

FICHA TECNICA. REA00410

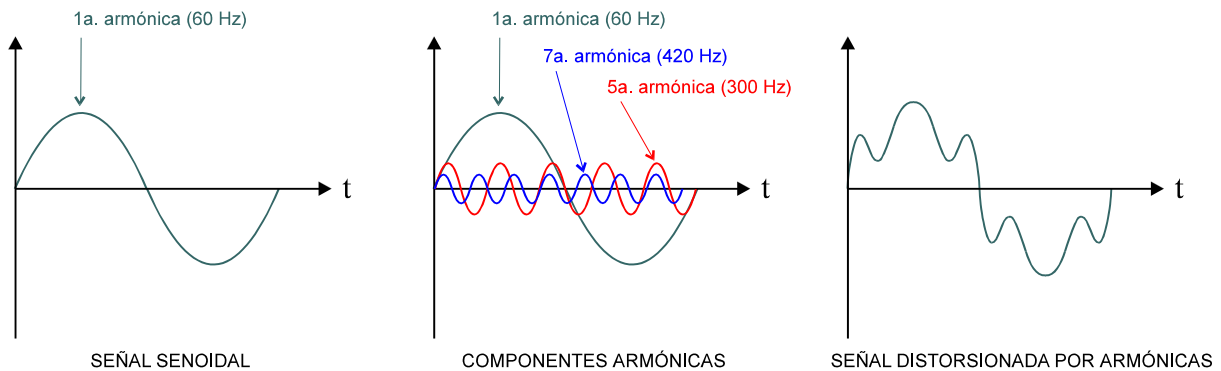
DISTORSION ARMONICA

En México, el sistema eléctrico de potencia está diseñado para generar y operar con una señal senoidal de tensión y de corriente a una frecuencia de 60 Hz (frecuencia fundamental), ésta sería la condición ideal, la realidad es que no todas las formas de onda son senoidales.

En la actualidad, los usuarios han incorporado en sus instalaciones gran cantidad de equipos con dispositivos electrónicos que en condiciones normales de operación producen corrientes no

senoidales, esta señal no senoidal está compuesta por armónicas.

Las armónicas son señales de tensión y/o corriente con una frecuencia que es un múltiplo entero de la fundamental; las armónicas se suman a la señal fundamental y la distorsionan, generando con ello lo que comúnmente se conoce como distorsión armónica (ésta distorsión armónica es una señal periódica no senoidal), como se ejemplifica en la siguiente figura:



Una “n” armónica, es una señal de “n” veces la frecuencia fundamental (60 Hz), es decir:

La 1ª armónica es una señal de 60 Hz.

La 2ª armónica es una señal de 120 Hz (2X60Hz).

La 3ª armónica es una señal de 180 Hz (3X60Hz), etc.

En países Europeos y otras partes del mundo la frecuencia fundamental es de 50 Hz, por lo tanto, en estos sistemas eléctricos, la 2ª armónica tiene una frecuencia de 100 Hz, la 3ª armónica de 150 Hz y así sucesivamente.

La presencia de armónicas no significa que necesariamente existirán problemas en los elementos del sistema eléctrico, pues como se menciona mas adelante, las armónicas son una característica inherente de la operación de gran cantidad de equipos, algunos son capaces de operar correctamente y otros tantos fallarán o presentarán errores de operación, dependerá de la susceptibilidad de cada uno de ellos.

En todo sistema eléctrico industrial, comercial o residencial existen dos tipos de cargas, se clasifican en cargas lineales y cargas no lineales; las cargas no lineales producen corrientes armónicas.

CARGA LINEAL.

Es una carga eléctrica que, en estado normal de operación tiene una impedancia constante a lo largo

del ciclo de la señal de tensión aplicada, por lo tanto, la corriente requerida por la carga varía en función de la tensión, como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 1
SEÑAL EN LA FUENTE SIN CARGA (1)

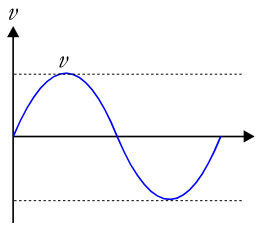


FIGURA 2
CARGA (z)

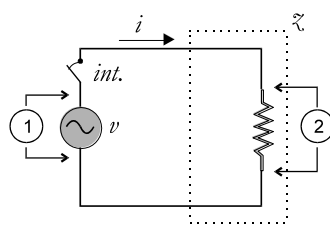


FIGURA 3
SEÑAL VISTA POR LA CARGA (2)

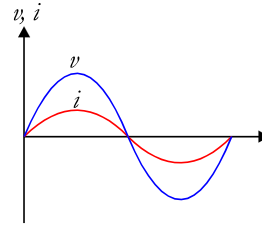


FIGURA 4. SEÑAL VISTA EN LA FUENTE CON CARGA (1)

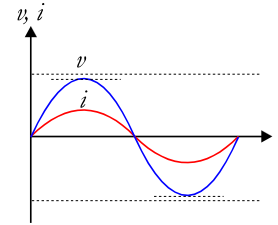


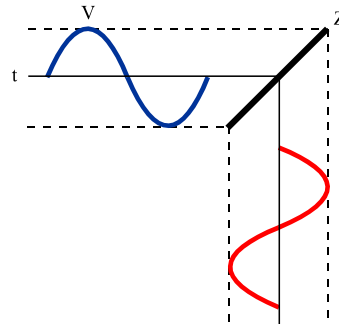
Figura 1: Es la señal de tensión senoidal que existe en la fuente de alimentación en ausencia de carga.

Figura 2: Al cerrar el interruptor "int" comienza a circular la corriente ($i=v/z$) requerida por la carga "z".

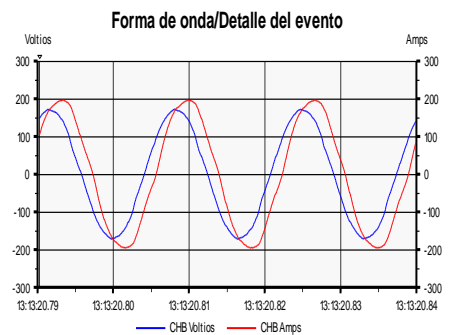
Figura 3: La señal de corriente "i" requerida por la carga varía en función de la tensión "v" y es una señal senoidal.

Figura 4: En la fuente existe una reducción del valor de tensión con respecto a la figura 1; ésta reducción será mínima si la potencia de la carga es pequeña con respecto a la potencia o capacidad de generación de la fuente, a medida que la potencia de la carga se incrementa provocará una mayor caída de tensión (en magnitud, no deformación).

REPRESENTACIÓN DE LA IMPEDANCIA (Z) DE UNA CARGA LINEAL



SEÑAL DE TENSIÓN (AZUL) Y CORRIENTE (ROJO) DE UNA CARGA LINEAL



Snapshot à 26/08/2008 13:13:20

Las cargas lineales más comunes son:

- Alumbrado incandescente.
- Hornos eléctricos de resistencias.
- Motores.
- Resistencias.

Estas cargas requieren de una corriente senoidal y no distorsionan la señal senoidal de tensión, algunas gráficas características son las siguientes:

CARGA NO LINEAL.

Es una carga eléctrica que, en estado normal de operación tiene una impedancia que varía a lo largo

del ciclo de la señal de tensión aplicada, por lo tanto, la corriente requerida por la carga no es continua, como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 1
SEÑAL EN LA FUENTE SIN CARGA (1)

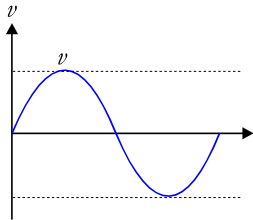


FIGURA 2. CARGA (z), ÉSTA TIENE UN DIODO RECTIFICADOR

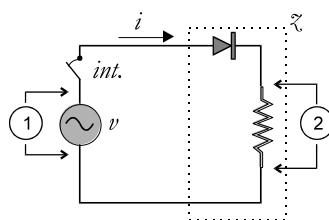


FIGURA 3
SEÑAL VISTA POR LA CARGA (2)

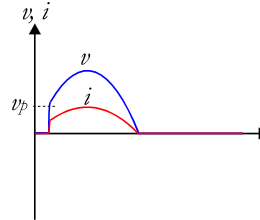


FIGURA 4. SEÑAL VISTA EN LA FUENTE CON CARGA (1)

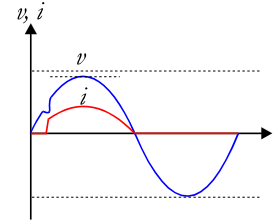


Figura 1: Es la señal de tensión senoidal que existe en la fuente de alimentación en ausencia de carga.

Figura 2: El diodo que forma parte de la carga "z" solo conduce durante el medio ciclo positivo de la señal senoidal de tensión y actúa como un circuito abierto durante el medio ciclo negativo.

Figura 3: Durante el medio ciclo positivo el diodo no conduce de manera inmediata, lo hace hasta alcanzar el valor de conducción o polarización " V_p ", entonces la corriente es " $i=v/z$ ". La señal de corriente requerida no es continua y no es senoidal, es una señal distorsionada.

Figura 4: Puede observarse que, existe una deformación en la señal de tensión provocada por el cambio repentino de no conducción a conducción del diodo (cambio brusco de la impedancia de la carga), esta condición produce una señal periódica no senoidal = distorsión armónica. Durante el medio ciclo positivo en la fuente existe además una reducción del valor de tensión con respecto a la figura 1, ésta reducción

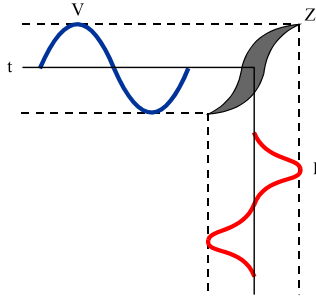
será mínima si la potencia de la carga es pequeña con respecto a la potencia o capacidad de generación de la fuente, a medida que la potencia de la carga se incrementa provocará una mayor caída de tensión y distorsión armónica. En un circuito real existen gran cantidad de dispositivos electrónicos y por lo tanto una mayor distorsión armónica en corriente y tensión.

Las cargas no lineales más comunes son:

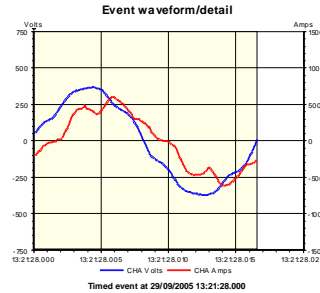
- Controles electrónicos de velocidad para motores de CD y CA.
- UPS's y PC's.
- Transformadores de núcleos saturados.
- Alumbrado Fluorescente y lámparas con balastos electrónicos.
- En general, todos los equipos con dispositivos electrónicos.

Estas cargas requieren de una corriente no senoidal y por lo tanto causan una distorsión periódica de la señal de corriente y tensión (distorsión armónica), algunas gráficas características son las siguientes:

REPRESENTACIÓN DE LA IMPEDANCIA (Z)
 DE UNA CARGA NO LINEAL



SEÑAL DE TENSION (AZUL) Y CORRIENTE (ROJO)
 DE UNA CARGA NO LINEAL



Equipos que basan su operación en dispositivos electrónicos de estado sólido (diodos, tiristores, rectificadores controlados de silicio o SCR, etc.) están presentes en las instalaciones eléctricas en muchas formas y aplicaciones. Durante el funcionamiento normal aparecen armónicas de tensión y corriente, para el caso de rectificadores se producen armónicas del siguiente orden:

$$h = (k * p) \pm 1$$

Donde:

- h - Es el orden de la armónica.
- p - Número de pulsos del rectificador.
- k - Un número entero.

Por ejemplo, en un UPS trifásico que tiene un rectificador de 6 pulsos se presentaran las armónicas:

- armónica. $h = (1 * 6) - 1 = 5$ Es la 5ª
- armónica. $h = (1 * 6) + 1 = 7$ Es la 7ª
- armónica. $h = (2 * 6) - 1 = 11$ Es la 11ª
- armónica. $h = (2 * 6) + 1 = 13$ Es la 13ª
- armónica, etc.

Por su naturaleza, cada armónica presente en el sistema eléctrico tiene una secuencia de fases definida de acuerdo a la siguiente tabla:

SECUENCIA DE LAS ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS BALANCEADOS

ARMÓNICA	1ª.	2ª.	3ª.	4ª.	5ª.	6ª.	7ª.	8ª.	9ª.	ETC.
SECUENCIA	+	-	0	+	-	0	+	-	0

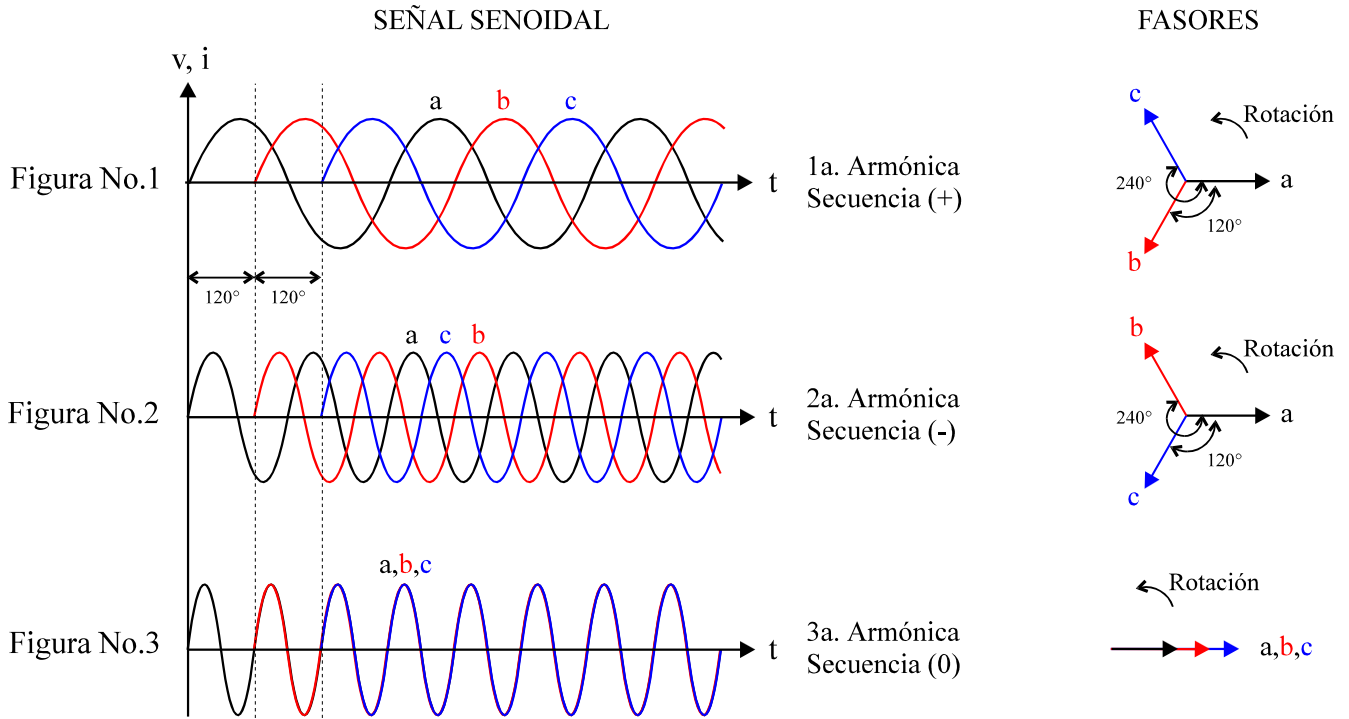
Una secuencia de fases positiva (+) significa que la señal alcanza su valor pico en la secuencia a, b, c (como se muestra en la figura No.1). Representadas con fasores y tomando como referencia la fase "a", la

fase "b" está retrasada 120° y la fase "c" está retrasada 240° con respecto a la fase "a".

Una secuencia de fases negativa (-) significa que la señal alcanza su valor pico en la secuencia a, c, b,

(como se muestra en la figura No. 2). Representadas con fasores y tomando como referencia la fase "a", la fase "c" está retrazada 120° y la fase "b" está retrazada 240° con respecto a la fase "a".

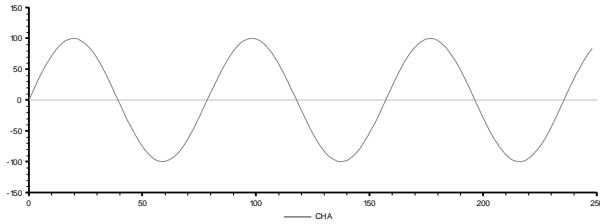
Una secuencia de fases cero (0) significa que las señales a, b, c, alcanzan su valor pico en el mismo instante (como se muestra en la figura No.3), es decir, están en fase (no existe ángulo entre ellos).



Una tensión armónica de secuencia positiva intenta hacer girar un motor en sentido correcto o de diseño. Una tensión armónica de secuencia negativa intenta hacer girar un motor en sentido inverso (le resta potencia). Una tensión armónica de secuencia cero provoca calentamiento en el motor e incrementa las pérdidas por calentamiento, lo mismo sucede en un transformador.

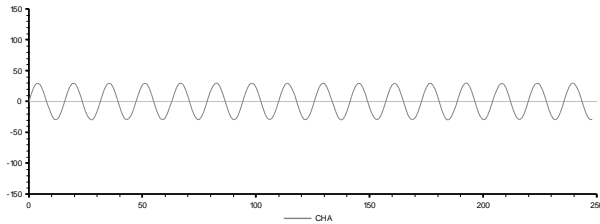
La distorsión armónica de la señal es una función periódica con respecto al tiempo y mediante el análisis matemático de Fourier es posible obtener las componentes armónicas que la integran. En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de la distorsión que causa una 5^a y 7^a armónica sobre la señal senoidal fundamental.

FIG. 1. SEÑAL SENOIDAL FUNDAMENTAL (60 HZ)



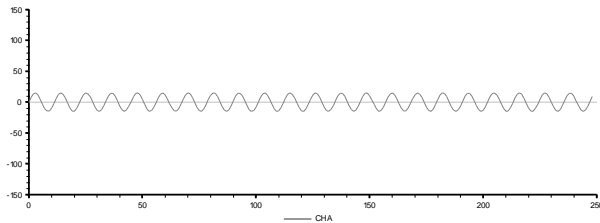
COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL	
ARMÓNICA	AMPLITUD
1	100
3	0
5	0
7	0
9	0

FIG. 2. SEÑAL SENOIDAL DE 5ª ARMÓNICA (300 HZ)



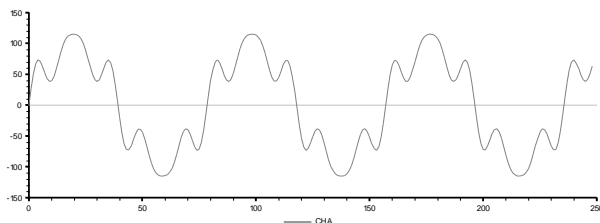
COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL	
ARMÓNICA	AMPLITUD
1	0
3	0
5	30
7	0
9	0

FIG.3. SEÑAL SENOIDAL DE 7ª ARMÓNICA (420 HZ)



COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL	
ARMÓNICA	AMPLITUD
1	0
3	0
5	0
7	15
9	0

FIG.4 SEÑAL DISTORSIONADA POR ARMÓNICAS



COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL	
ARMÓNICA	AMPLITUD
1	100
3	0
5	30
7	15
9	0

El resultado es que la señal se distorsiona por las armónicas (Fig. 4) y el valor pico es mayor con respecto a la senoidal pura. Si la señal distorsionada es de tensión, el incremento del valor pico somete a los aislamientos a un mayor potencial que puede provocar envejecimiento prematuro de éstos. Si la señal distorsionada es de corriente se comporta como una sobrecarga. En ambos casos el valor rms de la señal se incrementa.

VALORES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.

Para interpretar la deformación de la señal senoidal causada por armónicas en forma numérica, se utiliza la expresión de Distorsión Armónica Total (THD) que es aplicada para la señal de tensión y de corriente.

Distorsión Armónica Total en Tensión (THDV).

El THDV es usado para definir el efecto de las armónicas en la señal de tensión del sistema

eléctrico de potencia, es usado en baja, media y alta tensión. Es la relación de la raíz de la suma de los cuadrados de las armónicas de tensión con respecto a la fundamental, expresada en % y es definido como:

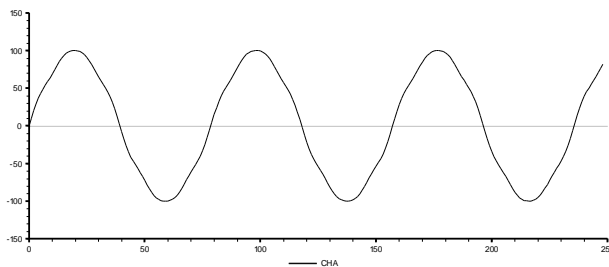
$$\% \text{ THDV} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100$$

Donde:

- THDV Distorsión armónica total en tensión expresada en %.
- h Orden de la armónica (a partir de la 2ª componente: 2ª, 3ª, 4ª, 5ª, etc.).
- Vh Volts de cada componente armónica.
- V1 Volts de componente fundamental (1ª armónica = 60 Hz).

Aplicando la expresión anterior, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo para obtener del valor de THDV en volts y en % calculado a partir de las componentes armónicas indicadas en el cuadro.

FIG.4 SEÑAL DISTORSIONADA POR ARMÓNICAS



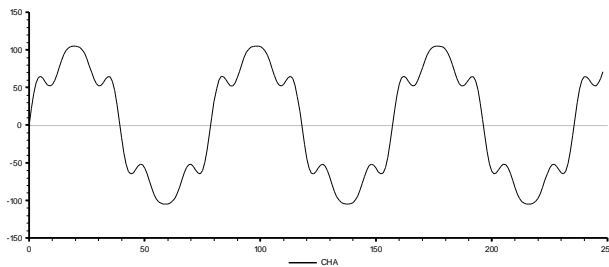
COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL		
ARMÓNICA	VOLTS	VALOR EN %CON RESPECTO A LA FUNDAMENTAL
1	127	100
3	1	0.79
5	3	2.36
7	2	1.57
THDV	3.74	2.94

Distorsión Armónica Total en Corriente (THDI).

El THDI es usado para definir el efecto de las armónicas en la señal de corriente del sistema eléctrico de potencia, es usado en baja, media y alta tensión. Es la relación de la raíz de la suma de los cuadrados de las armónicas de corriente con respecto a la fundamental, expresada en % y es definido como:

$$\% \text{ THDI} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100$$

FIG.4 SEÑAL DISTORSIONADA POR ARMÓNICAS



Valor eficaz de tensión “Vrms” y de corriente “I rms”.

Es el valor verdadero de tensión y de corriente de una señal distorsionada por armónicas (incluidas las componentes armónicas). Es igual a la raíz de la suma de los cuadrados de las armónicas correspondientes incluyendo la fundamental y se definen como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

Donde:
 THDI Distorsión armónica total en corriente expresada en %.
 h Orden de la armónica (a partir de la 2ª componente: 2ª, 3ª, 4ª, 5ª, etc.).
 I_h Amperes de cada componente armónica.
 I₁ Amperes de componente fundamental (1ª armónica = 60 Hz).

Aplicando la expresión anterior, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo para obtener del valor de THDI en amperes y en % calculado a partir de las componentes armónicas indicadas en el cuadro.

COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL		
ARMÓNICA	AMPERES	VALOR EN % CON RESPECTO A LA FUNDAMENTAL
1	500	100
3	25	5.0
5	100	20.0
7	50	10.0
THDI	114.6	22.9

Donde:
 V_{rms} Valor de eficaz de tensión, en volts.
 I_{rms} Valor eficaz de corriente, en amperes.
 V_h Volts de cada componente armónica.
 I_h Amperes de cada componente armónica.

$$\text{THDV (en volts)} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}$$

$$\text{THDI (en amperes)} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$$

Donde:
 THDV Valor rms de componentes armónicas.
 THDI Valor rms de componentes armónicas.
 V_h Volts de cada componente armónica.
 I_h Amperes de cada componente armónica.

Aplicando las expresiones a los ejemplos anteriores, los valores rms de tensión y corriente se indican en la siguiente tabla:

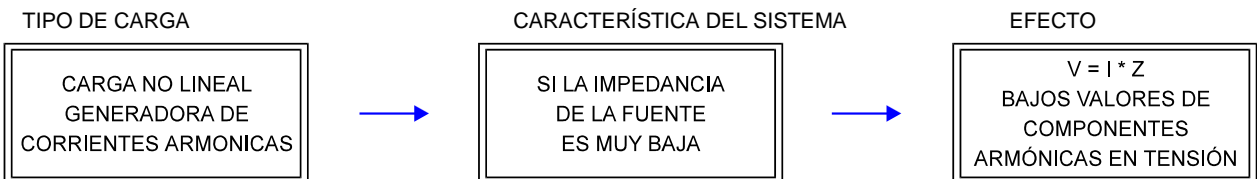
COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL		
ARMÓNICA	VOLTS	VALOR EN %CON RESPECTO A LA FUNDAMENTAL
1	127	100
3	1	0.79
5	3	2.36
7	2	1.57
THDV	3.74	2.95
V rms	127.1	

COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA SEÑAL		
ARMÓNICA	AMPERES	VALOR EN %CON RESPECTO A LA FUNDAMENTAL
1	500	100
3	25	5.0
5	100	20.0
7	50	10.0
THDI	114.6	22.9
I rms	513.0	

La cantidad de armónicas en tensión normalmente dependerá de la cantidad de corrientes armónicas producidas por la carga y de la impedancia de la fuente, la cual incluye conductores y transformadores.

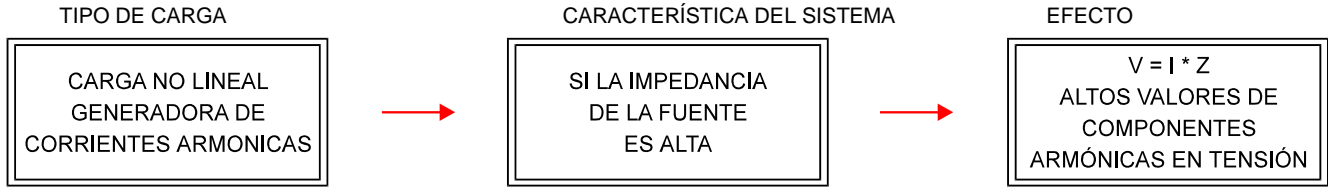
La ley de Ohm dice que: la tensión es igual a la corriente multiplicada por la impedancia ($V=I*Z$).

Si la impedancia de la fuente de suministro de energía es muy baja (como la de un sistema robusto o de gran potencia) entonces las corrientes armónicas producirán valores bajos de armónicas en tensión.



Si la impedancia de la fuente es alta, entonces las corrientes armónicas producirán valores altos de armónicas en tensión (este es el caso de algunos

tipos de transformadores de aislamiento y de plantas de generación de pequeña capacidad con respecto a la carga conectada).



Aún cuando los niveles de distorsión armónica pueden parecer altos en algún punto de la instalación, los equipos pueden tener cierta tolerancia a dichos niveles de distorsión armónica y funcionar correctamente, esto dependerá de las características de los equipos y de la fuente.

Los objetivos de establecer límites para la distorsión armónica es:

1. Que los usuarios deben ser responsables de limitar la cantidad de “corrientes armónicas” que inyectan al sistema eléctrico de potencia.
2. Que la compañía suministradora debe ser responsable de limitar la “distorsión de tensión” que entrega a los usuarios, es decir, entregar una tensión de calidad.

Suministradores y usuarios deben compartir responsabilidades para mantener un sistema eléctrico de buena calidad.