Gráfica 5.5. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase B.



Gráfica 5.6. Comportamiento de la tensión y la corriente en la fase C.



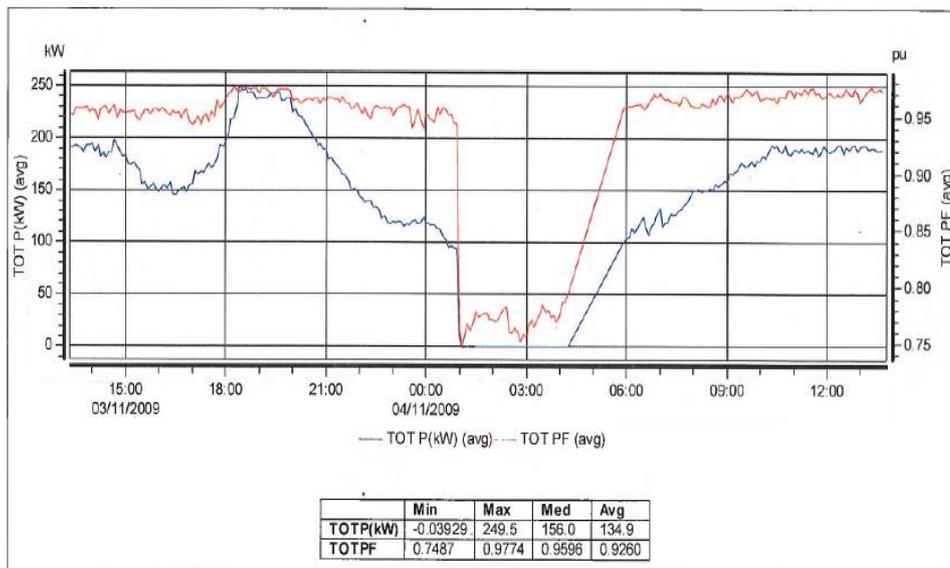
Gráfica 5.7. Comportamiento de la corriente en el neutro.

## GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA REAL PROMEDIO Y LA POTENCIA REACTIVA.

En cuanto a la potencia real promedio, el transformador que mostró el mayor valor es el de Torre de Rectoría con un valor de 134.9kW, el de menor potencia entregado es el de Relaciones Laborales quien apenas alcanza 14.90 kW, refiriéndonos a valores promedio máximos el transformador con mayor potencia es de igual manera Torre de Rectoría con 249.5 kW seguido por Dirección General de Publicaciones y finalmente los valores promedios mínimos registrados corresponden al transformador ubicado en Relaciones Laborales con un valor de 27.77 kW. El factor de potencia registrado por cada subestación y la potencia real son los siguientes.

Potencia real y factor de potencia				
Subestación	Potencia kW	Valores promedios de potencia kW	Factor de potencia promedio atrasado	Fator de potencia máximo atrasado
Extienda UNAM	61.49	106.1	0.9243	0.9747
Posgrado Psicología	45.21	72.94	0.948	0.9543
Direccion General de Publicaciones	121.3	199.8	0.9559	0.9643
Torre de Rectoría	134.9	249.5	0.926	0.9774
Relaciones Laborales	14.9	27.77	0.5069	0.8983

**Tabla 5.5.** Comportamiento de potencia real y factor de potencia.



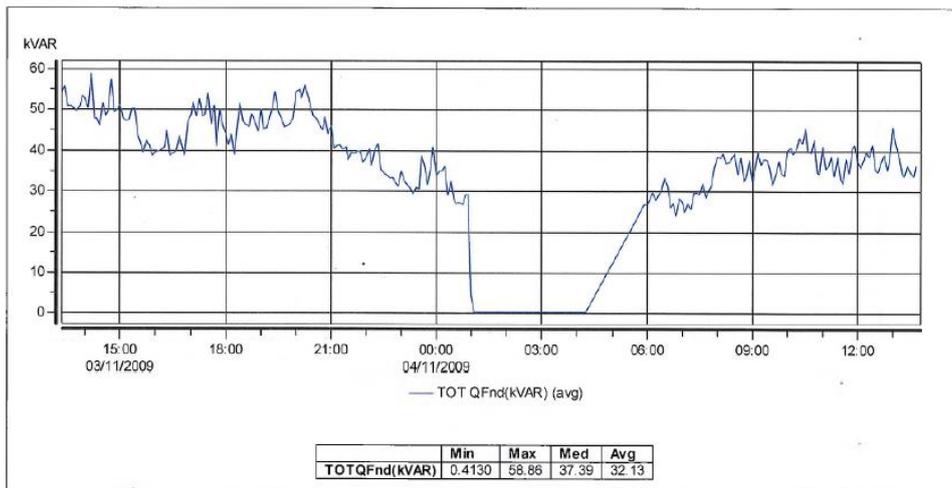
**Gráfica 5.8.** Comportamiento de la potencia real y factor de potencia en las fases de la Torre de Rectoría

La potencia reactiva con mayor valor registrado es de 32 kVAR perteneciente al transformador de Torre de Rectoría quien también posee el valor promedio máximo con un valor de 58.86 kVAR, los valores mínimos obtenidos son los correspondientes a Posgrado de Psicología con 10.41 kVAR y 16.55 kVAR.



Potencia Reactiva		
Subestacion	potencia kVAR	valores promedios potencia kVAR
Extienda UNAM	14.96	26.61
Posgrado psicología	10.41	16.55
Direccion general publicaciones	20.04	35.07
Torre de rectoria	32.13	58.86
Relaciones laborales	29.59	53.45

**Tabla 5.6.** Comportamiento de la potencia reactiva.



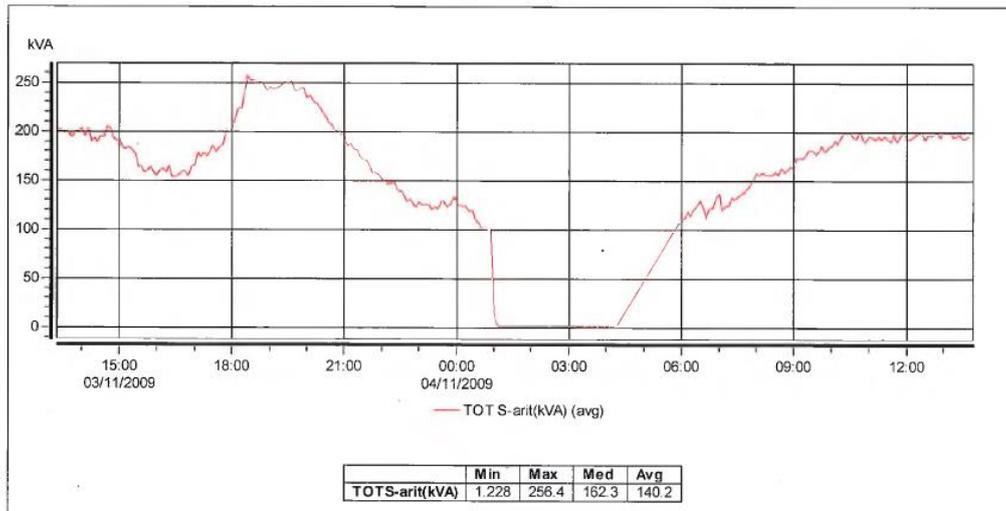
**Gráfica 5.9.** Comportamiento de la potencia reactiva en la Torre de Rectoría.

### GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA APARENTE.

Ya vimos los valores en potencia real y reactiva, en potencia aparente el transformador con el mayor valor obtenido fue Torre de Rectoría de nuevo quien además cuenta con el valor máximo registrado y el mayor factor de utilización con 256.4 kVA y 51.28% respectivamente, ahora los valores mínimos registrados en potencia aparente se presentaron en Relaciones Laborales con 33.90 kVA y el transformador con menor porcentaje de utilización fue el ubicado en Posgrado de Psicología con un 15.05%.

Potencia aparente			
Subestacion	potencia kVA	valores promedios potencia kVA	Factor de Utilizacion
Extienda UNAM	65.33	109.5	36.50%
Posgrado psicología	47.63	75.26	15.05%
Direccion general publicaciones	126.1	204.3	40.86%
Torre de rectoria	140.2	256.4	51.28%
Relaciones laborales	33.9	57.6	25.60%

**Tabla 5.7** Comportamiento de la potencia aparente.



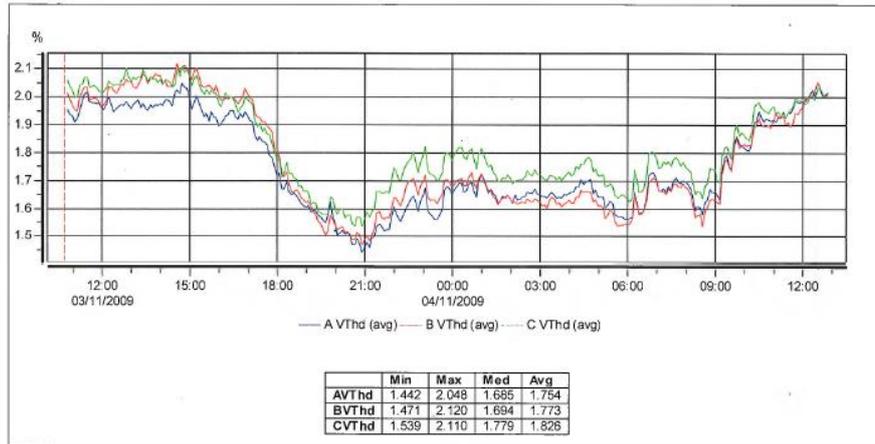
**Gráfica 5.10.** Comportamiento de la potencia aparente en la Torre de Rectoría.

## GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE Y CORRIENTE POR FASE.

El análisis de estas gráficas es más extenso por lo cual no es conveniente realizar una tabla o resumen de la misma. Estos fueron los resultados obtenidos para los diferentes transformadores ubicados en las distintas subestaciones que fueron estudiadas.

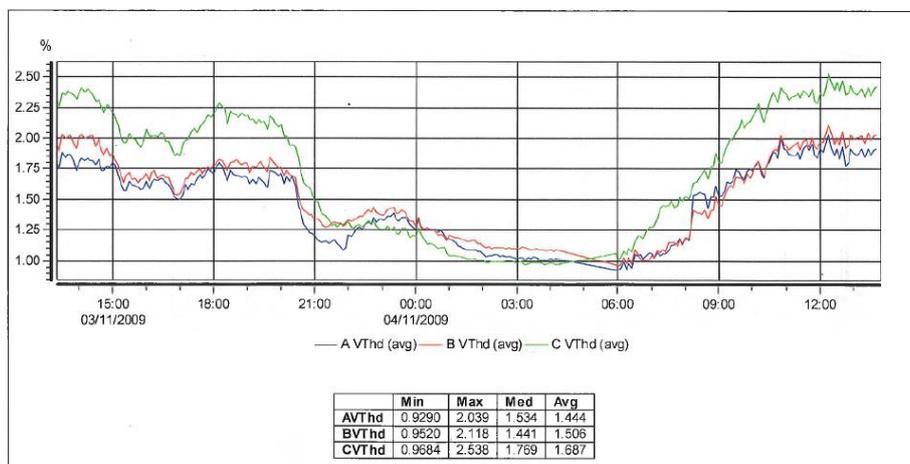
Análisis del comportamiento de Factor de Distorsión Armónico de Voltaje:

- Extienda UNAM de las tres fases el promedio fue de 1.413% valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519 que sugieren como un valor máximo para circuitos en baja tensión, no rebasar de un 5%. Las armónicas de voltaje de mayor importancia son las segundas, tercera, quinta, séptima, novena, onceava y treceava y con valores de 0.378%, 1.021%, 1.349%, 0.760%, 0.247%, 0.291% y 0.247% respectivamente, del voltaje a la frecuencia fundamental.
- Posgrado de Psicología de las tres fases el promedio fue de 1.784%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519 que sugieren como un valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar un 5%. Las armónicas de voltaje de mayor importancia son la segunda, tercera y quinta con valores de 0.39%, 0.36% y 1.805% respectivamente, del voltaje a la frecuencia fundamental.



**Grafica 5.11.** Comportamiento del factor de distorsión armónica de voltaje de Posgrado de Psicología.

- Dirección General de Publicaciones de las tres fases el promedio fue de 1.23% valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519 que sugieren como valor máximo en circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de voltaje de mayor importancia son la segunda, tercera, quinta, séptima con valores de 0.40%, 0.87%, 1.16% y 0.59% respectivamente, del voltaje a la frecuencia fundamental.
- Torre de Rectoría de las tres fases el promedio fue de 1.54% valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519 que sugieren como valor máximo en circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de voltaje de mayor importancia son segunda, tercera, quinta, séptima y novena con valores de 0.38%, 0.81%, 1.53%, 0.97% y 0.36% respectivamente, del voltaje a la frecuencia fundamental.

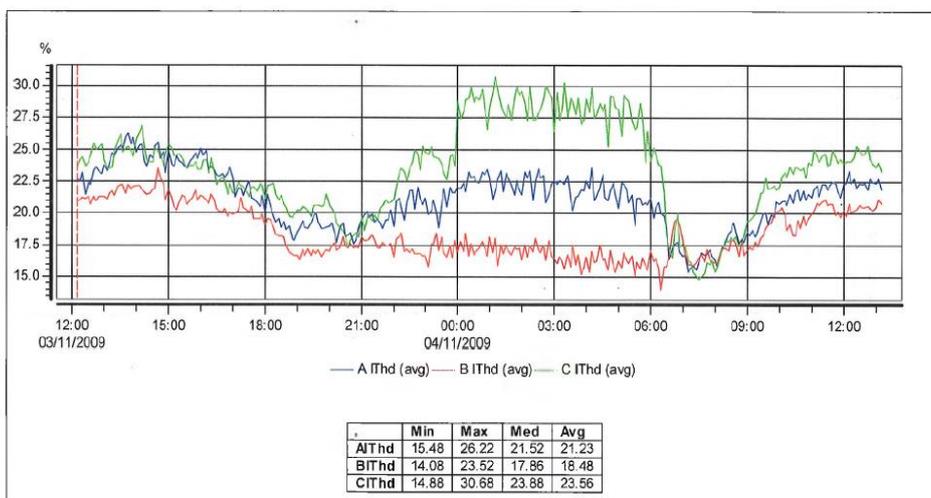


**Grafica 5.12.** Comportamiento del factor de distorsión armónica de voltaje de Torre de Rectoría.

- Relaciones Laborales de las tres fases el promedio fue de 1.459% valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519 que sugieren como valor máximo en circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de voltaje de mayor importancia son segunda, tercera, quinta, séptima, novena, onceava, treceava y quinceava con valores de 0.38%, 0.71%, 0.64%, 0.60%, 0.35%, 0.24%, 0.18% y 24% respectivamente, del voltaje a la frecuencia fundamental.

Análisis del comportamiento de Factor de Distorsión Armónico de Corriente:

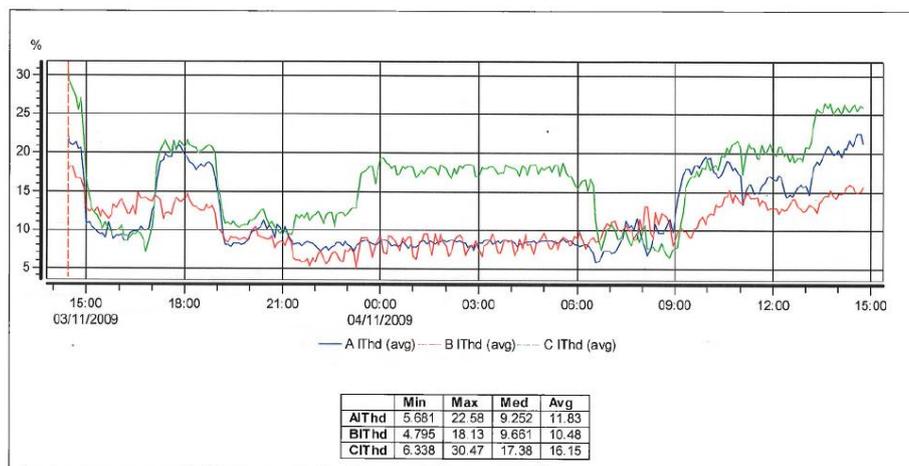
- Extienda UNAM de las tres fases fue de 19.12% si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el lado de baja tensión, éste no se encuentra dentro de las recomendaciones que para este circuito no debe ser mayor a 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil. Las armónicas de corriente de mayor importancia son la tercera, quinta, séptima y novena, con valores de 17.24%, 11.49%, 4.62% y 1.61% respectivamente, de corriente a la frecuencia fundamental.
- Posgrado de Psicología de las tres fases fue de 15.89% si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el lado de baja tensión, éste se encuentra fuera de las recomendaciones que para este circuito no debe ser mayor a 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil. Las armónicas de corriente de mayor importancia son tercera, quinta, séptima y novena con valores de 15.84%, 14.78%, 8.88% y 3.51% respectivamente, de corriente a la frecuencia fundamental.
- Dirección General de Publicaciones de las tres fases fue de 21.09% si aplicamos las normas de las IEEE 519 en el lado de baja tensión, éste se encuentra fuera de las recomendaciones que para este circuito no debe ser mayor 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil. Las armónicas de corriente de mayor importancia son tercera, quinta y séptima con valores de 15.02%, 15.16% y 4.91% respectivamente, de corriente a la frecuencia fundamental.



Gráfica 5.13. Comportamiento del factor de distorsión armónica de corriente en Dirección General de Publicaciones.



- Torre de Rectoría de las tres fases fue de 20.74% si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el lado de baja tensión, éste se encuentra fuera de las recomendaciones que para este circuito no debe ser mayor a 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil. Las amónicas de corriente de mayor importancia son la tercera, quinta, séptima y novena con valores de 6.04%,7.8%, 3.12% y 0.97% respectivamente, de corriente a la frecuencia fundamental.
- Relaciones Laborales de las tres fases fue de 12.82% si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el lado de baja tensión, éste se encuentra dentro de las recomendaciones que para este circuito no debe ser mayor a 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil. Las armónicas de corriente de mayor importancia son tercera, quinta, séptima, novena y onceava con valores de 12.15%, 9.65%, 6.71%, 2.47% y 2.03% respectivamente, de corriente a la frecuencia fundamental.



Gráfica 5.14. Comportamiento del factor de distorsión armónico de corriente en Relaciones Laborales.

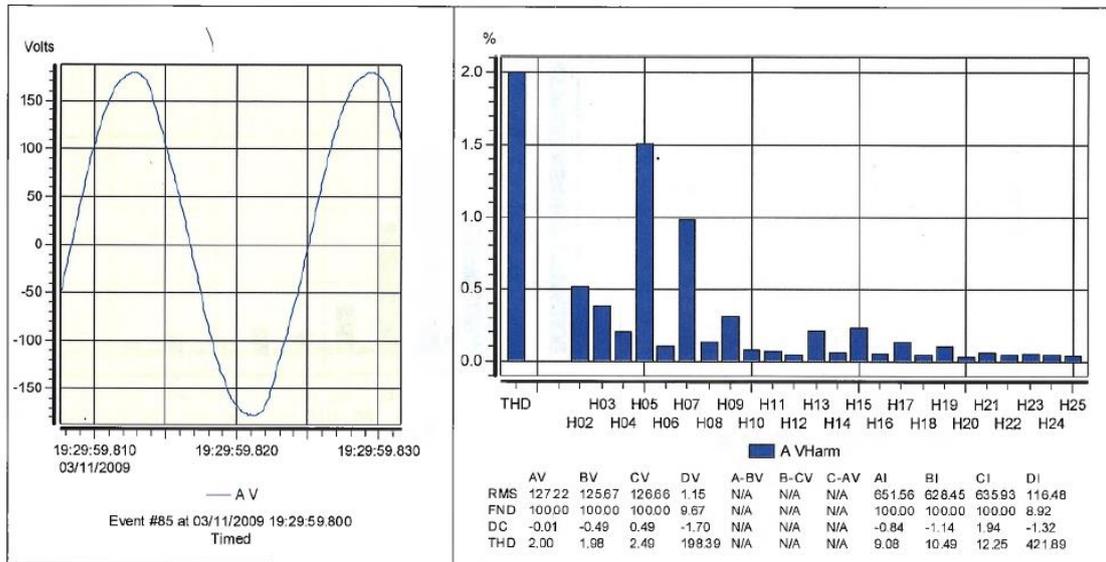
### FORMAS DE ONDAS Y ESPECTROS ARMÓNICOS TÍPICOS DE LAS SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.

En este punto veremos el comportamiento de las formas de onda y espectros armónicos de los voltajes y corriente, el factor K de la corriente y un incidente que ocurrió en Torre de Rectoría. En la siguiente tabla mostramos los valores del factor K obtenidos:

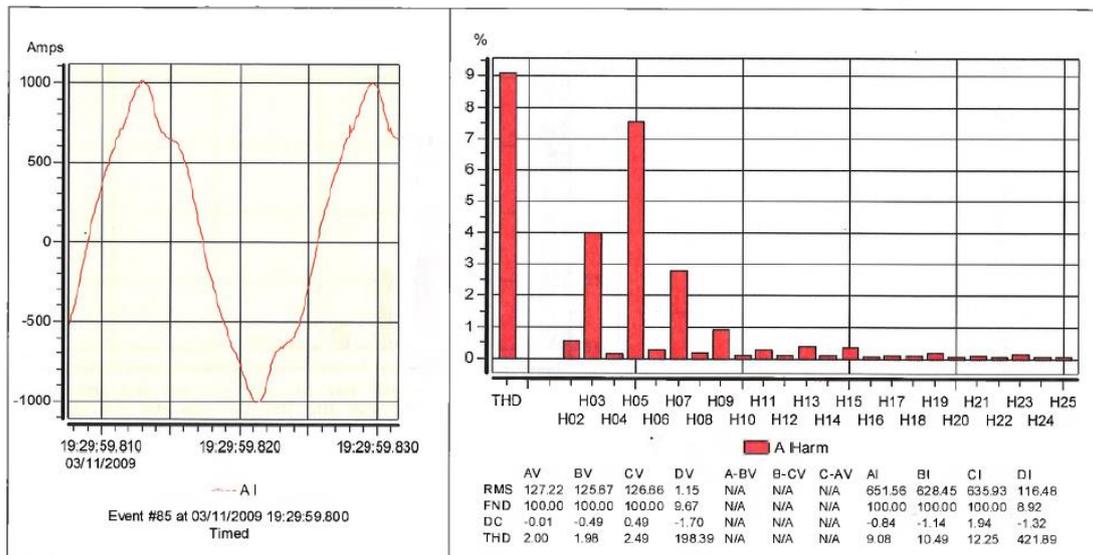
Factor k	
Subestacion	factor k
Extienda UNAM	1.82
Posgrado psicología	1.91
Direccion general publicaciones	1.85
Torre de rectoria	1.69
Relaciones laborales	1.79

Tabla 5.8 Valores obtenidos del factor k.

En el transformador de Torre de Rectoría en las tres fases fue de 1.69 promedio a plena carga por lo que no representa ningún riesgo para la operación del transformador. En la noche cuando se abrió el interruptor principal este factor subió hasta 54.45, y sin embargo este valor es irrelevante por no presentarse carga conectada. Analizando los demás valores podemos concluir que los valores registrados para las diferentes dependencias so representan ningún riesgo para las instalaciones.



Gráfica 5.15 Gráfica representativa de forma de onda y espectro armónico de tensión en Torre de Rectoría.

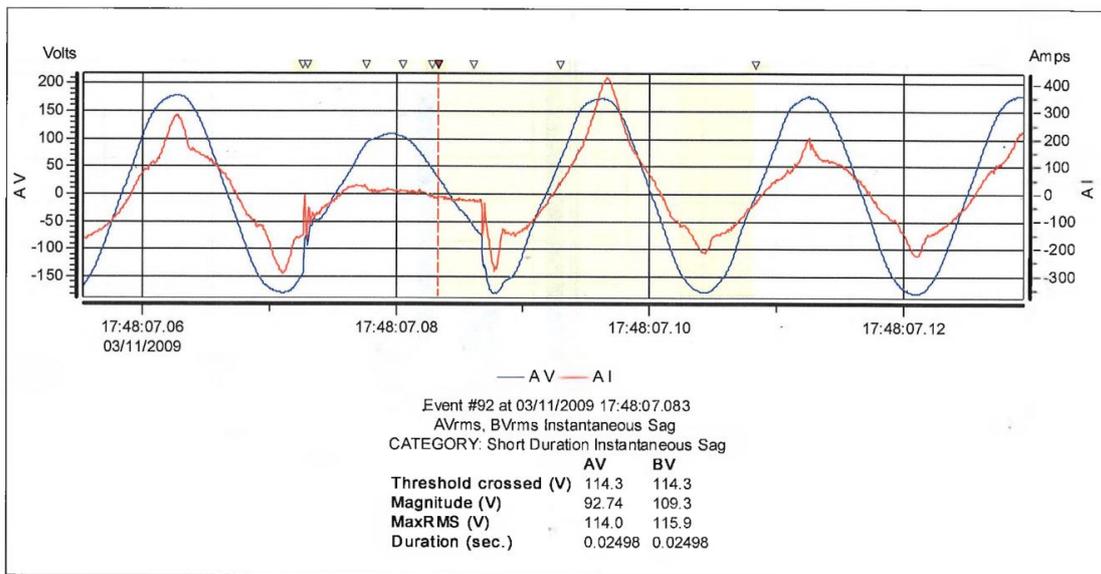


Gráfica 5.16. Gráfica representativa de forma de onda y espectro armónico de corriente en Torre de Rectoría.

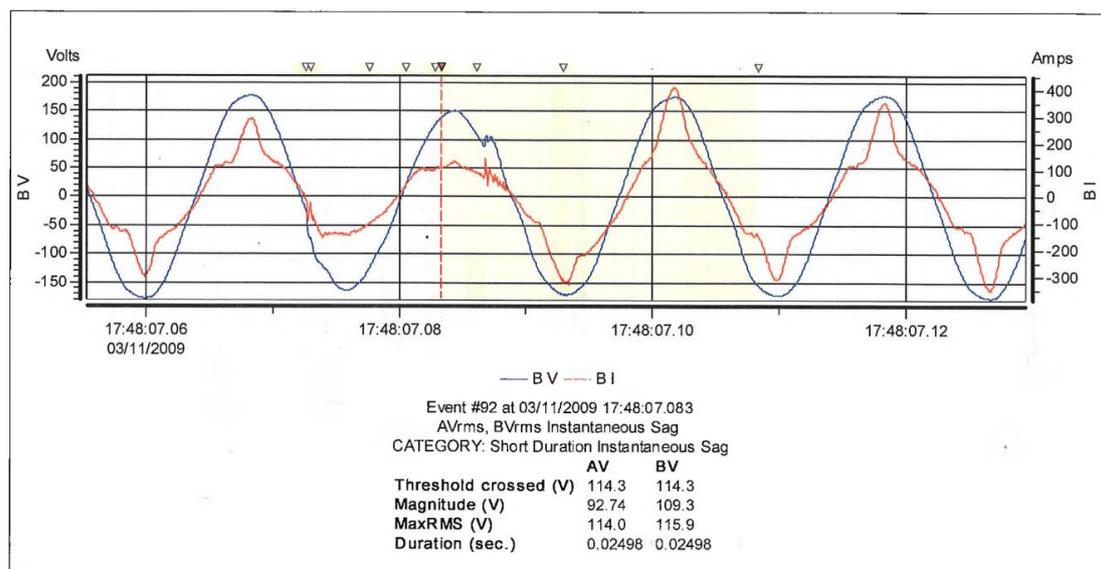
## DISTURBIOS ELÉCTRICOS MÁS REPRESENTATIVOS EN CASO DE HABERSE PRESENTADO ALGUNOS.

Ahora revisaremos los disturbios eléctricos encontrados durante el estudio:

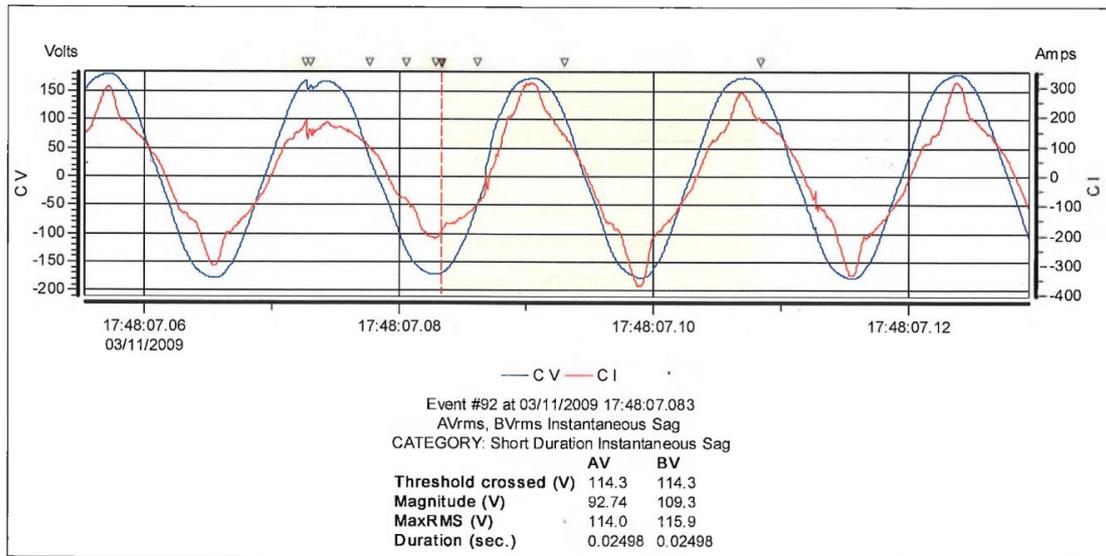
- 1) Extienda UNAM no hay registro de disturbios eléctricos.
- 2) Posgrado de Psicología se registró 1 sag y 7 impulsos transitorios asociados a este mismo sag. Se aprecia que el sag es de tipo externo lo cual significa que fueron provocados por la entrada de una carga importante de otra instalación o bien por alguna maniobra de la compañía suministradora de energía.



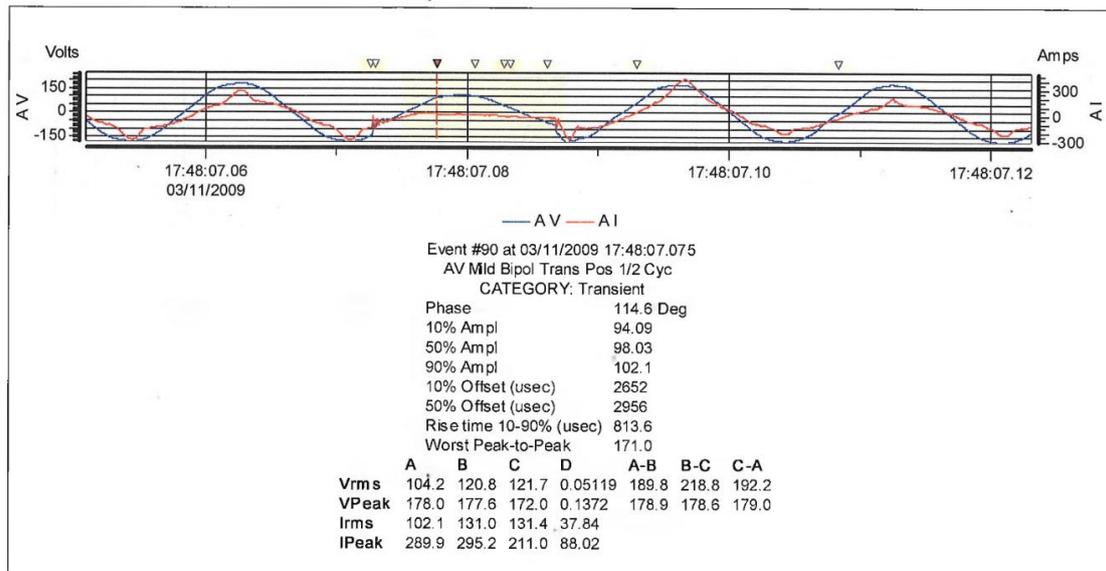
**Gráfica 5.17.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.



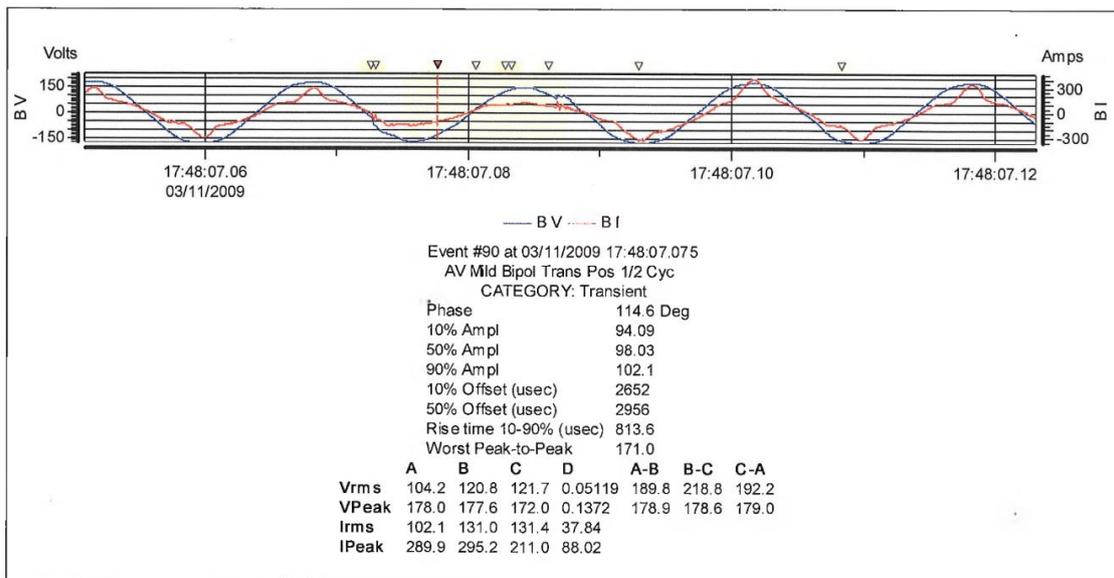
**Gráfica 5.18.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.



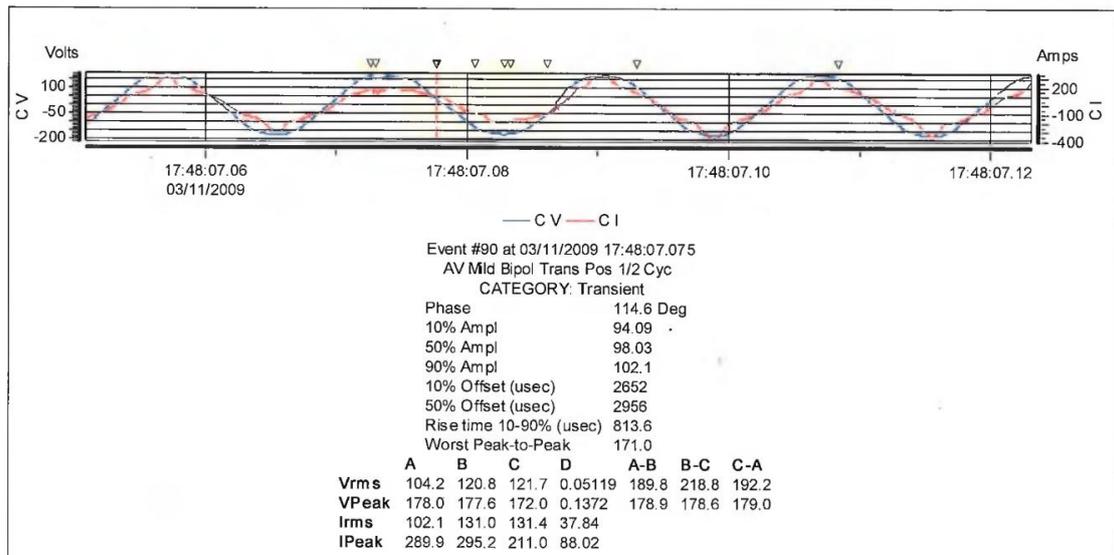
Gráfica 5.19. Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, sag instantáneo en el Posgrado de Psicología.



Gráfica 5.20. Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, transitorio en el Posgrado de Psicología.

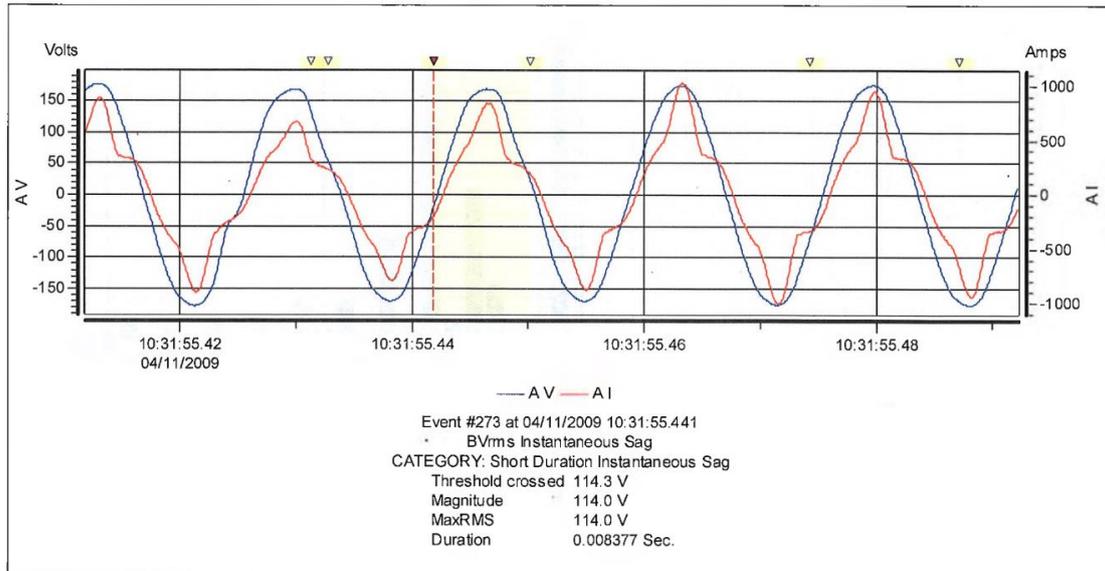


Gráfica 5.21. Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, transitorio en el Posgrado de Psicología.

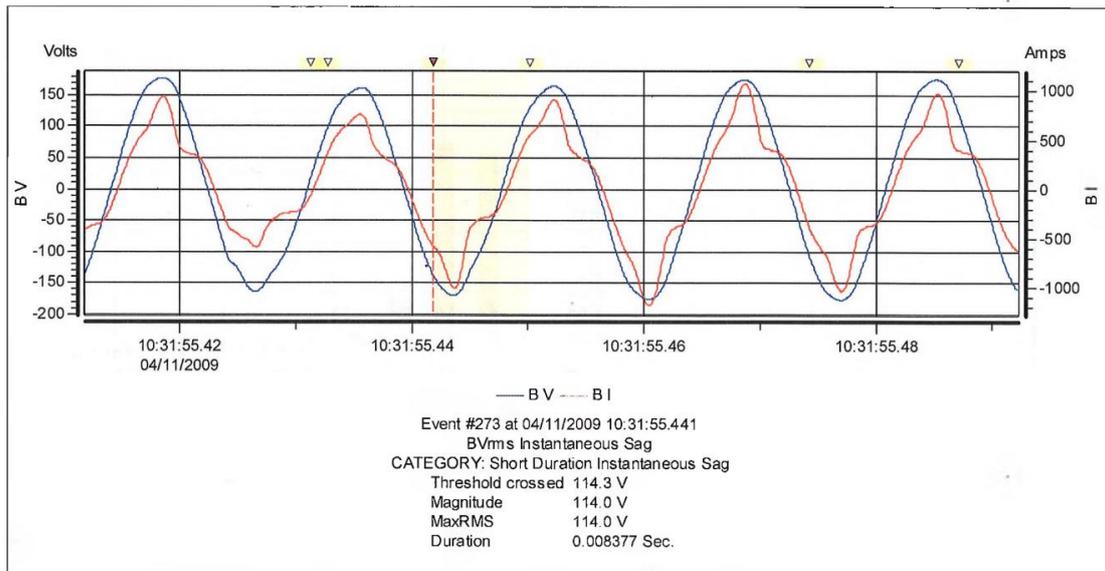


Gráfica 5.22. Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, transitorio en el Posgrado de Psicología.

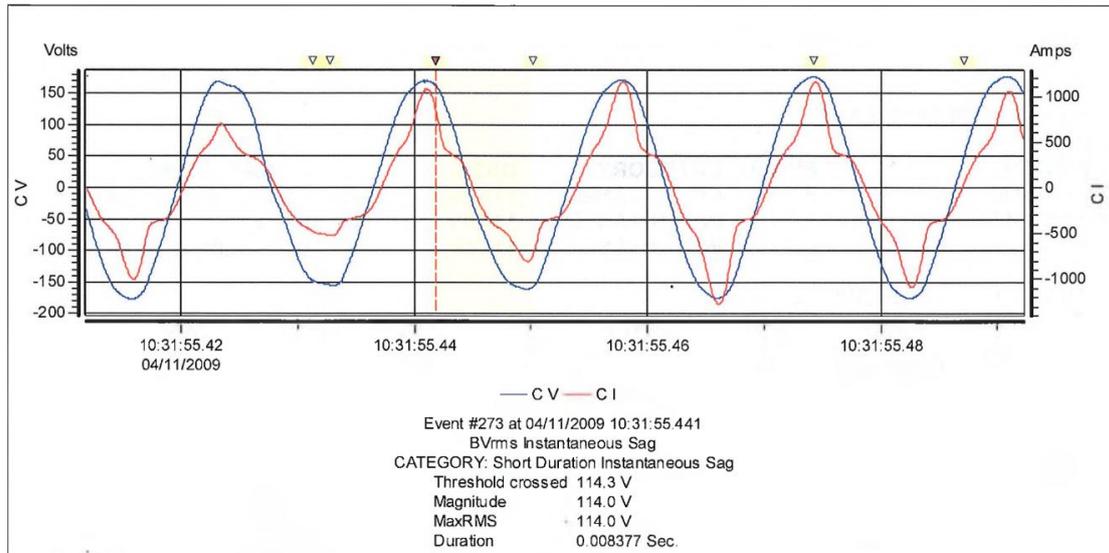
- 3) Dirección General de Publicaciones se registraron algunos disturbios eléctricos 1 tipo sag monofásico (fase B) de magnitud 114 V con duración de 0.0083 seg. y tres transitorios de voltaje los cuales fueron por el mismo sag. Se aprecia que el sag es de tipo externo lo cual significa que fueron provocados por la entrada de una carga importante de otra instalación o bien por una maniobra de la compañía suministradora de energía.



**Gráfica 5.23.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase A, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.



**Gráfica 5.24.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase B, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.



**Gráfica 5.25.** Gráfica representativa de formas de onda de tensión y corriente de la fase C, sag instantáneo en el Dirección General de Publicaciones.

- 4) Torre de Rectoría no hay registro de disturbios eléctricos.
- 5) Relaciones Laborales no hay registro de disturbios eléctricos.

### **OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.**

1. Aunque el nivel de distorsión armónica de corriente sobrepasa los niveles sugeridos por la IEEE del 15%, no se considera de riesgo para el transformador ya que es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye también es baja, por otra parte, es importante mencionar que, si se tenía contemplado cambiar el transformador por alguno de menor capacidad, era necesario realizar nuevamente este cálculo con los datos del transformador nuevo.

Hay que tomar en cuenta que, si el transformador es de menor capacidad, es posible que el rango permisible de THD disminuya por lo que habría que considerar un transformador con Factor K, lo cual podría resultar más costoso.

2. En caso de que en esta instalación se tuvieran conectados equipos electrónicos sensibles, se recomendaba protegerlos mediante uno o varios supresores de picos de voltaje.

Es importante mencionar que estas recomendaciones y observaciones fueron el resultado del estudio realizado en el año 2009 por la empresa COEMSA, por otro lado es evidente que el constante crecimiento de la población universitaria demandaba mejores instalaciones eléctricas y garantizar la continuidad del servicio, así como una mejora en la calidad de energía, por lo que realizar el cambio en los equipos y pasar de una tensión de 6.6 kV a una tensión de 23 kV era necesario para poder satisfacer las necesidades que requiere Ciudad Universitaria en sus instalaciones eléctricas.



## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LAS CARGAS DE LOS ANILLOS E Y F DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 23kV.**

#### **6.1 METODOLOGÍA.**

El estudio presentado en el capítulo 5 fue realizado por la empresa privada COEMSA, el cual se utilizó como referencia y punto de comparación con el estudio presentado en este capítulo realizado por nosotros, con el apoyo del Departamento de Eléctrica de Potencia de la Facultad de Ingeniería, quien nos proporcionó el equipo el cual utilizamos para efectuar las mediciones.

La metodología empleada consiste en realizar la visita a cada una de las subestaciones de las diferentes dependencias que conforman los anillos E y F de distribución eléctrica en Ciudad Universitaria para determinar el comportamiento de las señales de suministro eléctrico y la calidad de la energía, esto se pudo llevar a cabo con ayuda del equipo de medición, “Analizador de redes eléctricas y calidad de energía”.

El equipo se instaló durante un periodo aproximado de una semana, periodo en la cual las dependencias tenían actividades normales, para poder determinar cada uno de los parámetros de manera que proporcionaran los valores reales de operación en las instalaciones.

Una vez obtenidos los parámetros de medición se llevó a cabo el análisis de los mismos, se puntualizó en los casos que se presentaba algún problema o perturbación. Así mismo se plantearon las respectivas soluciones que mejorarían la calidad en el suministro eléctrico en las distintas dependencias.

#### **6.2 RESUMEN DEL ESTUDIO.**

Los parámetros eléctricos registrados en cada una de las subestaciones fueron los siguientes: tensión, corriente, potencia real, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, distorsión armónica total de tensión y corriente, transitorios y porcentaje de cada armónica.

Con estos parámetros se pudo realizar un análisis el cual permitió determinar las condiciones de energía de cada una de las dependencias, así como, un planteamiento de solución para cada una de ellas.



El equipo contiene un software con el cual se puede obtener la representación de cada uno de los parámetros de estudio en forma gráfica y en tiempo real, así como el de las perturbaciones que se llegan a presentar.

DEPENDENCIAS	CAPACIDADES DE LOS TRANSFORMADORES [KVA]	CAPACIDAD DE LOS TRANSFORMADORES [KW]	DEMANDA PROMEDIO [KW]	DEMANDA MÁXIMA [KW]	CORRIENTE TOTAL PROMEDIO [A]	NIVEL DE CORRIENTE MÁXIMO PROMEDIO [A]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	500	450	78.06	175.9	207.92	240.092
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	500	450	116.546	224.126	317.619	318.85
Facultad de Economía	500	450	123.9	207.4	339.505	358.964
Facultad de Derecho	300	270	85.27	132.5	232.63	239.288
Torre de Humanidades II	300	270	86.9	155.9	234.22	249.546
Unidad de Posgrado	500	450	27.294	45.824	69.39	75.549
Facultad de Ingeniería	500	450	78.01	185.09	209.4	240.677
Facultad de Química Edificio A	500	450	178.5	294.9	488.49	529.442
Instituto de Física	500	450	212.2	302.2	573.995	595.711
Química D, Aulas	225	202.5	52.06	85.85	154.27	178.834
Química D, Talleres	225	202.5	44.98	70.03	126.43	141.505
Química E, Gobierno	300	270	40.9	57.47	116.707	128.69
Química E, Alimentos	500	450	114	178.4	364.77	421.552

**Tabla 6.1.** Capacidad de los transformadores.

## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LAS DEPENDENCIAS DEL ANILLO E Y F DE CIUDAD UNIVERSITARIA.

Para poder efectuar un análisis de los resultados obtenidos en las mediciones es necesario plantear un método el cual permitirá comprender de una manera sencilla tanto los datos obtenidos, la forma en que se ingresan al equipo y las gráficas que permiten observar cada uno de los parámetros. Con este propósito se planteó el siguiente proceso de análisis:

1. Conceptos básicos para el análisis de la calidad de energía.
2. Procesamiento de los datos a partir del analizador de redes eléctricas y calidad de energía.
3. Parámetros representativos y obtención de gráficas de cada una de las distintas dependencias.
4. Análisis de los valores obtenidos y su cumplimiento con la normatividad vigente.
5. Planteamiento de soluciones a las perturbaciones registradas, así como las observaciones, recomendaciones y conclusiones originadas de este análisis.



### 6.3 REPORTE DE MEDICIONES.

- **ANÁLISIS EN EL SECUNDARIO DE LOS TRANSFORMADORES CONECTADOS AL ANILLO E**

Para realizar el análisis del anillo E, fue necesario recopilar información de cada una de las subestaciones consideradas dentro de éste, una vez obtenida la información se representó en gráficas y tablas.

El análisis se realiza sobre los parámetros eléctricos como lo son tensión, corriente, potencia real, reactiva, aparente, factor de potencia, distorsión armónica total de tensión y corriente, transitorios y porcentaje de cada armónica. Cada uno de estos parámetros además de ser analizando con el fin de encontrar anomalías, también es analizado con el fin de poder presentar alguna solución y así mitigar o prevenir las causas que las provocan.

#### TENSIÓN

Un problema de calidad es cualquier evento o suceso posible, que se manifiesta como una afectación de la forma de onda de tensión, corriente o frecuencia que resulte en la falla o en la operación incorrecta del equipo del usuario. Si bien se suele hablar de la calidad de la potencia, de hecho, se está haciendo referencia a la calidad de tensión, porque en la mayoría de los casos la cantidad controlada es la tensión.

Los problemas de calidad de tensión son diferentes si se visualizan a nivel de transmisión, de distribución o industrial. No obstante, un punto común o de coincidencia lo encontramos en que las medidas que se aplican para corregir, mitigar o eliminar, tienen como finalidad mantener formas de onda senoidales para cuando la tensión y la frecuencia están en su valor nominal.

El comportamiento ideal de la tensión en un sistema debería ser un valor constante, pero debido a las variaciones en la operación de los sistemas eléctricos contribuyen a que dicho valor tenga fluctuaciones. El valor empleado como referencia para el análisis de este parámetro es de 127 V de fase a neutro y de 220 V entre fases, con una tolerancia en la variación de estos valores de  $\pm 10 \%$ .

En la siguiente tabla No 6.2 se muestran los valores más representativos obtenidos de la medición de tensión en cada una de las subestaciones de las diferentes dependencias.



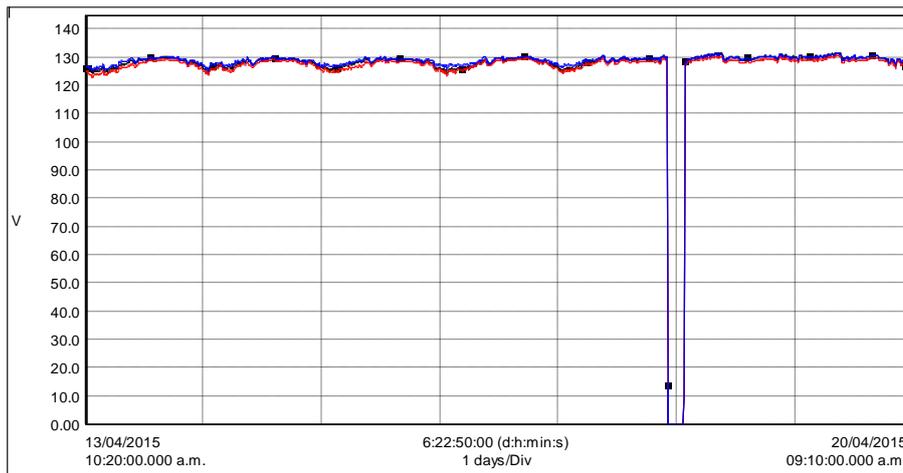
DEPENDENCIAS	NIVEL DE TENSIÓN RMS PROMEDIO DE LAS 3 FASES [V]	PORCENTAJE PROMEDIO CON REFERENCIA A LA TENSIÓN NOMINAL (127 V)	NIVEL DE TENSIÓN MÁXIMO PROMEDIO [V]	NIVEL DE TENSIÓN MÍNIMO PROMEDIO [V]	DESBALANCE DE TENSIÓN PROMEDIO EN LAS FASES [%]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	129.56	2.016	130.166	128.8	1.049
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	124.63	-1.866	124.859	124.518	0.273
Facultad de Economía	124.9	-1.654	125.355	124.586	0.613
Facultad de Derecho	127.45	0.354	128.19	126.006	1.704
Torre de Humanidades II	126.7	-0.236	128.85	125.22	2.817
Unidad de Posgrado	131.901	3.859	132.253	131.622	0.477
Facultad de Ingeniería	128.76	1.386	129.06	128.367	0.537
Facultad de Química Edificio A	124.72	-1.795	124.834	124.649	0.148
Instituto de Física	125.648	-1.065	125.813	125.335	0.380
Química D, Aulas	126.942	-0.046	128.21	126.21	1.560
Química D, Talleres	128.19	0.937	128.34	127.998	0.266
Química E, Gobierno	125.899	-0.867	126.119	125.585	0.423
Química E, Alimentos	125.72	-1.008	126.002	125.372	0.500

NOTA: EL SIGNO MENOS (-) EN LA COLUMNA DE PORCENTAJE SE REFIERE A QUE ESTA POR DEBAJO DEL VALOR NOMINAL DE LA TENSIÓN

**Tabla 6.2.** Comportamiento de tensión en el secundario de los transformadores conectados al Anillo E.

Analizando la tabla anterior podemos observar que, los valores de desbalance de tensión promedio registrados están dentro de un rango permitido del 3%, el cual no afecta a las cargas conectadas ya que en su mayoría están diseñadas con una tolerancia para su correcta operación.

El desbalance máximo permitido para la tensión es del 3% para sistemas de menos de 1 kV, por lo cual no se registró ningún valor fuera de lo permitido. El valor máximo de desbalance fue de 2.817% (en el Torre de Humanidades II), caso contrario el valor de desbalance mínimo fue de 0.148% (caso particular registrado en la Facultad de Química Edificio A).

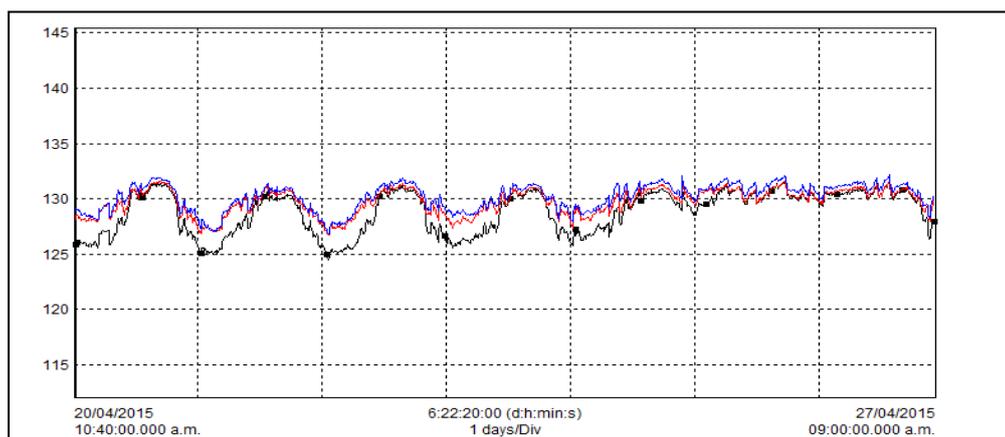


Tensión	Prom	Min	Max	Unidades
V1 RMS	126.037	0	131.7	V
V2 RMS	125.22	0	130.6	V
V3 RMS	126.385	0	131.4	V

— V1 RMS  
 — V2 RMS  
 — V3 RMS

Gráfica 6.1. Tensión en Torre de Humanidades II.

El comportamiento de la tensión que se registró en Torre de Humanidades II, el cual se puede visualizar en la gráfica anterior, es debido a un suceso aislado originado por la desconexión, por una falla en el sistema o por maniobras realizadas por el personal, pero que no representa una falla permanente en el suministro eléctrico de esta dependencia. Para poder mitigar o prevenir eventos es recomendable programar las debidas maniobras de mantenimiento con tiempo, si se tienen cargas sensibles o que por su naturaleza no deben perder su alimentación, es necesario el uso de un sistema de energía de respaldo o bien un UPS si las fallas son momentáneas.



FASE	PROM	MIN	MAX
V1 RMS	128.8	124.5	131.6V
V2 RMS	129.725	126.8	131.7V
V3 RMS	130.166	126.9	132.2V

— V1 RMS  
 — V2 RMS  
 — V3 RMS

Gráfica 6.2. Comportamiento de tensión de fase a neutro Torre de Humanidades.



Analizando la gráfica anterior podemos observar el comportamiento de la señal de voltaje durante el periodo de medición, por lo cual se determinó que el voltaje de suministro se encuentra dentro de los parámetros establecidos (tolerancia del 10%), por lo cual es evidente que el suceso registrado en esta dependencia, en el cual se produjo un corte en el suministro, se trató de una perturbación aislada.

## CORRIENTE

La magnitud del flujo de corriente a través de un sistema eléctrico depende directamente de la carga conectada y el tiempo de demanda de la misma. El comportamiento de la corriente representada en las gráficas obtenidas es similar a las gráficas de potencia, esto debido a que no se presentaron variaciones importantes en los valores de la tensión.

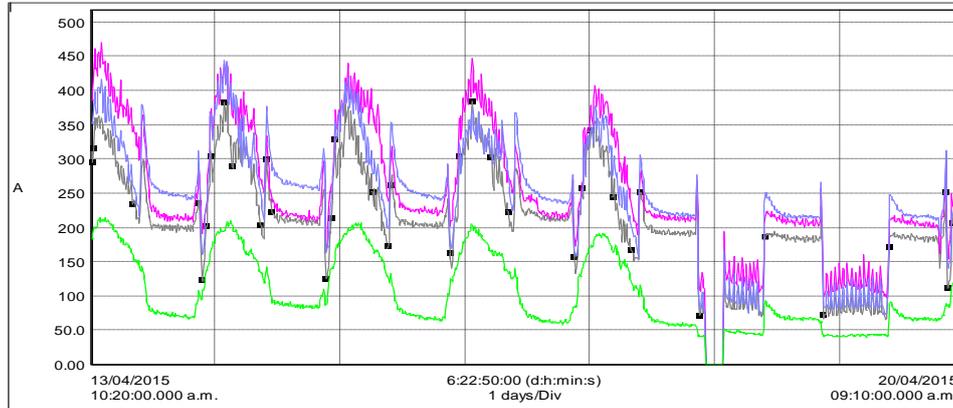
En la siguiente tabla se muestran los valores más representativos obtenidos en la medición de este parámetro en cada una de las subestaciones de las diferentes dependencias.

DEPENDENCIAS	CORRIENTE TOTAL PROMEDIO [A]	NIVEL DE CORRIENTE MÁXIMO PROMEDIO [A]	NIVEL DE CORRIENTE MÍNIMO PROMEDIO [A]	DESBALANCE DE CORRIENTE PROMEDIO EN LAS FASES [%]	VALOR MÁXIMO PROMEDIO DE CORRIENTE [A]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	207.92	240.092	169.081	29.577	467.56
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	317.619	318.85	315.534	1.040	623.73
Facultad de Economía	339.505	358.964	306.717	14.555	569.6
Facultad de Derecho	232.63	239.288	223.066	6.779	356.63
Torre de Humanidades II	234.22	249.546	209.826	15.917	433.43
Unidad de Posgrado	69.39	75.549	65.366	13.479	118.26
Facultad de Ingeniería	209.4	240.677	190.172	20.985	508.6
Facultad de Química Edificio A	488.49	529.442	464.284	12.307	816.9
Instituto de Física	573.995	595.711	561.991	5.660	840.86
Química D, Aulas	154.27	178.834	139.176	22.176	266
Química D, Talleres	126.43	141.505	112.177	20.726	209.3
Química E, Gobierno	116.707	128.69	98.65	23.343	169.56
Química E, Alimentos	364.77	421.552	328.194	22.146	551.23

**Tabla 6.3** Comportamiento de corriente en el Anillo E.



El valor máximo de desbalance en cuanto a corriente se refiere lo encontramos en Torre de Humanidades con un 29.577% debido al mismo problema presentado en la tensión, la perturbación que sufrió la subestación por un momento, además encontramos que el valor mínimo se presentó en la subestación que corresponde a la Biblioteca Samuel Ramos y la Biblioteca Antonio Caso (1.040%). En base a la tabla 6.3 podemos determinar que en la mayoría de las subestaciones se registró un valor de desbalance mayor al 8% establecido por la CFE-L000045, el cual es el desbalance máximo permitido en corriente.

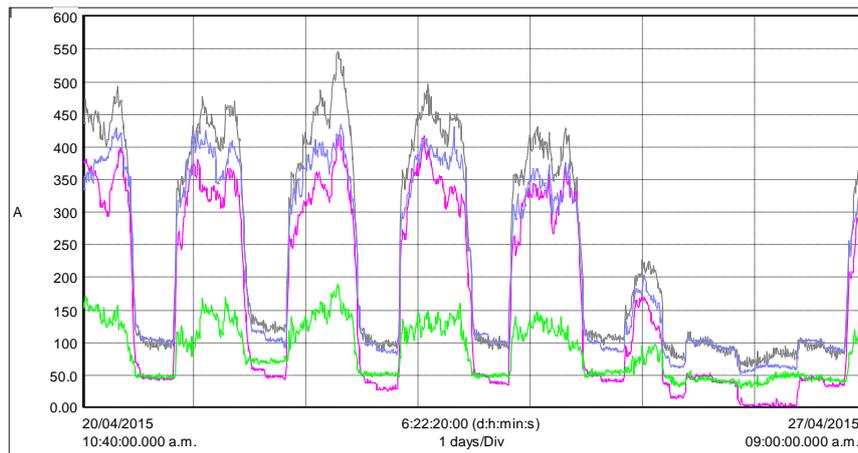


Corrientes	Prom	Min	Max	Unidades
A1 RMS	209.826	0	385.5	A
A2 RMS	249.546	0	471	A
A3 RMS	243.313	0	443.8	A
AN RMS	103.227	0	215.2	A

— A1 RMS  
— A2 RMS  
— A3 RMS

**Gráfica 6.3** Corriente por fase y neutro en Torre de Humanidades II.

En la gráfica se puede observar el comportamiento de la corriente, en donde se muestra la caída y el aumento de corriente la cual provoca el desbalance de corriente en estos dos casos.



FASE	PROMEDIO	MIN	MAX
A1 RMS	240.092A	56.7A	547.6A
A2 RMS	169.081A	2.1A	420A
A3 RMS	214.616A	53A	435A
AN RMS	85.28A	31.1A	189.9A

— A1 RMS  
— A2 RMS  
— A3 RMS

**Gráfica 6.4.** Corriente por fase en Torre de Humanidades.



Para tener una mejor calidad de energía se recomienda realizar un balance de cargas por fase, para así tener una mejor distribución de corriente y potencia por fase.

El comportamiento de la señal de corriente para las dependencias analizadas es congruente con el tipo de instalación, ya que al ser una institución académica el consumo de corriente y carga demandada aumentan los días en que se labora de manera normal (lunes-viernes) y conforme van disminuyendo las actividades en las instalaciones estos parámetros disminuyen considerablemente (sábado –domingo).

### **CORRIENTE EN EL NEUTRO.**

En cuanto al neutro se refiere, en la siguiente tabla 6.4 se encuentran los valores más significativos que se presentaron en los transformadores del lado de baja del anillo E de la red de distribución.

DEPENDENCIAS	CORRIENTE PROMEDIO EN EL NEUTRO [A]	CORRIENTE MÁXIMA PROMEDIO EN EL NEUTRO A PLENA CARGA [A]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	85.28	189.9
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	56.592	116.9
Facultad de Economía	114.529	215.4
Facultad de Derecho	72.826	131.4
Torre de Humanidades II	103.227	215.2
Unidad de Posgrado	21.593	33.9
Facultad de Ingeniería	113.691	190.9
Facultad de Química Edificio A	120.512	189.9
Instituto de Física	101.538	208.1
Química D, Aulas	42.18	114.8
Química D, Talleres	60.758	126.1
Química E, Gobierno	47.253	73.1
Química E, Alimentos	96.221	194

**Tabla 6.4.** Comportamiento de corriente en el neutro.

En la tabla 6.4 encontramos como valor máximo de corriente en el neutro de 120.512 amperes correspondientes a la subestación de facultad de Química edificio A, en cuanto al mínimo se refiere lo encontramos en la subestación ubicada en Unidad de Posgrado con un valor de 21.593 amperes. Haciendo la suma compleja con este valor el resultado difiere de cero por lo que podemos pensar en: a) puente de unión ilegal entre neutro y tierra, b) uso de la tierra como neutro o bien c) inversión entre neutro y tierra en algún circuito.



## POTENCIA REAL.

La potencia es la razón de cambio de la energía con respecto al tiempo en función del voltaje y la corriente. Se considera potencia real a toda la potencia encargada de realizar un trabajo. Por lo que consideramos que esta potencia es la que realmente estamos aprovechando en nuestro sistema, y la que será de gran utilidad en los cálculos de compensación de potencia.

En cuanto a potencia se refiere los valores igual que en la sección de corriente dependen de la carga instalada y necesidades del consumidor. En este apartado los datos a considerar son la capacidad del transformador la cual no debe ser rebasada por la potencia demanda o estar cerca de ser superada.

DEPENDENCIAS	POTENCIA REAL PROMEDIO [kW]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA REAL [kW]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	78.06	175.9
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	116.546	224.126
Facultad de Economía	123.9	207.4
Facultad de Derecho	85.27	132.5
Torre de Humanidades II	86.9	155.9
Unidad de Posgrado	27.294	45.824
Facultad de Ingeniería	78.01	185.09
Facultad de Química Edificio A	178.5	294.9
Instituto de Física	212.2	302.2
Química D, Aulas	52.06	85.85
Química D, Talleres	44.98	70.03
Química E, Gobierno	40.9	57.47
Química E, Alimentos	114	178.4

**Tabla 6.5** Comportamiento de la potencia real.

Como se observa en la tabla 6.5 la subestación con el valor de potencia real máximo promedio fue 212.2 kW y es la ubicada en Instituto de Física, mientras que el valor mínimo promedio fue de 27.294 kW el cual se presentó en la subestación que alimenta la Unidad de Posgrado.

Si observamos las gráficas y los valores obtenidos para estas dos dependencias, y en general para todas las instalaciones es claro el comportamiento de la demanda, ya que se pudo determinar que durante los días laborales dentro de un centro de enseñanza el consumo de energía es mayor, caso contrario ocurre en los fines de semana cuando el consumo es mínimo. Es importante mencionar que dentro de las instalaciones de la Unidad de Posgrado la afluencia de personal y estudiantes es menor que en otras dependencias por lo cual la demanda de potencia que se requiere para el suministro de la instalación es muy baja.



## POTENCIA REACTIVA.

Entendemos como potencia reactiva a la raíz cuadrada de la diferencia de los cuadrados de la potencia aparente y la potencia activa de un sistema. La presencia de esta potencia nos indica un bajo factor de potencia por lo cual es preferible que la potencia reactiva del sistema sea lo más baja posible. Esto implica que las instalaciones de las dependencias son más eficientes, lo cual evitará que la empresa suministradora pueda aplicar cargos por un bajo factor de potencia, ya que necesita aportar menos potencia reactiva.

DEPENDENCIAS	POTENCIA REACTIVA PROMEDIO [kVAR]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA REACTIVA [kVAR]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	15.46	29.02
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	19.455	42.249
Facultad de Economía	26.88	42.9
Facultad de Derecho	6.057	41.37
Torre de Humanidades II	21.59	45.05
Unidad de Posgrado	2.167	4.627
Facultad de Ingeniería	9.87	37.09
Facultad de Química Edificio A	33.19	49.39
Instituto de Física	25.49	36.52
Química D, Aulas	58.61	93.49
Química D, Talleres	17.98	29.61
Química E, Gobierno	15.59	22.32
Química E, Alimentos	76.07	100.6

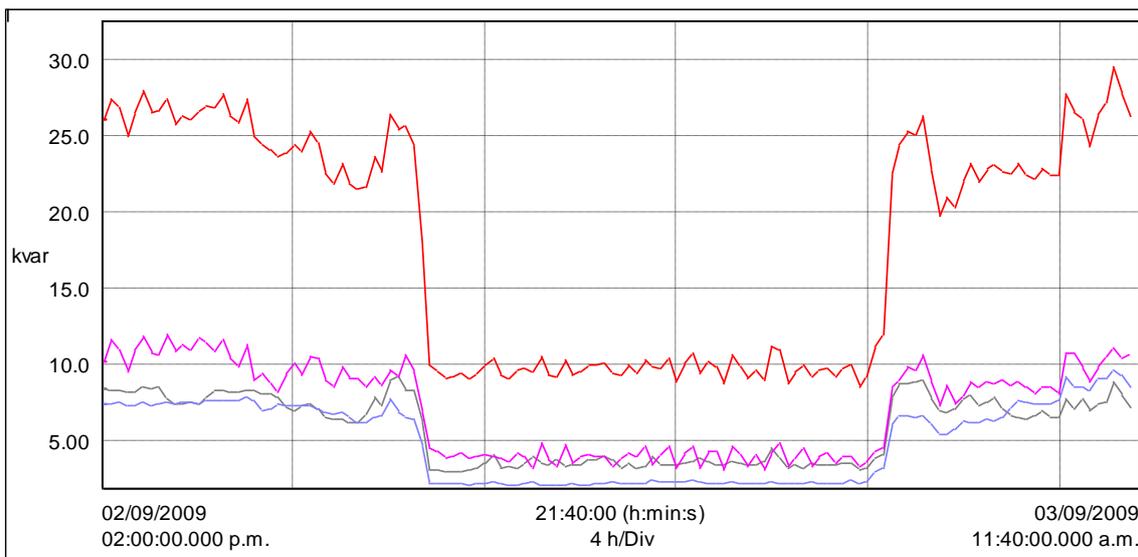
**Tabla 6.6** Comportamiento de la Potencia Reactiva.

Como vimos en el punto anterior uno de los parámetros más significativos en el análisis es el factor de potencia de los circuitos, el cual se ve reflejado en la potencia reactiva, una potencia reactiva alta indica baja eficiencia en la subestación debido a la generación o presencia de corriente inductiva la cual presenta muchas pérdidas.

Como se observa en la tabla anterior las subestaciones que presentaron un bajo factor de potencia en este apartado presentan los valores más altos en potencia reactiva (kVAR) promedio. Por ejemplo, la Facultad de Química (D Aulas y E Alimentos), los cuales se recomienda instalar un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia. En la sección de factor de potencia se muestra un ejemplo de cálculo de la potencia reactiva que es necesaria compensar mediante bancos de capacitores.



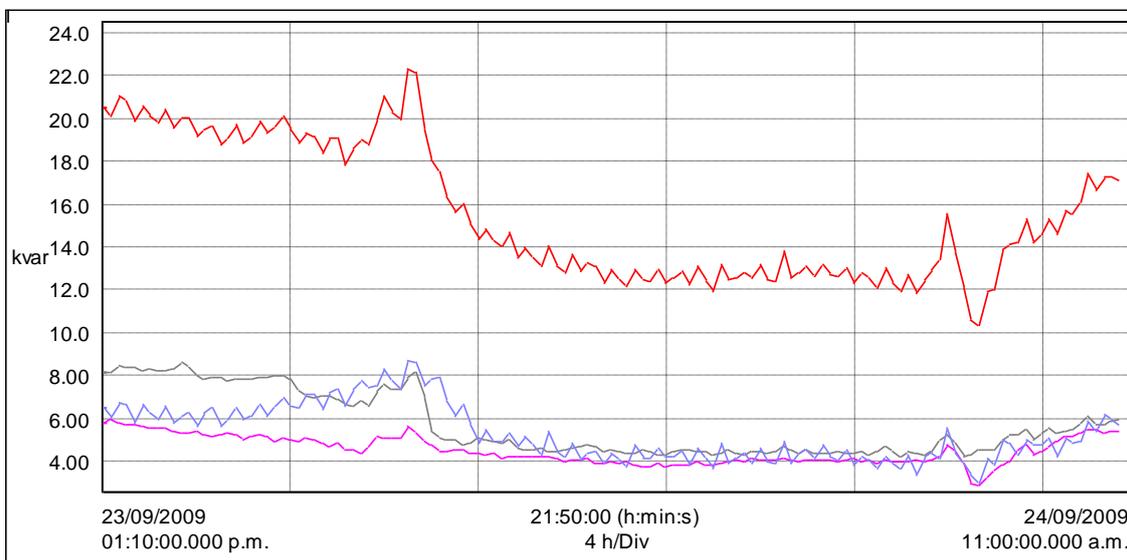
A continuación, presentamos las gráficas en donde se refleja lo anterior mostrado



Potencia	Prom	Min	Max	Unidades
var Total	17.978	8.618	29.607	kvar
var1	5.809	2.977	9.244	kvar
var2	7.146	3.161	12.055	kvar
var3	5.023	2.107	9.669	kvar

— var1  
— var2  
— var3  
— var Total

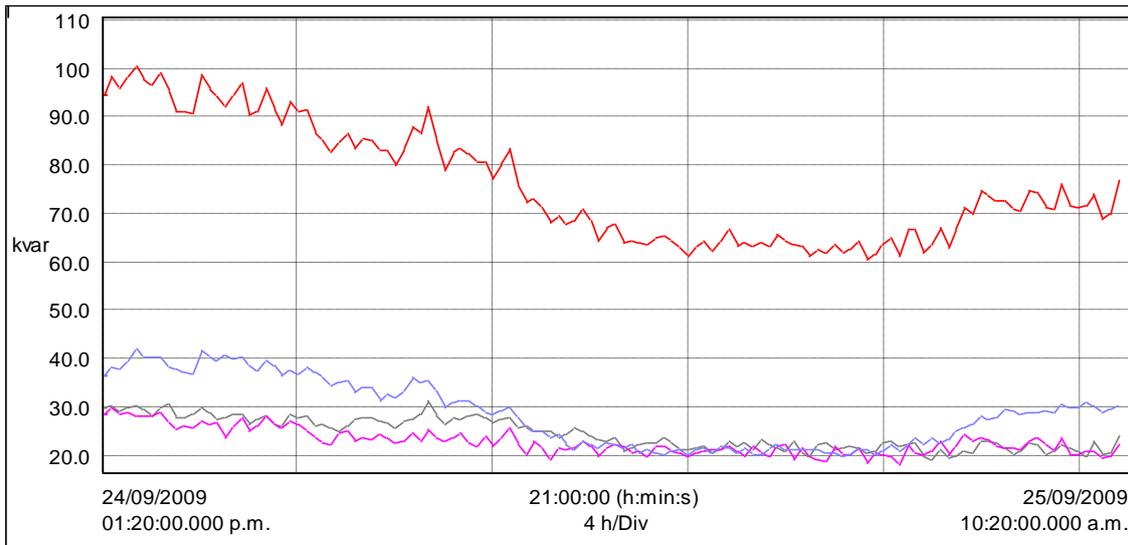
Gráfica 6.5. Potencia reactiva por fase Facultad de Química D Talleres.



Potencia	Prom	Min	Max	Unidades
varTotal	15.594	10.42	22.317	kvar
var1	5.719	4.258	8.618	kvar
var2	4.543	2.882	5.966	kvar
var3	5.333	2.959	8.707	kvar

— var1  
— var2  
— var3  
— var Total

Gráfica 6.6. Potencia reactiva por fase Facultad de Química E Gobierno.



var				
Total	76.072	60.428	100.617	kvar
var1	24.492	19.219	31.45	kvar
var2	22.856	18.178	29.972	kvar
var3	28.724	19.837	42.244	kvar

— var1  
— var2  
— var3  
— var Total

Gráfica 6.7. Potencia reactiva por fase en Facultad de Química E Alimentos.

## POTENCIA APARENTE.

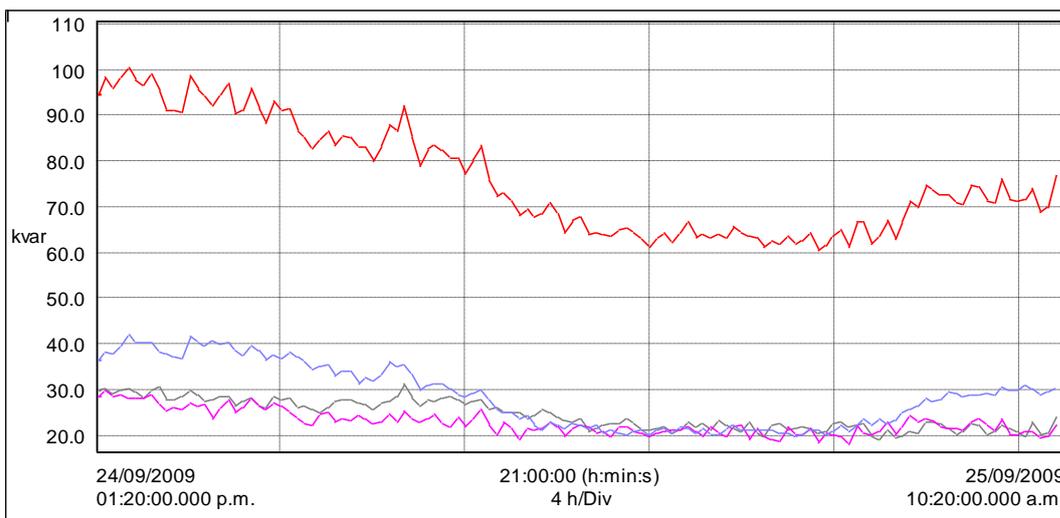
El siguiente punto de análisis es el que representa la potencia aparente o potencia total la cual considera la real y la potencia reactiva, la que realmente ocupamos y la que no es transformable.

DEPENDENCIAS	POTENCIA APARENTE PROMEDIO [kVA]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA APARENTE [kVA]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	80.29	178.1
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	118.335	227.828
Facultad de Economía	127	211.7
Facultad de Derecho	88.13	133.5
Torre de Humanidades II	80.07	159.9
Unidad de Posgrado	27.492	45.898
Facultad de Ingeniería	80.45	190.02
Facultad de Química Edificio A	182.1	298.2
Instituto de Física	216.3	311.2
Química D, Aulas	179.86	239.071
Química D, Talleres	48.54	74.89
Química E, Gobierno	43.84	61.22
Química E, Alimentos	137.6	205

Tabla 6.7. Comportamiento de la potencia Aparente.



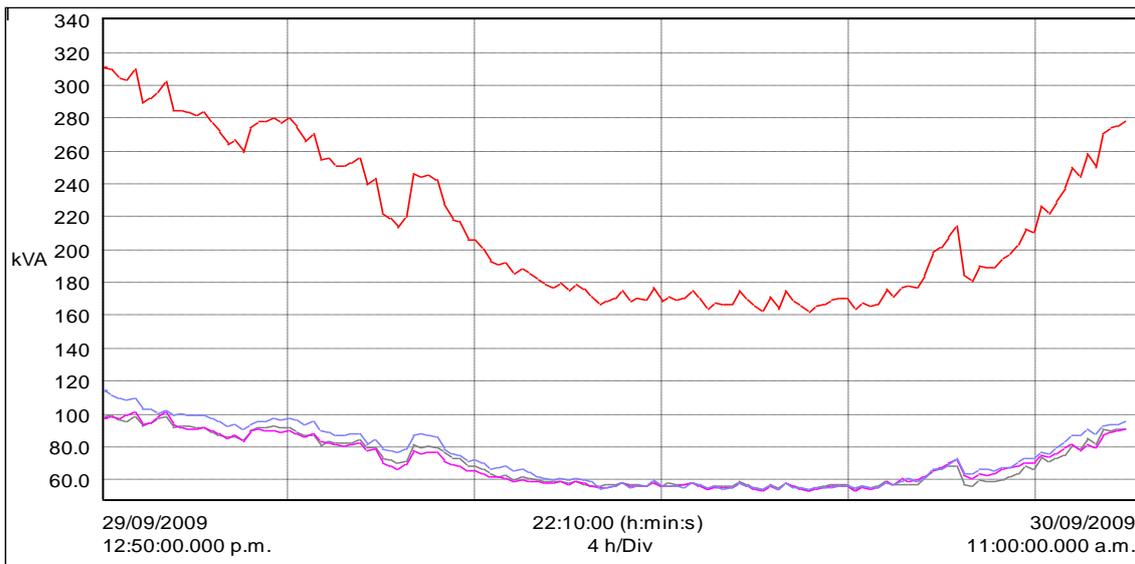
En la tabla 6.7 se observa que los valores máximos promedio de potencia aparente los encontramos en el Instituto de Física (216.3 kVA), seguido por la Facultad de Química Edificio A (182.1 kVA), el mínimo valor promedio es aquel perteneciente a la subestación ubicada en la Unidad de Posgrado (27.492 kVA). Los valores de potencia dependen de la carga instalada y no pueden sobrepasar la capacidad del transformador instalado. A continuación, se agregan las gráficas más características del lado de baja tensión de algunos transformadores conectados al Anillo E.



Potencia	MAX	
VA Total	13.368	MVA
VA1	5.106	MVA
VA2	3.631	MVA
VA3	4.632	MVA

— VA1  
— VA2  
— VA3

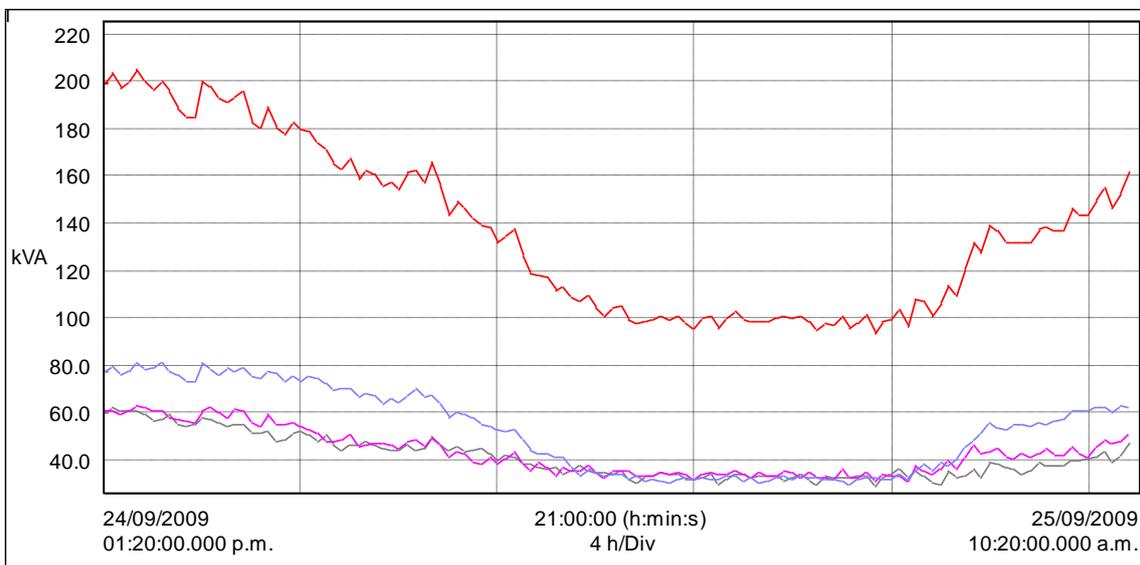
**Gráfica 6.8.** Potencia total por fases en Torre de Humanidades Y Facultad de Filosofía y Letras.



Potencia	Prom	Min	Max	Unidades
VA Total	216.323	161.834	311.237	kVA
VA1	70.989	53.871	99.829	kVA
VA2	70.694	53.382	101.767	kVA
VA3	74.64	54.211	114.103	kVA

— VA1  
— VA2  
— VA3

Gráfica 6.9. Potencia total por fase Instituto de Física.



Potencia	Prom	Min	Max	Unidades
VA Total	137.552	93.535	204.983	kVA
VA1	41.36	29.148	62.552	kVA
VA2	43.355	31.334	62.902	kVA
VA3	52.837	29.639	81.65	kVA

— VA1  
— VA2  
— VA3

Gráfica 6.10. Potencia total por fase Facultad de Química E Alimentos.



## FACTOR DE POTENCIA.

La potencia total que absorbe la carga o que entrega la fuente generada es la denominada potencia aparente o total, mientras que la potencia utilizada para producir trabajo es la potencia real por lo menos en un caso ideal, ya que las pérdidas también vienen en watts. Por lo que es necesario conocer la relación entre la potencia que produce trabajo y la total consumida o suministrada, esta relación es llamado factor de potencia y se calcula con la ecuación 6.1.

$$fp = \frac{P}{S} \quad (6.1)$$

Puntos que analizaremos con el factor de potencia:

- Dado que la potencia real es regularmente menor que la potencia total, salvo en el caso de circuitos puramente resistivos donde  $P=S$ , entonces el Factor de Potencia estará dentro del intervalo  $0 \leq fp \leq 1$ .
- Si el factor de potencia se acerca a la unidad quiere decir que tenemos un ángulo de desfase pequeño entre la corriente y el voltaje también implica que casi toda la potencia entregada por la fuente es transformable y una no aprovechable que son pérdidas.
- Un factor de potencia alejado de la unidad implica que solo una parte de la potencia entregada por la fuente se convierte en trabajo, mientras que una cantidad considerable es potencia reactiva, además de que indica que el ángulo de desfase entre la tensión y corriente es grande.

En muchas partes del mundo existe un cargo monetario si el factor de potencia de una empresa se encuentra por debajo de un límite fijado por la compañía suministradora, en el caso de México, dicho límite es 0.9, pero cuando el factor de potencia se mantiene en un promedio mayor a 0.9, entonces la compañía suministradora bonifica a la empresa que cumpla con este factor.

DEPENDENCIAS	FACTOR DE POTENCIA PROMEDIO	VALORES MÁXIMOS A PLENA CARGA DEL FACTOR DE POTENCIA
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	0.972	0.951
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	0.984	0.9837
Facultad de Economía	0.9752	0.979
Facultad de Derecho	0.967	0.968
Torre de Humanidades II	0.9647	0.9623
Unidad de Posgrado	0.9911	0.993
Facultad de Ingeniería	0.969	0.9455
Facultad de Química Edificio A	0.992	0.999
Instituto de Física	0.9809	0.955
Química D, Aulas	0.8901	0.8622
Química D, Talleres	0.9266	0.9163
Química E, Gobierno	0.9328	0.939
Química E, Alimentos	0.8285	0.8686

**Tabla 6.8.** Comportamiento del Factor de Potencia.



En la tabla anterior podemos observar los valores de factor de potencia obtenidos en las cargas conectadas al anillo E de distribución, en los cuales podemos observar que cuatro de las dependencias no cumplen con la norma ya que están por debajo del 0.90 mínimo requerido por lo cual es recomendable instalar un banco de capacitores para compensar este valor tan bajo. Las dependencias con bajo factor de potencia son Facultad de Ingeniería, Química D Aulas, y Química E Alimentos.

Existen diversos equipos que provocan un bajo factor de potencia como lo son, transformadores, alumbrado fluorescente, motores de inducción, hornos de inducción, rectificadores con o sin control, motores síncronos, grupos motor-generator, hornos de arco, soldadoras eléctricas, variadores de velocidad, etcétera, son ejemplos de algunas cargas que provocan bajo factor de potencia y que probablemente se tengan en los laboratorios o dentro de ciertas instalaciones de las facultades de Ciudad Universitaria, además de la gran cantidad de cargas no lineales que se pueden encontrarse en la actualidad en las instalaciones eléctricas.

Uno de los efectos por un factor de potencia bajo, es el incremento sustancial de la corriente, lo cual a su vez provocaría pérdidas por el calentamiento de los conductores debido al efecto joule, el cual está dado por la ecuación 6.2.

$$P = I^2R \quad (6.2)$$

En donde:

P= Potencia Real

I= Corriente

R= Resistencia

Otro de los efectos por esta misma causa es, mayores caídas de tensión en los conductores por el incremento de la corriente, Por lo cual se tiene la necesidad de invertir en nuevas instalaciones y en equipo para recuperar la capacidad de entregar potencia aparente.

Como conclusión un bajo factor de potencia afecta a la empresa suministradora de la siguiente forma:

- Disponibilidad de solo una fracción de la capacidad total, debido a la demanda de potencia reactiva por parte de los usuarios.
- Mayores pérdidas en los conductores por el incremento de corriente.
- Mayores caídas de tensión en los conductores por el incremento de corriente.
- Necesidad de invertir en nuevas instalaciones y en equipo para recuperar la capacidad de entregar potencia aparente.

Para determinar el valor de Potencia reactiva que es necesario proporcionar al sistema y así corregir el factor de potencia utilizamos las Ecuaciones 6.3 y 6.4.

$$Q = P(\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)) \quad (6.3)$$



En donde:

$Q$  = Potencia reactiva

$P$  = Potencia real

$$\varphi = \cos^{-1}(F_p) \quad (6.4)$$

$F_p$  = factor de potencia

Ahora que sabemos cómo determinar el valor de potencia a compensar, veremos varias maneras o métodos que nos ayudan a mitigar nuestro problema, como lo es el uso de capacitores o banco de capacitores, el cual es considerado el mejor método ya que es el medio más económico de corrección de factor de potencia, su principal desventaja es la sensibilidad a las componentes armónicas presentes en los sistemas eléctricos, el uso de motores síncronos es otra de las soluciones, este tipo de equipos tiene la ventaja de impulsar su carga mecánica y, simultáneamente, generar potencia reactiva para corregir el factor de potencia, los condensadores síncronos, tienen el mismo principio de operación que un motor síncrono, por lo tanto podrá generar o absorber potencia reactiva.

Para determinar la potencia liberada en el Transformador utilizaremos la siguiente ecuación <sup>[21]</sup>.

$$S_L = \frac{P}{F_{P1}} - \frac{P}{F_{P2}} \quad (6.5)$$

Donde:

$S_L$  = Potencia liberada en el transformador

$P$  = Potencia Real

$F_p$  = Factor de potencia

A continuación, se enuncian las ecuaciones que ocuparemos para calcular la corriente en los alimentadores, antes de la corrección del factor de potencia por el uso del banco de capacitores.

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * F_{PI}} \quad (6.6)$$

Donde:

$I_1$  = Corriente en alimentadores antes de corregir  $F_p$

$P$  = Potencia real

$V_L$  = Tensión

$F_{PI}$  = Factor de Potencia real

---

[21] **Título:** Calidad de Energía, Factor de Potencia y Filtrado de Armónicas. **Autor:** Santiago Barcón, Rafael Guerrero Cepeda, Iván Martínez.



Una vez planteada esta ecuación, y sustituyendo  $I_1$  en la siguiente ecuación, obtendremos la corriente en alimentadores después de la corrección del factor de potencia.

$$I_2 = \frac{F_{P1}}{F_{P2}} I_1 \quad (6.7)$$

Donde:

$I_1$  = Corriente en alimentadores antes de corregir  $F_p$

$I_2$  = Corriente de los alimentadores después de corregir el  $F_p$

$F_{P1}$  = Factor de Potencia real

$F_{P2}$  = Factor de Potencia Ideal

Para determinar la reducción de corriente en los alimentadores, usaremos la diferencia de corriente antes y después de corregir el factor de potencia <sup>[21]</sup> lo que nos queda como:

$$R = I_1 - I_2 \quad (6.8)$$

Por último, tenemos la siguiente ecuación la cual nos permite saber el porcentaje de reducción de corriente y también la disminución de la caída de tensión en los alimentadores.

$$\%R = \left(1 - \frac{F_{P1}}{F_{P2}}\right) \times 100 \quad (6.9)$$

---

[21] **Título:** Calidad de Energía, Factor de Potencia y Filtrado de Armónicas. **Autor:** Santiago Barcón, Rafael Guerrero Cepeda, Iván Martínez.



## CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA FACULTAD DE QUÍMICA AULAS

Datos necesarios para el cálculo, obtenidos de las tablas del estudio en el capítulo 6.

$$F_{PR} = 0.8901$$

$$P_R = 52.06 \text{ kW}$$

$$F_{PI} = 0.95$$

Donde:

$F_{PR}$  = Factor de potencia dependencia

$P_R$  = Potencia Real de la dependencia

$F_{PI}$  = Factor de potencia deseado

Utilizando la ecuación 6.4 calculamos los ángulos  $\varphi$  del triángulo de potencias, y con este poder calcular la potencia reactiva a compensar.

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0.8901)$$

$$\varphi_1 = 27.1142^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.95)$$

$$\varphi_2 = 18.19^\circ$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 6.3 obtenemos lo siguiente:

$$Q_c = 52.06 \text{ kW} (\tan(27.1142^\circ) - \tan(18.19^\circ))$$

$$Q_c = 9.55 \text{ VAR}$$

El valor obtenido de  $Q_c$  es el valor de potencia reactiva a compensar, por lo que se necesita instalar un banco de capacitores de 10 kVAR. En cuanto a la potencia reactiva absorbida por la Facultad de Química D aulas antes de esta corrección es:

$$Q_1 = 52.06 \text{ kW} \tan(27.1142^\circ)$$

$$Q_1 = 26.656 \text{ kVAR}$$

Si el banco de capacitores es instalado como se recomienda, la potencia que apartaría la empresa suministradora es la siguiente:

$$Q_2 = 26.656 \text{ kVAR} - 10.68 \text{ kVAR}$$

$$Q_2 = 15.976 \text{ kVAR}$$

Como resultado de la instalación del banco de capacitores la potencia reactiva que aporta la compañía suministradora se reduce a casi solo la mitad.



Ya con esta información y con la ecuación 6.5, es posible calcular tanto la potencia liberada en el transformador, como la reducción de corriente en los alimentadores y la disminución en la caída de tensión.

$$S_L = 52.06 \text{ kW} \left( \frac{1}{0.8901} - \frac{1}{0.95} \right)$$

$$S_L = 3.6878 \text{ kVA}$$

Cálculo de la corriente en los alimentadores antes de la corrección del factor de potencia, usando la ecuación 6.6.

$$I_1 = \frac{52060 \text{ w}}{\sqrt{3} \times 220V \times 0.8901}$$

$$I_1 = 153.491 \text{ A}$$

Cálculo de la corriente en los alimentadores después de la corrección del factor de potencia, usando la ecuación 6.7.

$$I_2 = \frac{0.8901}{0.95} \times 154.491 \text{ A}$$

$$I_2 = 144.75 \text{ A}$$

Con las dos corrientes calculadas anteriormente y con el uso de la ecuación 6.8 es posible obtener la reducción de corriente en los alimentadores <sup>[21]</sup>

$$R = 154.491 \text{ A} - 144.75 \text{ A}$$

$$R = 9.7410 \text{ A}$$

Y ahora para calcular el porcentaje de reducción de corriente y la disminución de la caída de tensión usamos la ecuación 6.9.

$$\%R = \left( 1 - \frac{0.8901}{0.95} \right) \times 100$$

$$\%R = 6.305\%$$

Con estos cálculos podemos concluir que la corrección del factor de potencia es muy útil no solo para compensar la potencia reactiva si no disminuir la corriente en los alimentadores lo que nos permite liberar potencia del transformador.

---

[21] **Título:** Calidad de Energía, Factor de Potencia y Filtrado de Armónicas. **Autor:** Santiago Barcón, Rafael Guerrero Cepeda, Iván Martínez.



## DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TENSIÓN.

De acuerdo con la normatividad vigente, como se determinó en el capítulo 3, en México se establece a partir de la norma CFE L0000-45 que para sistemas eléctricos con una tensión menor a un kilo volt la Distorsión Armónica Total en Tensión debe ser menor de 8%.

Mientras que en la norma STD IEEE 519-2014 indica que para los sistemas eléctricos con una tensión menor a 69 kV la Distorsión Armónica Total en Tensión (DATT) debe ser menor al 5%. En la más reciente actualización de la IEEE 519-2014 también se contemplan sistemas de 1kV o menos.

A continuación, se muestra la tabla de distorsión armónica con los valores máximos mínimos y promedios registrados en el anillo E del sistema de distribución.

DEPENDENCIAS	DIATORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN TENSIÓN [%]								
	MÍNIMO			PROMEDIO			MÁXIMO		
	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	1.2	1.3	1.4	1.821	1.905	2.01	2.5	2.7	2.8
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	1.4	1.3	1.2	1.906	1.723	1.736	2.6	2.3	2.4
Facultad de Economía	0.9	0.8	0.8	1.7	1.487	1.419	3.2	2.9	2.8
Facultad de Derecho	0.4	0.6	0.5	1.096	1.136	1.147	2.5	2.5	2.5
Torre de Humanidades II	0	0	0	2.66	2.378	2.137	3.8	4.4	3.8
Unidad de Posgrado	0.4	0.4	0.2	0.839	0.763	0.63	1.2	1.1	0.9
Facultad de Ingeniería	1.8	1.4	1.9	2.526	2.129	2.586	3.3	2.9	3.4
Facultad de Química Edificio A	0.4	0.4	0.2	0.839	0.763	0.63	1.2	1.1	0.9
Instituto de Física	0.2	0.5	0.4	0.692	0.841	0.774	1.4	1.3	1.4
Química D, Aulas	0.5	0.5	0.4	1.033	0.976	0.885	1.7	1.7	1.6
Química D, Talleres	0.2	0.1	0.2	0.912	0.975	0.963	1.8	1.8	2
Química E, Gobierno	0.6	0.6	0.7	0.919	0.988	1.074	1.6	1.5	1.7
Química E, Alimentos	0.2	0.5	0.5	0.748	0.932	0.957	1.5	1.5	1.7

**Tabla 6.9.** Distorsión Armónica Total en Tensión.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de lo establecido, el valor máximo registrado se obtuvo en la fase B de la Torre de Humanidades II (4.4%), mientras que el menor lo encontramos en la misma dependencia (0%), debido a la perturbación descrita con anterioridad.

## DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE.

La Distorsión Armónica Total en Corriente (DATC) es una figura de mérito cuya referencia es altamente sensible al nivel de carga y puede dar falsos positivos a bajos niveles de carga, cosa que ocurre con mucha frecuencia, pero también puede dar positivos correctos con altos niveles de carga. Debido a esta dependencia del nivel de carga fue que se definió el DATD.

Por otra parte, el DATD es una figura de mérito cuya referencia es insensible al nivel de carga y esa figura no da falsos positivos, precisamente por esa falta de sensibilidad. Si el DATD da un valor alto entonces el resultado es veraz y deben tomarse acciones correctivas, a diferencia del DATC que si da un valor alto hay que revisar el nivel de carga para ver si hay que tomar medidas correctivas.



A partir del desarrollo del capítulo 3 podemos establecer que tanto para la norma CFE L0000-45 y la STD IEEE 519-1992 el valor máximo permitido para la DATD es de 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil.

A continuación, se muestra la tabla de los factores de distorsión armónica de las tres fases registrados en el lado de baja tensión de algunos de los transformadores conectados al anillo E del sistema de distribución.

DEPENDENCIAS	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN CORRIENTE [%]
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras	11.233
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso	10.901
Facultad de Economía	11.286
Facultad de Derecho	12.488
Torre de Humanidades II	12.872
Unidad de Posgrado	3.859
Facultad de Ingeniería	13.528
Facultad de Química Edificio A	3.859
Instituto de Física	5.512
Química D, Aulas	13.836
Química D, Talleres	12.181
Química E, Gobierno	15.923
Química E, Alimentos	5.253

**Tabla 6.10.** Distorsión Armónica Total en Corriente.

• **ANÁLISIS EN EL SECUNDARIO DE LOS TRANSFORMADORES CONECTADOS AL ANILLO F.**

A continuación, se resumen los parámetros más relevantes de cada una de las diferentes dependencias, con la finalidad de mostrar aquellos valores que se encuentran dentro de la normatividad vigente y por otra parte aquellos que no lo están, así como la justificación de cada uno de los parámetros aquí analizados.

DEPENDENCIAS	CAPACIDAD DE LOS TRANSFORMADORES [KVA]	CAPACIDAD DE LOS TRANSFORMADORES [KW]	DEMANDA PROMEDIO [KW]	DEMANDA MÁXIMA [KW]	CORRIENTE TOTAL PROMEDIO [A]	CORRIENTE TOTAL MÁXIMA [A]
Facultad de Medicina B y C	500	450	176.1	264.7	513.1	537.1
Facultad de Medicina D	750	675	94.93	176.4	257.96	264.1
Facultad de Medicina Investigación	225	202.5	147.3	215.1	493.8	525
Instituto de Geofísica	500	450	87.05	142.4	233.36	244.1
Instituto de Investigación en materiales II	1000	900	141.7	164.3	459.8	470.1
Instituto de Investigación En materiales I	500	450	212.5	276.4	739.8	764.8
DGTIC	1000	900	476.9	550	1432	1477
CCADET	300	270	71.76	131.7	205.03	210.4
CUAED	225	202.5	70.92	101.2	186.83	202.5

**Tabla 6.11** Capacidad de los Transformadores.



## TENSIÓN.

El comportamiento ideal de la tensión en un sistema debería ser un valor constante, pero debido a las variaciones en la operación de los sistemas eléctricos contribuyen a que dicho valor tenga fluctuaciones. El valor empleado como referencia para el análisis de este parámetro es de 127 V de fase a neutro y de 220 V entre fases, con una tolerancia en la variación de estos valores de  $\pm 10\%$ .

En la siguiente tabla se muestran los valores más representativos obtenidos en la medición de este parámetro en cada una de las subestaciones de las diferentes dependencias.

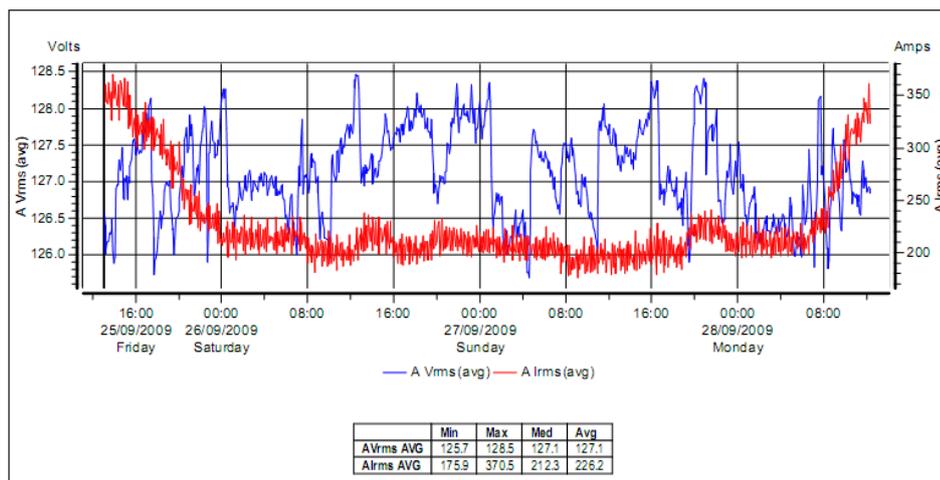
DEPENDENCIAS	NIVEL DE TENSIÓN RMS PROMEDIO DE LAS 3 FASES [V]	PORCENTAJE PROMEDIO CON REFERENCIA A LA TENSIÓN NOMINAL (127 V)	NIVEL DE TENSIÓN MÁXIMO PROMEDIO [V]	NIVEL DE TENSIÓN MÍNIMO PROMEDIO [V]	DESBALANCE DE TENSIÓN PROMEDIO EN LAS FASES [%]
Facultad de Medicina B y C	123.5	-2.756	123.5	123.5	0.000
Facultad de Medicina D	130.9	3.071	131	130.8	0.153
Facultad de Medicina Investigación	123.93	-2.417	124.2	123.7	0.403
Instituto de Geofísica	127.06	0.047	127.4	126.7	0.549
Instituto de Investigación en materiales II	126.56	-0.346	126.8	126.4	0.315
Instituto de Investigación En materiales I	122.83	-3.283	123.1	122.6	0.406
DGTIC	129.06	1.622	129.3	128.8	0.387
CCADET	126.96	-0.031	127	126.9	0.079
CUAED	130.76	2.961	131.1	130.5	0.458

NOTA: EL SIGNO MENOS (-) EN LA COLUMNA DE PORCENTAJE SE REFIERE A QUE ESTA POR DEBAJO DEL VALOR NOMINAL DE LA TENSIÓN

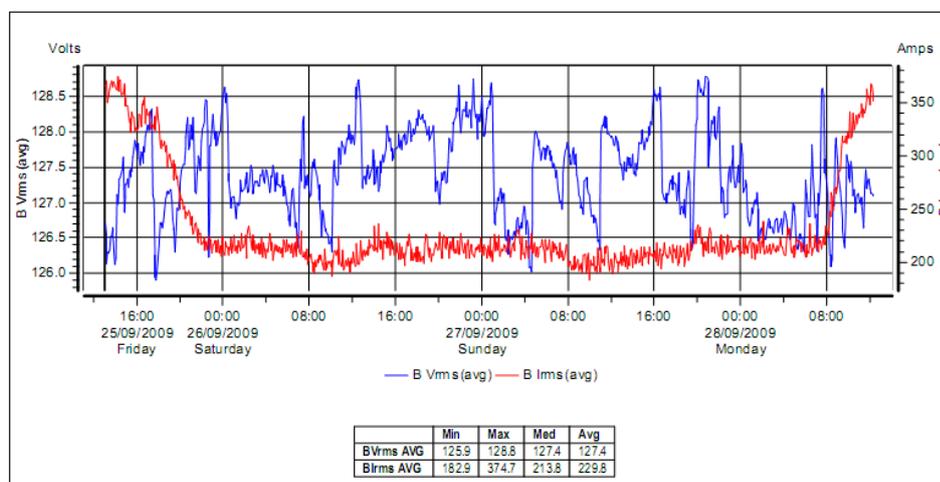
**Tabla 6.12.** Comportamiento de la tensión en el secundario de los transformadores conectados al Anillo F.

Como se puede observar, los valores promedios registrados están dentro de un rango permitido, el cual no afecta a las cargas conectadas ya que en su mayoría están diseñadas con una tolerancia para su correcta operación de 10 a 15% del valor nominal.

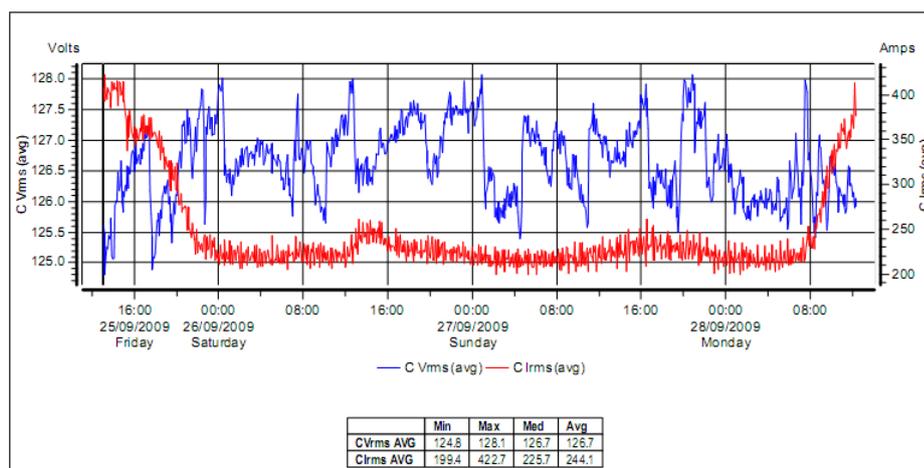
El desbalance máximo permitido para la tensión es del 3% para sistemas de menos de 1 kV, por lo cual no se registró ningún valor fuera de lo permitido. El valor máximo de desbalance fue de 0.549% (en el Instituto de Geofísica), caso contrario el valor de desbalance mínimo fue de 0% (caso particular registrado en la Facultad de Medicina en los Edificios B y C).



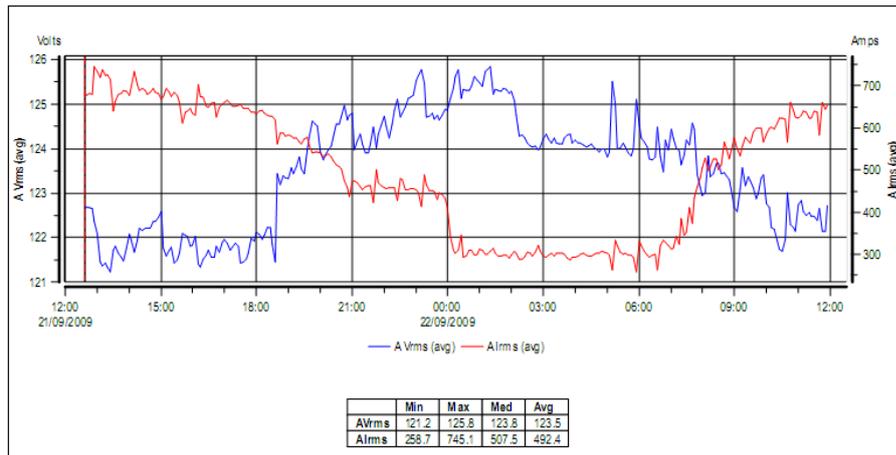
Gráfica 6.11. Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase A.



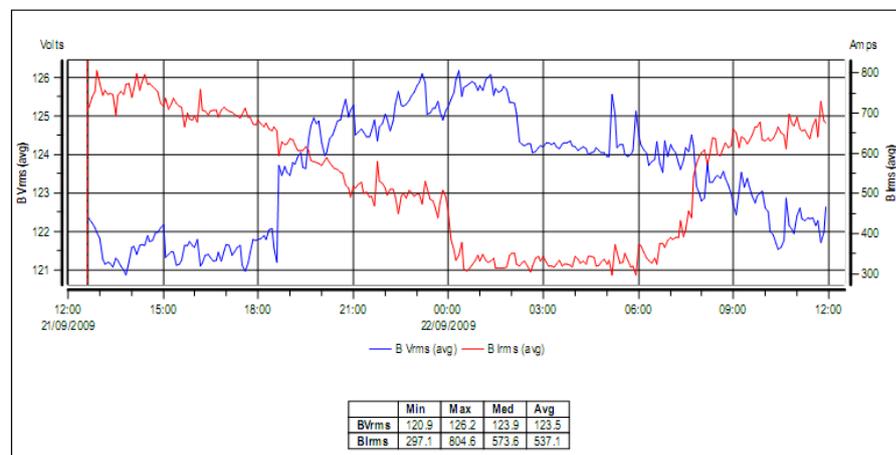
Gráfica 6.12. Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase B.



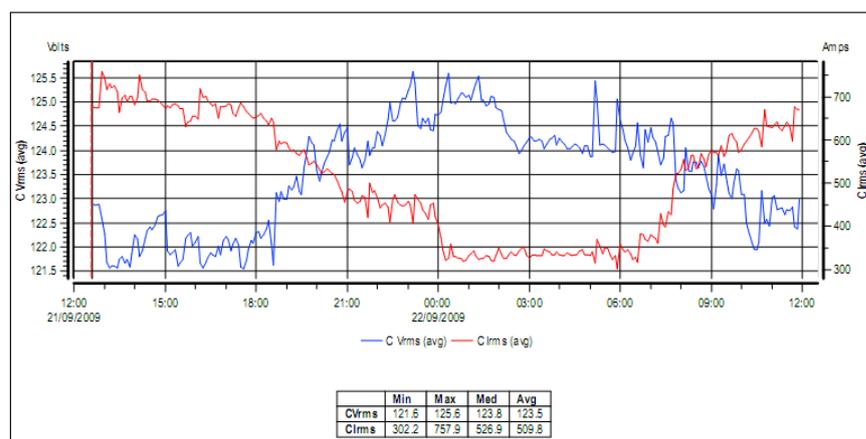
Gráfica 6.13. Comportamiento de la Tensión en el Instituto de Geofísica Fase C.



Gráfica 6.14. Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase A.



Gráfica 6.15. Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase B.



Gráfica 6.16. Comportamiento de la tensión en la Facultad de Medicina Fase C



En base a los valores obtenidos en las tablas de tensión y de corriente se puede observar que el desbalance en la tensión registrada se debe al desbalance en la corriente de demanda. Y se puede concluir que todos los valores registrados en las diferentes mediciones están por debajo de los límites recomendados.

Analizando el comportamiento de las señales presentes en estas gráficas podemos concluir que el comportamiento de la corriente y voltaje está relacionado, como era de esperarse, ya que cuando la demanda debido a la carga aumenta el comportamiento de la corriente es similar (aumenta), mientras que el voltaje disminuye.

### CORRIENTE

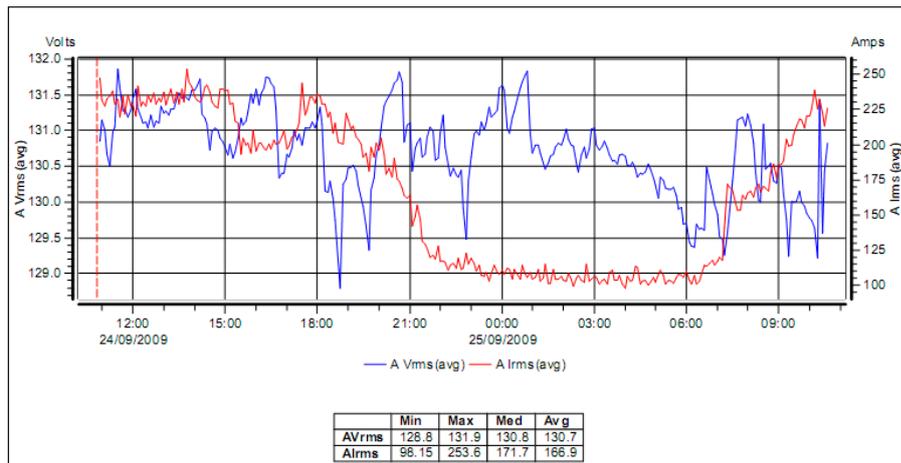
En la siguiente tabla se muestran los valores más representativos obtenidos en la medición de este parámetro en cada una de las subestaciones de las diferentes dependencias.

DEPENDENCIAS	CORRIENTE TOTAL PROMEDIO [A]	NIVEL DE CORRIENTE MÁXIMO PROMEDIO [A]	NIVEL DE CORRIENTE MÍNIMO PROMEDIO [A]	DESBALANCE DE CORRIENTE PROMEDIO EN LAS FASES [%]	VALOR MAXIMO PROMEDIO DE CORRIENTE [A]
Facultad de Medicina B y C	513.1	537.1	492.4	8.322	769.2
Facultad de Medicina D	257.96	264.1	245.7	6.967	318.51
Facultad de Medicina Investigación	493.8	525	449.4	14.400	672.06
Instituto de Geofísica	233.36	244.1	226.2	7.333	389.3
Instituto de Investigación en materiales II	459.8	470.1	454	3.425	530.63
Instituto de Investigación En materiales I	739.8	764.8	726.6	4.995	921.13
DGTIC	1432	1477	1346	8.869	1638
CCADET	205.03	210.4	199.8	5.038	382.43
CUAED	186.83	202.5	166.9	17.580	273.06

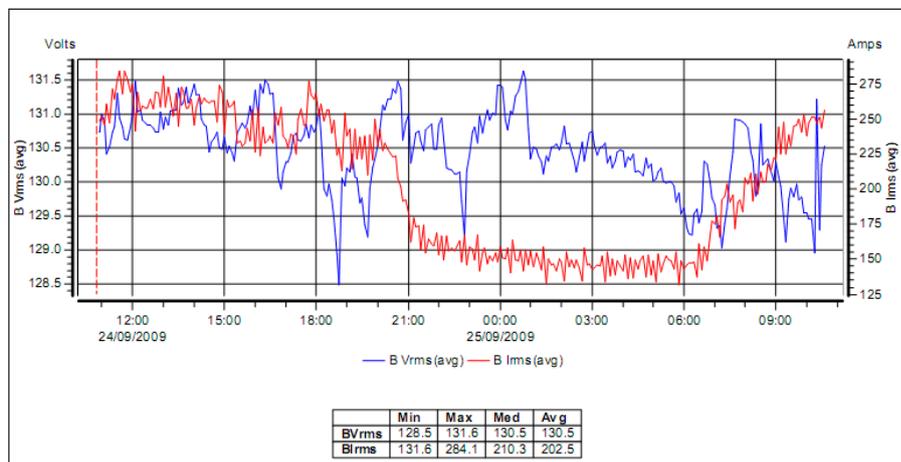
**Tabla 6.13.** Comportamiento de la Corriente en el Anillo F.

El desbalance de corriente máximo en las fases fue de 17.58 % (en la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia, CUAED), mientras que el desbalance mínimo en las fases fue de 3.425 % (en el Instituto de Investigación en Materiales II).

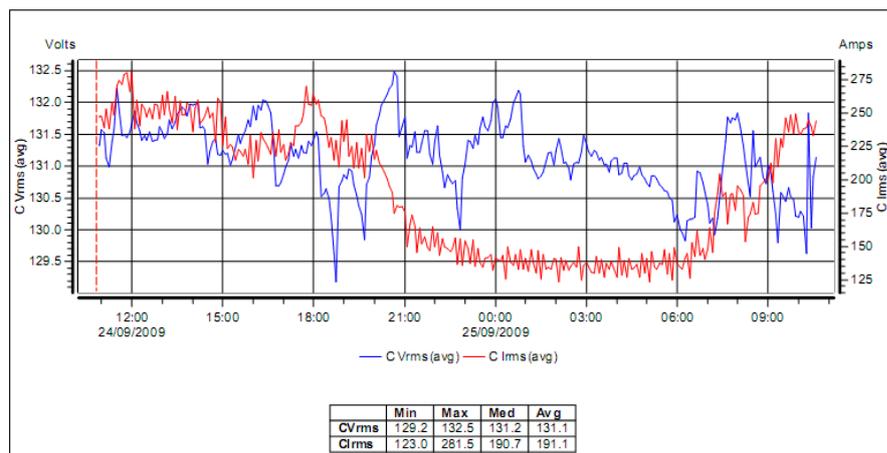
Considerando lo indicado en la norma CFE-L000045 para el desbalance máximo permitido en corriente, tanto en la Facultad de Medicina Investigación como en el CUAED se presentaron valores fuera de lo permisible y en cuyos casos el desbalance de corriente superó el 8% establecido.



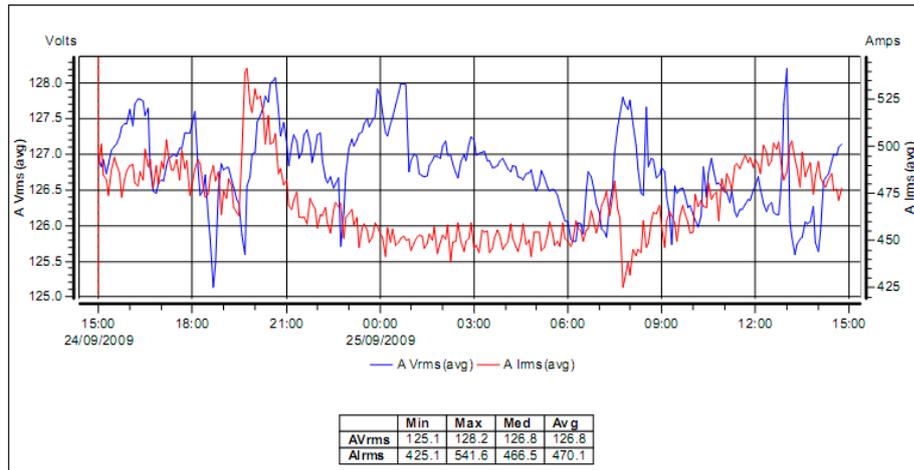
Gráfica 6.17. Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase A.



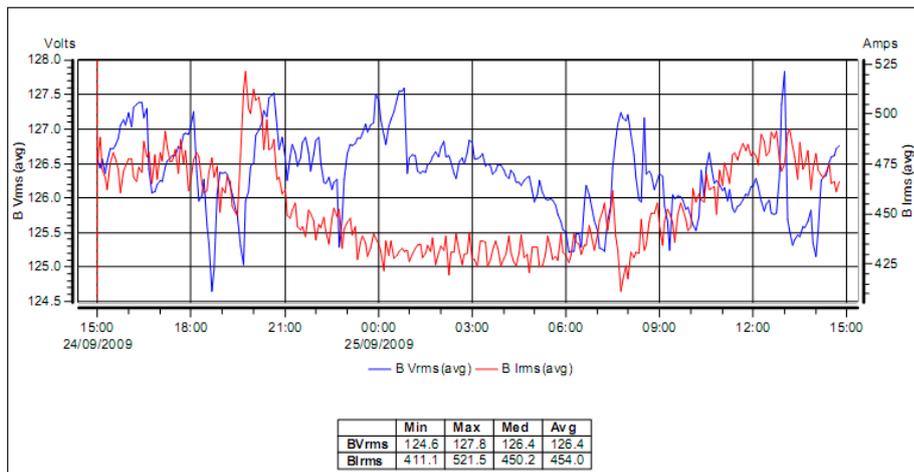
Gráfica 6.18. Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase B.



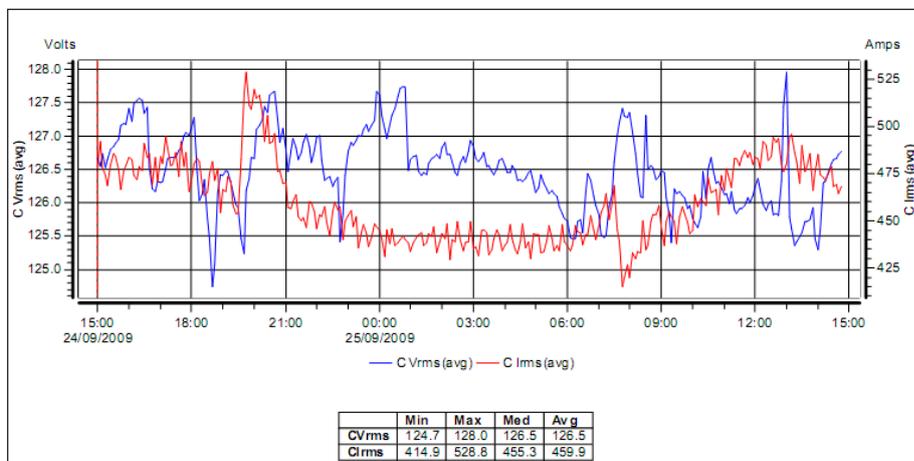
Gráfica 6.19. Comportamiento de la corriente en el CUAED Fase C.



Gráfica 6.20. Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase A.



Gráfica 6.21. Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase B.



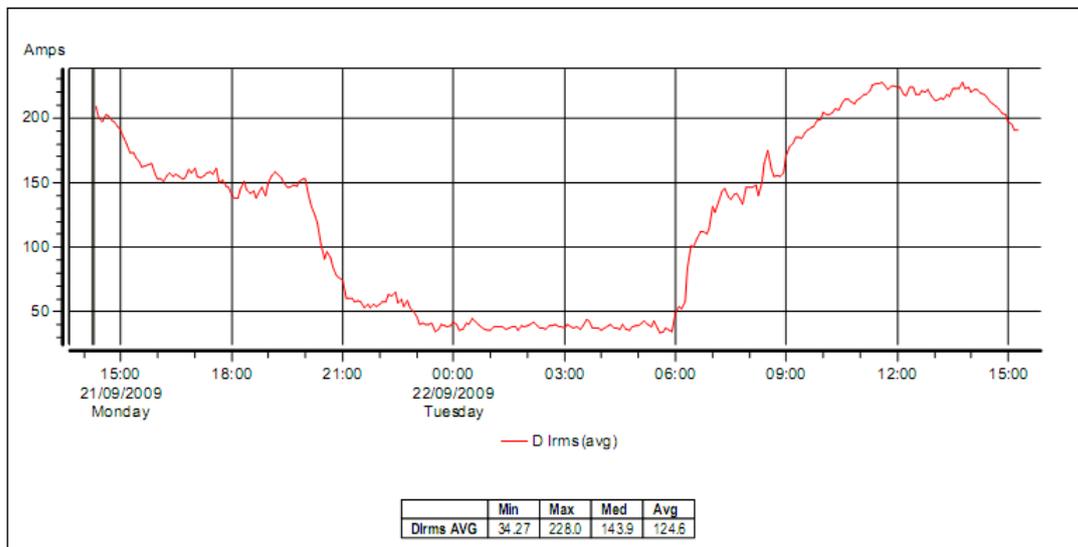
Gráfica 6.22. Comportamiento de la corriente en el Instituto de Investigación en Materiales II Fase C.

- Comportamiento de la corriente en el neutro para cada una de las dependencias.

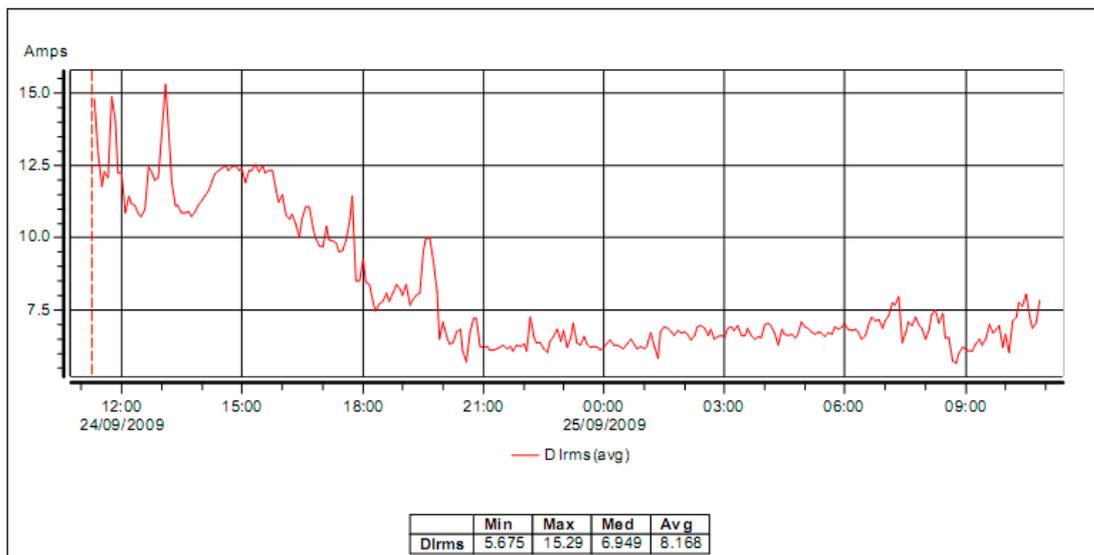
DEPENDENCIAS	CORRIENTE PROMEDIO EN EL NEUTRO [A]	CORRIENTE MÁXIMA PROMEDIO EN EL NEUTRO A PLENA CARGA [A]
Facultad de Medicina B y C	66.45	118.1
Facultad de Medicina D	124.6	228
Facultad de Medicina Investigación	39.86	92.7
Instituto de Geofísica	30.75	55.47
Instituto de Investigación en materiales II	8.797	18
Instituto de Investigación En materiales I	16.46	23.96
DGTIC	71.11	107.6
CCADET	8.168	15.29
CUAED	35.47	65.09

**Tabla 6.14.** Comportamiento de la corriente de neutro en el secundario de los transformadores conectados en el Anillo F.

El valor máximo de corriente promedio en el neutro fue de 124.6 A (en la Facultad de Medicina D), mientras que el valor mínimo promedio fue de 8.168 A (en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET).



**Gráfica 6.23.** Comportamiento de la corriente promedio en el neutro en la Facultad de Medicina D.



**Gráfica 6.24.** Comportamiento de la corriente promedio en el neutro del CCADET.

## POTENCIA REAL PROMEDIO

Se muestran los valores de la potencia real que es proporcionada por las subestaciones eléctricas hacia todas las instalaciones eléctricas de cada dependencia. Este parámetro depende de la corriente que demanda la carga conectada y del tipo de carga (factor de potencia).

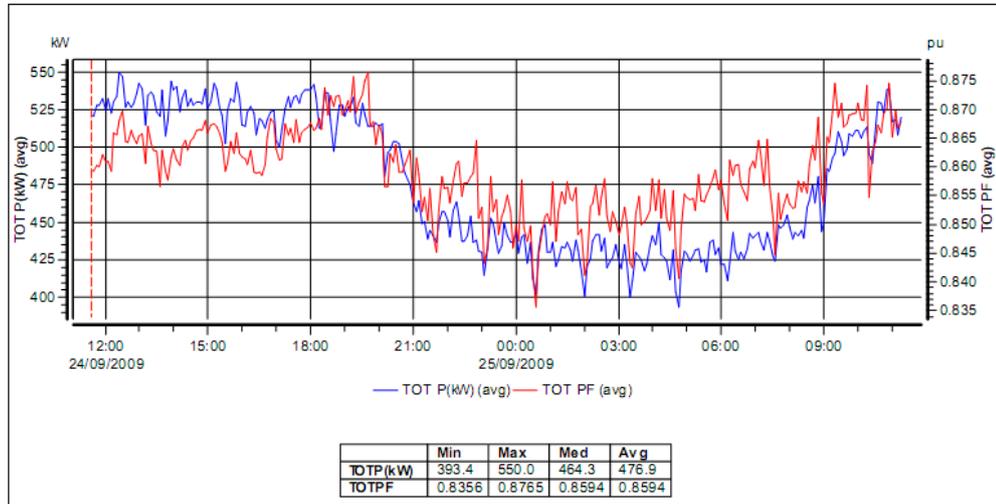
Como resultado de las mediciones se lograron obtener los valores máximos y promedios de la Potencia Real y Reactiva para cada dependencia pudiendo obtener las siguientes tablas que resumen lo anterior.

## POTENCIA REAL

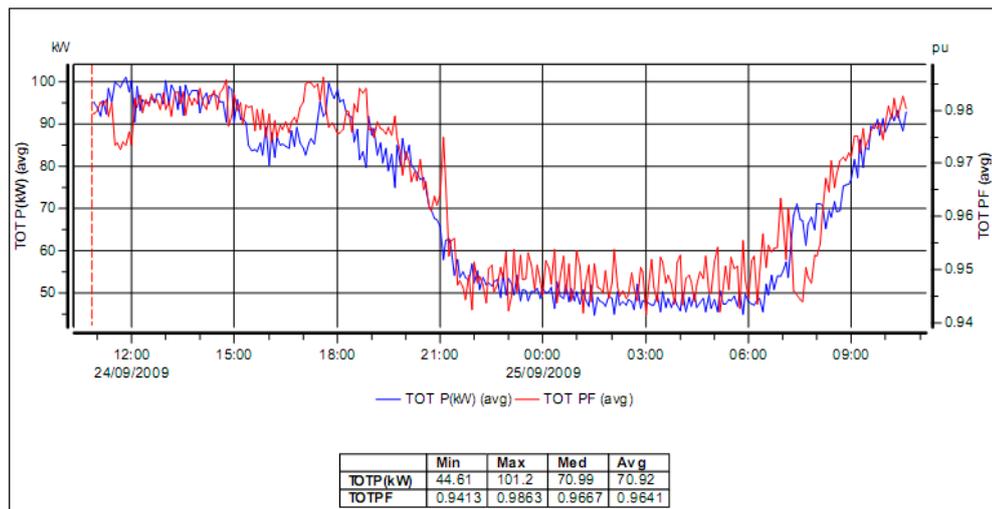
DEPENDENCIAS	POTENCIA REAL PROMEDIO [kW]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA REAL [kW]
Facultad de Medicina B y C	176.1	264.7
Facultad de Medicina D	94.93	176.4
Facultad de Medicina Investigación	147.3	215.1
Instituto de Geofísica	87.05	142.4
Instituto de Investigación en materiales II	141.7	164.3
Instituto de Investigación En materiales I	212.5	276.4
DGTIC	476.9	550
CCADET	71.76	131.7
CUAED	70.92	101.2

**Tabla 6.15.** Potencia Real en el secundario de los transformadores conectados al Anillo F.

El valor de Potencia Real máximo promedio fue de 476.9 kW (en la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, DGTIC), mientras que el valor mínimo promedio fue de 70.92 kW (en la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia, CUAED).



**Gráfica 6.25.** Máximo valor de Potencia Real promedio en la DGTIC.



**Gráfica 6.26.** Mínimo valor de Potencia Real promedio en la CUAED.

Si observamos las gráficas y los valores obtenidos para estas dos dependencias, y en general para todas las instalaciones es claro el comportamiento de la demanda, ya que se pudo determinar que durante los días laborales dentro de un centro de enseñanza el consumo de energía es mayor, caso contrario ocurre en los fines de semana cuando el consumo es mínimo.

La medición de este parámetro permite determinar la demanda promedio la cual es el consumo deseable para cada día de la semana sin que haya fluctuaciones en el perfil de demanda, esto permitiría tener una eficiencia promedio mayor ya que se tomaría este valor como patrón de consumo para todas las instalaciones.

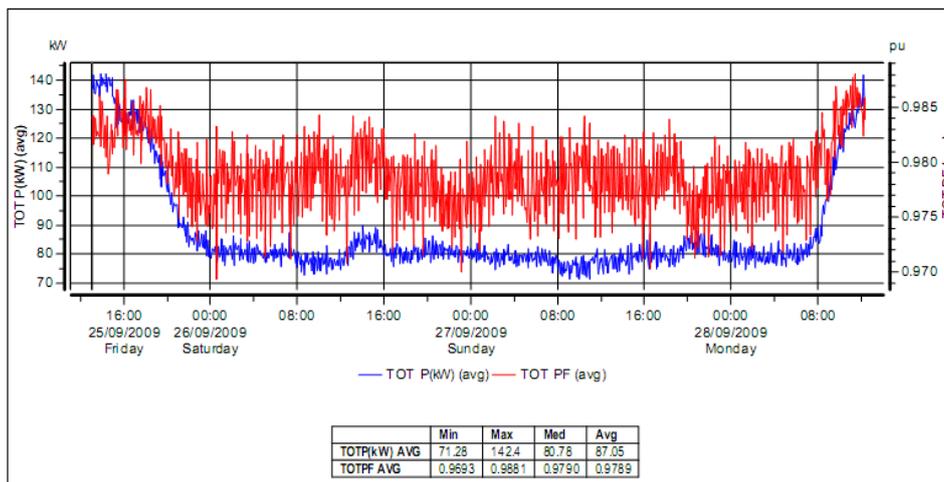


### FACTOR DE POTENCIA

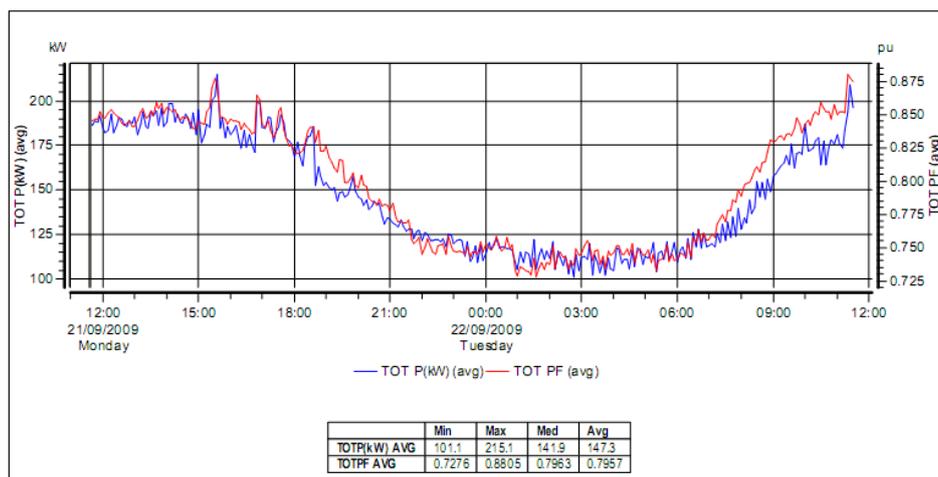
DEPENDENCIAS	FACTOR DE POTENCIA PROMEDIO	VALORES MÁXIMOS A PLENA CARGA DEL FACTOR DE POTENCIA
Facultad de Medicina B y C	0.92	0.9577
Facultad de Medicina D	0.9209	0.9653
Facultad de Medicina Investigación	0.7957	0.8805
Instituto de Geofísica	0.979	0.9881
Instituto de Investigación en materiales II	0.8091	0.8212
Instituto de Investigación En materiales I	0.8041	0.8255
DGTIC	0.8594	0.8765
CCADET	0.8986	0.9554
CUAED	0.9641	0.9863

**Tabla 6.16.** Factor de Potencia en el secundario de los transformadores conectados al Anillo F.

El valor de Factor de Potencia máximo promedio fue de 0.979 (en el Instituto de Geofísica), mientras que el valor mínimo promedio fue de 0.7957 (en la Facultad de Medicina Investigación).



**Gráfica 6.27.** Máximo valor de Factor de Potencia promedio en el Instituto de Geofísica.



**Gráfica 6.28.** Mínimo valor de Factor de Potencia promedio en la Facultad de Medicina Investigación.



La medición de este parámetro permite analizar el comportamiento de las señales tanto de corriente como de voltaje, ya que el factor de potencia es una medida del retraso de la señal de corriente respecto de la de tensión. Con lo anterior podemos determinar que entre mayor sea el atraso de la corriente respecto a la tensión mayor será la demanda de potencia reactiva, lo que no es conveniente porque la potencia reactiva no representa potencia que sea factible de realizar un trabajo.

Para la mayoría de las compañías suministradoras es conveniente contar con un factor de potencia alto, es decir de 0.9, lo cual permite operar con una mayor eficiencia un sistema eléctrico. Para efectos de facturación existen algunos valores registrados durante el periodo de mediciones que podrían mejorar, aun que es necesario tomar en cuenta que el comportamiento de este factor de potencia es debido a las cargas conectadas permanentemente, las cuales en su mayoría son equipos de iluminación y cómputo.

### **CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA FACULTAD DE MEDICINA INVESTIGACIÓN.**

Datos necesarios para el cálculo

$$\begin{aligned}F_{PR} &= 0.7957 \\P_R &= 147.3 \text{ kW} \\F_{PI} &= 0.95\end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}F_{PR} &= \text{Factor de potencia dependencia} \\P_R &= \text{Potencia Real de la dependencia} \\F_{PI} &= \text{Factor de potencia deseado}\end{aligned}$$

Utilizando la ecuación 6.4 calculamos los ángulos  $\varphi$  del triángulo de potencias, y con éste poder calcular la potencia reactiva a compensar.

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \cos^{-1}(0.7957) \\ \varphi_1 &= 37.27^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \cos^{-1}(0.95) \\ \varphi_1 &= 18.19^\circ\end{aligned}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 6.3 obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned}Q_c &= 147.3 \text{ kW}(\tan(37.27^\circ) - \tan(18.19^\circ)) \\ Q_c &= 61.693 \text{ kVAR}\end{aligned}$$

El valor obtenido de  $Q_c$  es el valor de potencia reactiva a compensar, por lo que se necesita instalar un banco de capacitores de 70 kVAR. En cuanto a la potencia reactiva absorbida por la Facultad de Medicina Investigación antes de esta corrección es:



$$Q_1 = 147.3 \text{ kW } \tan(37.2786^\circ)$$
$$Q_1 = 112.126 \text{ kVAR}$$

Si el banco de capacitores es instalado como se recomienda, la potencia que apartaría la empresa suministradora es la siguiente:

$$Q_2 = 112.126 \text{ kVAR} - 61.693 \text{ kVAR}$$
$$Q_2 = 50.433 \text{ kVAR}$$

Como resultado de la instalación del banco de capacitores la potencia reactiva que aporta la compañía suministradora se reduce a casi solo la mitad.

Ya con esta información y con la ecuación 6.5, es posible calcular tanto la potencia liberada en el transformador, como la reducción de corriente en los alimentadores y la disminución en la caída de tensión.

$$S_L = 147.3 \text{ kW} \left( \frac{1}{0.7957} - \frac{1}{0.95} \right)$$
$$S_L = 30.067 \text{ kVA}$$

Cálculo de la corriente en los alimentadores antes de la corrección del factor de potencia, usando la ecuación 6.6.

$$I_1 = \frac{147300 \text{ w}}{\sqrt{3} \times 220 \text{ v} \times 0.7957}$$
$$I_1 = 485.814 \text{ A}$$

Cálculo de la corriente en los alimentadores después de la corrección del factor de potencia, usando la ecuación 6.7.

$$I_2 = \frac{0.7957}{0.95} * 485.814 \text{ A}$$
$$I_2 = 406.908 \text{ A}$$

Con las dos corrientes calculadas anteriormente y con el uso de la ecuación 6.8 es posible obtener la reducción de corriente en los alimentadores

$$R = 485.814 \text{ A} - 406.908 \text{ A}$$
$$R = 78.9064 \text{ A}$$



Y ahora para calcular el porcentaje de reducción de corriente y la disminución de la caída de tensión usamos la ecuación 6.9.

$$\%R = \left(1 - \frac{0.7957}{0.95}\right) \times 100$$

$$\%R = 16.242\%$$

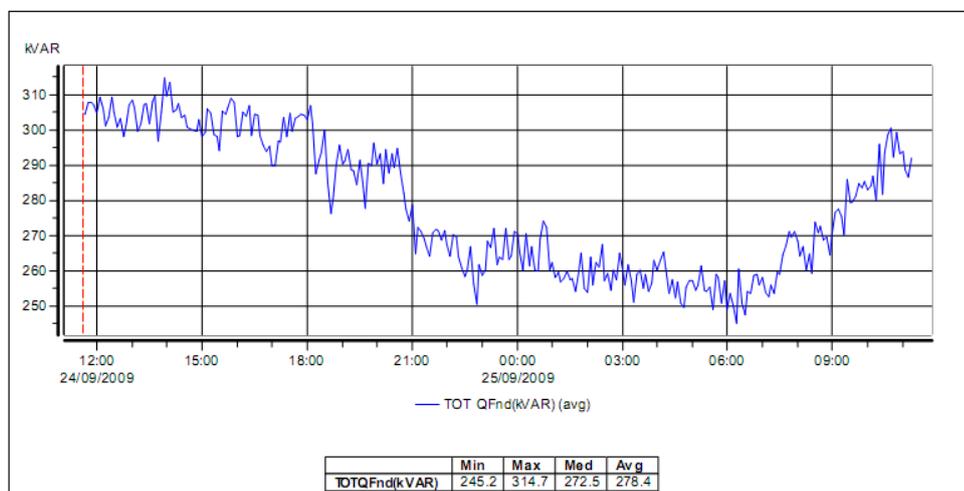
Con estos cálculos podemos concluir que la corrección del factor de potencia es muy útil no solo para compensar la potencia reactiva si no disminuir la corriente en los alimentadores lo que nos permite liberar potencia del transformador.

### POTENCIA REACTIVA.

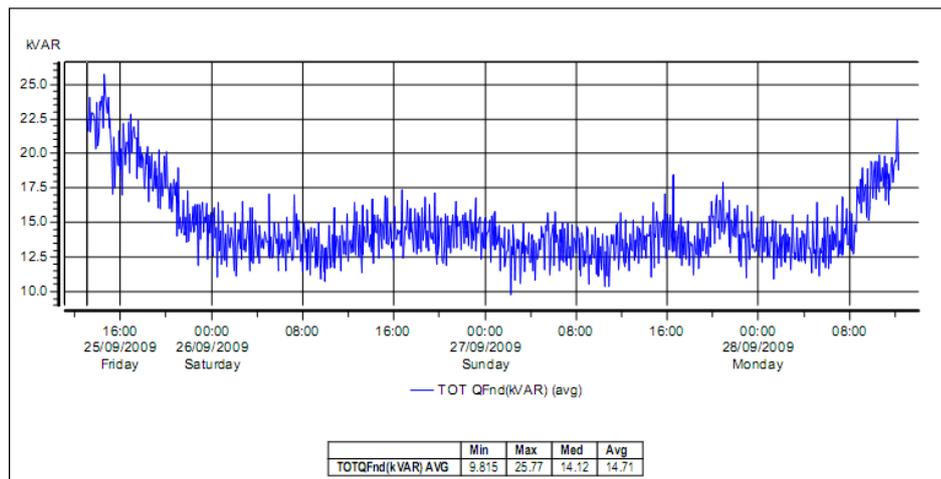
DEPENDENCIAS	POTENCIA REACTIVA PROMEDIO [kVAR]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA REACTIVA [kVAR]
Facultad de Medicina B y C	68	94.46
Facultad de Medicina D	26.22	54.77
Facultad de Medicina Investigación	107.2	123.4
Instituto de Geofísica	14.71	25.77
Instituto de Investigación en materiales II	101.4	114.5
Instituto de Investigación En materiales I	153.4	188.8
DGTIC	278.4	314.7
CCADET	26.74	49.3
CUAED	15.34	22.13

Tabla 6.17. Potencia Reactiva en el secundario delos transformadores conectados al Anillo F.

El valor de Potencia Reactiva máximo promedio fue de 278.4 kVAR (en la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, DGTIC), mientras que el valor mínimo promedio fue de 14.71 kVAR (en el Instituto de Geofísica).



Gráfica 6.29. Máximo valor de Potencia Reactiva promedio en la DGTIC.



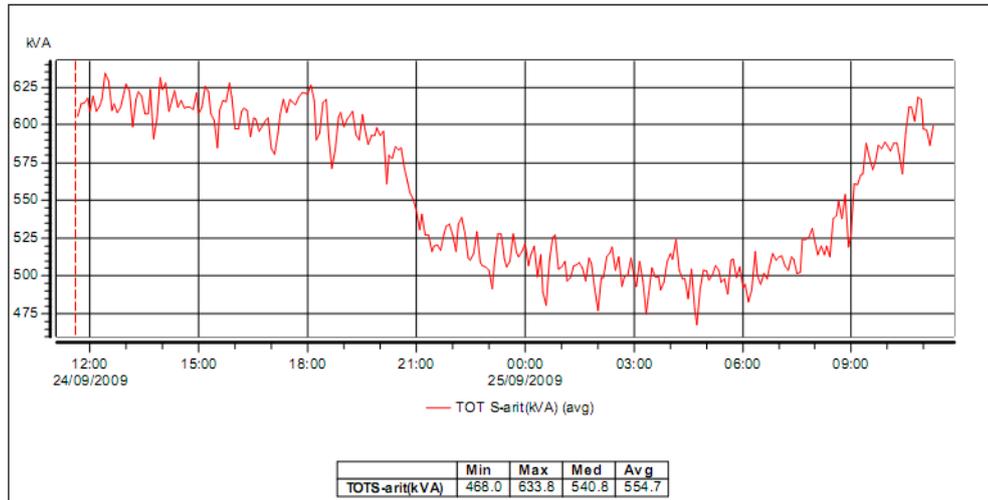
**Gráfica 6.30.** Mínimo valor de Potencia Reactiva promedio en el Instituto de Geofísica.

### POTENCIA APARENTE

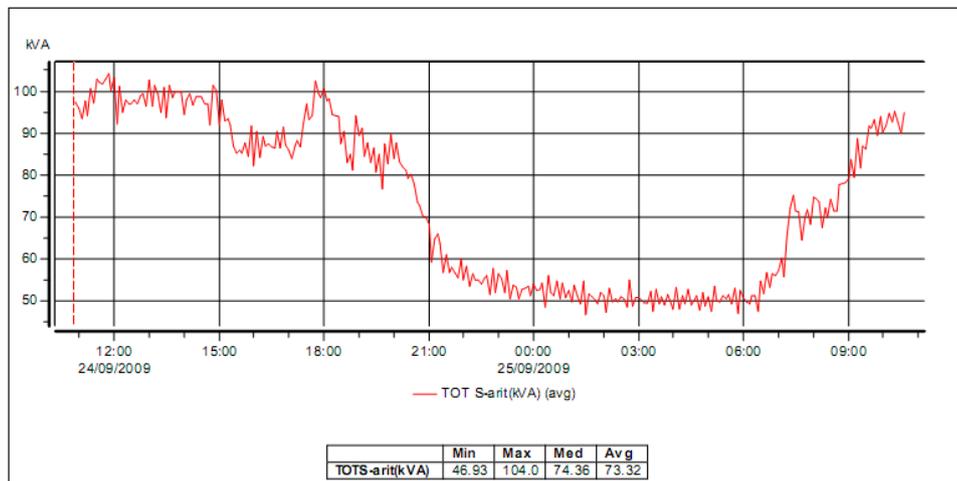
DEPENDENCIAS	POTENCIA APARENTE PROMEDIO [kVA]	VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA APARENTE [kVA]
Facultad de Medicina B y C	189.6	281.7
Facultad de Medicina D	100.9	186.8
Facultad de Medicina Investigación	183.3	246.5
Instituto de Geofísica	88.94	145.2
Instituto de Investigación en materiales II	175.2	201
Instituto de Investigación En materiales I	263.4	335.8
DGTIC	554.7	633.8
CCADET	78.01	140.5
CUAED	73.32	104

**Tabla 6.18.** Potencia Aparente en el Anillo F.

El valor de Potencia Aparente máximo promedio fue de 554.7 kVAR (en la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, DGTIC), mientras que el valor mínimo promedio fue de 73.32 kVAR (en la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia, CUAED).



**Gráfica 6.31.** Máximo valor de Potencia Aparente promedio en la DGTIC.



**Gráfica 6.32.** Mínimo valor de Potencia Aparente promedio en la CUAED.

## DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN TENSIÓN.

De acuerdo con la normatividad vigente, como se determinó en el capítulo 3, en México se establece a partir de la norma CFE L0000-45 que para sistemas eléctricos con una tensión menor a un kilo volt la Distorsión Armónica Total en Tensión debe ser menor de 8%.

Mientras que en la norma STD IEEE 519-2014 indica que para los sistemas eléctricos con una tensión menor a 69 kV la Distorsión Armónica Total en Tensión (DATT) debe ser menor al 5%. En la más reciente actualización de la IEEE 519-2014 también se contemplan sistemas de 1kV o menos.

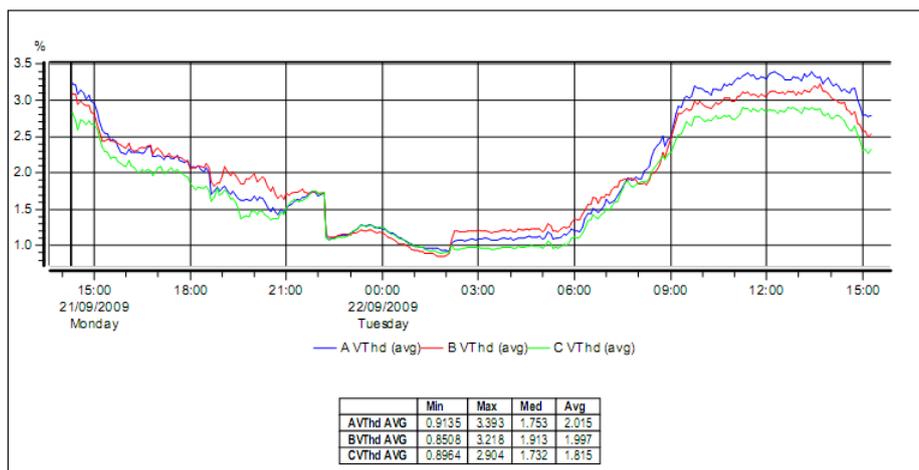
A continuación, se muestran los valores mínimos, promedio y máximos por fase obtenidos en las mediciones de cada una de las diferentes dependencias, para la Distorsión Armónica Total en Tensión:



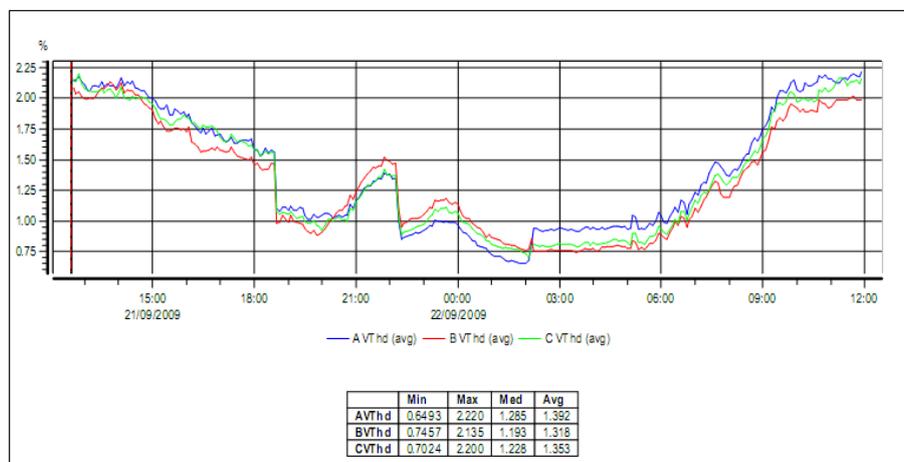
DEPENDENCIAS	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN TENSIÓN [%]								
	MÍNIMO			PROMEDIO			MÁXIMO		
	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C
Facultad de Medicina B y C	0.6493	0.7457	0.7024	1.392	1.318	1.353	2.22	2.135	2.2
Facultad de Medicina D	0.9135	0.8508	0.8964	2.015	1.997	1.815	3.393	3.218	2.904
Facultad de Medicina Investigación	0.7152	0.8557	0.7517	1.318	1.306	1.294	1.856	1.82	1.86
Instituto de Geofísica	0.8809	0.9675	0.8839	1.098	1.158	1.096	1.768	1.743	1.824
Instituto de Investigación en materiales II	1.657	1.577	1.675	1.809	1.772	1.818	2.222	2.218	2.227
Instituto de Investigación En materiales I	1.946	1.987	2.064	2.132	2.168	2.25	2.469	2.482	2.592
DGTIC	0.7893	0.8711	0.8562	1.111	1.165	1.163	1.791	1.851	1.786
CCADET	1.201	1.222	1.077	1.752	1.902	1.681	2.366	2.684	2.484
CUAED	0.9636	0.9579	0.7602	1.432	1.434	1.189	2.033	1.949	1.747

Tabla 6.19. Distorsión Armónica total en tensión Anillo F.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de lo establecido, el valor máximo se presentó en la Fase A de la Facultad de Medicina D (3.393%), mientras que el valor mínimo se presentó en la Fase A de la Facultad de medicina B y C (0.6493%).



Gráfica 6.33. Máximo valor de DATT en la Facultad de Medicina D.



Gráfica 6.34. Mínimo valor de DATT en la Facultad de Medicina B y C.



## DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN CORRIENTE

La Distorsión Armónica Total en Corriente (DATC) es una figura de mérito cuya referencia es altamente sensible al nivel de carga y puede dar falsos positivos a bajos niveles de carga, cosa que ocurre con mucha frecuencia, pero también puede dar positivos correctos con altos niveles de carga. Debido a esta dependencia del nivel de carga fue que se definió el DATD.

Por otra parte, el DATD es una figura de mérito cuya referencia es insensible al nivel de carga y esa figura no da falsos positivos, precisamente por esa falta de sensibilidad. Si el DATD da un valor alto entonces el resultado es veraz y deben tomarse acciones correctivas, a diferencia del DATC que si da un valor alto hay que revisar el nivel de carga para ver si hay que tomar medidas correctivas.

A partir del desarrollo del capítulo 3 podemos establecer que tanto para la norma CFE L0000-45 y la STD IEEE 519-1992 el valor máximo permitido para la DATD es de 15%, para sistemas en los que la impedancia relativa es mayor a cien y menor a mil.

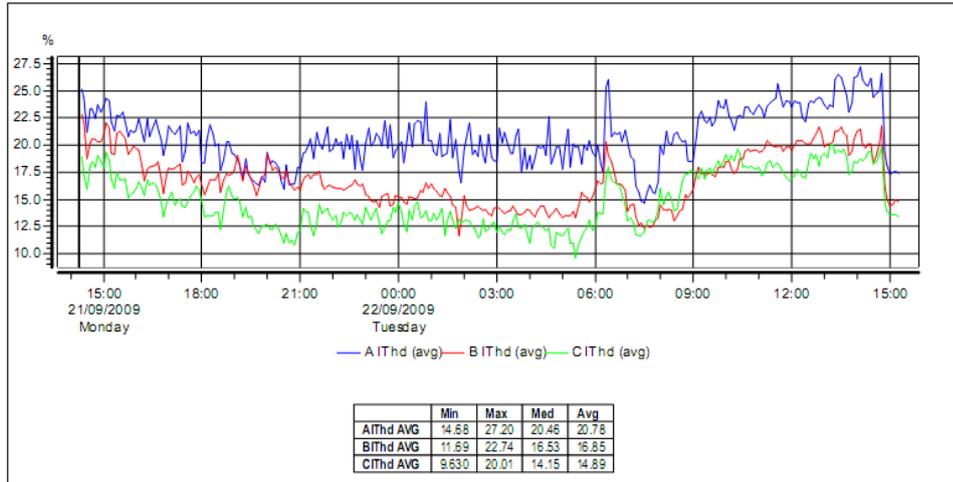
A continuación, se muestra la tabla de los factores de distorsión armónica en corriente registrados en el lado de baja tensión de algunos de los transformadores conectados al anillo E del sistema de distribución.

DEPENDENCIAS	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN CORRIENTE [%]
Facultad de Medicina B y C	3.625
Facultad de Medicina D	17.507
Facultad de Medicina Investigación	5.107
Instituto de Geofísica	5.335
Instituto de Investigación en materiales II	7.911
Instituto de Investigación En materiales I	6.385
DGTIC	5.207
CCADET	15.960
CUAED	7.550

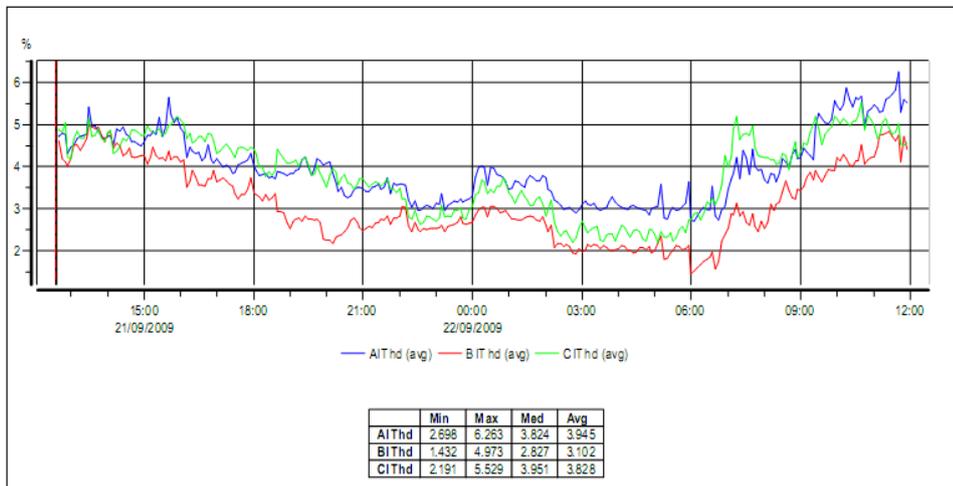
**Tabla 6.20.** Distorsión Armónica Total en corriente.

De la tabla anterior se observa que para los valores del factor de distorsión armónica en corriente en las tres fases, se presentaron casos en los que se sobrepasó el límite establecido, tal fue el caso de la Facultad de Medicina D y CCADET.

El valor máximo de DATC en las tres fases se presentó en la Facultad de Medicina D (17.507%), mientras que el valor mínimo en las tres fases se presentó en la Facultad de Medicina B y C (3.625%).



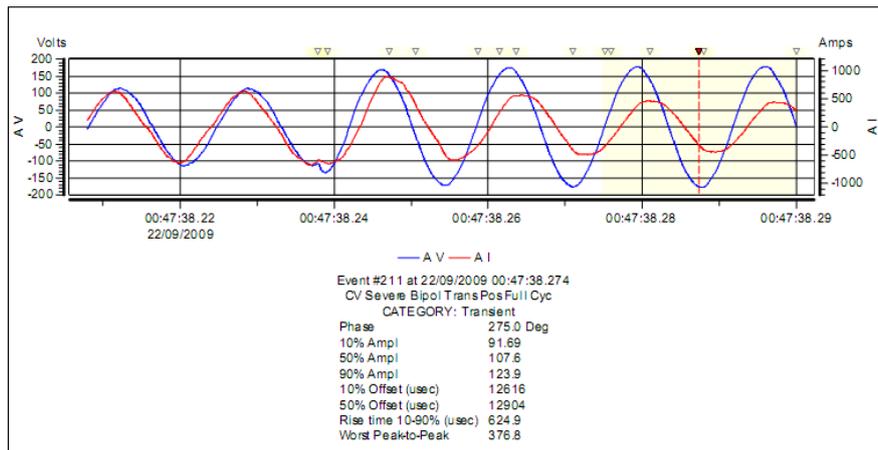
Gráfica 6.35. Máximo valor de DATC en la Facultad de Medicina D.



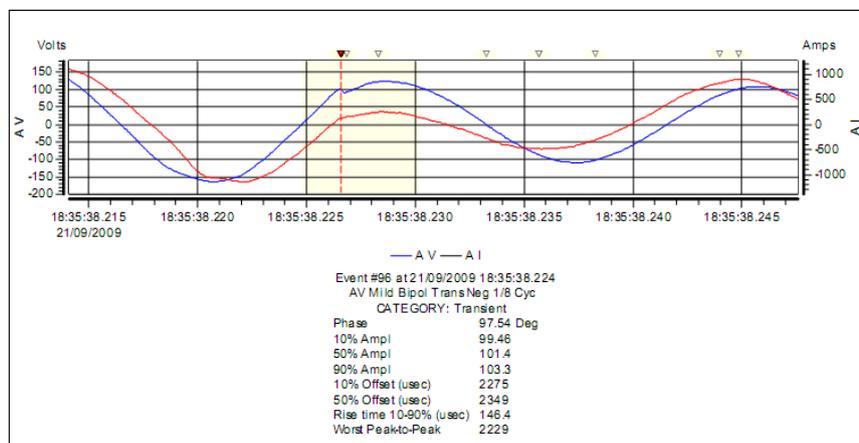
Gráfica 6.36. Mínimo valor de DATC en la Facultad de Medicina B y C.

## DISTURBIOS ELÉCTRICOS MÁS REPRESENTATIVOS.

El análisis de calidad de la energía empleando el analizador de redes permite obtener los disturbios eléctricos que provocan la distorsión de la forma de onda. A continuación, se presentan los casos más representativos que se presentaron en las mediciones que se llevaron a cabo en las diferentes dependencias del Anillo F:



**Gráfica 6.37.** Transitorios de Voltaje y Corriente en la Facultad de Medicina B y C.



**Gráfica 6.38.** Transitorios de Voltaje y Corriente en la Facultad de Medicina, Torre de Investigación.

En ambos casos se presentaron transitorios de voltaje y de corriente, tanto en las instalaciones de la Facultad de Medicina en la Torre de Investigación, como en la subestación donde se encuentra ubicado el transformador que le da suministro al edificio B y C.

En dichos eventos se observa la presencia de una depresión (sag) en la tensión que afecta el valor de la corriente, esto pudo haber sido ocasionado por la entrada de una carga considerable en el sistema, lo cual puede afectar a equipos de cómputo que no estén debidamente conectados o protegidos y en la reducción de la intensidad de los luminarios. Otra causa posible de estos transitorios puede ser la presencia de corriente directa en sistemas de corriente alterna o por la energización de banco de capacitores.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES.

El hecho de que exista la propagación de corrientes armónicas en las instalaciones, implica que existan también tensiones armónicas, estas debidas a que dentro de la carga conectada en el sistema se presentan cargas no lineales, por lo que, para el caso de las dependencias conectadas en los anillos E y F se recomienda reemplazar las cargas no lineales por otras, para la misma función, pero de diseño actualizado las cuales deberán producir menos distorsión, se pretende que esta acción se realice a mediano o largo plazo debido al costo que implica.

Uno de los problemas identificados es el bajo factor de potencia para algunas instalaciones. El beneficio más importante de mejorar este factor de potencia es que existen bonificaciones por parte de la compañía suministradora que reducen el costo total de la energía que se consume.

Otras medidas que mejoran la calidad de la energía en las instalaciones, en general de todos los anillos que integran el sistema de Ciudad Universitaria, son: balancear la acometida mediante una adecuada distribución de las cargas e instalar transformadores de aislamiento para alimentar, exclusivamente, a las cargas no lineales.

Al igual que en este documento es importante inspeccionar las características de los equipos y los circuitos eléctricos para realizar un análisis de problemas de armónicas más eficiente. Debido a que estos problemas en su mayoría de las ocasiones son causados o empeorados por cargas desbalanceadas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor neutro, por problemas con equipos o el uso inapropiado de los mismos, los cuales pueden ser identificados con una inspección cuidadosa con equipo apropiado.

Así como implementar un proceso para llevar acabo un mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones, ya que esto permitirá que se conserven en buen estado y de esta manera prevenir fallas en el suministro y garantizar la continuidad del servicio, considerando en todo momento el uso eficiente de la energía.



## RECOMENDACIONES

Para el caso de sobretensiones transitorias y armónicas se recomienda disminuir la impedancia a tierra e incrementar la capacidad del neutro, ya que en un gran porcentaje los problemas de puesta a tierra contribuyen en gran medida con la calidad de energía.

Otra recomendación es instalar los dispositivos (filtros, transformadores, UPS's, etc.), que limiten o reduzcan la distorsión y las variaciones tanto en la tensión como en la corriente del sistema. Lo anterior se deberá hacer en base a lo analizado en este documento, recordando que las soluciones aquí propuestas, están basadas en estudios eléctricos, normas y el costo de éstas, ya que no solo es importante corregir un problema, si no el poder dar una solución eficiente, cuidando los aspectos antes mencionados.

El uso de filtros contribuye a bloquear o atrapar la energía de los armónicos de tal manera que no fluya por los equipos o que no entre al sistema siendo los filtros pasivos los más simples, más económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicas. Por otro lado están los filtros activos los cuales tienen una mayor aplicación aunque tienen la desventaja de ser más caros y un consumo de potencia significativo, creando además niveles altos de interferencia electromagnética.

El Código Nacional americano (NEC) y Underwriting's Laboratory (UL), demandan que sean especificados transformadores de factor k para la alimentación de cargas no lineales, ya que están diseñados para operar con menores pérdidas a las frecuencias armónicas.

Recapitulando y a manera de simplificar todo lo anteriormente visto, en cuanto a calidad de energía se refiere, vimos todos los problemas posibles y dentro de estos los que se presentaron en las diferentes subestaciones de los anillos E y F del sistema de distribución de Ciudad Universitaria UNAM, además de las soluciones que mejoran la calidad de energía en las diferentes instalaciones.

## COSTO BENEFICIO PARA LOS USUARIOS

### - Ahorro

La eficiencia energética es el modo más rápido, económico y limpio de reducir el consumo energético y reducir así las emisiones de gases de efecto invernadero, en la mayoría de las instalaciones se puede lograr un considerable porcentaje de ahorro energético utilizando las soluciones y tecnologías disponibles en la actualidad.



- **Análisis del uso de la energía**

El diagnóstico del consumo de energía y la asignación de costos es el primer paso importante para conseguir un uso eficiente de la energía. Las soluciones del uso de la energía ofrecen un medio para entender el consumo energético de todas las instalaciones, así como el análisis de los informes de facturación permiten a los usuarios efectuar acciones que disminuyan los costes sobre el gasto energético.

- **Beneficios al cliente**

Reducir los efectos negativos que tienen los armónicos sobre las instalaciones permitirá disminuir los costes de operación y los consumos energéticos. Los estudios de armónicos permiten conocer exactamente cuánto, cómo y cuándo conseguirlo.

- Incremento vida útil de los equipos.
- Reducción de pérdidas por sobrecargas y calentamientos de cables.
- Atenuación de las fuentes de distorsión del sistema.
- Estabilidad a las cargas del sistema e incremento de la fiabilidad de la red.



## CAPÍTULO 8

### APÉNDICES.

#### 8.1. NORMAS ANCE.

<b>Clasificación</b>	<b>Pertenece</b>	<b>Título</b>
NMX-550/1-1-ANCE-2008	CT 77	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 1-1- Generalidade: Aplicación E Interpretación de Definiciones y términos Básicos
NMX-J-616-ANCE-2008	NA	Guía de aplicación de filtros y capacitores con conexión en paralelo para la corrección de distorsión Armónica
NMX-J-610/3-8-ANCE-2008	GT 77 D	Compatibilidad electromagnética(EMC)-Parte 3-8; limites-transmisión de señales en instalaciones eléctricas de baja y media tensión-niveles de perturbaciones electromagnéticas
NMX-J-550/4-2-ANCE-2005	GT 77B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-2; Técnicas de prueba a descargas electrostáticas
NMX-J-550/3-3-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética (Emc)-Parte 3-3; limites-limitaciones. Para los cambios de tensión. Las fluctuaciones de tensión y parpadeo. En los sistemas públicos de suministro de baja tensión para equipos con corriente nominal= Que 16 A por fase y no sometidos a conexión adicional
NMX-J-550/3-2-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 3-3; Limites-Limites para las emisiones de corriente Armónicas (Aparatos con corriente de Entrada =16 A Por fase).



NMX-J-550/4-15-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-15; técnicas de prueba y medición - medidor de parpadeo-Especificaciones de funcionamiento y de diseño.
NMX-J-610/3-6-ANCE-2008	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 3-6; Evaluación de límites de distorsión armónica para la conexión de instalaciones eléctricas a sistemas eléctricos de potencia
NMX-J-610/6-2-ANCE-2008	GT 77 D	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 6-2; normas genéricas-requisitos de inmunidad de aparatos eléctricos en ambientes industriales
NMX-J-610/4-29-ANCE-2008	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-29; Técnicas de prueba y medición-prueba de inmunidad a caídas de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión en puertos de alimentación de corriente directa
NMX-J-550/4-7-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-7; Técnicas de prueba y medición-guía general de instrumentación y medición para armónicas e inter armónicas. En sistemas de suministro de Energía eléctrica y equipo conectado a estos.
NMX-J -550/4-13-ANCE-2006	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-13; Técnicas de prueba y medición-pruebas de inmunidad a Armónicas e inter armónicas. En las terminales de alimentación, incluyendo los puertos para la transmisión de señales de baja frecuencia en las instalaciones eléctricas de baja tensión



NMX-J-550/3-11-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 3-11; límites- limitación de las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión y parpadeo en sistemas públicos de alimentación de baja tensión -equipos con corriente nominal = 75 A y sujetos a conexión condicional
NMX-J-550/2-2-ANCE-2005	GT 77 A	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 2-2, entorno- niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en los sistemas de suministro público de baja tensión
NMX-J-550/4-12-ANCE-2006	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-12; Técnicas de prueba y medición-pruebas de inmunidad a ondas oscilatorias.
NMX-J-550/4-5-ANCE-2005	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-: Técnicas de prueba y medición- Pruebas de inmunidad a ráfagas de impulsos eléctricos Rápidos.
NMX-J-610/4-1-ANCE-2009	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-1: técnicas de prueba y medición- guía para la selección de pruebas de inmunidad radiada y conducida de la serie de normas NMX-j610/4-ANCE.
NMX-J-610/4-17-ANCE-2008	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-17: técnicas de prueba y medición- Prueba de inmunidad al rizo en la entrada de alimentación en corriente directa
NMX-J-550/4-4-ANCE-2005	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-4: técnicas de prueba y medición- pruebas de inmunidad a ráfagas de impulsos eléctricos Rápidos.



NMX-550/4-11-ANCE-2006	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 4-11: técnicas de prueba y medición- pruebas de inmunidad a caídas de tensión con transición gradual para equipo.
NMX-J-550/14-2-ANCE-2008	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 14-2: requisitos para aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y aparatos similares- requisitos de inmunidad
NMX-J-550/1-1-ANCE-2008	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 1-1 - generalidades: aplicaciones e interpretación de definiciones y términos básicos
NMX-J-550/4-10-ANCE-2007	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-10: técnicas de pruebas y medición- prueba de inmunidad a campos magnéticos oscilatorios amortiguados
NMX-J-550/4-3-ANCE-2008	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-3: técnicas de inmunidad a campos electromagnéticos radiados por señales de radiofrecuencia
NMX-J-610/4-110-ANCE-2008	NA	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-110: técnicas de prueba y medición- Métodos de medición de los niveles de campo eléctrico y magnético que se generan por sistemas eléctricos de potencia relativos a la exposición del cuerpo humano
NMX-J-550/4-30-ANCE-2007	GT 77 B	Compatibilidad Electromagnética(EMC)-Parte 4-3: Técnicas de prueba y medición- pruebas de inmunidad a campos electromagnéticos radiados por señales de radiofrecuencia



NMX-J-550/3-4-ANCE-2005

GT 77 A

Compatibilidad Electromagnética (EMC)-Parte 3-4: límites- Límites de las emisiones de corrientes armónicas en los sistemas de suministro de baja tensión para equipos con corriente nominal >16A por fase.

## 8.2. NORMAS.

- ✓ **NOM-001-SEDE-2012**
- ✓ **IEEE STANDARD 519-1992**
- ✓ **IEC 61000-2-2**
- ✓ **IEC 61000-3-2**
- ✓ **IEC 61000-3-4**
- ✓ **IEC 61000-3-6**
- ✓ **EN 50160**
- ✓ **CFE L0000-45**

## 8.3. DATOS TÉCNICOS DEL ANALIZADOR DE REDES TRIFÁSICO.

La memoria de 6 MB del PowerPad se encuentra dividida para permitirle almacenar tipos diferentes de datos, sincronizados o independientes unos de otros. Se pueden almacenar hasta 12 fotos instantáneas de la pantalla, hasta 50 transientes capturados que contienen cuatro ciclos para cada entrada activa, y 4096 eventos de alarma, también puede registrar datos de tendencia durante días, semanas e incluso meses. Contiene seis botones de acceso directo a funciones que le permiten ver rápidamente:

**Forma de onda:** Volts, Amps, TDH y factor de cresta por fase o en todas las fases.

**Armónicos:** Hasta el 50th para volts, Amps y VA. Los armónicos individuales se presentan como un porcentaje y en valor real. También se puede presentar la dirección y la secuencia de los armónicos.

**Transientes:** Ajuste, capture y presente los transientes.

**Alarmas:** Configura, captura y presenta hasta 4096 eventos de alarma basados en hasta diez variables de disparo diferentes.

**Registro:** Configura y registra datos de tendencia a velocidades seleccionables desde una muestra/ segundo hasta una muestra cada 15 minutos en 22 variables diferentes para todas las fases.

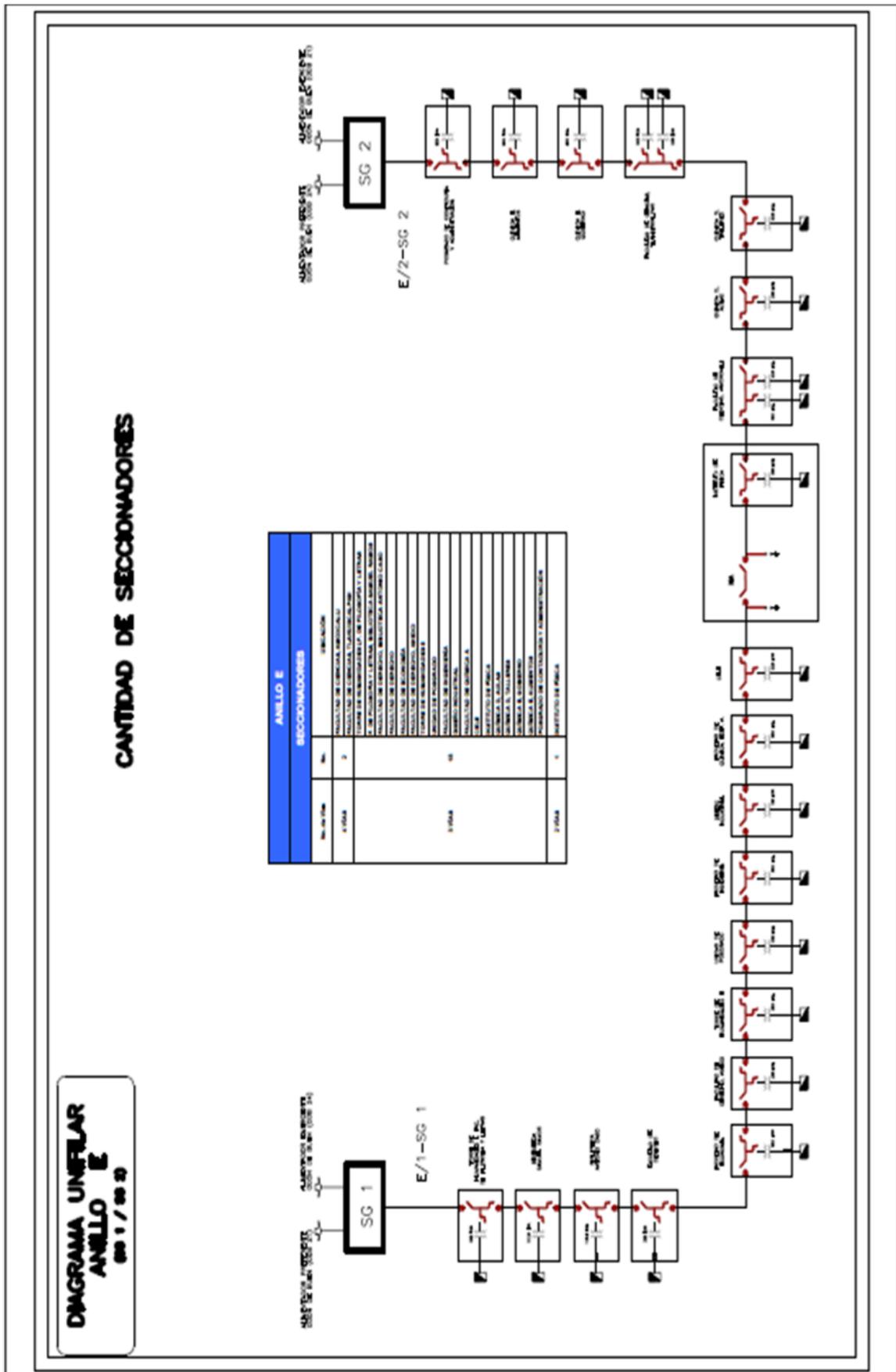
**Potencia y energía:** Presenta watts, VARs y VA por fase y total

**8.4. DIAGRAMAS UNIFILARES ANILLOS E Y F.**

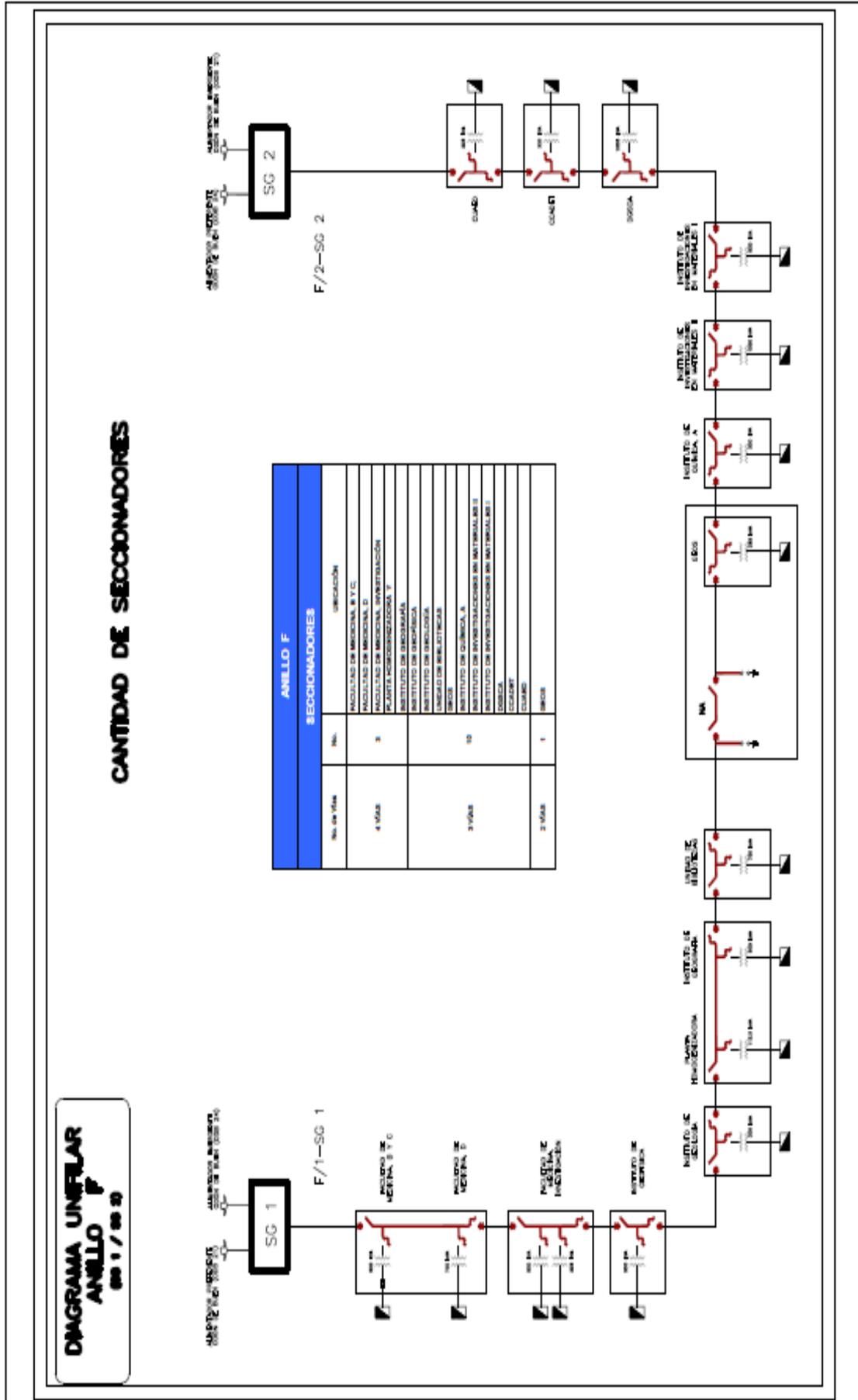
Dependencias	Fecha	Anillo	Visita
Torre de Humanidades Facultad de Filosofía y Letras		E	X
Biblioteca Samuel Ramos, Biblioteca Antonio Caso		E	X
Facultad de Economía		E	X
Facultad de Derecho		E	X
Facultad de Derecho Anexo		E	
Torre de Humanidades II		E	X
Unidad de Posgrado		E	X
Facultad de Ingeniería		E	X
Diseño Industrial		E	
Facultad de Química Edificio A		E	X
CELE		E	
Instituto de Física		E	X
Facultad de Ciencias Amoxcalli		E	
Facultad de Ciencias Dermestario		E	
Química D, Aulas		E	X
Química D, Talleres		E	X
Facultad de Ciencias Tlahuicalpan		E	X
Química E, Gobierno		E	X
Química E, Alimentos		E	X
Posgrado de Contaduría y Administración		E	
Facultad de Medicina B y C		F	X
Facultad de Medicina D		F	X
Facultad de Medicina Investigación		F	X
Instituto de Geofísica		F	X
Instituto de Geología		F	X
Planta Homogeneizadora, Instituto de Geografía		F	
Unidad de bibliotecas		F	
GEOS		F	X
Instituto de Investigación en materiales II		F	X
Instituto de Química A		F	
Instituto de Investigación En materiales I		F	X
DGTIC		F	X
CCADET		F	X
CUAED		F	X

Tabla 8.1) Lista de dependencias visitadas para el estudio.











## 8.5. BIBLIOGRAFÍA.

[1]

**Título:** Redes Eléctricas Tomo 1,2.

**Autor:** Jacinto Viqueira Landa.

**Editorial:** UNAM Facultad de Ingeniería, 2004.

[2]

**Título:** Sistemas de potencia, Análisis y diseño.

**Autor:** Duncan Glover/Mulukutla S. Sarna.

**Editorial:** Thomson, 3ra edición.

[3]

**Título:** Manual de equipos eléctricos.

**Autor:** Enríquez Harper.

**Editorial:** Limusa.

[4]

**Título:** Sistemas de distribución.

**Autor:** Espinosa Lara Roberto.

**Editorial:** Limusa.

[5]

**Título:** Historia de la eléctrica de potencia.

[6]

**Título:** Calidad de la energía y Análisis Armónico en Sistemas eléctricos.

**Autor:** Dr. Madrigal Martínez Manuel.

[7]

**Título:** Comisión Federal de Electricidad, enero 2005, especificación CFE L0000-45 "Desviaciones Permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

[8]

**Título:** IEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Std 1159-1995; IEEE Standars Coordinating committee 22 on power Quality.

[9]

**Título:** Power System Harmonics: Fundamentals, Analysis and filter design.

**Autor:** George J. Walkieh

Editorial: Stringer

[10]

**Título:** IEEE Task Force, "Effects of harmonics on equipment", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, Abril 1993.



[11]

**Título:** “An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads”.

**Autor:** A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, M. Samotyj,

**Editorial:** IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 10, N° 1, (1995)

[12]

**Título:** “Determination of voltage distortion factor for a network loaded with several DC motor drives”, IEE Proc. Part C, Volumen 131, N° 3. (1984).

**Autor:** P. Crnosija,

[13]

**Título:** “Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads”. Harmonics and Quality of Power, 1998. Proceedings 8th. International Conference on, Volumen: 2, pp 883-889, Oct. 1998

**Autor:** A. Mansoor, W. M. Grady

[14]

**Título:** “Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 10, N° 3, (1995).

**Autor:** A. Mansoor, W. M. Grady, R. S. Thallam, M. T. Doyle, S. D. Krein, M. J. Samotyj,

[15]

**Título:** “Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 10, No 4, Noviembre 1995.

**Autor:** A. K. Khan, R. Dwyer, M. McGranaghan

[16]

**Título:** “The Influence of personal computer processing modes on line current harmonics”. IEEE Transaction on Power Delivery, Volumen 18, N° 4, (2003).

**Autor:** P. J. Moore, I. E. Portugués,

[17]

**Título:** “Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers”. Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volumen: 2, 27-31

**Autor:** W. M. Grady, A. Mansoor, E. F. Fuchs, P. Verde, M. Doyle,

[18]

**Título:** Calidad de la Energía

Proyecto de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología. “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS).

**Asesor:** Msc. Omar Prias Caicedo, Coinvestigador.



[19]

**Título:** Calidad del Servicio de Energía Eléctrica

Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Junio 2003.

**Autores:** Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonio Cano Plata.

[20]

**Título:** Armónicos en las Redes Eléctricas

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

**Disponible en:**

[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/)

[21]

**Título:** “Calidad de Energía, Factor de potencia y Filtrado de Armónicas.

**Autor:** “Santiago Barcón, Rafael Guerrero Cepeda, Iván Martínez.