

3 Ruido en el canal PLC

3.1 Introducción

En el capítulo anterior, se presentó una breve explicación de la tecnología PLC, su clasificación, funcionamiento y problemas. Queda claro que uno de los principales problemas es el ruido existente en el canal, por lo que en el presente capítulo, se aborda el tema del ruido.

A lo largo de este capítulo, se define al ruido y las fuentes que lo generan, pero sobre todo, se enfoca en el ruido existente en las líneas de distribución de energía eléctrica, que es el mismo medio utilizado en PLC. Asimismo, se analiza el tema de la calidad de la energía, debido a que es un tema que se encuentra relacionado con la transmisión de datos por PLC.

Para entender como se pueden hacer mediciones referentes al ruido, se presenta de forma muy sencilla, el análisis armónico y las series de Fourier, sobre lo cual están basados los métodos para la medición de ruido armónico que se pueda encontrar en la línea eléctrica, para luego comparar los resultados con los estándares definidos.

3.2 Ruido

Para poder trabajar sobre las características de un canal ruidoso, es necesario primero saber lo que es el ruido y el tipo de ruido más común que puede presentarse. El ruido, son señales indeseables sin relación alguna con la señal de interés, que se introducen y causan distorsiones sobre la misma. Existen señales de ruido aleatorias, es decir, que son de naturaleza impredecible, y señales de ruido no aleatorias, que pueden predecirse y eliminarse con un diseño adecuado.

3.2.1 Fuentes de ruido

Existen varias fuentes de ruido, pueden clasificarse como:

- Ruido producido por el hombre.
- Perturbaciones naturales y erráticas que ocurren de forma irregular.
- Ruido de fluctuación que se presenta en el interior de los sistemas físicos.

El ruido producido por el hombre se debe a la recepción de señales no deseadas provenientes de otras fuentes tales como contactos defectuosos, dispositivos eléctricos, alumbrado fluorescente, etc. Este tipo de ruido, idealmente se podría evitar si se identifica y elimina la fuente que lo produce.

El ruido natural errático puede provenir de relámpagos, tormentas eléctricas en la atmósfera, ruido intergaláctico, etc. El ruido de fluctuación aparece dentro de sistemas

físicos debido a las fluctuaciones espontáneas, como el movimiento térmico de los electrones libres, la emisión de electrones, generación de portadores, etc. [7]

3.2.2 Ruido en la línea de transmisión eléctrica

Las líneas de transmisión eléctrica constituyen un ambiente hostil para la transmisión de datos. Tienen impedancias variables, considerable ruido y una alta atenuación. El canal combina el horrible comportamiento de la línea de transmisión eléctrica con el canal de comunicación.

Las características pueden ser dependientes tanto del tiempo como de la frecuencia, así como también depender de la localización del transmisor y del receptor en la infraestructura de la línea eléctrica. El canal se puede describir como aleatoriamente variante en el tiempo, y dependiente de la relación de señal a ruido (SNR) en la frecuencia sobre el ancho de banda de comunicación. [28] En el rango de frecuencias de interés para PLC, (1.7-30MHz), el ruido es principalmente dominado por la interferencia de banda angosta y el ruido impulsivo.

Se puede considerar como fuentes de ruido en la red eléctrica todo el equipo electrónico y eléctrico conectado a la línea de distribución eléctrica. Algunas de estas fuentes pueden generar ruido de banda ancha, tal como los motores eléctricos que se encuentran en licuadoras, taladros, extractores, máquinas de coser, etc. Otras fuentes como los atenuadores de luz, inyectan ruido impulsivo. Más allá de lo anterior, hay

algunas fuentes de ruido que están armónicamente relacionadas con la frecuencia de la señal de CA de 50-60 Hz. Finalmente, hay porciones de ruido que son creadas por el ambiente, es decir, ruido natural errático (tormentas, radiación solar, etc.) en las líneas de transmisión.

3.2.2.1 Clasificación del ruido en la línea

Los varios tipos de ruido, pueden ser clasificados como a continuación se muestra:

- Ruido de Fondo. Puede ser estacionario desde unos cuantos segundos hasta horas.
 - Ruido de fondo de color: Presenta una densidad espectral de baja potencia, variando con la frecuencia [23].
 - Ruido de banda estrecha: Consiste en señales continuas con amplitud modulada. Se caracteriza por que su frecuencia central es mucho mayor que el ancho de banda [40].
 - Ruido periódico sincronizado con las frecuencias principales de 50-60Hz.: Este tipo de ruido, generalmente es causado por aplicaciones eléctricas que generan impulsos eléctricos con rangos de repetición [23].

- Ruido Impulsivo. Tiene una variación que va desde los microsegundos a los milisegundos.
 - Ruido impulsivo sincronizado con las frecuencias principales: Son impulsos de corta duración (10-100 μ seg.) en los cuales la densidad espectral de potencia decrece con la frecuencia [23].
 - Ruido impulsivo asíncrono: son impulsos individuales ocasionados por eventos aleatorios de encendido y apagado [23].
 - Ruido de avalancha o de ionización: producido por campos eléctricos intensos que arrancan electrones de los enlaces covalentes de un material, por ionización directa o por choque con otros portadores de carga acelerados. [13]
 - Ruido de transición: causado por los desfases que aparecen entre los voltajes y corrientes en el interior de los dispositivos, debido al tiempo que los portadores de carga tardan en atravesarlos; desfases que se incrementan con el aumento de la frecuencia. [13]

En PLC la transmisión de datos tiene una velocidad del orden de Mbps por lo que una interferencia de tan sólo 1μ s puede convertir la señal de datos en un conjunto de bits basura rápidamente [38]. En la figura 3.1 se ejemplifica la conexión y desconexión de una fuente creadora de interferencia, y como ésta puede afectar a la señal de PLC.

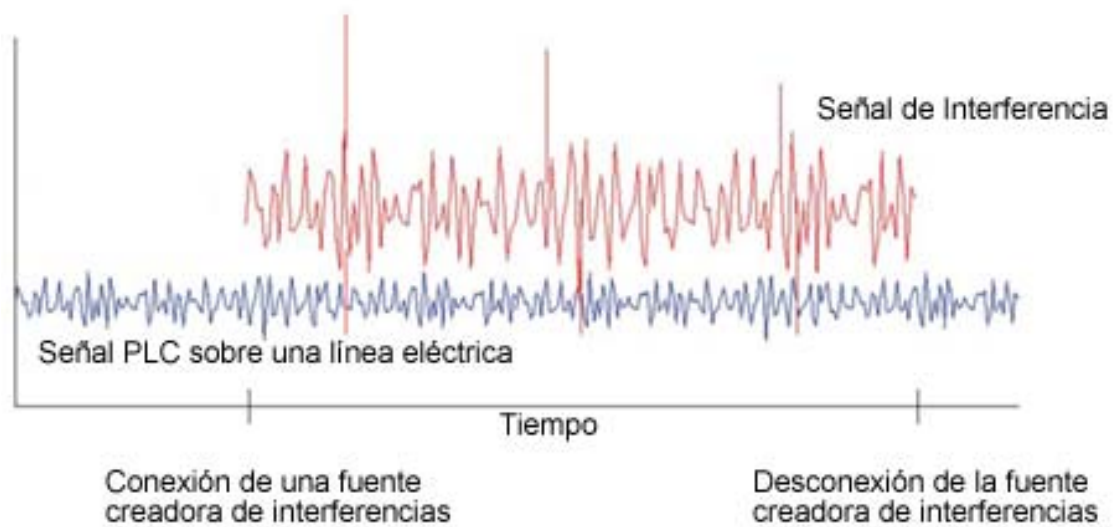


Figura 3.1 Ejemplo de interferencia en PLC [38]

El ruido existente en Power Line Communication está lejos de ser simple ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN por sus siglas en inglés), al contrario, como se mencionó anteriormente, es ruido de color y es causado principalmente por las aplicaciones o cargas que son conectadas a la red de distribución eléctrica. [18]

3.3 Calidad de la Energía Eléctrica

La calidad de la energía eléctrica se define como la ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario. Además, le concierne la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. [2]

Los disturbios en las líneas de distribución eléctrica causan problemas como los que se citan a continuación:

- a) Operación incorrecta de controles remotos.
- b) Sobrecalentamiento de cables.
- c) Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores y motores.
- d) Errores en medición.
- e) Operación incorrecta de sistemas de protección.

El objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario. Asimismo, busca proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica de calidad. [2]

3.3.1 Disturbios en la línea eléctrica

A continuación, se proporciona una breve descripción de algunos de los disturbios más comunes que se presentan en las líneas de distribución de energía: [2]

- Pico de Voltaje: Es un incremento en el nivel de voltaje con una duración de microsegundos. Es causada principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas

atmosféricas y switcheo de grandes cargas. En la figura 3.2 a) se muestra este problema.

- **Depresión de Voltaje:** Es un decremento momentáneo de varios ciclos de duración en el nivel de voltaje. Es provocada por la conexión de grandes cargas y fallas en la red eléctrica. Este problema se muestra en la figura 3.2 b).
- **Dilatación de Voltaje:** Es un incremento del voltaje de varios ciclos de duración, ocasionado por la desconexión de grandes cargas como se muestra en la figura 3.2 c).
- **Sobrevoltaje:** Es una condición de voltaje elevado, en este caso, el valor del voltaje esta por arriba del valor nominal del mismo. Es causado por una pobre regulación de voltaje. Ver figura 3.2 d)
- **Parpadeo:** se refiere a las fluctuaciones en el nivel de voltaje nominal y se suelen producir por la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por oscilaciones subarmónicas (ver figura 3.2 e)). Por lo general, este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas.
- **Interrupciones de energía:** Es la pérdida total de potencia. Se considera interrupción cuando el voltaje ha decrecido a un 15 % del valor nominal o menos.

Se debe a aperturas de líneas, daño de transformadores, operación de fusibles o equipos de protección de la red, entre otras posibilidades. (Ver figura 3.2 f)).

- **Ruido Eléctrico:** Es la distorsión de la forma sinusoidal del voltaje. Este es debido a switcheo, transmisores de radio y equipo industrial de arco eléctrico. (Ver figura 3.2 g)).
- **Distorsión Armónica:** Es la distorsión periódica de la forma de onda sinusoidal del voltaje o corriente. (figura 3.2 h)). Generalmente es causada por la operación de equipos y cargas no lineales. Este es un fenómeno en estado estable.

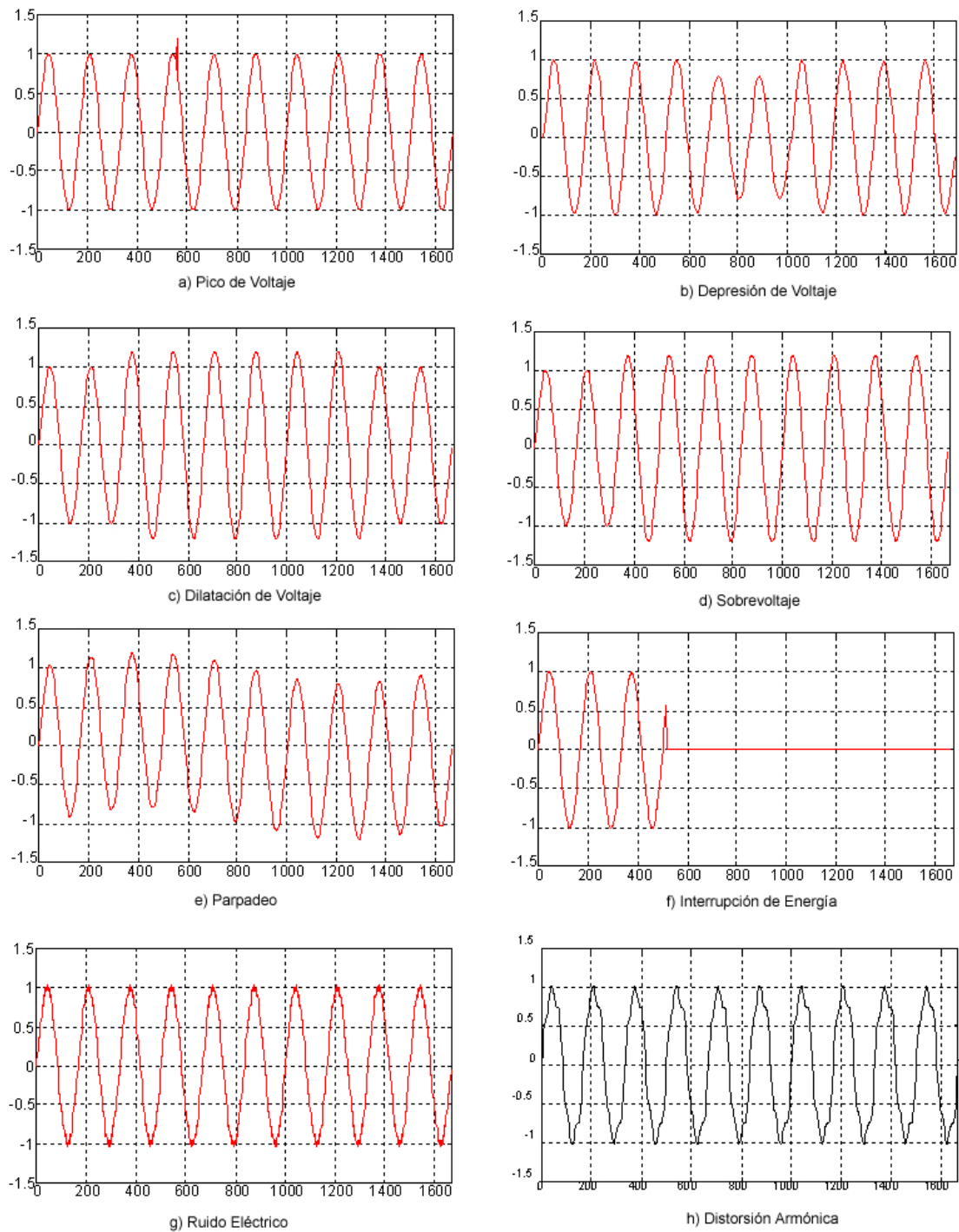


Figura 3.2 Disturbios en la línea eléctrica [2]

3.3.2 Armónicos en los sistemas eléctricos

Los armónicos que causan distorsión en las formas de onda del voltaje y de corriente, también suelen ser los que afectan en gran medida a la calidad de la energía. Uno de los principales problemas de interferencia en los sistemas de comunicación, son originados por los armónicos de alta frecuencia que se generan en el acoplamiento magnético; así mismo el incremento de cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico de potencia, ocasiona que el nivel medio de armónicos en la línea aumente. [2] Por lo anterior, el modelado de los elementos del sistema de potencia ante señales armónicas, cada vez es más importante, sobre todo si se considera que este es el medio utilizado para la transmisión de datos en PLC.

3.4 Análisis Armónico

El ruido, la interferencia y la calidad de la energía están íntimamente relacionados cuando se trata de PLC. El estudio de la generación de señales armónicas es un punto de gran importancia. A continuación, se abordará el tema de forma breve, tomando en cuenta sólo los puntos de mayor interés.

3.4.1 Definición del Análisis Armónico

El análisis armónico o análisis de Fourier es la rama de las matemáticas que estudia la representación de funciones o señales como superposición de ondas básicas, de

las que se puede decir que la función o la señal se compone. Investiga y generaliza las nociones de series de Fourier y transformadas de Fourier. Las ondas base se dicen armónicos, y de ahí el nombre de la disciplina. [3]

La Serie Trigonométrica de Fourier es una aplicación usada en muchas ramas de la ingeniería, además de ser una herramienta sumamente útil en la teoría matemática abstracta. Algunas áreas de aplicación incluyen el análisis vibratorio, acústica, óptica, procesamiento de imágenes y señales, y compresión de datos. En ingeniería, para el caso de los sistemas de telecomunicaciones, y a través del uso de los componentes espectrales de frecuencia de una señal dada, se puede optimizar el diseño de un sistema para la señal portadora del mismo. [36]

3.4.1.2 Funciones periódicas

En la serie trigonométrica de Fourier se sostiene que si la forma de la onda es periódica, se puede representar con una precisión arbitraria mediante la superposición de un número suficientemente grande de ondas sinusoidales que forman una serie armónica. [5]

Una función periódica se define como:

$$f(t) = f(t + T) \quad (3.1)$$

Donde T es el periodo, y está definido como:

$$T = \frac{1}{frec.} \quad (3.2)$$

La figura 3.3 muestra un conjunto de funciones que cumplen con la definición de funciones periódicas.

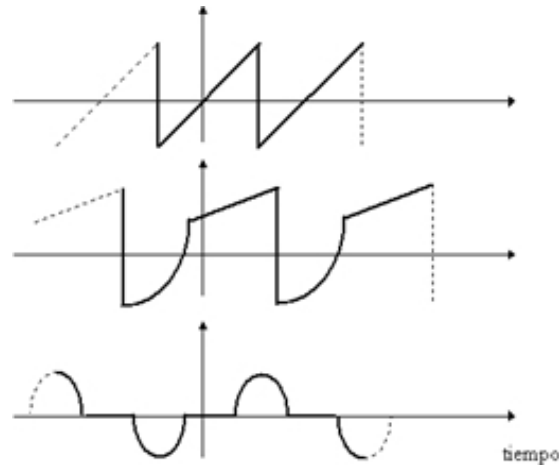


Figura 3.3 Funciones periódicas [4]

3.4.1.3 Series de Fourier

Si la función $f(t)$ es una función periódica, entonces se puede representar por una serie trigonométrica de la forma

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (3.3)$$

Donde

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{2} a \\ C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \\ \omega_0 &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \quad (3.4)$$

y

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (3.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

La figura 3.4 muestra una forma gráfica de interpretar las serie de Fourier

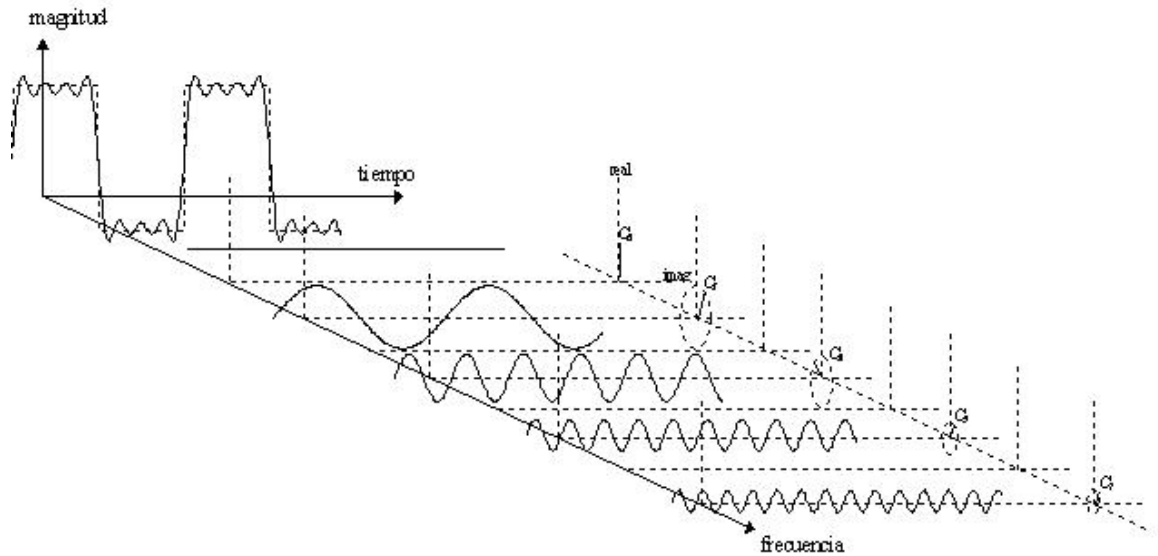


Figura 3.4 Representación de los coeficientes de la serie de Fourier [4]

3.4.1.3 Distorsión Armónica

Es relevante retomar la definición de armónica de la manera en que es utilizada en redes eléctricas. De esta forma, una armónica está definida como una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental (en este caso 50-60 Hz) [1], como se muestra en la figura 3.5. Y como en los sistemas eléctricos se tienen señales periódicas, por ejemplo el voltaje, entonces se puede representar por:

$$v(t) = V_1 \cos(\omega t + \theta_1) + V_2 \cos(\omega t + \theta_2) + V_3 \cos(\omega t + \theta_3) + \dots \quad (3.6)$$

O lo que es lo mismo:

$$v(t) = \sum_{n=1}^n V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (3.7)$$

Donde a:

V_n se le define como la armónica de orden n y a

θ_n como el ángulo de la armónica n

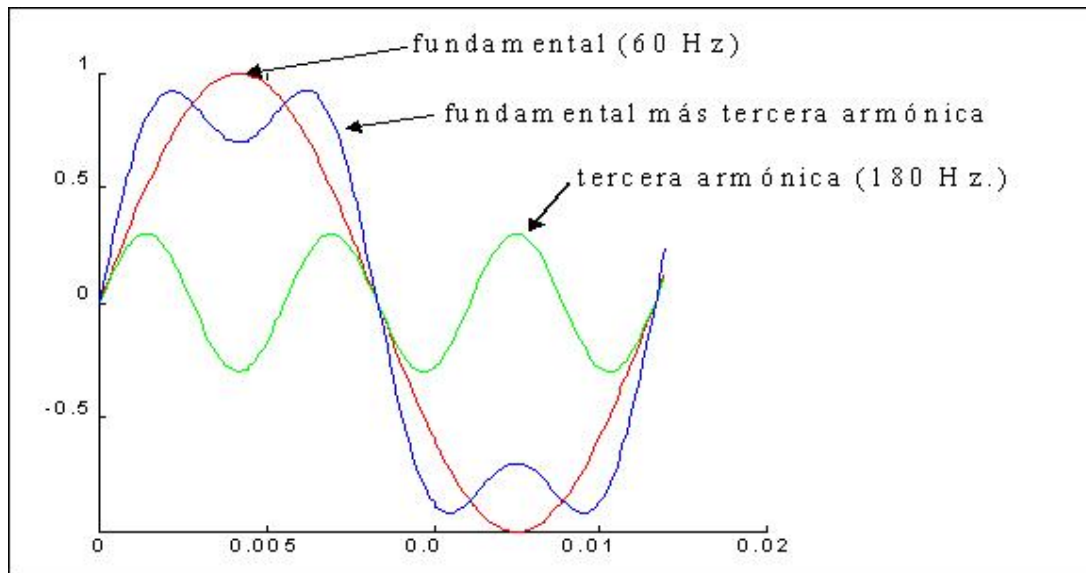


Figura 3.5 Fundamental más tercera armónica [1]

La distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés) de una señal, es la medida de la distorsión armónica que presenta dicha señal y está definida por el cociente de la suma de potencia de todos los componentes armónicos, con relación a la potencia de la frecuencia fundamental. Los valores de distorsión están definidos en porcentaje de cantidades eléctricas, estos valores son frecuentemente utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas. [1]

Para el voltaje:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \times 100 \quad (3.8)$$

Para la corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \times 100 \quad (3.9)$$

Para armónicas individuales:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100 \quad (3.10)$$

Distorsión total de demanda:

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_{dem-max}} \times 100 \quad (3.11)$$

3.4.1.4 Normas

Algunas de las normas internacionales referentes al control de armónicas son las siguientes:

- IEC 36.05 (Europa).
- DIN 57160 (Alemania).
- G 5/3 (Inglaterra).
- AS 2279 (Australia).
- IEEE 519 (Estados Unidos).

La tendencia en México, impulsada por Comisión Federal de Electricidad, es de implementar la norma estándar IEEE-519, aunque hasta ahora solo ha aparecido una especificación provisional (CFE L0000-45), la cual se basa en dicha norma. [1]

Los límites para el voltaje y la corriente armónica se muestran en las tablas 3.1 a 3.4 que son las recomendaciones del IEEE std 519 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”. Estos límites son dependientes de varios conceptos que se definen a continuación:

- PCC. Punto de acoplamiento común (por sus siglas en inglés). Este punto es definido como el punto en el servicio público hacia un cliente particular, donde otro cliente podría ser conectado.
- I_{SC} . Corriente de corto circuito disponible (por sus siglas en inglés).

- I_L . Máxima corriente demandada en un promedio de 15 o 30 minutos.
- TDD. Distorsión total de demanda (por sus siglas en inglés). El TDD es idéntico al THD a excepción de I_L la cual es utilizada en lugar de la componente fundamental de la corriente.

PCC Voltage	Individual Harmonic Magnitude (%)	THD _V (%)
≤ 69 KV	3.0	5.0
69 – 161 KV	1.5	2.5
≥ 161 KV	1.0	1.5

Tabla 3.1. Límites de distorsión de voltaje en % de V1

I_{SC}/I_L	< 11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≥h	TDD (%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20–50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50–100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 3.2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 KV en % de I_L

Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares. Para armónicas

pares se incrementa el límite en 25% de las impares

I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \geq h$	TDD (%)
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20–50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50–100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 3.3. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV

Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares. Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \geq h$	TDD (%)
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
> 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 3.4. Límites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV

Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares. Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

3.5 Resumen

A lo largo de este capítulo fueron referidos los temas más relevantes respecto al ruido y los inconvenientes que se presentan en las líneas de distribución eléctrica, siempre considerando los efectos negativos que pueden ocasionar a la comunicación por PLC.

Se definió lo que es el ruido, las principales clases de ruido y sus características que se pueden encontrar en la línea, producto de distintas fuentes; asimismo, se mencionó el tema de la calidad de la energía pues es importante tener en mente los problemas que suelen presentarse ya que al trabajar con PLC, es deseable que la calidad de la energía sea óptima.

El ruido armónico es uno de los problemas que mayor interés tiene para el tema las interferencias en PLC. Debido a lo anterior, se mostró una breve descripción del estudio de armónicos mediante el análisis de Fourier y la distorsión armónica, la cual puede ser debida por las distintas fuentes conectadas a la misma red de distribución eléctrica.

Finalmente, como la distorsión armónica es algo inevitable, se recurrió a las normas respectivas para tener un punto de referencia y conocer los límites aceptados para el THD presente en la línea, debido a que estos valores suelen ser utilizados para conocer

el grado de contaminación de las redes eléctricas; pero no es el único factor que se debe considerar puesto que el mismo THD depende de otras variables.