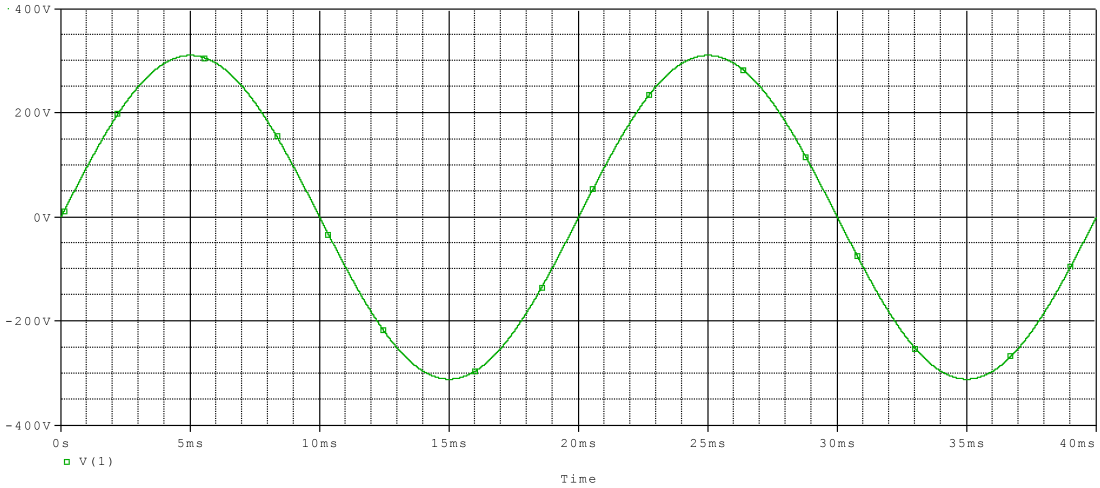
Grupo GESE FRH
Análisis del contenido armónico y su problemática en las redes de alimentación

Introducción:
Antes de comenzar con el estudio es importante aclarar los siguientes conceptos.

Red de alimentación:
La señal de nuestra red de alimentación en baja tensión tiene una característica alternada cuyos parámetros principales son los siguientes

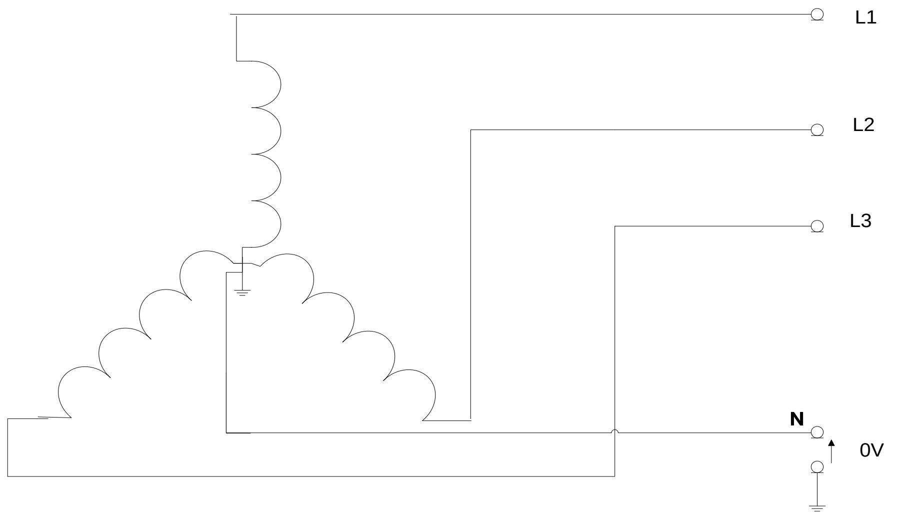
Vrms (línea – neutro) = 220 V
Frecuencia (50 Hz)



$$v(t) = Vm * \sin(wt)$$

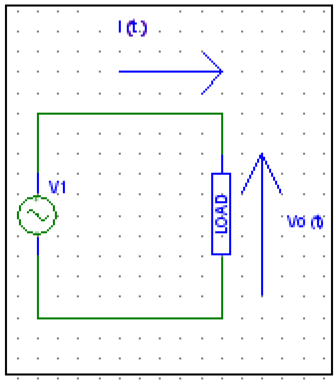
Ampliando esto , se llega a un sistema trifásico en donde las señales anteriores, son tres de la misma característica pero están desfasadas entre si 120º.

Si sumamos dichas señales en el tiempo para el esquema anterior punto a punto nos da que dicho valor es cero. Por lo tanto tenemos un sistema equilibrado en tensión en donde el terminal del conductor de neutro respecto a la referencia de tierra mantendría dicho valor , todo esto en el caso de un sistema seguramente sin consumo o con cargas lineales y perfectamente equilibradas.



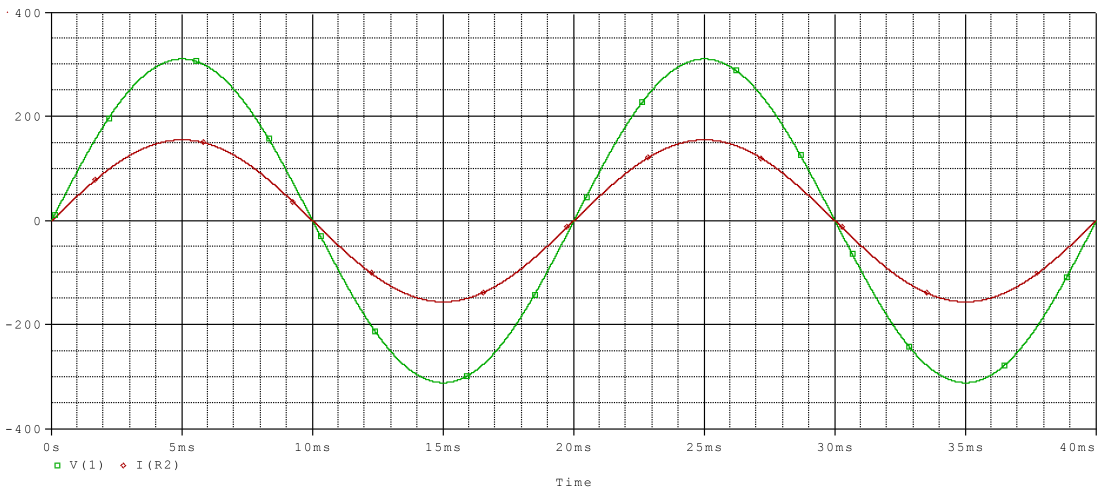
Sistema Cargado

Supongamos que alimentamos con nuestra señal monofásica (linea – neutro) a una carga dada.



Circulará una corriente que será, al igual que la tensión, también periódica pero con las siguientes posibilidades.

a) tener la misma forma y sincronizada con la tensión



En donde se observa coinciden los máximos, mínimos y cruces por cero entre ambas tensión y corriente. Es decir estamos en presencia de un sistema con una carga netamente resistiva. Si esto lo extendemos en un sistema trifásico y coinciden las amplitudes de corriente entres si, la suma de dichas señales en el tiempo es cero, por lo tanto no tendríamos circulación de corriente por el cable denominado neutro o de referencia de cada fase. Es decir estamos en presencia de un sistema equilibrado en donde el promedio del consumo es igual al de una fase.
Si definimos luego el desequilibrio como sigue el mismo sería cero.

$$\frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3} = \frac{3I_L}{3} = I_L$$

Des. % = $\frac{|I_L - I_{L\max}|}{I_{L\max}} * 100 = 0\%$

Dado que $I_{Lmàx} = I_C$

Teniendo en cuenta que la potencia desarrollada en una de las fases sería

$$P_{L1}(t) = v_{L1}(t) * i_{L1}(t)$$

El consumo sobre la misma lo obtendríamos promediando dicho producto en un período o juego completo de valores de dichas señales.
Entonces si no hay desfase entre ambas, es decir, si coinciden las fases: dicho cálculo sería

$$v_{L1}(t) = V_{L\max} * \sin(wt)$$

$$i_{L1}(t) = I_{L\max} * \sin(wt)$$

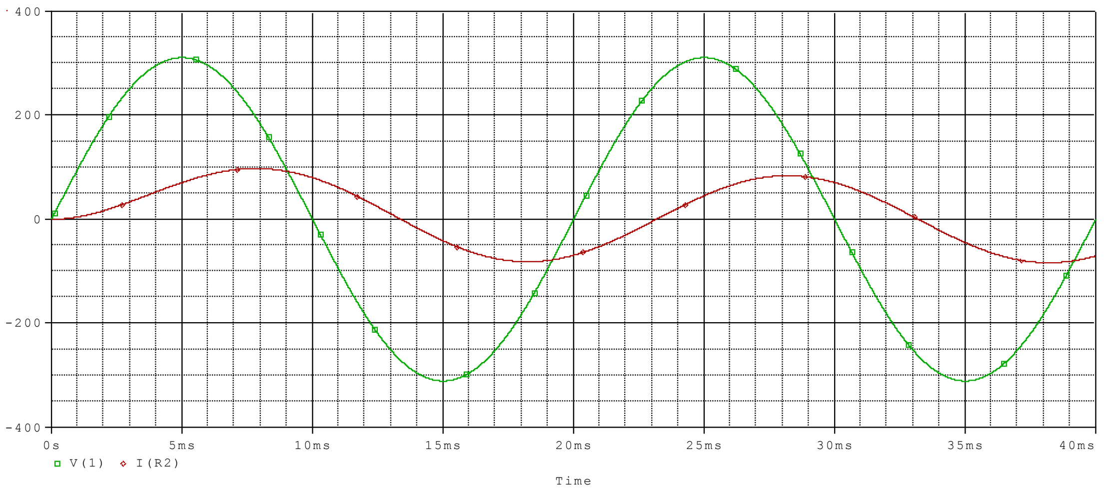
Dicho cálculo sería:

$$P_{L1}(t) = \frac{1}{T}\int_0^t v_{L1}(t) * i_{L1}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} V_{L\max} * I_{L\max} * sen^2(wt)$$

$$P_{L1} = \frac{V_{L\max} * I_{L\max}}{2\pi} * \int_0^{2\pi}\left(\frac{1-\cos 2wt}{2}\right)dt = \frac{V_{L\max} * I_{L\max}}{4\pi} * 2\pi = \frac{V_{L\max} * I_{L\max}}{2}$$

$$P_{L1} = \frac{V_{L\max}}{\sqrt{2}} * \frac{I_{L\max}}{\sqrt{2}} = \bar{I}_{L1} * \bar{V}_{L1}$$

Esto, de la misma manera, lo podemos extender a un sistema de tres fases o trifásico.
Que ocurre ahora si no hay coincidencia en el tiempo entre ambas señales de tensión y corriente, suponiendo mantener ambas la misma forma senoidal.



Hay un ángulo de corrimiento entre una y otra, o dicho de otra manera cuando una esta, por decir, en un máximo la otra pasó ya dicha condición.

$$v(t) = V_{\max} * \sin(wt)$$
$$i(t) = I_{\max} * \sin(wt - \varphi_d)$$

En este ejemplo la tensión adelanta a la corriente. La potencia puesta en juego la calcularíamos de la siguiente manera

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{\max} * I_{\max} * \sin(wt) * \sin(wt - \varphi_d) dwt$$

$pero:$

$$\sin(wt) * \sin(wt + \varphi_d) = \sin(wt)[\sin(wt) * \cos(\varphi_d) - \cos(wt) * \sin(\varphi_d)$$
$$\sin(wt) * \sin(wt + \varphi_d) = \sin^2(wt) * \cos(\varphi_d) - \sin(wt) * \cos(wt) * \sin(\varphi_d)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} * V_{\max} * I_{\max} \int_0^{2\pi} \sin^2(wt) * \cos(\varphi_d) dwt * \underbrace{\int_0^{2\pi} \sin(wt) * \cos(wt) * \sin(\varphi_d) dwt}_{0}$$

$$P = \frac{V_{\max} * I_{\max}}{2\pi} * \cos(\varphi_d) * \frac{2\pi}{2} = \overline{V} * \overline{I} * \cos(\varphi_d)$$

$$P = \overline{V} * \overline{I} * \cos(\varphi_d)$$

Esto último nos indica el consumo de nuestra carga que ve alguien desde la red.
En donde tenemos una señal de tensión cuyo valor eficaz es Vrms y lo mismo para la corriente Irms.
De la expresión de potencia se observa que esta puede variar entre un máximo dado por el producto neto entre la tensión y la corriente hasta ser cero si el ángulo de corrimiento es 90º .

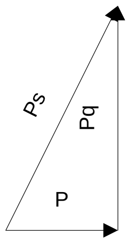
$$P\min = \overline{V} * \overline{I} * \cos(90^o)$$
$$P\max = \overline{V} * \overline{I} * \cos(0^o) = \overline{V} * \overline{I}$$

Pero que ocurre? porque nuestra red aguas arriba esta entregando tensión y ve una circulación de corriente hacia dicha carga que no genera un trabajo eléctrico 100% sus posibilidades, es decir esa potencia que se entrega denominada ahora aparente no es transformada totalmente en consumo sino solo una parte, y la otra entonces que es? Seguramente otra potencia la que se denomina reactiva cuyo valor lo definimos como sigue

$P_S = \overline{V} * \overline{I}$ Potencia Aparente.

$P = \overline{V} * \overline{I} * \cos(\varphi_d)$ Potencia Activa.

$Pq = \overline{V} * \overline{I} * \sin(\varphi_d)$ Potencia Reactiva.



De gráfico anterior

$Ps = \sqrt{P2+Pq2}$

De aquí definimos otro elemento importante que es el F.P. (Factor de Potencia)

F.P = P / PS

Aquí se puede decir que empieza la problemática. Estamos generando y entregando una energía que no es transformada totalmente en trabajo, es decir no estamos haciendo un uso eficiente de la energía que se genera. A demás, complicando a un más lo anterior, desarrollando pérdidas de energía en forma de calor, en líneas de distribución, todo tipo de protección, interruptores, transformadores etc.

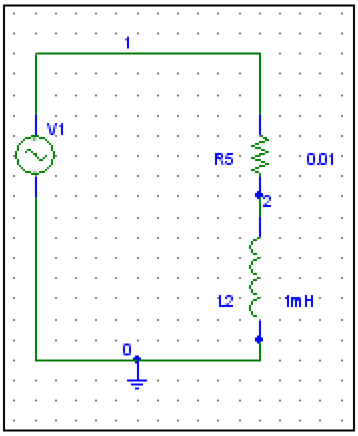
Esto trae, no cabe dudas según normas vigentes, niveles de inmunidad que no deben ser sobrepasados en un determinado porcentaje del tiempo de una medida.

Si el sistema es trifásico y el corrimiento de la corriente se mantiene igual en las tres fases, seguiríamos con una corriente nula por el cable de neutro. Esto es prácticamente imposible de llevar a la práctica y siempre pequeña que sea hay una circulación de corriente por dicho conductor. Cuanto mayor sea el desequilibrio de consumo entre las fases de un sistema trifásico mayor será la circulación de corriente por dicho conductor por lo tanto mayores las pérdidas por efecto Joule por el mismo.

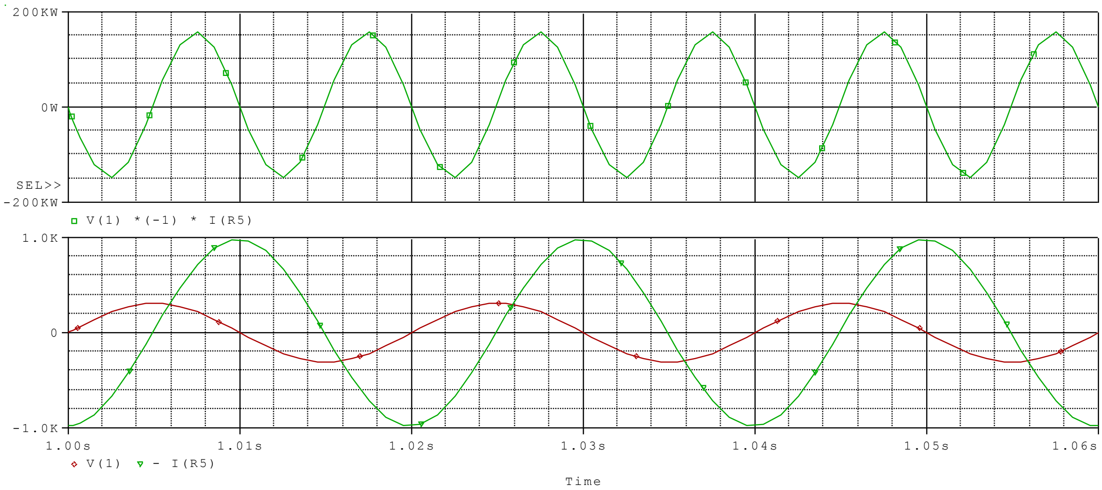
Nuestro sistema sería ideal desde el punto de vista energético si

F.P. = 1

En cambio en el caso extremo



Un circuito altamente inductivo tenemos las siguientes gráficas



Donde se observa en gráfica superior el desarrollo de la potencia entregada por el generador el el tiempo, además claramente se nota que dicha media de potencia es cero por lo tanto para este caso.

FP = P / Ps = 0

En la curva posterior tenemos la corriente y la tensión con un defase de 90º

Estamos en presencia de un sistema altamente reactivo, en donde aunque no hay consumo por nuestra carga tenemos circulación de corriente y por lo tanto pérdidas, dado esta circula por cables, fusibles, protecciones, interruptores etc.
Esta condición es penalizada, para ello hay normativas que establecen según tarifa de consumo y tensión de trabajo los parámetros con sus respectivas tolerancias que no deben ser sobrepasadas.

Alimentación de sistemas alineales

Hoy en día nos encontramos que la mayoría de nuestros consumos son debidos a cargas del tipo alineal es decir aquellas que hacen que la corriente tomada desde la red no guarda misma forma (senoidal) que de la tensión que la alimenta.

Por lo tanto tenemos nuestra señal de tensión y corriente que podemos representar de la siguiente manera:

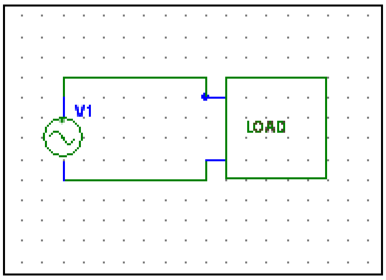
$$v(t) = V_{\max} * \sin(wt)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n * \sin(nwt + \varphi_n)$$

La i(t) se puede representar por medio de un desarrollo en series de Fourier como la sumatoria de señales senoidales, es decir esa corriente de forma compleja queda representada en suma de señales conocidas. A cada una de estas la denominaremos armónicos, en donde el primero será denominado fundamental (de la frecuencia de la tensión de red) y el resto de orden superior.

El tema ahora es determinar como juegan estos en la potencia consumida o entregada desde la red.

Supongamos el siguiente esquema



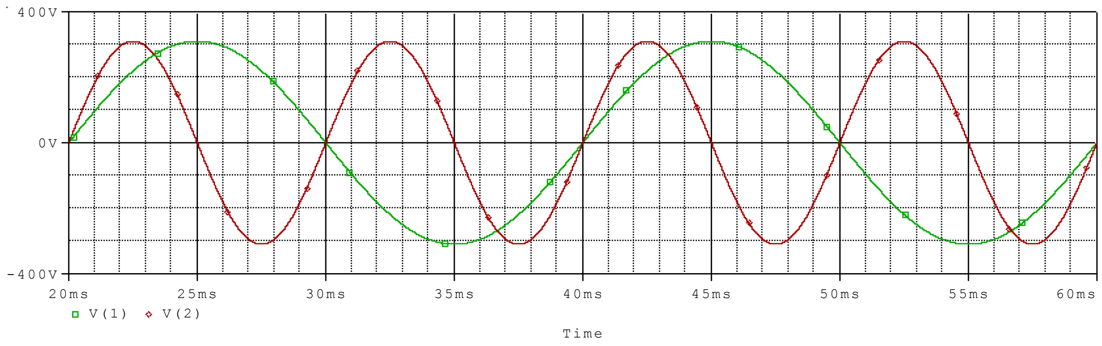
En donde la potencia instantánea será en todo momento

$$P(t) = v(t) * i(t)$$

Reemplazando por las expresiones de la corriente y tensión anterior y desarrollando nos queda

$$P(t) = v(t) * \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n * \sin(nwt + \varphi_n)] \right]$$

$$P(t) = v(t) * [I_1 * \sin(wt + \varphi_1)] + v(t) * [I_2 * \sin(2wt + \varphi_2)] + ... + v(t) * [I_n * \sin(nwt + \varphi_n)]$$



El promedio en un período del producto de estas dos señales senoidales es cero por lo tanto nos queda:

$$P = \frac{1}{2\pi} \times \int_0^{2\pi} V\max \times senwt \times I1\max \times sen(wt + \varphi 1) \times dwt$$

$$P = \frac{V\max \times I1\max}{2\pi} \int_0^{2\pi} senwt \times (senwt \times \cos\varphi 1 + \cos wt \times sen\varphi 1) \times dwt$$

$$P = \frac{V\max \times I1\max}{2\pi} \times \left(\int_0^{2\pi} sen^2 wt \times \cos\varphi 1 \times dwt + \underbrace{\int_0^{2\pi} senwt \times \cos wt \times sen\varphi 1 \times dwt}_{0} \right)$$

$$P = \frac{V\max \times I1\max \times \cos\varphi 1 \times 2\pi}{4\pi}$$

$$P = \overline{V} \times \overline{I}1 \times \cos\varphi 1$$

Expresión, esta última, del consumo visto desde el generador. En donde observamos que depende del primer armónico de corriente y su desfase respecto de la tensión .
Aparte tendremos una potencia reactiva

$$P = \overline{V} \times \overline{I1} \times sen\varphi 1$$

Si al igual que antes (cuando la señal de corriente era senoidal) planteamos que

$$Ps = \overline{V} \times \overline{I} \neq \sqrt{P + Pq}$$

Esta potencia aparente no se corresponderá con la suma vectorial de P + Pq
Es aquí en donde aparece la incidencia de los armónicos , desarrollándose una potencia de deformación debida a tal contenido

$$PD = \overline{V} \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \overline{In}^2}$$

Quedando entonces la potencia aparente total como

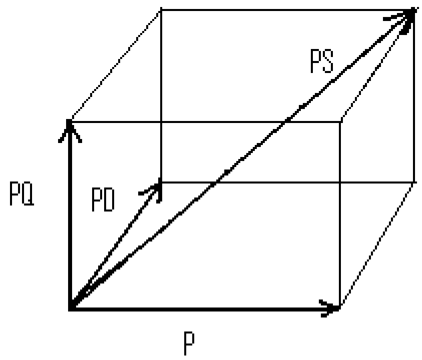
$$Ps = \sqrt{PD^2 + P^2 + Pq^2}$$

Si analizamos el factor de potencia nos queda

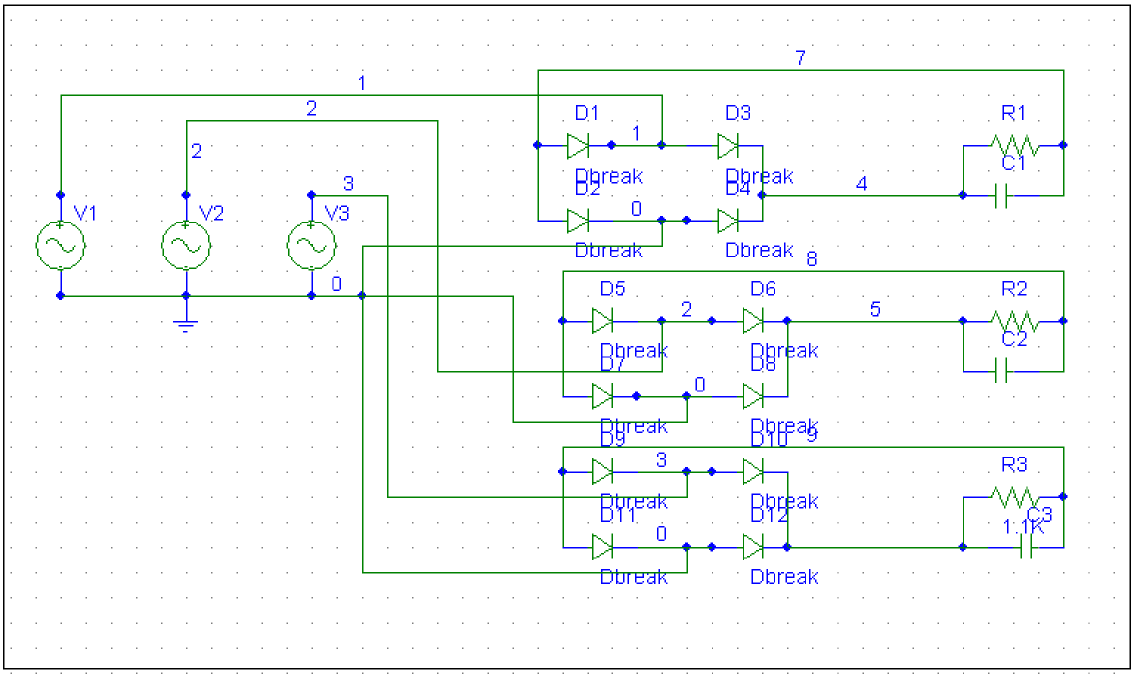
$$F.P. = \frac{P}{PS} = \frac{\overline{V}}{\overline{V}} \times \frac{I1}{I} \varphi 1$$

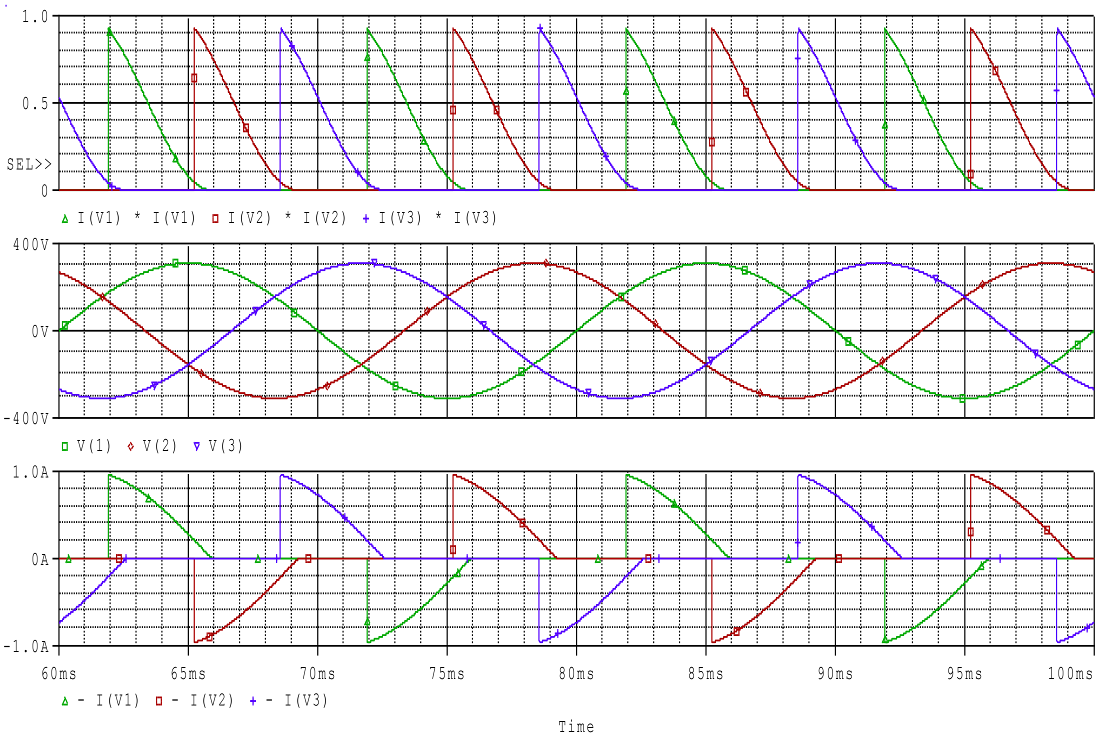
$$F.P. = \frac{I1}{I} \times Cos\varphi 1$$

En donde I_1/I=F.D. o factor de deformación , nos da idea en cuanto la corriente se aleja de su forma senoidal. Llamando a su vez a Cosφ = PFD o factor de desplazamiento de la potencia.
Se puede observar que ahora el FP no es más el Cosφ , sino que aparece multiplicado por un factor de deformación que disminuye aún más su valor.



En el caso de un sistema trifásico, suponiendo cargado en forma equilibrada, podemos observar con el siguiente ejemplo lo siguiente:





En la segunda curva tenemos la alimentación fase neutro con el correspondiente desfase, en la última curva la corriente que veríamos circular por nuestro conductor de neutro y la primer curva la suma cuadrática de dicha corriente.

Por lo tanto se cumple que:

$$In^2 = \frac{3}{2\pi} \times \int_0^{2\pi} Iv^2(t) \times dt \Rightarrow In = \sqrt{3} \times \overline{Iv}$$

Se puede observar que la corriente aparte de tener un alto contenido armónico, por el conductor neutro circula raíz de tres la corriente de cualquiera de las tres fases. Es decir tenemos más corriente por el neutro (cerca del doble) que en cualquiera de las fases. Esto trae elevadas pérdidas de energía en dicho conductor que generalmente se mal dimensiona sin tener en cuenta este punto muy importante.
Otro problema debido a la deformación de la corriente es su alto factor de cresta. En una senoidal pura teníamos que

$$FC = \frac{\mathrm{Im}\acute{a}x}{Irms} = \sqrt{2} = 1.4142$$

En cambio para cargas alineales o deformantes este factor puede superar en más del doble a aquel de señales senoidales puras.

$$FC(no\_senoidal) = \frac{\mathrm{Im}\acute{a}x}{Irms} \rangle 2$$

Esto origina circulación de picos de corriente por cables, transformadores y protecciones de hasta tres veces la corriente eficaz. Estos han sido construidos generalmente para picos de corriente que consideran señales senoidales. Una de estas consecuencias es el disparo intempestivo de protecciones, como ser fusibles y diferenciales. Algo parecido ocurre con los transformadores de alimentación, en donde su construcción se fundamenta en señales senoidales y en base a esto hace referencia su potencia en VA en la chapa que indica sus características. La circulación de corriente con dicha deformación los desclasifica para la potencia para la cual fueron construidos, apareciendo un coeficiente de desclasificación.

$$FK = \frac{\mathrm{Im}\acute{a}x \times \sqrt{2}}{Irms}$$

Este factor FK nos da idea en cuanto hay que disminuir la potencia en VA indicada en la chapa del transformador. Puede observase que si estamos en un sistema lineal dicho factor seria 1 y no tendríamos que depreciar la potencia.
Porque sucede esto, a que se debe esta degradación en la potencia, fundamentalmente a que la corriente al estar compuesta por armónicos de orden superior contribuyen en un aumento en las pérdidas de potencia tanto en el núcleo (son función de la frecuencia al cuadrado) como por efecto pelicular o Skin en los cables. Esto origina una sobreelevación de la temperatura por encima de los valores admisibles es por ello que debemos trabajar a una corriente menor a la tabulada, esta en algunos casos puede llegar a la mitad de la nominal.
Vemos con esto la incidencia negativa del contenido armónico y su correlación con aumento de las pérdidas de energía.
Una manera de tabular el factor FK en mediciones más exigentes es la siguiente:

$$FK = \sum_{n=1}^{n=50} I`n^{2} \times n^{2}$$

Donde I`n es la relación entre la amplitud del armónico de orden n y el de la señal fundamental de 50Hz

$I`n = \frac{In}{I1}$ desde n=1 a n=50

Distorsión armónica o THD

El THD puede ser de corriente o de tensión y nos indica, tomando como referencia la señal fundamental es decir la senoide de 50Hz, en cuanto la real o la que tenemos en nuestra medición esta alejada de esta última. En el caso de que nuestra señal sea senoide el THD sera cero aumentando a medida que nos alejemos de dicha forma.

Como vimos en el apartado anterior las pérdidas de energía son función directa del contenido armónico por lo tanto hay normas como la IEC 61000-2-4 que regulan dicho contenido.

La expresión del THD de tensión es la siguiente:

$$THDv\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Vn^2 rms}}{V1rms} \times 100 = \frac{\sqrt{Vtrms^2 - V1rms^2}}{V1RMS} \times 100$$

Donde:

Vtrms= tensión eficaz total

V1rms= tensión eficaz de primer armónico

Mismo análisis sería para la corriente.

En el caso de tensión este parámetro no debe superar el 5% , considerando para ello una determinada tarifa (I , II , III) , tensión de trabajo , PCC (potencia de corto circuito) etc.

Si consideramos a la tensión libre de distorsión o con contenido despreciable es decir un THD menor al 5%.

El factor de potencia lo podemos expresar como sigue

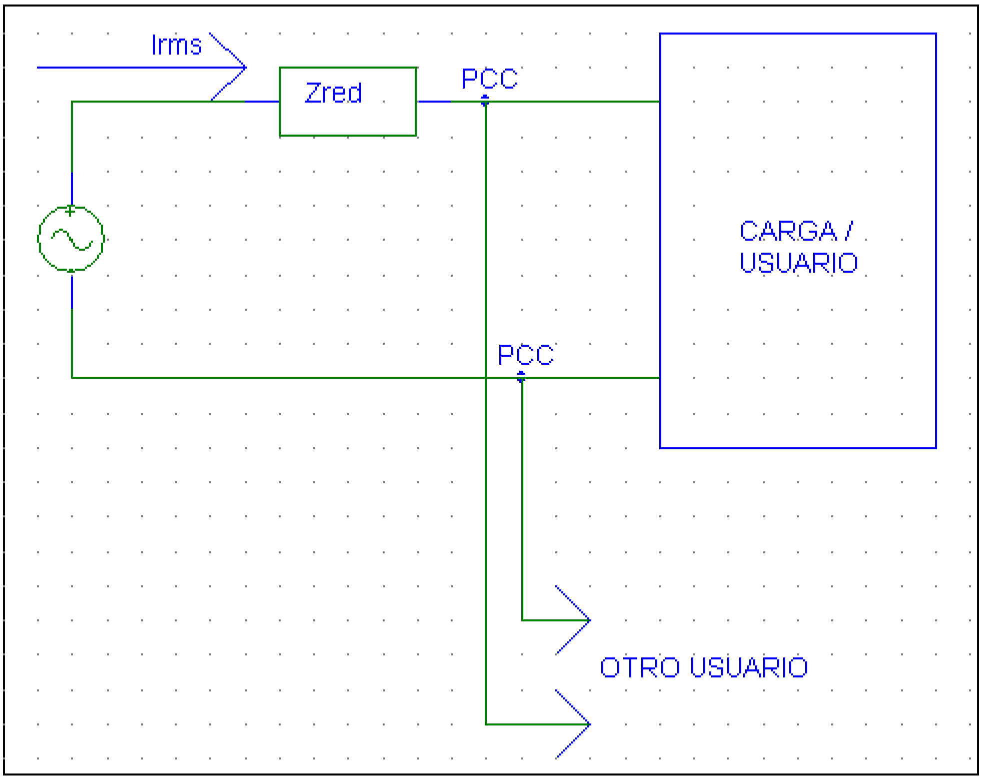
$$FP = \frac{I1rms}{Itrms} \times \cos\varphi(v1, I1)$$

Además podemos expresar a la corriente eficaz total como

$$Itrms = \sqrt{THDi^2 \times I1rms^2 + I1rms^2}$$

$$Itrms = I1rms\sqrt{THDi^2 + 1}$$

Se puede observar que si no tengo distorsión en la corriente la Irms total es igual a la de la fundamental o primer armónico, a medida que aumenta la distorsión por cargas alineales, visto esto último desde la red o aguas arriba, la corriente eficaz total aumenta para el mismo trabajo eléctrico. Este aumento en la corriente total genera pérdidas de energía, mismo, la circulación de una corriente de alto contenido armónico puede provocar, por caídas de tensión en cables mal dimensionados, armónicos de tensión en los puntos de conexión común o PCC. Esto suele ser grave dado que hay muchos dispositivos que no están preparados para este tipo de tensión deformada y generan recalentamiento o mal funcionamiento tal es el caso de motores de inducción alimentados con tensión con contenido de quinto armónico el mismo genera cupla frenante, vibraciones y aumento de pérdidas por recalentamiento.



Por lo tanto es necesario una Potencia de cortocircuito importante de manera que redunde en una baja impedancia de red, evitando de esta manera los perjuicios de los armónicos de tensión , esto no significa que no se puedan provocar dentro de la instalación si esta última esta mal dimensionada, por lo tanto es muy importante estudiar esto último.

Generalmente se dice que la calidad de la tensión en el PCC depende o es responsabilidad de la distribuidora de energía, imputándose al usuario el contenido armónico de la corriente.

Veamos en el siguiente apartado uno de los inconvenientes provocado por el alto contenido armónico de corriente debido a cargas alineales.

Pérdidas en los conductores o cables de alimentación

Se sabe que ha medida que aumenta la frecuencia de la señal que se transporta por un conductor esta tiende a concentrarse en una zona cercana a su periferia, por lo tanto aumenta la resistencia efectiva a dicha corriente.
Para la corriente continua o a frecuencias bajas, por debajo de los 50Hz, la resistencia de un conductor se puede expresar como:

$$R = \rho \times \frac{l}{S}$$

Donde:

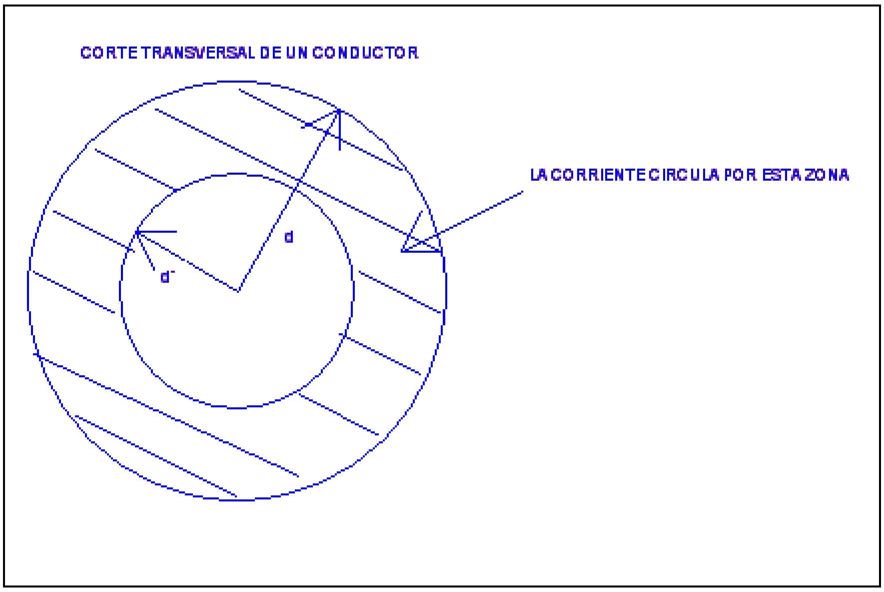
ρ resistividad del material en Ω.m (1,7 x 10^{-8} Ω.m)

l longitud en metros (m)

S superficie en mm^2

Quiere decir que una barra homogénea de 1m y un 1 mm^2 de sección tiene una R = 1,7$10^{-2}$ Ω

Si la frecuencia de la señal aumenta nos queda lo siguiente



$$SUPtotal = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

Siendo la superficie de la corona por la cual circula la corriente igual a :

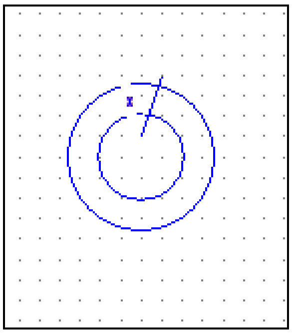
$$SUPcorona = \frac{\pi}{4} \times (d^2 - d'^2)$$

Quedando la resistencia a la corriente alterna como sigue

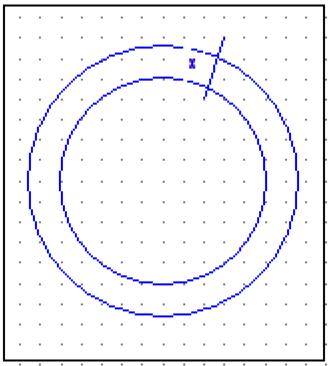
$$Rca = Rcc \times \frac{d^2}{d^2 - d'^2}$$

En base a esto último si analizamos el siguiente ejemplo en donde hacemos circular dos corrientes de misma frecuencia (ej. 100KHz), por dos conductores de diferente sección , podemos sacar la siguiente conclusión.

Cable $1mm^2$ F= 100kHz



Cable $10mm^2$ F=100kHz



Tanto para una sección como para la otra la penetración x no cambia . por lo tanto aumenta la Rca respecto a la Rcc para el conductor en cuestión. A medida que aumentamos la sección, la Rca disminuye, pero para una misma frecuencia cuanto mayor sea la sección del conductor mayor será la relación entre la Rca y su respectiva Rcc. Es por ello se establece la siguiente expresión general:

$$Rca = Rcc \times (1 + Ys + Yp)$$

Donde:
Ys= (Incremento debido al efecto pelicular)
Yp= (Incremento debido al efecto de proximidad)

$$Ys = 3.28 \times \frac{f^2 \times S^2}{\rho^2 \times 10^8}$$

f= frecuencia de la corriente en Hz
S= Sección efectiva del conductor en mm^2
ρ= resistividad del conductor a la temperatura de trabajo

De lo anterior se desprende que la resistencia a la señales alternadas aumenta con el cuadrado de la frecuencia, por lo tanto un tercer armónico generará una Rca, 9 veces mayor que ha 50Hz, ni que hablar para un 5to armónico.
La conclusión es que una corriente con alto contenido armónico ocasiona:

- Calentamiento y por lo tanto pérdidas de energía adicionales, por efecto Joule, en los conductores.
- Disparos intempestivos de protecciones magnetotérmicas por incremento de su resistencia.
- Fallas en fusibles por aumento de su densidad de corriente.
- Calentamiento adicionales en motores, transformadores…etc

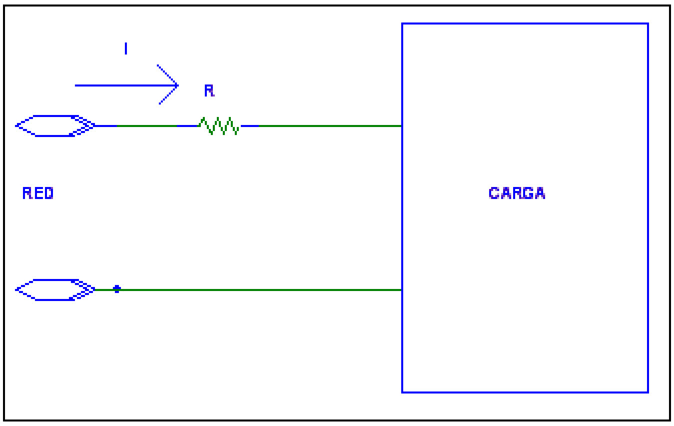
Estas como alguna de las más importantes.

<u>Comparación de las pérdidas en conductores recorridos por armónicos superiores respecto de aquellas sin contenido armónico.</u>

Si la alimentación tiene un THDv < 5% podemos aproximar a que dicha señal de tensión esta libre de contenido armónico o el mismo es despreciable para ser tenido en cuenta. Entonces podemos decir que:

$$Itrms = I1rms\sqrt{THDi^2 + 1}$$

Cuando el THDi es nulo (sistemas lineales) Itrms=I1rms
Si concentramos en una R las pérdidas en nuestro conductor de acuerdo al siguiente ejemplo

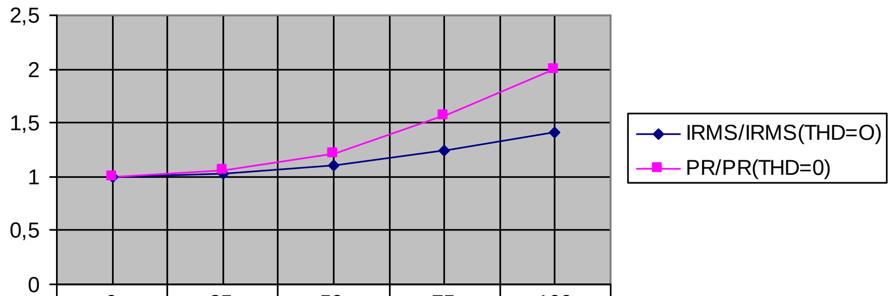


La potencia de pérdida sobre la R será la siguiente

$$PR = \sum_{n=1}^{\infty} Inrms^2 \times R = Itrms^2 \times R$$

Cuando el THDi=0

$PR = I1rms^2 \times R \Rightarrow$ usando dicho valor como de referencia , vemos que ocurre cuando crece el THDi.



	0	25	50	75	100
IRMS/IRMS(THD=O)	1	1,03	1,1	1,25	1,41
PR/PR(THD=0)	1	1,06	1,21	1,56	2

THDI%

Se puede observar de este gráfico que las perdidas aumentan fuertemente a medida que se incrementa el contenido armónico en la corriente. Siendo un 10% mayor la relación de perdidas de potencia respecto a la de corriente para un THDi del 50%, llegando esta relación al 41.42% cuando el THDi llegue a un 100% . Mismo será de un 21% el aumento de las perdidas de potencia, por ejemplo, para una distorsión del 50% en la corriente respecto a la que se generaría sin contenido armónico .

Conclusión:

Es de importancia primaria controlar el contenido armónico, se observa su relación directa con la pérdida de energía, para mitigar dicho efecto se pueden buscar diferentes alternativas como la de aumentar la sección de los conductores y utilizar todo tipo de equipamiento acorde al contenido armónico que se tenga, la otra posibilidad recae en la utilización de filtros según cada caso en particular.

Planteado el problema nos queda cuantificar las pérdidas generadas en nuestra red de distribución por las diferentes familias de dispositivos electrónicos, y correlacionar esto último con la emisión de CO_2. Para ello será necesario contar con un medidor de calidad de energía el cual nos permitirá tabular los diferentes parámetros que hemos tratado en este trabajo.
Quedando como tarea importante el desarrollo de correctores de factor de potencia aplicables a dispositivos electrónicos, comparar valores y cuantificar las posibles mejoras que se pudieran encontrar.