

## **Diseño de un Procedimiento de Cálculo de Conductores Bajo Efecto con Corrientes Armónicas**

Investigación

M.C. Gustavo Adolfo Acevedo Ramírez<sup>1</sup>, M.C. Mario Salvador Esparza González<sup>1</sup>,  
Dr. Juan Carlos Olivares Galván<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. A. López Mateos 1801 Ote. Fraccionamiento Bona  
Gens, Aguascalientes, Ags. C.P. 20256, Tel: 01(449)9105002, Fax: 01(449) 9700423

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Azcapotzalco, México D.F., México  
gaar07@hotmail.com, msespa@ieee.org, jolivare\_1999@yahoo.com

### **Resumen**

El problema que se estudia en este trabajo, es el impacto que tienen los armónicos generados por cargas no lineales en los conductores empleados para las instalaciones eléctricas, utilizando una metodología que permite calcular un calibre adecuado de conductor para minimizar las pérdidas ocasionadas por el efecto piel producto de los armónicos. Inicialmente se desarrolló un procedimiento para calcular la caída de tensión y las pérdidas en el conductor a diferentes frecuencias, mediante simulaciones se validaron los resultados y finalmente se estableció el método de cálculo basado en el método tradicional.

Se ha estudiado el comportamiento de una serie de conductores, sometidos al nivel de contaminación armónica que proporciona un rectificador monofásico con una distorsión armónica total (THD) del 56%, considerando una carga del conductor del 90% y 100%.

Los resultados permiten concluir que para calibres inferiores a 2 AWG los efectos de los armónicos pueden ser despreciables, mientras que para los conductores mayores a éste, la caída de tensión en el conductor para 30 metros de longitud sobrepasa el límite recomendado cuando tienen una utilización entre el 90% y 100%, por lo que el calibre debe ser reemplazado por un conductor inmediato superior.

**Palabras clave:** Conductor, armónicos, pérdidas, caída de tensión.

### **Abstract**

The problem that is studied in this work, is the impact that there have the harmonic ones generated by not linear loads in the wires used for the electrical installation, the aim of this research is the development of a methodology that allows to calculate a wire's suitable cross-sectional area to minimize the losses caused by the effect skin product of the harmonic. Initially develop a procedure to calculate the voltage drop and the losses in the wire to different frequencies,

by means of simulations the results were validated and finally there was established the method of calculation based on the traditional method.

There has been studied the behavior of a series of wires, submitted at the level of harmonic pollution that provides a single-phase rectifier with total harmonic distortion (THD) of 56 %, considering a load of the wire of 90 % and 100 %. The results allow to conclude that for cross-sectional area lower than 2 AWG the effects of the harmonic ones can be despicable, whereas for the drivers bigger than this one, the voltage drop in the driver for 30 meters of length exceeds the recommended limit when they have a utilization between (among) 90 % and 100 %, for what the cross-sectional areas must be replaced by an immediate top driver.

**Keywords:** Conductor, Harmonics, Losses, Fall of Voltage.

### **Introducción**

El uso de la electrónica de potencia en los dispositivos de control, así como en los artículos electrodomésticos, ha permitido la reducción de las dimensiones físicas de estos, además de que se ha mejorado notablemente su eficiencia; sin embargo, también se genera la distorsión de la señal de voltaje que provee la compañía suministradora de energía eléctrica. Es por eso que a este tipo de cargas que distorsionan la corriente y se les conoce generalmente como cargas no lineales.

En las instalaciones eléctricas la presencia de armónicos ocasiona problemas en protecciones, equipos y conductores. El problema que se genera en los conductores radica específicamente en su calentamiento, mismo que provoca un aumento de su resistencia lo que conlleva un incremento en las pérdidas de energía. Básicamente, el fenómeno que provocan los armónicos, es consecuencia de las altas frecuencias inherentes a estos, que hace que al circular una corriente por el conductor los electrones, que en condiciones normales circulan repartidos a través de la sección transversal del conductor, sean desplazados

hacia la superficie de éste, elevando así la densidad de corriente cada vez más cercana a la periferia del conductor.

La mayoría de las investigaciones que se han realizado en torno a la problemática generada por las cargas no lineales, han estado dirigidas hacia la forma de mitigar los efectos armónicos que alteran en forma nociva la calidad de la energía y en consecuencia, la de los aparatos y equipos de protección. En este sentido, podemos encontrar literatura técnica acerca de los diferentes aspectos relacionados con los armónicos, los cuales van desde técnicas para evaluar la calidad de la energía [1], estudios para la selección de sistemas de barra bus considerando corrientes armónicas [2], hasta diseño de sistemas de distribución de potencia para operar bajo condiciones de carga no sinusoidal [3].

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología que permita calcular el calibre de un conductor considerando el nivel de contaminación armónica que transportara, es por eso que este trabajo estará enfocado al estudio del comportamiento del conductor eléctrico, sometido a cierto nivel de contaminación armónica para que sean analizados los resultados y así poder determinar un modelo matemático que permita calcular el diámetro del conductor y de esta forma pueda circular la corriente contaminada sin que se produzcan calentamientos y pérdidas excesivas que deterioren rápidamente la vida útil del conductor.

### Fundamentos teóricos

La resistividad es una característica propia de los conductores y puede definirse como la resistencia que ofrece el conductor, cuando circula corriente eléctrica a través de su área de sección transversal, a lo largo de la longitud del conductor [4]. La unidad de la resistividad volumétrica está dada en  $\Omega \cdot m$  ó en algunos casos también se puede expresar en  $(\Omega \cdot mm^2)/m$ . Matemáticamente se puede expresar como:

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad volumétrica ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )

$R$  = Resistencia en ohms ( $\Omega$ ).

$A$  = Área de sección transversal en ( $mm^2$ ).

$l$  = Longitud en metros (m).

La inductancia es una función del campo magnético establecido por la corriente en un conductor, pero este campo como un entero es divisible en dos partes, uno

que es completamente externo al conductor y otro está enteramente dentro del conductor; solamente la última porción se puede ver como correspondiente a las características magnéticas del material conductor. La resistencia es estrictamente una característica del propio conductor. Ambas, la resistencia y la inductancia interna de un conductor cambian sus valores efectivos cuando hay cambios de corriente con gran rapidez como en el caso de la alta frecuencia en corriente alterna; este es el término conocido como efecto piel [4].

El efecto piel en los conductores es un fenómeno que ocurre cuando la intensidad de corriente varía rápidamente de instante a instante pero no ocurre con la corriente continua [4]. Uno de los aspectos más perjudiciales del efecto pelicular es la reducción del área efectiva de un conductor macizo por donde circula la corriente alterna debido al incremento de la densidad de corriente en la periferia del mismo. Una explicación que se da frecuentemente para explicar el aumento en la resistencia efectiva, es que la inductancia de la zona central de un conductor es mayor que la de la zona periférica; y estando esta inductancia ligada a la variación de flujo abarcado, es un máximo para el flujo de corriente central [5].

La Ec. 2 muestra el efecto piel o de penetración del conductor cuando se tiene un incremento de la frecuencia, a mayor frecuencia el área efectiva del conductor se reduce.

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}} \quad (2)$$

Donde

$\delta$  = Profundidad de penetración (m)

$\rho$  = Resistividad del conductor ( $\Omega/m$ )

$\mu$  = Permeabilidad en el vacío ( $4\pi 10^{-7}$ )

$f$  = Frecuencia (Hz)

### Materiales y métodos

Para ver el impacto de los armónicos en los conductores, lo primero que se ha de determinar es la resistencia e inductancia efectiva a las frecuencias de los armónicos que se consideran, para este caso hasta el armónico 23, mediante el uso de proporciones del efecto piel [4].

Se han seleccionado un rango de calibres de conductores que van del 2AWG (diámetro = 33.6mm) al 500AWG (diámetro = 28.8mm), ya que en este rango el efecto piel tiene un impacto considerable. Para el análisis de estos conductores se ha simulado un rectificador monofásico de onda completa no controlado con THD del 56.20%, hay que subrayar que la caída de tensión y las pérdidas en el conductor se realizan en

base a la proporción de corriente de cada armónico para este modelo electrónico.

La metodología que se utiliza para determinar un calibre de conductor adecuado cuando circulan armónicos a través de él es la siguiente:

- 1) Conocer el tipo de carga que se van a alimentar a través de los conductores, para poder obtener los valores de corriente de cada armónico generado por la carga.
- 2) Determinar el tipo de conductor que se desea instalar y conocer sus valores de resistividad para ese tipo de cobre y el valor de inductancia por unidad de longitud.
- 3) Mediante (1) determinar la resistencia por unidad de longitud, considerando el factor de cableado que para este caso en particular se trata de uno del tipo B por lo que le corresponde un factor del 2%.

$$R_L = \frac{\rho F}{A} \quad (3)$$

Donde:

$R_L$  = Resistencia eléctrica nominal en  $\Omega/\text{km}$  a  $20^\circ\text{C}$ .  
 $\rho$  = Resistividad volumétrica máxima a  $20^\circ\text{C}$ .  
 $A$  = Área de sección transversal nominal en  $(\text{mm}^2)$ .  
 $F$  = Factor de incremento de la resistencia eléctrica debido al cableado  $F=1+k/100$   
 $k$  = Incremento en masa y resistencia eléctrica debido al cableado. Valores en la tabla.

4) Con la resistencia e inductancia por unidad de longitud conocidas, se procede a calcular la resistencia e inductancia efectiva en c.a. para cada valor de frecuencia de armónico mediante:

$$R' = KR \quad (4)$$

$$L' = K'L \quad (5)$$

Donde K se puede consultar en forma tabular en [4] a partir del valor de x el cual está dada por:

$$x = 2\pi a \sqrt{\frac{2f\mu}{\rho}} \quad (6)$$

Donde:

$a$  = es el radio del conductor en cm.  
 $f$  = es la frecuencia en ciclos por segundo (Hz).  
 $\mu$  = es la permeabilidad magnética del conductor (aquí se considera como constante)  
 $\rho$  = es la resistividad en abohm-centímetros (1 abohm =  $10^{-9}\Omega$ ).

5) Como ya son conocidas las resistencias y las inductancias efectivas, además de la corriente por cada armónico, se puede determinar a través de (7) y (8) la caída de tensión por cada armónico y la total a través del conductor:

$$v_n = z_n' \cdot l \cdot I_n \quad (7)$$

$$V_t = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} v_n^2} \quad (8)$$

Donde:

$v_n$  = Caída de tensión en el conductor por armónico, en volts (V).  
 $z_n$  = Impedancia efectiva en el conductor ( $\Omega$ ).  
 $l$  = Longitud del conductor en metros (m).  
 $V_t$  = Caída de tensión total en el conductor (V).  
 $v_n$  = Caída de tensión en el conductor por armónico (V).  
 $n$  = número de armónico.

6) Finalmente se calculan las pérdidas parciales y totales a través de (9) y (10) respectivamente.

La contribución de cada armónico ( $p_n$ ) en (W) se calcula mediante:

$$p_n = I^2 * R' * l \quad (9)$$

Las pérdidas totales (W) en el conductor ( $P_{tc}$ ) se obtienen de:

$$P_{tc} = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \quad (10)$$

### Resultados y discusión

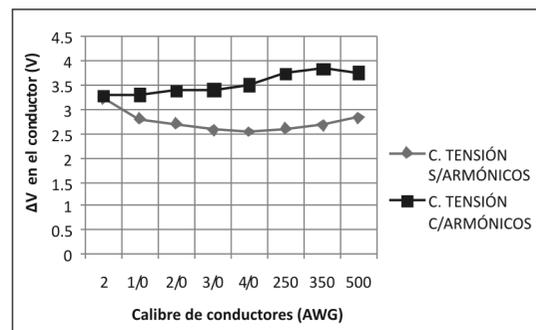


Figura 1. Comportamiento de la caída de tensión en conductores con armónicos al 90% de carga

Las figuras de la 1 a la 4 se obtuvieron después de aplicar la metodología anteriormente explicada a una

serie de diferentes calibres de conductores que van desde el 2AWG al 500AWG, calculados para una capacidad de conducción de un 90 y 100%.

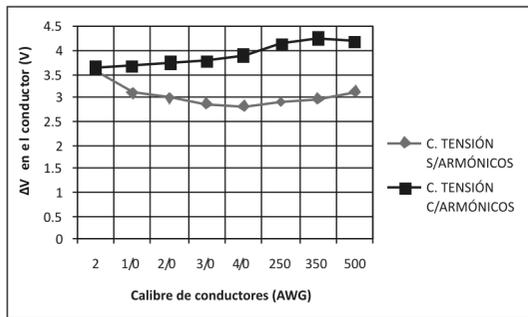


Figura 2. Comportamiento de la caída de tensión en conductores con armónicos al 100% de carga

Las figuras 1 y 2 muestran el comportamiento de la caída de tensión en los conductores, además de la comparación entre el cálculo sin armónicos y el que se hace de acuerdo a la metodología propuesta.

Las figuras 3 y 4 muestran las curvas de comportamiento para la potencia para un 90% y un 100% de utilización, calculados con y sin armónicos.

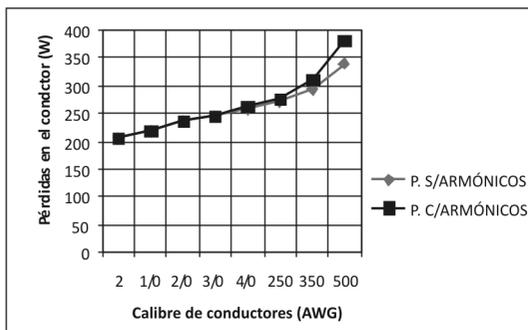


Figura 3. Pérdidas en conductores al 90% de la carga

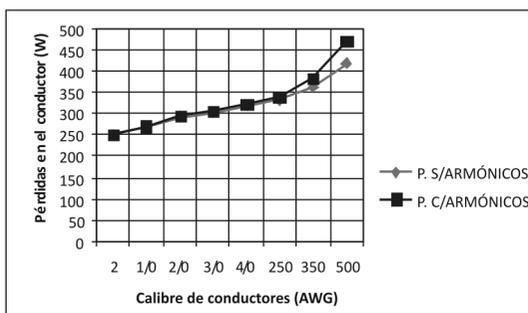


Figura 4. Pérdidas en conductores al 100% de la carga

### Conclusiones

Los cambios de resistencia e inductancia son despreciables en conductores con calibres menores a 2/0 ante diferentes frecuencias armónicas debido a

la relación directa que existe entre la profundidad del efecto piel, la frecuencia y el diámetro de los mismos, por consecuencia los cambios son significativos en el rango de conductores mayores a este calibre.

El método que se propone permite conocer la caída de tensión y las pérdidas reales que se tiene en un conductor por el que circulan componentes armónicas.

En base a este método, los resultados que se muestran gráficamente en las figuras 1 y 2 permiten concluir que la caída de tensión para los conductores del 1/0 AWG al 500AWG desde un 90% de su capacidad de conducción exceden el porcentaje de caída de tensión sugerido por la NOM-001-SEDE-2005 [6-7], con lo que se justifica un cambio de conductor al calibre inmediato superior cuando se hace la selección.

Se muestra un incremento de pérdidas en el conductor debido a la consideración de armónicos de acuerdo a la con las figuras 3 y 4; las pérdidas reales en el conductor calibre 500AWG, representan un 11% adicional de las pérdidas totales que se calculan sin considerar los armónicos, lo cual genera un incremento de temperatura en el conductor que deberá ser evaluado para no exceder la capacidad térmica del mismo.

### Referencias

- [1] A. Dell' Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta, (Julio 2004), "New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems Under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, N° 3, , pp 1284-1290.
- [2] P. Leprête, M. Mary and J. Schonck, (2004), "Taking account of harmonic currents in the selection of busbar systems", *11th International Conference on Harmonics and Quality of power*, , pp 41-45.
- [3] Gregory W. Massey, (Mayo- Junio 1995), "Power Distribution System Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, N° 3, pp 513-519.
- [4] Fink, Donald G. (2006), *Estandar Handbook for Electrical Engineers*, Mc Graw Hill Professional Publishing, sección 4 pp-28-33.
- [5] Ducluzaux Andre, (Septiembre 2003), "Cuaderno Técnico No. 083", Schneider Electric, pp 8-14.
- [6] Norma Oficial Mexicana (NOM)-001-SEDE-2005.
- [7] Asociación de Normalización y Certificación A.C. "Norma ANSI NMX-J-012-2002", 2002.

**Artículo recibido:** 6 de febrero de 2009

**Aceptado para publicación:** 19 de mayo de 2009