

RELACIONES DE POTENCIA EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES

HORACIO TORRES S.
LEONARDO BARRETO G.

PROYECTO P.A.A.S. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
e-mail: HTORRES@BACAIA.USC.UNAL.EDU.CO

RESUMEN:

Este artículo presenta algunas consideraciones con respecto al flujo de potencia cuando existen armónicos de tensión y/o corriente en el sistema de distribución. Se enfatiza el hecho de que las relaciones de potencia reactiva clásicas definidas para el caso sinusoidal dejan de ser válidas y que la descomposición espectral de la potencia instantánea puede contribuir a establecer, comprender e interpretar las componentes de la potencia y

1. INTRODUCCION

La existencia de distorsión armónica en las ondas de tensión y corriente debido a la presencia de cargas no lineales en la red de distribución ha generado la necesidad de establecer de manera clara y definida las propiedades del flujo de potencia en condiciones no sinusoidales, pues las definiciones tradicionales dejan de ser válidas.

Esto constituye además un problema de aplicación práctica puesto que las definiciones de potencia que se desarrollen tendrán incidencia en cuestiones tales como el cálculo del factor de potencia, métodos de compensación de co-

rrientes reactivas, cancelación de armónicos, el principio de funcionamiento y la aplicabilidad de los medidores tarifarios, el control de la tensión de un sistema mediante inyección de potencia reactiva etc.

Sin embargo, aún no se han presentado en la literatura definiciones concluyentes con respecto a la descomposición de la potencia en condiciones no sinusoidales, particularmente en cuanto a la potencia reactiva y a la denominada potencia de distorsión se refiere, continuando así como un tópico vigente de investigación [5]. Un adecuado entendimiento e interpretación del flujo de potencia requiere una adecuada complementación del análisis en los dominios del tiempo y la frecuencia [10]

2. DEFINICIONES BASICAS

La potencia asociada a un circuito puede definirse como la rata de transferencia o utilización de la energía.

Para un circuito pasivo cualquiera, lineal o no lineal, alimentado por una tensión periódica puede definirse la potencia instantánea como:

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

$p(t)$ = Potencia instantánea [W]

$v(t)$ = Tensión de alimentación [V]

$i(t)$ = Corriente suministrada [A]

La potencia instantánea $p(t)$ tiene una periodicidad determinada por el período de $v(t)$ e $i(t)$.

Por otra parte, la potencia promedio (o activa) P_p del circuito está dada como:

$$P_p = \frac{1}{T} * \int_0^T v(t) * i(t) * dt$$

Donde:

P_p = Potencia promedio [W]

T = Período [seg]

cuando existen armónicos en las ondas de tensión y/o corriente, a $p(t)$ puede asociarse una descomposición en series de Fourier. La componente de $p(t)$ para la frecuencia $f = 0$, corresponde a la potencia P_p de la carga. [11]

Para la tensión $v(t)$ y la corriente $i(t)$ pueden definirse los valores rms (root-mean-square) como:

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

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

que para ondas compuestas por n y m armónicos de tensión y corriente respectivamente, pueden expresarse como:

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_i^2 + \dots + V_n^2}$$

Donde V_i es el valor rms del i -ésimo armónico de tensión ($i = 1, \dots, n$).

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_j^2 + \dots + I_m^2}$$

Donde I_j es el valor del j -ésimo armónico de corriente ($j = 1, \dots, m$).

Puede definirse la potencia Aparente (S) para una fase como:

$$S = V_{rms} * I_{rms} \text{ en [VA]}$$

S representa la máxima capacidad de transferencia de energía del circuito pero, en general, no tiene una naturaleza física sino que constituye una figura de mérito.

La eficiencia energética de un circuito puede definirse en términos de factor de potencia dado por:

$$F.P = \frac{P_P}{S}$$

Estas definiciones son válidas para circuitos lineales y no lineales independientemente de la forma de onda de la excitación.

3. CIRCUITOS LINEALES EXCITACION SINUSOIDAL

En circuitos lineales sometidos a una excitación $v(t)$ sinusoidal, la potencia instantánea puede expresarse como:

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos(\phi) \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega_1 \cdot t)) - V \cdot I \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(2 \cdot \omega_1 \cdot t)$$

Donde:

ϕ = Angulo de desfase entre la corriente y la tensión

V = Valor rms de la onda de tensión

I = Valor rms de la onda de corriente

ω_1 = $2 \cdot \pi \cdot f_s$

f_s = Frecuencia de oscilación de $v(t), i(t)$

Es decir, $p(t)$ consta de una componente constante y una componente oscilatoria.

De la anterior expresión, la potencia activa del circuito (P), que corresponde al valor promedio de la potencia instantánea (componente constante), está dada por:

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\phi)$$

Y la potencia reactiva (Q) tiene la expresión:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\phi)$$

Que puede ser interpretada como el valor máximo de una componente que oscila con el doble de la frecuencia de oscilación de tensión y corriente. En este caso la oscilación de potencia corresponde exclusivamente a la presión en el circuito de elementos capaces de almacenar energía.

Reformulando la expresión para $p(t)$ en términos de P y Q se tiene:

$$p(t) = P - (P \cdot \cos(2 \cdot \omega_1) + Q \cdot \sin(2 \cdot \omega_1))$$

Es decir que la oscilación de frecuencia $2 \cdot \omega_1$ está formada por dos componentes ortogonales de amplitudes P y Q .

Adicionalmente, para estas condiciones, puede establecerse la relación:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Donde:

S = Potencia aparente [VA]
P = Potencia activa [W]
Q = Potencia reactiva [VAR]

P está asociada al consumo de energía y, en este caso particular, Q está asociada a la energía almacenada en elementos del circuito.

Sin embargo, para el caso general de circuitos lineales o no lineales que operan en condiciones no sinusoidales, la relación anterior no es válida y aún la cantidad Q puede no tener un significado físico claramente definido.

Pero para este caso general, siguen siendo válidas las definiciones de potencia S y potencia promedio (o activa) P, que ilustran la diferencia existente entre la rata de transferencia de energía existente y la rata de transferencia máxima que podría ser alcanzada.

La cantidad:

$$H = \sqrt{S^2 - P^2}$$

no tiene un significado físico definido y puede ser denominada "Voltamperios no Activos", en la literatura se han presentado diferentes interpretaciones de la descomposición analítica de H hasta el momento no se ha obtenido una definición concluyente [3][4][6][7][8][11].

No obstante, la descomposición analítica de H es de importancia en el análisis de las causas de la diferencia entre S y P y proporciona información sobre la forma de mejorar el factor de potencia de un circuito determinado, la determinación de los filtros para los armónicos, el control de tensión etc.

4. CIRCUITOS NO LINEALES CON EXCITACION SINUSOIDAL

Para el caso particular de un circuito no lineal que está siendo alimentado por una tensión sinusoidal se tiene:

$$v(t) = \sqrt{2} * V_1 * \sin(w_1 * t)$$
$$i(t) = \sqrt{2} * \sum_{j=1}^n I_j * \sin(j * w_1 * t + \phi_j)$$

considerando que en la carga no lineal se presentan n armónicos de corriente. [11]

La potencia aparente está dada por:

$$S = V_1 * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

La potencia activa está expresada como:

$$P = V_1 * I_1 * \cos(\phi_1)$$

Donde ϕ_1 es el ángulo existente entre la componente fundamental de la tensión y la componente fundamental de la corriente y se tiene en cuenta que P está dada por los productos de las componentes de tensión y corriente de la misma frecuencia que están en fase. [11]

El factor $\cos(\phi)$ se conoce como factor de desplazamiento.

La potencia reactiva Q es identificable y está definida para este caso como la combinación de las componentes de corriente y tensión de la misma frecuencia desfasadas 90° así:

$$Q = V_1 * I_1 * \sin(\phi_1)$$

Es decir que en este caso la potencia reactiva está asociada solo a las componentes de frecuencia fundamental.

De acuerdo con lo anterior se ha establecido una descomposición de la potencia aparente dada por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Donde se ha involucrado una componente D conocida como 'Voltamperios de Distorsión', cuya expresión es:

$$D = V_1 * \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n I_j^2\right) - I_1^2}$$

La componente de distorsión (D) de la potencia aparente está, para este caso, definida por la combinación de componentes de tensión y corriente de diferente frecuencia, y no está ligada al almacenamiento de energía pero contribuye a la reducción del factor de potencia.

Esto significa que sólo una parte de la diferencia entre potencia aparente y activa puede ser reducida utilizando bancos de condensadores fijos, existiendo un valor máximo de factor de potencia alcanzable por este medio, sin poderse garantizar en consecuencia, una compensación completa (F.P = 1.0).

En el caso de una carga no lineal alimentada por tensión sinusoidal dicha parte corresponde al valor de potencia reactiva Q tal como fue definida.

El factor de potencia para este caso está dado por:

$$F.P. = \frac{V_1 * I_1 * \cos(\phi_1)}{V_1 * \sqrt{\sum_{j=1}^n I_j^2}}$$

De allí se observa que al compensar Q, el factor de desplazamiento ($\cos(\phi)$) se hace uno, pero el factor de potencia total (F.P) de la carga no debido a la presencia de armónicos de corriente en la carga. El valor máximo de factor de potencia obtenible (al hacer $Q = 0$), expresado en términos de potencia está dado por:

$$F.P._{\max} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2}}$$

Donde se considera que ni la potencia activa (P) ni los "Voltamperios de distorsión" (D) se ven afectados por la inclusión de un condensador en el circuito (suponiendo a este último sin pérdidas).

Debe recalarse que esta interpretación es aplicable al caso de un circuito no lineal alimentado por una tensión sinusoidal y que aún no existe consenso sobre la descomposición de la potencia aparente cuando el sistema (lineal o no lineal) es alimentado por una tensión no sinusoidal. [3][6][9][11]

La suposición de que la tensión aplicada a la carga no lineal permanece sinusoidal implica que la fuente tenga una impedancia interna nula y por ende no es realista. Sin embargo, el análisis anterior y las expresiones definidas (en especial las correspondientes a Q y D) son aplicables en los casos en que la distorsión de la onda de tensión sea despreciable.

4. CIRCUITOS LINEALES CON EXCITACION NO SINUSOIDAL

El caso del circuito lineal que es alimentado por una tensión no sinusoidal también es de interés puesto que corresponde a las cargas que sin ser fuente de perturbación se ven afectadas por la presencia cercana de una carga no lineal que está inyectando armónicos a la red.

Puede darse, por ejemplo, que la carga no lineal y la carga lineal se encuentren conectadas en paralelo. La carga no lineal obliga a la circulación de una corriente no sinusoidal que puede originar distorsión de la onda de tensión de alimentación al presentarse una caída de tensión no sinusoidal en la impedancia interna de la fuente de alimentación.

Ello significa que una tensión no sinusoidal será aplicada también a la carga lineal. Si se ha efectuado (o se pretende realizar) una compensación de reactivos a la carga lineal, suponiendo que alimentación es sinusoidal, la presencia de armónicos puede provocar una disminución del factor de potencia, restar efectividad a la compensación e incrementar la posibilidad de problemas debidos a resonancia.

Para esta condición de carga lineal tanto la tensión como la corriente contienen componentes armónicas.

La potencia activa P corresponde a la suma de los productos de las componentes de tensión y corriente de la misma frecuencia que están en fase:

$$P = \sum_{i=1}^n V_i * I_i * \cos(\phi_i)$$

Debe tenerse en cuenta que esta suma es posible a que los productos corresponden a valores promedio.

Sin embargo, cuando la tensión es no sinusoidal, la potencia instantánea p(t) y por la potencia aparente (S) y los 'voltamperios no activos' (H) contienen términos que involucran productos de componentes de tensión y corriente de diferentes frecuencias.

La potencia instantánea se expresa como:

$$p(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\sqrt{2} * V_i * \cos(i * \omega_i * t + \theta_i)] * [\sqrt{2} * I_j * \cos(j * \omega_j)]$$

La potencia aparente dada por:

$$S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n V_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 \right)}$$

Y los 'voltamperios no Activos' están compuestos por un grupo de términos que contienen productos de componentes de tensión y corriente de la misma frecuencia, y otro grupo de términos que involucran productos de componentes de tensión y corriente de diferente frecuencia [11].

Por analogía con la ecuación de la potencia activa, la expresión:

$$Q_{ns} = \sum_{i=1}^n V_i * I_i * \sin(\phi_i)$$

ha sido asociada con la definición de potencia reactiva para el caso no sinusoidal.

Así, varios análisis han mostrado que no es una definición adecuada [2][6][8][11], ya que en el caso no sinusoidal la superposición que dicha ecuación involucra no es válida, puesto que la potencia reactiva correspondiente al n-ésimo armónico ($n * \omega_1$) es un fasor de frecuencia doble de la de este ($f = 2 * n * \omega_1$), y por consiguiente no es posible sumar algebraicamente las magnitudes de dichos fasores de diferente frecuencia para establecer una potencia reactiva total [6][8][9].

Además, esta definición presupone que los desfases existentes entre la tensión y la corriente se deben únicamente a la presencia de elementos que almacenan energía en la red.

Sin embargo, los elementos no lineales causan desfases entre tensión y corriente que no están asociados a oscilaciones de energía. Por ello, la compensación reactiva de la cantidad Q_{ns} no corresponde a una condición óptima de factor de potencia y ella, es general, no es de utilidad para diseñar los circuitos de compensación ni refleja ninguna propiedad de importancia de la res.

Por tanto, la definición de potencia reactiva en el caso de tensión de alimentación no sinusoidal se encuentra todavía en discusión. [6][4]

El factor de potencia en este caso corresponde a:

$$F.P = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * I_i * \cos(\phi_i)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n V_i^2\right) \left(\sum_{i=1}^n I_i^2\right)}}$$

Se observa que no es posible separar un término equivalente al factor de desplazamiento y por tanto la consideración, válida para circuitos con alimentación

sinusoidal, de que el factor de potencia puede ser expresado como el producto del factor de desplazamiento y la relación entre el valor rms de la componente fundamental de la corriente y el valor rms total de la misma, no es aplicable.

En este caso, la corrección de factor de potencia y compensación de reactivos debe aplicarse teniendo en cuenta que la condición de máximo factor de potencia está asociada a que la potencia aparente sea mínima; es decir que el valor rms de la corriente suministrada sea mínima. En condiciones no sinusoidales puede ser más efectiva la utilización de filtros activos o compensación variable en el tiempo y debe buscarse una combinación equilibrada técnico-económica de corrección de factor de potencia y minimización del contenido armónico. [5][6].

5. CIRCUITO NO LINEAL CON EXCITACION NO SINUSOIDAL

Para el caso general de un circuito no lineal alimentado por una tensión no sinusoidal se tiene que [11]:

- La tensión de alimentación puede considerarse como compuesta por un grupo de componentes armónicas $n1$ que producen componentes de corriente de carga en las mismas frecuencias y un grupo de componentes armónicas $n2$ para las que no existen componentes de corriente correspondientes de tal manera que su valor rms será:

$$V_{rms} = \sqrt{* \sum_{i=1}^{n1} V_i^2 + \sum_{j=1}^{n2} V_j^2}$$

- La corriente está compuesta por un grupo de componentes $n1$ y un grupo de componentes armónicas $n3$, donde estas últimas no tiene una componente de tensión correspondiente. el valor rms de la corriente será:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n1} I_i^2 + \sum_{k=1}^{n3} I_k^2}$$

La potencia promedio consumida por el circuito (P) está dada por una combinación de componentes de corriente y tensión de la misma frecuencia (es decir las que hacen parte del grupo $n1$).

$$P = \sum_{i=1}^{nI} V_i * I_i * \cos(\phi_i)$$

Los ' Voltamperios no Activos' comprenden grupos de términos que involucran tanto productos de amplitudes de corriente y tensión de la misma frecuencia como grupos de términos compuestos por productos cruzados entre componentes de diferente frecuencia. De manera que la descomposición de H para propósitos de análisis es mucho más compleja. [4][6][11]

Por tanto, las consideraciones ya realizadas con respecto a la definición de potencia reactiva (es el sentido de que no es posible utilizar la expresión de forma análoga a la de potencia activa para definir la potencia reactiva) en el caso de un circuito lineal alimentado por tensión no sinusoidal siguen siendo válidas para este caso alimentado por tensión no sinusoidal.

6. CASO ILUSTRATIVO

Para propósitos de ilustración se presenta la descomposición espectral de la potencia instantánea correspondiente a ondas de tensión y corriente adquiridas en el lado de baja tensión del transformador de alimentación de un circuito que presenta distorsión armónica.

Las ondas fueron adquiridas con un osciloscopio FLUKE 97. Se utilizó una frecuencia de muestreo de 5 KHz y se registraron originalmente 512 puntos que corresponden a un tiempo total por señal de 102.2 ms.[1]

Sin embargo, para el análisis de composición espectral se empleó un algoritmo de Transformada -Discreta de Fourier (DFT) que procesa secuencias discretas con un número de puntos diferente a 2^n . Se tomaron 500 puntos de cada señal adquirida que corresponden a 100 ms, lo cual equivale exactamente a seis ciclos de la onda fundamental de 60 Hz. Esto con el fin de disminuir los errores debidos a truncamiento de la señal y a la dispersión espectral. [1]

Se consideraron los quince primeros armónicos de tensión y corriente para el análisis.

Las figuras 1 y 2 presentan la onda de tensión adquirida y su contenido armónico. Puede apreciarse que los armónicos de tensión más significativos corresponden al quinto (2% de la fundamental) y el undécimo (1.23%).

Figura 1.
Onda de Tensión Adquirida. THDv = 2.84%

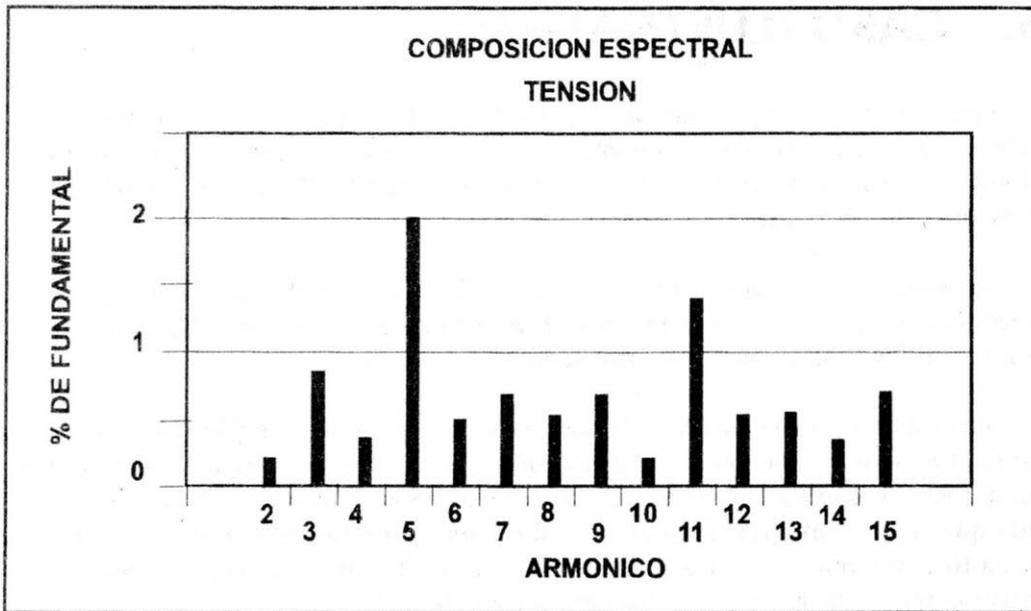
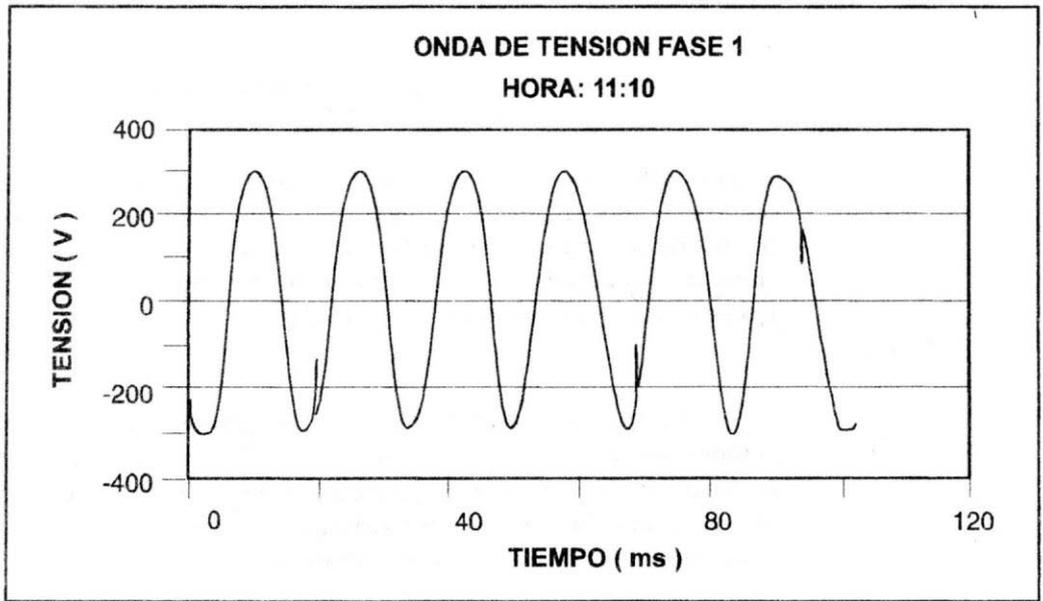


Figura 2.
Espectro Onda de Tensión

Las figuras 3 y 4 presentan la correspondiente onda de corriente y su respectivo espectro. Esta es una onda altamente distorsionada. Los armónicos de corriente más significativos son el quinto (25.6% de la fundamental), séptimo (5.43%) y undécimo (4.88%).

Figura 3.
Onda de Corriente
adquirida.
THDu = 26.1%

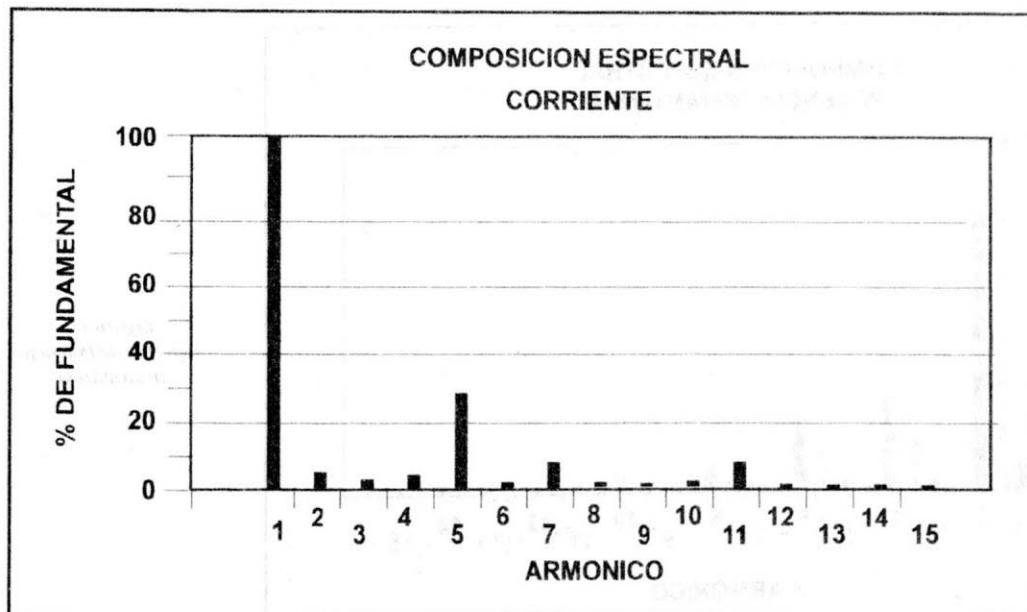
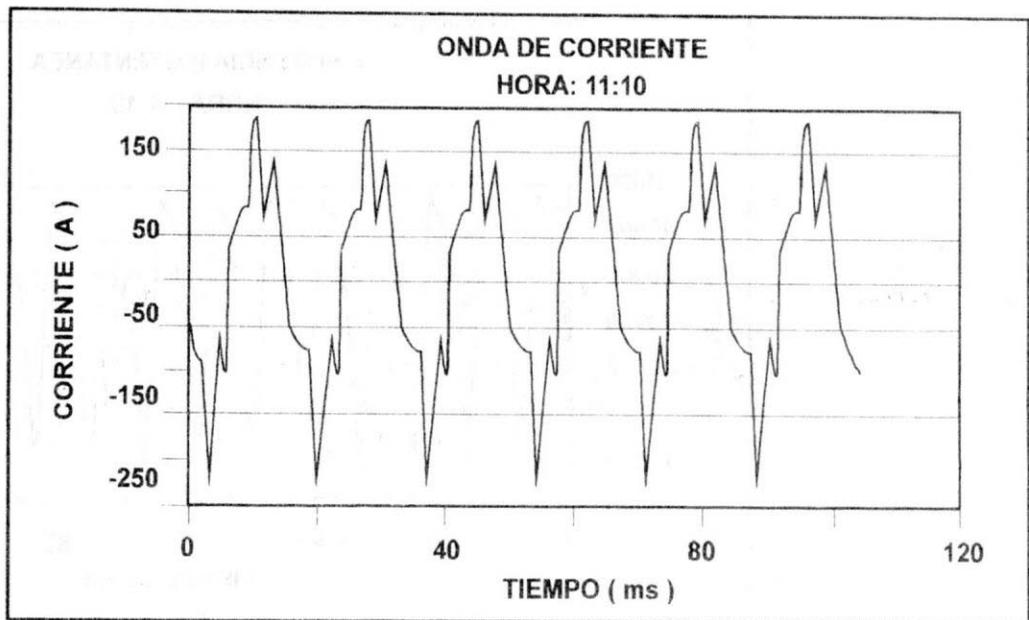


Figura 4.
Espectro onda de
corriente

La potencia instantánea y su correspondiente espectro son mostrados en las figuras 5 y 6.

La componente armónica de frecuencia cero (figura 6) corresponde a la potencia activa y tiene este caso un valor de 14335 W.

Las demás son las componentes oscilatorias de la potencia instantánea. Puede observarse que los armónicos más significativos son el segundo, el cuarto y el sexto. El armónico segundo (120 Hz), corresponde básicamente a la componente

Figura 5.
Potencia Instantánea

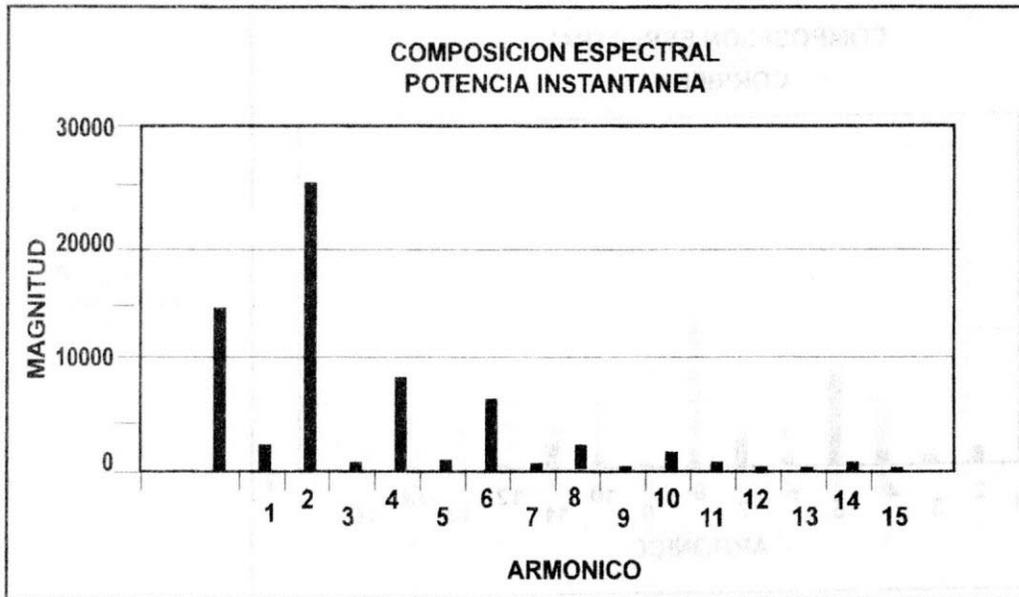
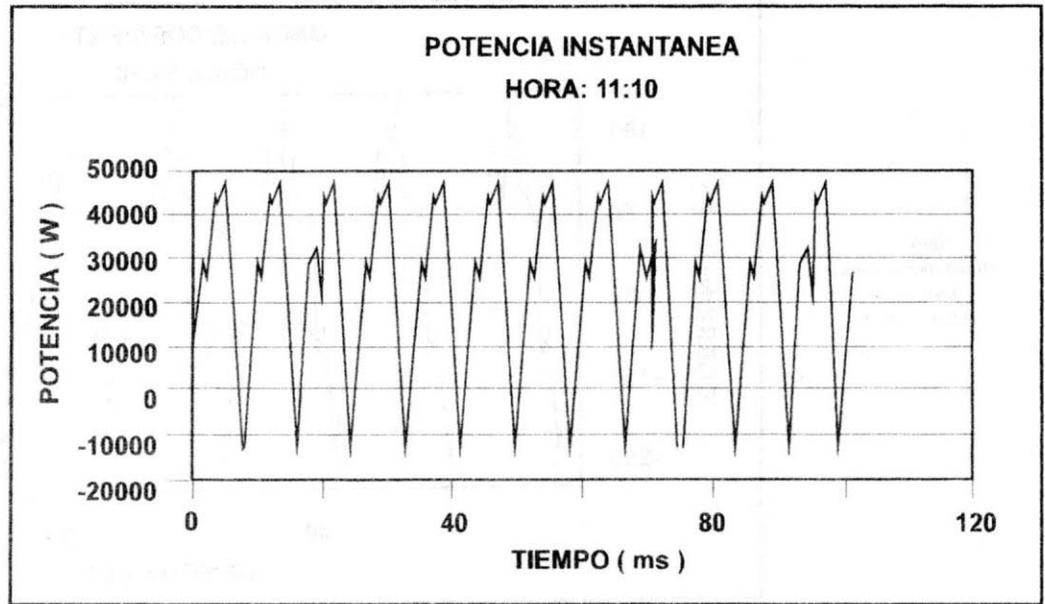


Figura 6.
Espectro de Potencia
Instantánea

oscilatoria asociada a la combinación de tensión y corriente de frecuencia fundamental (60 Hz).

Por otra parte, los armónicos cuarto (240 Hz) y sexto (360 Hz) corresponden principalmente a la combinación de corrientes y tensiones de frecuencia fundamental (60 Hz) con los quintos armónicos (300 Hz) de tensión y corriente, que son los más significativos (esta combinación produce oscilaciones de frecuencia 300 ± 600 Hz).

Estas oscilaciones, no corresponden por consiguiente a flujo de potencia debido a elementos que almacenan energía, pero se contribuyen a la potencia de distorsión y por lo tanto a la disminución del factor de potencia de la instalación.

(Debe aclararse, sin embargo, que otras componentes que contribuyen a la magnitud de estas oscilaciones son la combinación de componentes de tensión y corriente de segundo armónico (120 Hz) para el caso del armónico cuarto de potencia y la combinación de tensión y corriente de tercer armónico (180 Hz) para el caso del armónico sexto de potencia, pero en este ejemplo particular, dada la magnitud de los respectivos armónicos, su contribución no es relevante).

Obtiene la componente de la potencia activa debida a la frecuencia fundamental (P_1) a partir de la expresión:

$$P_1 = V_1 * I_1 * \cos(\phi_1) = 14230 \text{ [W]}$$

Donde:

V = Valor de componente fundamental de tensión

I = Valor rms de la componente fundamental de corriente

ϕ_1 = Angulo de fase entre V_1 e I_1

En este caso, P_1 es la componente dominante en la magnitud de potencia activa de la instalación.

Así mismo, puede obtener la potencia reactiva debida a las componentes fundamentales de tensión y corriente como:

$$Q_1 = V_1 * I_1 * \text{sen}(\phi_1) = 21250 \text{ [VAR]}$$

Esta componente es normalmente el elemento dominante en la potencia reactiva de la instalación y es importante efectuar su cálculo separado en la descomposición de la potencia instantánea pues tiene influencia en las magnitudes de tensión y en el valor rms de la corriente. [6][8][9]

La potencia aparente S tiene en este caso un valor de 26560 VA y el factor de potencia correspondiente es de 0.54, valor muy bajo debido a la presencia de convertidores AC/DC trifásicos en la instalación operación provoca desfase entre las ondas de tensión y corriente. El desfase, por tanto, no puede ser atribuido sino parcialmente a la presencia de elementos de almacenamiento de energía ya que existe una cierta potencia de distorsión a la carga.

7. CONCLUSIONES

En condiciones no sinusoidales no existe ninguna cantidad que tenga las mismas propiedades que la potencia reactiva sinusoidal [8]. Pero lo que debe establecerse claramente, con respecto a las definiciones de potencia reactiva que han sido propuestas en la literatura, es qué propiedad de la red es reflejada en ellas y cuál es su utilidad expresa como indicador del estado y como elemento de análisis para concebir medidas correctivas en la operación del sistema, que conduzcan a una optimización de la transmisión de potencia y al mejoramiento de la calidad de suministro de energía eléctrica (‘Power Quality’).

A ese respecto cabe anotar que las cantidades que sean definidas deben permitir, de manera segura y confiable, la identificación de la potencia activa consumida por una carga o grupo de cargas, de la componente fundamental de la potencia reactiva (importante en el control de la magnitud de tensión) y los términos de potencia no activos que contribuyan a la definición del deterioro de la calidad de suministro de la energía y al cálculo y especificación de filtros para armónicos, compensadores de factor de potencia, acondicionadores de líneas etc. Ello contribuiría a la toma de decisiones técnico-económicas acertadas en ingeniería.

Adicionalmente, es evidente que el tratamiento que se da a las expresiones de potencia está ligado al grado de certeza con que sean estimados los componentes armónicos de corriente y tensión presentes en los circuitos. De allí que sea importante evaluar y aplicar correctivamente las técnicas de procesamiento de señales, en los dominios del tiempo y la frecuencia, involucradas.

Por otra parte, el desarrollo de métodos e instrumentos de medición de magnitudes asociadas al flujo de potencia debe estar precedido por la verificación de la utilidad y significado de la cantidad medida.

8. REFERENCIAS

[1] **BARRETO I, TORRES H.** “Procesamiento de Señales para análisis de armónicos”. Seminario Armónico en Sistemas y Equipos Eléctricos. Medellín. Marzo, 1995.

[2] **CZARNECKI L.** “Reactive and Unbalanced Currents Compensation in Three-phase Asymmetrical Circuits Under nonsinusoidal conditions”.

IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol 38, N° 3.

[3] **CZARNECKI L, SWIETLICKI T.** "Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, analysis, and measurement". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. 1990.

[4] **CZARNECKI L.** "Physical reasons of Currents RMS value increase in Power Systems with Nonsinusoidal". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 8, Nº1. January, 1993.

[5] **DOMIJANA, HEYDT G.T, MELIPOULOS A, VENKATA S, WEST S.** "Directions of Research on Power Quality". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 8, Nº 1. January 1993.

[6] **EMANUEL A.E.** "Powers in Nonsinusoidal Situations. A Review of Definitions and Physical Meaning". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 5. Nº 3. July, 1990.

[7] **FILIPSKI P.S** "Polyphase Apparent Power and Power factor Under Distorted Waveform conditions". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 6, No 3º. July , 1991.

[8] **FILIPSKI P.S, LABAJ P.W.** "Evaluation of Reactive Power Meters in the presence of Harmonic Distortion". IEEE Transactions on Power delivery. Vol 7, Nº4. October, 1992.

[9] **GIRGIS A.A, MAKRAM E.B, REGAN B.J.** "Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.28, No. 4 July/August. 1992.

[10] **MONTAÑO J, CASTILLO M.** et al. "Measurement of Apparent Power Components in the Frequency Domain". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol.39, No. 4 August. 1990.

[11] **SHEPHERD W, ZAND P.** "Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Systems". Cambridge University Press. 1979.