



29
01190

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**ESTUDIO DE LA POTENCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS
LINEALES Y NO-LINEALES**

JOSE SAUL COHEN SAK

TESIS DOCTORAL

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA**

MARZO 1999

CIUDAD UNIVERSITARIA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

271885



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

11/11/2020

A mi Tutor y Amigo, Francisco, gracias.

ESTUDIO DE LA POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS LINEALES Y NO-LINEALES.

M.I. José Saúl Cohen Sak

Director de Tesis: Dr. Francisco de León
Sección de Graduados, ESIME, IPN.

Resumen

La definición de las potencias: activa P , reactiva Q y aparente S , en circuitos eléctricos lineales con excitación senoidal fué dad por Steinmetz en el año de 1897. Él observó que las potencias podían ser consideradas ortogonales y entonces se cumple que $S^2 = P^2 + Q^2$. Budeanu extendió, en 1927, esta definición a circuitos no-lineales, agregando, arbitrariamente otro término en la suma: $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$.

Una cuestión importante (no enunciada claramente) es que las potencias definidas no toman en cuenta la interacción entre ellas. Entonces la suma de los términos cuadráticos implica que los términos definidos son ortogonales entre si. Desde entonces muchos autores han seguido el mismo camino sin preguntarse si la potencia debida a la distorsión es realmente ortogonal a P y a Q . Una excepción notable es el trabajo de Czarnecki (What's wrong with the Budeanu's theory...). Además es de apuntar que Q "solamente define una componente analítica conveniente y su definición se eligió por su dualidad con la, físicamente real, potencia promedio, P " (Shepherd).

En el presente la discusión respecto a la definición de las potencias continúa abierta. Muchos artículos (incluso algunos muy recientes) se han publicado sobre este tópico demostrando que la polémica aún continúa. En 1995 un Grupo de Trabajo de la IEEE generó un reporte respecto a la controversia respecto a las definiciones prácticas de la potencia. Otras definiciones, tales como: potencia no-activa, aparente fundamental, aparente armónica han sido usadas para situaciones de carga no-lineal.

Aunque se ha buscado un sentido físico para las expresiones matemáticas de las potencias definidas (entre ellas D) se concluye que no lo tienen.

Para la ingeniería, no parece aceptable que algunos de los resultados (de un proceso físico) no tengan sentido físico. Se cree que el problema debe ser revisado a partir de la definición ortogonal de las potencias. Entonces se cuestiona el uso de las técnicas de Fourier para la representación de las potencias y corrientes en circuitos periódicos y no-lineales, ya que esta técnica es esencialmente ortogonal.

El presente trabajo presenta un modelo en el dominio del tiempo para la representación de potencias en sistemas eléctricos lineales y no-lineales. En el modelo presentado, se hace una distinción muy clara entre la potencia o energía consumida, $a(t)$, y la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema, $r(t)$. Este último término representa, para el sistema o la carga no-lineal, la energía almacenada y luego devuelta a la fuente, análoga a la potencia reactiva Q utilizada en sistemas lineales.

Las dos potencias, $a(t)$ y $r(t)$, pueden ser usadas por los ingenieros en dos aspectos muy importantes: para fines de cobro del consumo y la compensación de ambos términos.

STUDY OF POWER IN LINEAR AND NON-LINEAR ELECTRICAL SYSTEMS

M.I. José Saúl Cohen Sak

Thesis Director : Dr. Francisco de León
Graduate Section, ESIME, IPN.

Abstract

The definitions of powers: active P , reactive Q and apparent S , for linear electric circuits with sinusoidal excitation were given for Steinmetz in the year 1897. He observed that powers could be considered orthogonal and therefore comply with $S^2 = P^2 + Q^2$. Budeanu extended, in 1927, this definitions for non linear circuits adding arbitrarily another term to the sum: $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$.

An important feature (not stated clearly) is that the powers defined cannot take into account interactions between the powers since the sum of squared terms means that they are orthogonal to each other. Since then, many authors have followed the same path *without questioning if the power due to distortion D is really orthogonal to P and Q* . A noteworthy exception is the work by Czarnecki (What's wrong with the Budeanu's Theory...). Moreover, note that Q "merely defines a *convenient* analytical component and the definition is chosen for its duality with the physically real average power P " (Shepard).

Nowadays, the discussion regarding the definitions of powers is still in the open. Many papers (including some very recent ones) have been published in this topic demonstrating that the polemic still continues. In 1995 an IEEE working group report, a *discussion of the practical definitions for powers* was given. Other definitions such as: nonactive, fundamental apparent, harmonic apparent, etc., have been used a nonlinear load.

Although, he was searching for the physical meaning of the mathematical expressions, he concludes that some of the expressions (among them D) do not have one.

For an engineer, it does not seem acceptable that some of the results (of a physical process) do not have physical meaning. We believe that the problem should be tracked down backwards to the use of orthogonal definitions for powers. Therefore we will question the use of Fourier techniques for the representation of currents and powers in nonlinear periodic circuits since this techniques are essentially orthogonal.

This work presents a time domain model for the representation of powers in linear and non-linear electrical systems. In the presented model, a very clear distinction, in an engineering sense is made, between the power (or energy) consumed $a(t)$, and the

power needed for the system to work $r(t)$. The latter in a linear and non linear system (load) represents the energy stored and later released analogous to the reactive power Q in linear systems.

The two powers, $a(t)$ and $r(t)$, can be used by engineers, in two very important aspects: for billing purposes, and for the compensation of both.

ÍNDICE

	Página
1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Objetivos	8
1.4. Preliminares	9
1.5. Organización del trabajo	13
2. Revisión de la literatura	
2.1. Introducción	14
2.2. W. Shepherd	16
2.3. A. Emanuel	19
2.4. C. Page	21
2.5. Conclusiones	25
3. Modelo de descomposición de $p(t)$ en el dominio del tiempo	
3.1. Introducción	27
3.2. Balance de energía	27
3.3. Resistencia equivalente y corriente eficaz	29
3.4. Propuesta del modelo de descomposición	34
3.5. Comparación con otros modelos	37
3.6. Demostración de la unicidad de $a(t)$	42
3.7. El modelo $(a(t), r(t))$ mediante la descomposición de $v(t)$	45
3.8. Esquema general de la instrumentación para el cálculo de $a(t)$ y $r(t)$	46
4. Ejemplos de aplicación del modelo	
4.1. Consideraciones generales	48
4.2. Caso 1: carga lineal o R-L	48
4.3. Caso 2: diodo y carga R-L.	50
4.4. Caso 3: dos SCR's en antiparalelo y carga R-L.	52
4.5. Caso 4: fuente de alimentación conmutada o lineal	54
4.6. Caso 5: carga arbitraria	56
4.7. Conclusiones	57

5. Aplicación del modelo a la compensación y a la medición	
5.1. Consideraciones generales	58
5.2. Compensación	58
5.3. Propuesta de utilización del modelo en la compensación	62
5.4. Ejemplos de aplicación en compensadores	65
5.5. Medición del consumo	70
6. Conclusiones	
6.1. Introducción	72
6.2. Generales	72
6.3. Temas abiertos para futuros proyectos de investigación	73
7. Apéndice	75
8. Referencias	81

1. Introducción.

1.1. Antecedentes.

La fundamentación teórica de los sistemas eléctricos alimentados con CA data de 1897 [1]. Estas bases teóricas suponen alimentación con tensión senoidal de cargas lineales: focos incandescentes y motores; en otros términos, cargas R-L (lineales). Así se diseñaron y construyeron los equipos y sistemas para la generación, transmisión y distribución de la electricidad y se desarrolló la instrumentación para la medición de las variables de interés: tensión, corriente, factor de potencia, demanda y potencias.

Dadas las condiciones anteriores los fenómenos físicos se describían adecuadamente por el modelo existente: las pérdidas previstas en la distribución, eran confirmadas por las mediciones realizadas con los instrumentos disponibles; los usuarios corregían su factor de potencia de acuerdo a las normas establecidas por el proveedor del servicio; las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica no interfería con las comunicaciones. En síntesis: durante medio siglo las cosas funcionaron bien; los valores medidos coincidieron con los previstos por la teoría.

La introducción de otros tipos de cargas: rectificadores (1950), el convertidor estático de potencia y la iluminación fluorescente (1960), comenzaron a romper la armonía entre teoría y práctica. Desde entonces la introducción de cargas de tipo electrónico, controladores de velocidad de motores, controladores de CA, fuentes lineales y conmutadas, etcétera, ha ido en aumento; la tendencia continuará; se estima que para el año 2000 el 80% de la carga industrial y domiciliaria en los EE.UU. será de este tipo [2].

Stratford [3] inicia, en 1961, el estudio sistemático de lo que se llamó en ese entonces, y sigue vigente en gran medida hasta nuestros días, la polución armónica. En los últimos años es común la expresión “potencia sucia (“dirty power”) [4] para indicar este fenómeno.

La presencia de cargas no-lineales provoca, desde la óptica del proveedor del servicio eléctrico, dos problemas principales [5]:

A. Sobredimensionamiento de la red de distribución: para una demanda igual de potencia útil, las cargas no-lineales y reactivas producen un incremento en la corriente eficaz a proveer a los usuarios del servicio. Aunado a lo anterior, la presencia de no-linealidades en la carga genera sobretensiones en la red. Así, ésta debe dimensionarse para esta condición de carga y no la ideal (carga lineal); en el diseño de la red se debe, entonces, incrementar el calibre y aislamiento de conductores y utilizar transformadores de distribución de mayor capacidad

B. Aumento de las pérdidas en los sistemas de transmisión y de distribución: el aumento de la corriente provoca un aumento en las pérdidas en la transmisión y distribución. El prestador del servicio ve así incrementado sus costos de operación por su mayor demanda de los energéticos que utiliza para la generación de la energía eléctrica.

Otros problemas producidos por el ruido armónico son : interferencia con sistemas de comunicaciones (telefonía), daños a los equipo eléctrico y electrónico conectado a la red y fallas en las protecciones [6, 7].

Dado lo anterior, el interés por el estudio de esta polución ha ido en aumento y así la cantidad de reportes publicados y presentados en congresos. En 1984 se publica "IEEE Tutorial Course: Power System Harmonics" donde se resume el conocimiento existente sobre el tema, hasta esa fecha. Desde entonces una enorme cantidad de trabajos sobre el tema se ocupan de: definiciones de la potencia eléctrica, su medición y los efectos y cancelación de las armónicas en las redes de distribución.

Los trabajos se han orientado en dos direcciones; una, eminentemente práctica, que trata de evaluar y a veces corregir, los efectos de la presencia de cargas no lineales en los sistemas eléctricos; la otra, teórica, que ha intentado la adecuación de la teoría clásica de los fenómenos eléctricos excitados con CA, a la nueva realidad de la carga.

Esta última orientación se generó a partir de la problemática (errores) que presenta la instrumentación, creada de acuerdo a la teoría clásica, al utilizarla en la medición de tensiones, potencia, factor de potencia, en redes conectadas a cargas electrónicas (no-lineales) [8, 9].

Dentro de los trabajos teóricos se encuentran algunos [10, 11] que intentan la creación de nuevas teorías que expliquen los nuevos fenómenos presentes en las redes. La idea es la formulación de las bases teóricas que expliquen satisfactoriamente los flujos de energía entre la fuente y una carga arbitraria y, con estas bases, crear una nueva instrumentación tal que permita una medición correcta de las variables eléctricas de interés.

De estas variables, tal vez la más importante, por su grado de significación económica, es la potencia eléctrica y, a diferencia de otras magnitudes eléctricas donde su definición no se ha puesto en tela de juicio (tensión, corriente, inductancia, etcétera), en el caso de la potencia eléctrica se ha entablado una polémica dentro de la comunidad de ingenieros y científicos acerca de la manera adecuada de definir y por lo tanto medir las componentes de la potencia en situaciones donde la carga es no-lineal [12, 13, 14, 15].

Algunos autores enfocan su trabajo a sistemas trifásicos [16,17] con cargas desbalanceadas y no-lineales; otros se limitan a sistemas monofásicos [18,19] con cargas no-lineales.

Comentando esta polémica, Willems [20] presenta la perspectiva ingenieril o aplicativa del problema; más allá de la discusión respecto a tal o cual descomposición de la potencia eléctrica, lo que interesa es el acuerdo en el significado del factor de potencia o la potencia reactiva y, desde este acuerdo, estandarizar las mediciones de al menos esas dos variables no-físicas.

En el mismo orden de ideas, resulta indicativo el esfuerzo que realiza parte de la comunidad científica en esta área del conocimiento (definiciones de potencia en situaciones no-estándar - corrientes y/o tensiones no-senoidales -) en vincularse con la comunidad de ingenieros eléctricos.

Para este propósito la IEEE realizó en 1994 una encuesta a los ingenieros a cargo de la operación de los 122 prestadores del servicio eléctrico en EEUU y Canadá [21]. El interés del estudio radicó en conocer el grado de información que se tenía sobre el fenómeno de la aparición en las redes de distribución de corriente no-senoidales, debidas a la naturaleza no-lineal de la carga y los efectos de estas corriente sobre la instrumentación.

Dos cifras resumen el resultado del estudio: solamente contestaron la encuesta ingenieros de 50 empresas (de las 122) y de estos, el 96% consideró que no había necesidad de separar la potencia aparente en una componente activa, una reactiva y una de distorsión.

Más allá de los temas abordados y de enfoques teóricos o prácticos, la revisión de la literatura muestra el esfuerzo que, a través de numerosos artículos y libros, y por más de 60 años, se realiza para formular una teoría que unifique los conceptos asociados a la transferencia de energía en sistemas eléctricos con cargas lineales y/o no-lineales.

La idea de unificar los conceptos y concensarlos en toda la comunidad científica e ingenieril, sigue vigente. En esta Tesis se propone una teoría sobre la potencia eléctrica, desde el punto de vista del proveedor del servicio, que funciona correctamente para sistemas lineales y no-lineales.

Por último, se comenta el hecho de que, a partir de este trabajo, se derivó un artículo que ha sido aceptado para su publicación en la IEEE Transactions on Power Systems.

1.2. Formulación del problema.

En el apartado anterior se describieron brevemente los términos y el estado de la polémica respecto a la definición de las componentes de la potencia eléctrica en situaciones no-senoidales. Se comentó además, que desde el punto de vista o interés del proveedor del servicio hay tres aspectos centrales a considerar: dimensionamiento de las redes de transmisión y distribución, incremento en las pérdidas en las redes y la medición correcta del consumo de cada usuario del servicio.

En este orden de ideas el estudio de los flujos de energía en la red de distribución en baja tensión, monofásica y/o trifásica, resulta de primordial interés.

Los esfuerzos por desarrollar una teoría de la potencia eléctrica en situaciones no-senoidales han tenido como propósito permitir una medición correcta del consumo así como plantear metodologías que permitan compensar, de una manera eficiente, las no-linealidades y reactivos; en otras palabras la teoría debería aportar soluciones a los dos problemas mayores a los que se enfrenta el proveedor del servicio.

El interés en la formulación de un modelo adecuado para las componentes de la potencia eléctrica no es solamente un problema académico sino eminentemente práctico y económico, para cada proveedor del servicio eléctrico.

Si bien no se conocen trabajos que reporten las pérdidas que se producen en la red de distribución por efecto de las cargas no-lineales, estudios sobre los efectos de calentamiento provocado por la distorsión armónica en conductores y transformadores de distribución [22], permiten estimar a aquéllas entre un 3% a 5%.

Hasta ahora diferentes países y comunidades de países han establecido normas a fin de limitar la presencia de polución armónica en las redes y así las citadas pérdidas. La Comunidad Económica Europea reguló [23] el tipo de equipo conectable a su red, EEUU y México recomiendan un máximo de distorsión armónica en la red [24].

En nuestro país existen cerca de 15 millones de usuarios conectados a sistemas de distribución monofásicos y dos millones a redes trifásicas [25]. Estos últimos son, en general, usuarios industriales que reparten de manera más o menos arbitraria la carga en cada una de las tres fases de acometida en su inmueble. Situación similar se presenta en la alimentación trifásica de edificios para oficinas o vivienda.

Si el modelo de potencia a proponer permite una medición adecuada y una realización relativamente sencilla de compensadores, es posible pensar en un ahorro real; para el caso mexicano de dineros públicos.

Las consideraciones anteriores definen el interés y los alcances del presente proyecto de investigación.

Se trata de estudiar un sistema monofásico, uni-puerto o mono-puerto, pasivo excitado por una fuente de tensión, $v(t)$, senoidal, de amplitud máxima y frecuencia conocidas y constantes [Apéndice]. La pasividad implica que en el sistema fuente-carga la potencia promedio es siempre positiva [29]. Cabe mencionar que este tipo de circuito representa satisfactoriamente a la gran mayoría de los sistemas monofásicos existentes.

Dado que $v(t)$ es “constante” resulta que la información contenida en la onda de corriente, $i(t)$, es la única disponible para el análisis del comportamiento del sistema fuente-carga; por ejemplo, si es lineal o no, inductivo o capacitivo, etcétera, así como para el estudio de los fenómenos de transferencia de energía entre la fuente y la carga, °para efectos de la medición del consumo o la realización de compensadores.

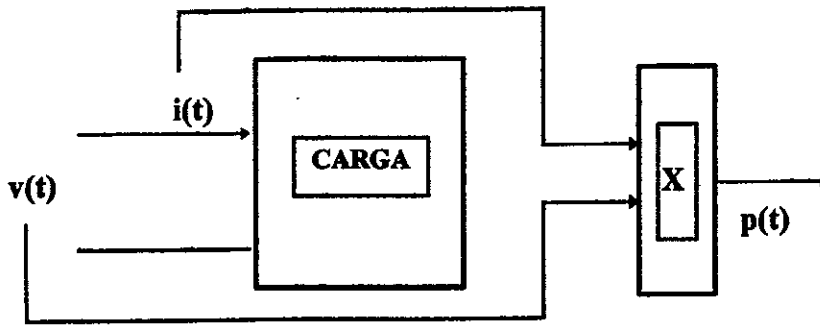
Se reitera que, desde la óptica del proveedor, el interés radica solamente en la posibilidad de una compensación adecuada y una medición correcta del consumo. No hay interés en la estructura interna de la carga ni como esta distribuye, internamente, los flujos de energía.

Un punto importante a considerar es la posible variación temporal de las condiciones de carga reales conectadas a una red de distribución - fuente - típica. En este trabajo se supone la estacionariedad de la condición de carga y así de la forma de onda de la corriente, durante un cierto número de ciclos. Este supuesto se basa en una serie de datos experimentales a los que se considera representativos [Apéndice].

En general no se conoce el tipo de carga ni su distribución dentro de la “caja negra”. La única variable disponible o medible, además de la tensión, $v(t)$, es la corriente, $i(t)$. En su forma de onda se encontrará toda la información del comportamiento periódico de la carga y del análisis de la onda de la potencia instantánea,

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

se obtiene la información de los intercambios energéticos instantáneos entre la fuente y la carga. El esquema general del sistema bajo estudio se muestra en la gráfica 1.1..



Gráfica 1.1
Esquema general del sistema
bajo estudio

La corriente es conocida a través de técnicas de muestreo y, a partir de esta colección de muestras, es posible disponer mediante interpolación, de una representación analítica de la corriente [26].

De la inspección de los gráficos de corriente [Apéndice], es posible afirmar, que ésta puede ser expresada como una función periódica y continua salvo un número finito de discontinuidades. En conclusión, esta función es integrable.

A partir de este supuesto es posible afirmar que la potencia instantánea presenta un comportamiento estacionario para un número finito de ciclos. En una fracción de este tiempo será posible el cálculo de la potencia promedio, P y la corriente eficaz, I , para una forma de onda arbitraria aunque periódica, [29]. La relación entre ambas, y un parámetro importante para propósitos de la caracterización energética de un circuito,

$$\frac{P}{I^2} \quad (1.1)$$

es una constante que depende de la condición de carga de ese sistema durante el tiempo que se considera a éste como estacionario. La unidad de esta constante es ohms. Dado el carácter estacionario de los fenómenos considerados en este trabajo, basta su evaluación en un período, T . Las técnicas de instrumentación disponibles nos permiten el cálculo de esta constante, el tiempo de interés, o sea un ciclo de .0166 s ($T [s] = 1 / 60 [Hz]$).

En resumen, el sistema fuente-carga bajo estudio tiene las siguientes características:

- Alimentación de tensión senoidal, de frecuencia y amplitud máxima constantes.

- .- Carga pasiva arbitraria conectada a un sistema monofásico.**
- .- Corriente periódica, estacionaria en un número finito de ciclos y con expresión analítica calculable e integrable.**

.- Cociente $\frac{P}{I^2}$

constante en el ciclo de evaluación.

1.3. Objetivos.

El presente trabajo de investigación se propone cubrir los siguientes objetivos:

- .- La formulación de un modelo físico-matemático nuevo que, en el dominio del tiempo, explique físicamente (ingenierilmente) los fenómenos de transferencia energética entre una fuente senoidal monofásica y una carga arbitraria.**
- .- Descomposición de la potencia instantánea en componentes o términos con claro sentido físico e ingenieril; medibles y/o calculables.**
- .- Aplicación del modelo para la realización de medidores del consumo real de potencia activa, desde el punto de vista del proveedor del servicio eléctrico.**
- .- Aplicación del modelo en la proposición de técnicas de compensación de reactivos y/o no-linealidades.**

1.4. Preliminares.

Se considera que un punto de partida adecuado para el conocimiento de las definiciones de potencia eléctrica existentes lo constituye la revisión realizada por Cox [27] del diccionario de estándares de la IEEE.

A partir del hecho de que una tensión $v(t)$ genera sobre una carga una corriente $i(t)$ y dada la potencia instantánea, $p(t)$, como,

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

el diccionario define:

Potencia activa.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt,$$

donde T es el período.

Si la tensión y la corriente son senoidales se cumple que:

$$P = VI \cos \phi, \quad (1.2)$$

donde ϕ es la diferencia de fase entre la tensión y la corriente, mientras que V e I son los valores eficaces o RMS de aquéllas. Si la carga es una resistencia, R ($\phi=0$), la ecuación (1.2) se transforma en:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1.3)$$

Para formas de onda no senoidal la potencia activa, se define como:

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \phi_n,$$

donde V_n , I_n y $\cos \phi_n$ son, respectivamente, la tensión eficaz, la corriente eficaz y el ángulo de desfase de la n -ésima componente armónica .

Salvo para Czarnecki [28], quien pone en tela de juicio la utilidad de P, para cobrar el consumo real de energía, no se ha encontrado, en la revisión bibliográfica efectuada, controversia alguna acerca de la utilidad y el sentido físico de la definición de la potencia activa también referida como real, eficaz o promedio.

Czarnecki ilustra el caso de dos usuarios que demandan de la red la misma potencia activa, (5KW). Uno de ellos posee carga lineal y el otro no-lineal. Para proveer los 5KW al segundo usuario el prestador del servicio deberá generar 6KW, debido a las pérdidas adicionales en la red generadas por la no-linealidad de la carga de este usuario.

Potencia reactiva.

En la situación senoidal,

$$Q=VI \text{ sen } \phi.$$

Para ondas no-senoidales, se define [14],

$$Q = \sum_n V_n I_n \text{ sen } \phi_n,$$

el significado de V_n , I_n y ϕ_n se explicó anteriormente.

En el diccionario de estándares de IEEE se dice que la potencia reactiva es: “...el producto de la tensión y las componentes de corriente fuera de fase con la tensión. En un circuito pasivo la potencia reactiva representa el intercambio alternante de energía almacenada (inductiva o capacitiva) entre dos áreas (fuente y carga)”.

Cox critica la definición anterior con el argumento de que la potencia reactiva existiría aún en circuitos no lineales sin elementos reactivos.

Potencia aparente.

El diccionario IEEE la define como,

$$U = VI ,$$

Potencia de fasor.

Si la tensión y corriente son senoidales, y los fasores de las potencias activa y reactiva son, respectivamente, \bar{P} y \bar{Q} , la potencia de fasor se define,

$$\bar{S} = \bar{P} + j\bar{Q}$$

Su magnitud es:

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

Donde P y Q son las magnitudes de los fasores que representan a las potencias activa y reactiva.

Comentando la definición anterior Cox señala que no es posible asignarle un signo a la potencia de fasor (aparente para otros autores) y así no existe la posibilidad de asignar un sentido o dirección al flujo de energía que describe S.

Por otra parte, S no cumple con la ley de conservación de la energía en el sentido de que, para un circuito dado la suma de las potencias de fasor calculadas en cada elemento no coinciden con la potencia de fasor total del mismo [29]. A su vez, Czarnecki cuestiona esta definición cuando se la aplica a sistemas trifásicos [30].

Potencia de distorsión.

Su definición es meramente matemática; no hay signo a esta cantidad escalar ni sentido físico definido [31],

$$D = \sqrt{U^2 - S^2}.$$

Potencia ficticia.

El diccionario la define como,

$$F = \sqrt{Q^2 + D^2} = \sqrt{U^2 - P^2}$$

Potencia no-reactiva.

Se la define como,

$$N = \sqrt{F^2 + D^2} = \sqrt{U^2 - Q^2}$$

Hasta este punto se han citado algunas de las definiciones dadas en el diccionario de estándares de la IEEE. La variedad de definiciones y términos introducidos constituyen el cuerpo teórico “oficial” de los ingenieros eléctricos. A partir de estas definiciones se realiza el diseño de las redes de transmisión y distribución de la energía eléctrica y se creó la instrumentación existente.

Dentro de este marco de referencia se genera la información técnica y la instrumentación utilizada actualmente para las mediciones de potencia eléctrica. Estas definiciones, publicadas en 1988, son cuestionadas continuamente por numerosos autores.

En los párrafos anteriores se citaron algunos comentarios críticos del autor de la revisión. Para concluir esta sección y con el propósito de mostrar el nivel de la controversia que existe sobre este tema, se citan a continuación algunos ejemplos de otras definiciones y parte de la polémica respecto a la nomenclatura. Watanabe [10] define,

$$H = V \sqrt{\sum_n I_n^2},$$

y la denomina potencia armónica.

Czarnecki [32] indica con D_H a la potencia armónica, H de Watanabe y la llama “potencia generada armónica”; su expresión coincide con la de Watanabe.

Para Enslin [12] la potencia ficticia, F , tiene una expresión diferente a la dada en el diccionario de la IEEE. A partir de la definición de la llamada corriente ficticia, $i_f(t)$, define,

$$F = i_f(t)V$$

El mismo autor introduce el concepto de potencia deactiva, D , definida como

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

Enslin denomina potencia de carga (“loading power”) a la potencia aparente, S ($=VI$). En magnitudes de uso generalizado, como lo es, por ejemplo, la potencia aparente, los autores difieren hasta en la nomenclatura. Kluster [33], utiliza S para designar la potencia aparente a diferencia de la letra U del diccionario.

1.5. Organización del trabajo.

En el capítulo 2 se ofrece la revisión de la literatura en lo referente a la formulación de modelos de la potencia eléctrica. Se analizan en particular los tres enfoques considerados como más representativos en la definición de las componentes de la potencia eléctrica, así como algunos comentarios y críticas a los mismos. El capítulo 3 presenta la fundamentación y deducción del modelo físico-matemático para la potencia eléctrica instantánea propuesto en este trabajo. Se presenta, además, un esquema de la instrumentación necesaria para la obtención de las componentes de $p(t)$ propuestas. En el capítulo 4 se dan algunos ejemplos de aplicación del modelo propuesto. En el capítulo 5 se trata el problema de la compensación: sus conceptos generales y la proposición de técnicas de acuerdo al modelo propuesto, a la vez que se expone la utilización del mismo en la realización de medidores de consumo. El capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo.

2. Revisión de la literatura.

2.1. Introducción.

En el capítulo anterior se comentó acerca de la diversidad de los trabajos tendientes a la formulación de una teoría que unifique los conceptos asociados a la transferencia de energía en sistemas eléctricos con cargas lineales y/o no-lineales.

El tópico del análisis de la potencia eléctrica o de la transferencia de energía, ha sido uno de los más debatidos por la ingeniería de potencia en los últimos años [34]. Como se ha señalado, esta polémica se generó e incrementó a la par que la cantidad de cargas no-lineales conectadas en la red. Cada teoría conduce a diferentes conclusiones y estas deben ser evaluadas en relación al problema que intentan resolver: modelado y mediciones, monitoreo de la carga y tarificación, filtrado y compensación de la potencia no-activa.

Este capítulo reseña la revisión de la literatura que, como parte del trabajo de investigación, se realizó, a la vez que señala las cuestiones principales postuladas por los autores considerados como representativos. La reseña presentada intenta mostrar el estado actual de la polémica respecto a la definición de las componentes de la potencia eléctrica así como mostrar las inconsistencias de cada teoría.

Las cuestiones que aparecen sistemáticamente [35, 36, 37] respecto a los modelos planteados para la definición de las potencias en sistemas con corrientes no-senoidales, se pueden resumir en:

- .- ¿Tienen sentido físico las magnitudes definidas?, o, en otros términos, ¿ Es física la descomposición propuesta?**
- .- ¿La descomposición propuesta facilita la realización de compensadores?**
- .- ¿Oscila la potencia reactiva en el sistema fuente-carga?**
- .- ¿El modelo propuesto permite la evaluación de las pérdidas en el conjunto generador-transmisión-distribución?**
- .- ¿El modelo de potencias permite la realización de instrumentación confiable, desde la perspectiva del usuario y del proveedor del servicio?**
- .- Al compensar el sistema ¿Hay que poner el énfasis en las no-linealidades de la parte activa o la reactiva o ambas?**

En definitiva, lo que se quiere de una teoría de potencia eléctrica es que:

A. Las cantidades de potencia, obtenidas matemáticamente, deben estar relacionadas a fenómenos de potencia en el circuito (claro sentido físico).

B. Provea información tal que permita el diseño de los sistemas o circuitos de compensación y medición.

Una parte importante de los esfuerzos teóricos y prácticos (realización de la instrumentación y compensadores) ha girado bajo el supuesto de adaptar la teoría clásica a la nueva realidad [12,38]; la generación de una serie de términos nuevos de potencia que aparecen en situaciones no-senoidales intenta mantener los marcos teóricos clásicos e introducir magnitudes que permitan, básicamente, aportar a la evaluación de las redes, la potencia consumida y la realización de compensadores, bajo la nueva realidad de la carga.

Las dos líneas principales de pensamiento en el análisis de la potencia son: el enfoque en el dominio de la frecuencia y el enfoque en el dominio del tiempo. En el primero, los aportes de Budeanu [39], Shepherd [31], y Emanuel [40] son los más representativos mientras que los trabajos de Fryze [41], Depenbrock [42], Enslin [12] y Page [43] expresan las ideas principales del enfoque en el dominio del tiempo.

Cada una de las teorías define, primeramente, un número de componentes de la corriente de línea, las cuales son ortogonales en un cierto espacio y durante un cierto intervalo de tiempo [34]. Para el conjunto de los autores la corriente de línea puede descomponerse en, al menos dos términos: componente activa y componente reactiva.

El término considerado más importante es la “componente activa”, indicada con $i_a(t)$ o $i_p(t)$ según el autor, y está relacionada con la potencia activa entregada a la carga. El criterio general, más o menos explícito, es que la forma de onda de esta componente de corriente debería ser la misma que la de la corriente que demanda un sistema ideal (con carga lineal) alimentado con tensión alterna, o sea, forma senoidal.

Marshall [34] afirma que hay consenso (en ambos enfoques) respecto a existencia de la citada componente activa, i_p , de la corriente y respecto a la utilización de la “conductancia universal de Fryze”, G , para el cálculo de las componentes de la corriente y de la potencia en sistemas monofásicos y trifásicos.

A finales de los años 90 la polémica continúa. Tratando de aportar claridad en las definiciones necesarias para la creación de instrumentación y métodos de compensación suficientemente concensados, la IEEE creó un Grupo de Trabajo [44] para el estudio de las definiciones de potencia en situaciones de carga no-senoidal.

Este Grupo de Trabajo resume esta problemática comentando que, en la aparición de definiciones, sus proponentes usualmente señalan algunas inconsistencias en las definiciones previamente establecidas y sugieren una forma, una nueva teoría, para eliminar esas inconsistencias. Parece, sin embargo, que cada nueva solución introducida resuelve algunos problemas a la vez que introduce inconsistencias en otra área.

Con el propósito de ejemplificar lo hasta ahora expresado, se exponen, a continuación, las ideas básicas de los tres autores a quienes se considera representativos de las tendencias predominantes en la búsqueda de expresiones para las componentes de la potencia eléctrica en situaciones de carga no-lineal.

Shepherd y Emanuel utilizan un análisis en el dominio de la frecuencia o análisis basado en las series de Fourier, mientras que Page realiza la descomposición de la potencia instantánea, $p(t)$, a través de un método en el dominio del tiempo.

2.2. W. Shepherd.

En su libro, clásico en la materia, Shepherd [31] establece: cuando la impedancia es no-lineal es necesario definir una componente analítica adicional, a P y Q, llamada voltamperios de distorsión, D.

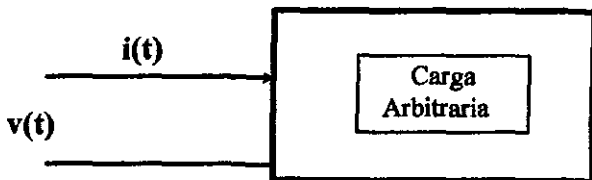
El análisis de este autor se basa en la representación en series de Fourier de la onda de corriente y de la definición clásica de la potencia aparente, que Shepherd llama Voltamperios aparentes, S, dada por:

$$S = V I,$$

donde V e I son los valores eficaces de la tensión y corriente, respectivamente.

Shepherd estudia el caso donde la excitación, $v(t)$, es senoidal y la corriente no-senoidal, $i(t)$, carente de componente de CD, situación real en las redes de distribución en baja, media y alta tensión.

El esquema del sistema bajo estudio es,



Dados,

$$v(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t)$$

y la expresión de la corriente en serie de Fourier,

$$i(t) = \sum_{n=1} \sqrt{2}I_n \text{sen}(n\omega t) ,$$

donde $\sqrt{2}$ relaciona los valores de pico y eficaz en cada senoide e I_n indica la enésima componente eficaz de la corriente,

se tiene que:

$$I^2 = \sum_{n=1} I_n^2 = I_1^2 + \sum_{n=2} I_n^2 , \quad (2.1)$$

donde I_1 es el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente.

De la definición clásica de la potencia aparente, se tiene que:

$$S^2 = I^2 V^2 . \quad (2.2)$$

Shepherd utiliza la definición clásica de potencia reactiva, voltamperios reactivos en términos de este autor, o sea,

$$Q = V I_1 \text{sen } \phi_1 , \quad (2.3)$$

siendo ϕ_1 el ángulo de desfase entre la tensión y la componente fundamental de la corriente.

Utilizando la definición clásica de potencia activa,

$$P = V I_1 \cos \phi_1 . \quad (2.4)$$

Se tiene que, sumando los cuadrados de (2.3) y (2.4),

$$Q^2 + P^2 = V^2 I_1^2 . \quad (2.5)$$

La relación clásica entre potencias (el llamado triángulo de las potencias) es,

$$S^2 = Q^2 + P^2 . \quad (2.6)$$

Este autor parte de las definiciones clásicas, aplicables al caso donde la carga es lineal, para explicar el caso no-lineal adecuando las ecuaciones existentes. Esta línea de pensamiento conduce a la necesidad de definir un nuevo término, los voltamperios de distorsión o potencia de distorsión, D.

Comparando (2.1) y (2.6), y utilizando (2.2) y (2.5),

$$S^2 = V^2 (I_1^2 + \sum_{n=2} I_n^2) = Q^2 + P^2 + V^2 \sum_{n=2} I_n^2.$$

La ecuación clásica, (2.4), se transforma en:

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

donde,

$$D^2 = V^2 \sum_{n=2} I_n^2.$$

Si bien para el caso lineal el mismo autor asigna un sentido físico a P y a Q, al tratar con cargas no-lineales afirma que los voltamperios reactivos no tienen una existencia física independiente y Q define solamente una componente analítica conveniente, cuya definición es elegida por su dualidad con la ecuación (2.4), que este autor llama "físicamente real", para la potencia real, P.

De igual modo Shepherd establece que los voltamperios de distorsión, D, y los voltamperios reactivos, Q, no tiene existencia física independiente.

Afirma, además, que el hecho físico es que la potencia promediada en el tiempo, P es menor que los voltamperios aparentes, S, pero no hay justificación física, en general, para la separación de la diferencia,

$$S^2 - P^2,$$

en componentes analíticos. Cualquier descomposición de S es puramente matemática y sujeta a la interpretación de cada uno.

Shepherd establece que la descomposición de S debe ser tal que asigne algún significado físico a la diferencia $S^2 - P^2$ y así, tal descomposición sugiera métodos posibles para la mejoría del factor de potencia.

Czarnecki [20] extiende la crítica a la obra de Shepherd en lo referente a las técnicas de compensación propuestas por ese autor.

Pese a las dudas sobre el sentido físico que, incluso el mismo autor establece, el término potencia de distorsión, D, fue incluido en el diccionario de términos eléctricos de la IEEE. Es posible encontrar algunos medidores “modernos” de potencia que reportan esta D.

2.3. A. Emanuel.

Tal vez la revisión más exhaustiva de las definiciones de “potencias” a la vez que un intento de encontrar el sentido físico de las magnitudes definidas a esas fechas, la realizó Emanuel [40].

El análisis de Emanuel parte de las expresiones de la tensión y corriente no-senoidales, a través de la representación de Fourier. Así,

$$i(t) = \sum_{h=1} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \psi_h),$$

$$v(t) = \sum_{k=1} \sqrt{2} V_k \sin(k\omega t + \theta_k),$$

θ_k y ψ_h representan el ángulo de fase de cada componente de tensión y corriente; V_k e I_h son los valores eficaces de la componentes k-ésimas de la tensión y de la corriente, respectivamente; $\sqrt{2}$ es la relación entre los valores de pico y eficaz, por el hecho de que en la expansión de Fourier las componentes son senoides.

A partir de la expresión de la potencia instantánea,

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

este autor encuentra una serie de componentes para las potencias activa y reactiva.

La potencia activa promedio, P la descompone en:

$$P^2 = (P_1 + P_H)^2,$$

P_1 es la potencia activa o promedio debida a la fundamental de tensión y corriente;

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1,$$

P_H es la potencia activa debida a las componentes armónicas donde $h = k = n$,

$$P_H = \sum_{n=1} V_n I_n \cos \phi_n,$$

ϕ_n es el ángulo de desfase entre las componentes enésimas de la tensión y la corriente, V_n e I_n .

La potencia reactiva Q_F es:

$$Q_F^2 = Q_B^2 + D^2, \quad (2.7)$$

donde Q_F es la potencia generalizada de Fryze [41],

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2},$$

S es la potencia aparente y Q_B es la potencia reactiva de Budeanu [39],

$$Q_B = \sum_n V_n I_n \text{sen } \phi_n,$$

y D es la potencia de distorsión (volt-amperios de distorsión) utilizada por Shepherd y tomada de Budeanu.

La conclusión de Emanuel coincide con la de Shepherd; ésta indica la imposibilidad de asignar sentido físico (magnitudes directamente medibles) a variables o términos resultantes a partir de la utilización del análisis de Fourier para la representación de las ondas de corriente: Emanuel establece, entre otras conclusiones, que:

1. La ecuación (2.7) carece de significado físico y Q_B no aporta información útil para efectos de cancelación de armónicas ni para el mejoramiento del factor de potencia.
2. No es posible asignar un signo (sentido de circulación) a las componentes de Q_F y su utilidad para la compensación es cuestionable dado el elevado número de componentes armónicas con significación en los sistemas de interés.
3. La potencia armónica P_H incluye las potencias disipadas y generadas en la carga. Este último párrafo es muy cuestionado en la discusión del citado trabajo. En efecto, a menos que se admita, como lo supone Emanuel, la existencia de conductancias negativas, la afirmación resulta inaceptable en el marco del análisis de sistemas de distribución, donde la carga es pasiva.

En los sistemas pasivos se cumple que la energía entregada a la carga entre los instantes t y t_0 es,

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t v(t') i(t') dt \geq 0,$$

(en sistemas reales es estrictamente mayor que)

P_H incluye las pérdidas por la resistencia en los devanados de los transformadores, corrientes de Eddy, resistencia de conductores y aisladores. P_H siempre se convierte en calor, en lugares (conductores, transformadores) donde el calor no es deseado.

4. Basados en el hecho de que la naturaleza física de las oscilaciones de potencia con transferencia de energía cero son las mismas para cargas lineales, no-lineales y variables en el tiempo se recomienda la realización de medidores de Q_F .

El trabajo de Emanuel es otra muestra clara de las dificultades que surgen al utilizar la descomposición de la corriente en series de Fourier a la vez que intentar asignar sentido físico a las expresiones encontradas.

2.4. C. Page.

El modelo propuesto por Chester Page [43] para la potencia reactiva en situaciones de corriente no-senoidal y excitación senoidal, coincide con el de Piotr Filipki [45] en el hecho de intentar un análisis en el dominio del tiempo de la llamada potencia reactiva, para situaciones de carga no-lineal, en contraposición al modelo clásico de Budeanu basado en la utilización del modelo de Fourier.

Page expresa que el análisis en el dominio del tiempo está más relacionado a la física de la oscilación de energía entre la fuente y la carga. Esta oscilación, llamada potencia oscilante o pulsante (“reciprocating power” en el texto original) puede ser expresada en términos de series de Fourier pero las series resultantes no poseen una forma obvia para ser consideradas para la definición de potencia reactiva.

El autor citado también justifica su opción por el análisis en el dominio del tiempo al hecho de que este análisis facilita la realización de la instrumentación necesaria para la medición de la potencia reactiva.

Se introduce el concepto de “corriente en fase”, $i_p(t)$ con la tensión senoidal y “corriente en cuadratura”, $i_q(t)$.

Si la corriente total es $i(t)$, se tiene que:

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t).$$

De acuerdo a la correspondencia entre funciones y vectores [46], la $i_p(t)$ se calcula con:

$$i_p(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)v(t)dt}{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t)dt} v(t) = \frac{P}{V^2} v(t) \quad (2.8)$$

El numerador de la ecuación (2.8) es el producto interno de $v(t)$ e $i(t)$. El denominador es el módulo al cuadrado de la referencia. La forma de onda de $i_p(t)$ es senoidal al serlo $v(t)$.

La constante de proporcionalidad entre $i_p(t)$ y $v(t)$ puede ser vista como una conductancia promedio, ya definida por Fryze,

$$G = \frac{P}{V^2}$$

La $i_p(t)$ es la proyección de la función o vector $i(t)$, sobre la función o vector de referencia, $v(t)$, de ahí que $i_p(t)$ es una función senoidal, por serlo $v(t)$, con expresión:

$$i_p(t) = Gv(t).$$

La componente en cuadratura se calcula mediante substracción,

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t),$$

Como ambas componentes de la corriente están en cuadratura, se cumple que:

$$\int_0^T i_p(t)i_q(t)dt = 0.$$

Las potencia instantánea se expresa como:

$$v(t)i(t) = i_p(t)v(t) + i_q(t)v(t).$$

Dada la ortogonalidad, el valor eficaz de la corriente, I es:

$$I^2 = I_p^2 + I_q^2.$$

Page define a la potencia reactiva, Q como:

$$Q = \pm I_q V.$$

Este autor afirma que Q representa físicamente la tasa a la cual la energía fluye hacia adelante y atrás en el circuito, de ahí el significado de los signos de Q .

La potencia activa es,

$$P = I_p V.$$

Por último Page establece, para sistemas lineales y no lineales la expresión

$$S^2 = V^2 I^2 = V^2 I_p^2 + V^2 I_q^2 = P^2 + Q^2.$$

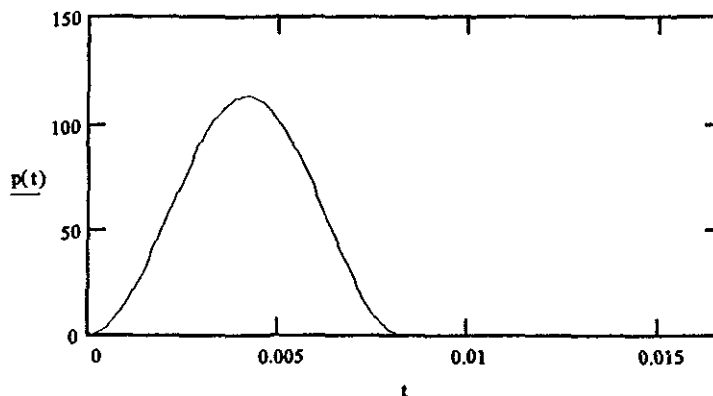
Czarnecki [47] cuestiona el modelo propuesto por Page, mostrando, como es la costumbre en la polémica que existe en la comunidad de científicos e ingenieros, respecto a la pertinencia de un nuevo modelo planteado, las fallas o inconsistencias del nuevo modelo a través del estudio de un ejemplo sencillo.

La conclusión de Czarnecki es que, de la ecuación planteada por Page, la potencia reactiva para el caso general:

$$Q = \pm \sqrt{S^2 - P^2},$$

que, como se mencionó, él la define como el flujo de energía que oscila entre la fuente y la carga, no existe en el caso de una carga no-lineal.

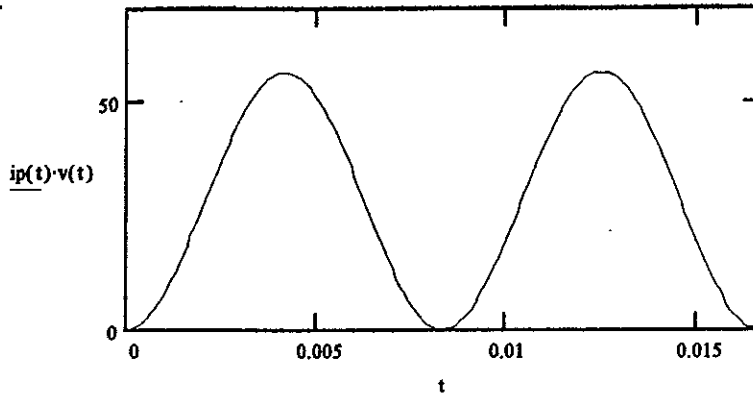
El ejemplo de Czarnecki es el estudio de los flujos de potencia en un circuito consistente en un diodo y una resistencia, alimentado por una senoide. La forma de onda de la potencia que fluye por el circuito, es:



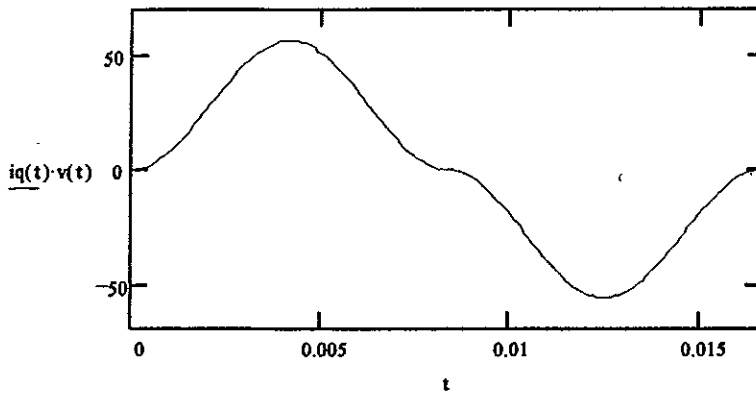
Gráfica 2.1
Potencia instantánea, $p(t)$.

Entre $t = .00833$ s (π rad) y $t = .01666$ (2π rad) - período T s -, no hay flujo de energía en el sistema. Una comprobación adicional consiste en poner en serie con la resistencia y el diodo un conmutador que se abra secuencialmente en el intervalo $(\pi, 2\pi)$. La forma de onda obtenida es idéntica a la mostrada en la gráfica 2.1.

Según la descomposición de Page, las formas de onda para los valores instantáneos $i_p(t)v(t)$ e $i_q(t)v(t)$, son las mostradas a continuación:



Gráfica 2.2
Potencia instantánea activa de Page



Gráfica 2.3
Potencia instantánea reactiva de Page

Según el modelo de Page tanto la potencia activa instantánea, $i_p(t)v(t)$, como la potencia reactiva instantánea, $i_q(t)v(t)$, existen en el intervalo $(\pi, 2\pi)$ lo cual contradice el hecho físico: el diodo no conduce en ese intervalo.

2.5. Conclusiones.

Existen dos escuelas de investigadores que estudian los fenómenos de la transferencia de potencia entre una fuente y una carga: análisis en el dominio del tiempo y análisis en el dominio de la frecuencia utilizando métodos de Fourier.

Aquellos investigadores que usan las técnicas de Fourier descomponen la corriente instantánea en un gran número de componentes (teóricamente infinito aunque prácticamente finito), tal que,

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} i_n(t),$$

donde las componentes $i_n(t)$ se calculan con las técnicas tradicionales de Fourier.

Para los seguidores del modelado en el dominio del tiempo existe un acuerdo más o menos explícito respecto a la descomposición de la corriente en dos componentes;

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t),$$

donde $i_p(t)$ es la corriente en fase con la tensión senoidal utilizada como excitación del sistema (el subíndice p se toma de la palabra inglesa “phase”) cuya forma es una senoide e $i_q(t)$ es la corriente reactiva, en cuadratura con la $i_p(t)$, y calculada a partir de la corriente total $i(t)$ con la expresión:

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t).$$

A pesar de que las dos tendencias parecen ser radicalmente opuestas, existen similitudes importantes, las cuales son, probablemente, la causa del fracaso en la interpretación física de las componentes:

Similitud 1: siempre (y únicamente) es la corriente instantánea la que se divide en varias componentes.

Similitud 2: en el dominio del tiempo o de la frecuencia la llamada componente activa de la corriente instantánea tiene la forma de la onda de tensión, o sea, senoidal.

La combinación de estas dos características provoca que ningún modelo matemático para las potencias, derivado de la descomposición de la corriente, sea capaz de explicar físicamente el hecho de que no haya intercambios energéticos, entre fuente y carga, cuando no circula corriente por el circuito.

La controversia permanece abierta acerca de como definir las “componentes” de la potencia eléctrica: ¿ Qué método es el más adecuado? ¿ en el dominio del tiempo o en

el dominio de la frecuencia ?; ¿ una combinación de ambos ?; ¿ Cómo construir un compensador ?.

Hay quienes se permifen opinar que la solución es puramente técnica y aplicable a cada caso en particular [20].

La revisión de la literatura tiende a hacer pensar que el establecimiento de una teoría deberá fijar las bases para una solución técnica razonable en lo referente a las propiedades (componentes) de la potencia, la medición correcta del consumo y la compensación.

3. Modelo de descomposición de $p(t)$ en el dominio del tiempo.

3.1. Introducción.

El modelo para la descomposición de la $p(t)$ propuesto en el presente trabajo tiene como punto de partida el principio de conservación de la energía, a diferencia de los trabajos anteriores que parten de la descomposición de la corriente. Esto es con la intención de generar un modelo que ofrezca un claro sentido físico a las componentes definidas; o sea que, proporcione las formas de onda reales de las potencias instantáneas activa y reactiva y, a partir de esta última, facilitar la medición real del consumo y la realización de compensadores.

3.2. Balance de energía.

La fuente de alimentación o red de distribución entrega a la carga una cantidad de energía; los diferentes actuadores y dispositivos convierten la energía eléctrica en calor, luz, energía potencial y movimiento; o sea, realizan trabajo. Joule [48] estableció la equivalencia entre la energía mecánica y el calor de la siguiente forma: “La cantidad de calor capaz de incrementar la temperatura de una libra de agua en un grado en la escala de Fahrenheit es igual, y puede ser convertida a una fuerza mecánica capaz de elevar 838 libras un pié”.

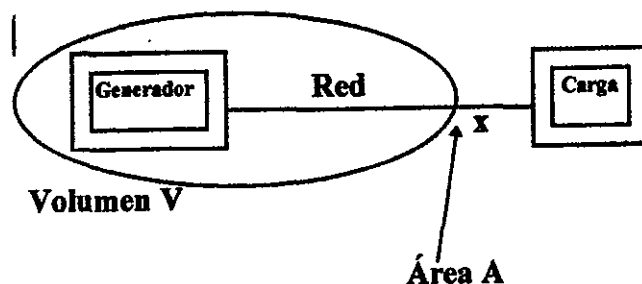
Se considera que la energía simplemente adopta diferentes formas y todas ellas (Joule mencionó sólo dos) son en definitiva, equivalentes.

De acuerdo a su principio de conservación, la energía provista por la fuente es transformada en otras formas de energía o almacenada y regresada a la fuente. La energía de transformación se disipa en forma de calor o transformada (absorbida) en otras formas.

Considerando los alcances y limitaciones expuestos en la introducción del presente trabajo, se parte del hecho que la potencia instantánea (tasa instantánea del flujo de energía) es transformada y/o almacenada, cíclicamente en la carga arbitraria, conectada a la red de distribución.

La justificación de la afirmación anterior se encuentra en la ecuación de balance de energía propuesta por Maxwell [49] dada la validez de la teoría electromagnética en circuitos eléctricos; en ellos se cumple la condición cuasiestacionaria que implica que los campos quedan dentro de los conductores: no hay energía irradiada [50].

En un sistema generador - red - carga,



Gráfica 3.1.
Sistema cuasiestacionario bajo estudio

en el punto x de la red se obtiene la ecuación de balance de energía válida para cualquier condición (sistemas lineales, no-lineales, variables o no en el tiempo) de los campos E y H [49]:

$$\oint_{\mathbf{A}} (\overline{\mathbf{E}} \times \overline{\mathbf{H}}) d\mathbf{A} + \int_{\mathbf{V}} (\overline{\mathbf{E}} \cdot \overline{\mathbf{J}}) d\mathbf{V} + \frac{d}{dt} \int_{\mathbf{V}} \left(\frac{\overline{\mathbf{H}} \cdot \overline{\mathbf{B}}}{2} + \frac{\overline{\mathbf{E}} \cdot \overline{\mathbf{D}}}{2} \right) d\mathbf{V} = 0, \quad (3.1)$$

siendo;

$\overline{\mathbf{E}}$: intensidad del campo eléctrico [V/m]

$\overline{\mathbf{B}}$: densidad de flujo magnético [T]

$\overline{\mathbf{J}}$: densidad de corriente [A/m²]

$\overline{\mathbf{D}}$: densidad de flujo eléctrico [C/m²]

$\overline{\mathbf{H}}$: intensidad de campo magnético [A/m]

En (3.1) el primer término es la potencia transmitida, el segundo término representa las pérdidas por efecto Joule y el tercer término indica el cambio instantáneo de la energía almacenada en forma de campo eléctrico y magnético [50].

La ecuación anterior, de valores instantáneos, puede ser escrita como:

$$\text{Potencia transmitida} + \text{Potencia disipada} + \text{Potencia almacenada} = 0,$$

o bien como,

$$p(t) + p_a(t) + p_s(t) = 0, \quad (3.2)$$

donde,

$p(t)$ = potencia transmitida,
 $p_d(t)$ = potencia disipada,
 $p_a(t)$ = potencia almacenada.

Adoptando una convención para los signos de las potencias instantáneas definidas en la ecuación (3.2) - potencia instantánea positiva si fluye de la fuente a la carga y negativa si lo hace en el sentido contrario - ésta queda:

$$p(t) = p_d(t) + p_a(t). \quad (3.3)$$

3.3. Resistencia equivalente y corriente eficaz.

De acuerdo a las consideraciones de equivalencia energética, podemos afirmar que, en los sistemas bajo estudio, la $p_d(t)$ puede ser vista como una medida de la energía que no regrese a la fuente (la de transformación). También puede verse como el calor equivalente que generaría una resistencia conectada a la fuente y de magnitud constante, dentro del ciclo de evaluación de la transformación de la energía.

En consecuencia, desde la óptica de la red de distribución, las componentes de la carga que transforman la energía pueden ser reemplazadas por una sola resistencia capaz de generar, al circular por ella la $i(t)$, la cantidad de calor equivalente a la energía de transformación entregada por la fuente. Desde la fuente se ve un consumo equivalente.

A esta resistencia se la llama resistencia equivalente R_{eq} y representa en forma adecuada, para fines de estudio, todos los fenómenos de conversión de la energía eléctrica en otra forma, que ocurren dentro de la carga, desde el punto de vista de la fuente.

La R_{eq} definida está relacionada con la potencia activa o real consumida por la carga, P . El calor generado en esta resistencia depende de la corriente, en general arbitraria, que circula por ella. Ya que la corriente eficaz, I , puede ser definida para cualquier forma de $i(t)$ con la sola restricción de ser periódica [51], y de acuerdo a la ley de Joule, se define:

$$R_{eq} = \frac{P}{I^2} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt} \quad (3.4)$$

Se remarca que en la valuación de la I se incluyen todas las variaciones temporales y no-linealidades de la carga ya que es un "promedio cuadrático" de la corriente

instantánea en la cual va incluida toda la información de la transferencia energética entre la fuente y la carga.

Las variaciones temporales o no-linealidades de los elementos que constituyen la carga están presentes o contenidas en la forma de $i^2(t)$. Solamente hay intercambio energético entre la fuente y la carga si hay circulación de portadores. En términos de la energía de transformación, y dado que R_{eq} es constante, la evaluación del consumo equivalente viene dado por la ecuación (3.4).

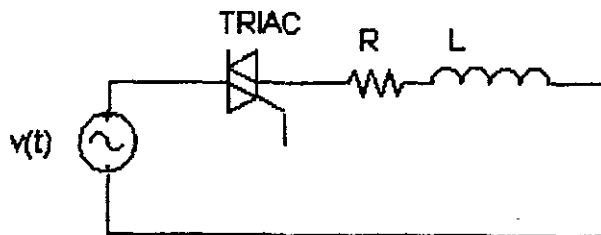
Un elemento adicional que fundamenta la afirmación anterior lo constituye el hecho de que la medición de la I en los instrumentos que miden el “auténtico valor RMS” de la corriente realmente evalúan el calor generado por la corriente periódica, de forma arbitraria, al circular en una resistencia patrón interna al instrumento.

La medición de la I se convierte en una medición de un incremento de temperatura, ΔT , en la citada resistencia, producto del calor generado en un tiempo determinado. El valor desplegado será proporcional a ese ΔT [52].

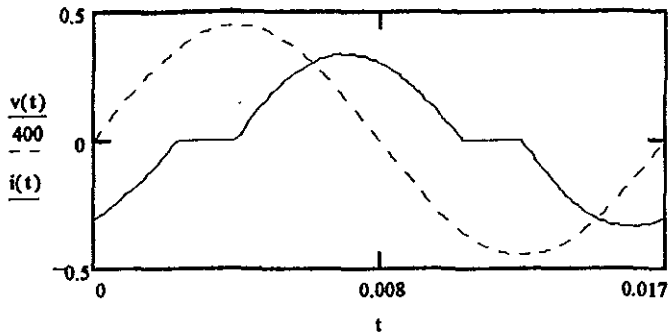
Una forma alternativa [53] de definir la R_{eq} se expone a continuación: sea cual sea la carga, y salvo un número finito de discontinuidades, manejables siempre por métodos computacionales, es posible introducir el concepto de impedancia instantánea (real),

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}$$

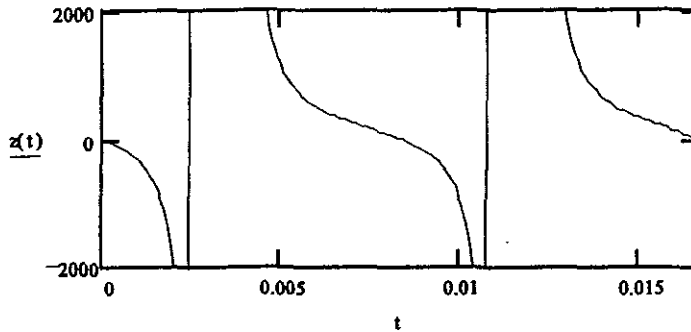
Para el siguiente circuito, consistente en un TRIAC y carga R-L,



Las formas de las ondas de corriente, tensión y de la impedancia instantánea son:



Gráfica 3.2
Tensión y corriente instantáneas



Gráfica 3.3
Impedancia instantánea

Se define una resistencia equivalente R_{eq} como la impedancia instantánea promediada sobre el ciclo completo. De

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)},$$

multiplicando numerador y denominador por $i(t)$.

$$z(t) = \frac{p(t)}{i^2(t)},$$

y promediando en un ciclo:

$$R_{eq} = \overline{z(t)} = \frac{\int_0^T z(t)i^2(t)dt}{\int_0^T i^2(t)dt} = \frac{P}{I^2}$$

La definición matemática coincide con la planteada en la ecuación (3.4).

En un circuito lineal R_{eq} es fácilmente identificable con la parte real de la impedancia equivalente. Si ϕ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, y Z es la impedancia, se tiene que:

$$R_{eq} = Z \cos \phi$$

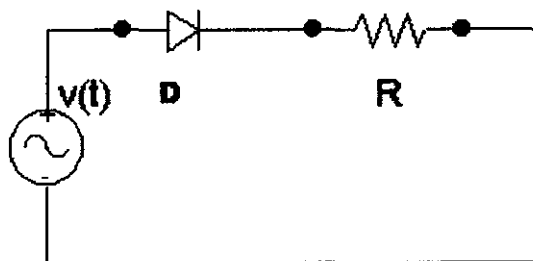
En el siguiente capítulo, al ejemplificar la aplicación del modelo y el cálculo de la R_{eq} , se verá que, al considerar un circuito con carga R-L y un dispositivo no lineal que no consume energía, en serie, la R_{eq} será la misma R del circuito, por ser el único elemento que disipa (transforma) energía.

El concepto de R_{eq} definido en este trabajo es distinto al reportado en la literatura. Kouril & Vrba [54] definen una resistencia equivalente, R_e , como el cociente de las componentes fundamentales (primera armónica) de la tensión y la corriente.

A partir de esta definición en [54] se establece el llamado “principio de balance de energía”, el cual establece que las potencias promedio provistas por una fuente de corriente a una resistencia no-lineal o su resistencia equivalente son iguales.

Estos autores extienden el concepto de “linealización equivalente” a capacitores e inductores no-lineales, e introducen el concepto de impedancia equivalente, siempre en referencia a las componentes fundamentales de la tensión, la corriente, la carga para el capacitor no-lineal y el flujo enlazado para la bobina no-lineal.

La diferencia entre la R_{eq} postulada en el presente trabajo y la R_e de la literatura se muestra en el siguiente ejemplo: la alimentación, $v(t)$, es una fuente senoidal, y la carga la constituyen un diodo en serie con una resistencia, R. Sea P la potencia activa para este circuito.



La R_e definida en la literatura [55, 56], es aquella que, conectada a la fuente disipa una potencia activa o real P, igual a la que consume la carga D-R. En este ejemplo

$$R_e = 2R.$$

Con esta resistencia la potencia promedio es P.

La definición de la R_{eq} propuesta en este trabajo es la suma de todas las componentes que transforman energía (disipativas y de absorción) y para el ejemplo citado es;

$$R_{eq} = R$$

y

$$R I^2 = P$$

La diferencia entre los dos conceptos radica en su utilidad para la evaluación de la $p(t)$.

La R_e solamente permite la comparación, en términos de la potencia real consumida de dos sistemas: el no-lineal y el llamado "linealizado".

Si intentáramos conocer $p(t)$, cuya forma es fundamental para la correcta medición del consumo (la forma - contenido espectral - definirá el ancho de banda del Watthorímetro necesario) y la creación de un compensador, utilizando el sistema linealizado, es fácil entender que la $p(t)$ no sería consistente con la realidad física del flujo de potencia instantánea.

Esta diferencia es particularmente importante en circuitos no-lineales donde la representación instantánea es insustituible, como se dijo antes, en medición del consumo y compensación; en circuitos lineales, donde se pueden usar fasores, los resultados del cálculo de la potencia promedio, P , por ambos métodos, son idénticos.

Si se "linealiza la carga", se pierde la información de los instantes donde se consume o almacena energía.

Desde el punto de vista de la fuente (red) y para una condición de carga ideal, es decir tensión senoidal, corriente senoidal y ángulo de desfasaje, $\phi = 0$, la ecuación (3.4) nos da el valor de la resistencia que, bajo estos supuestos, constituye la carga.

En esta resistencia se disipará, en forma de calor, la energía provista por la fuente. Según la ley de Joule [48],

$$P = I^2 R.$$

Es importante remarcar que en el caso lineal la R es única y en general, para un sistema determinado, en un ciclo particular, la componente resistiva resultado de la ecuación (1.1) también es único, por serlo P e I .

Para un sistema general las cargas no son únicamente resistivas ni lineales. La naturaleza de la carga es arbitraria: iluminación fluorescente, motores, equipo electrónico provisto de fuentes conmutadas, refrigeradores, calentadores, etcétera.

En definitiva el sistema es una caja negra para la cual se evalúa, desde el punto de vista de la fuente, el flujo de la potencia instantánea y sus componentes de almacenamiento y transformación .

Si bien la ley de Joule es generalmente expresada como,

$$P = rI^2$$

la literatura reporta [57, 58, 59] su formulación instantánea:

$$p(t) = \frac{dq(t)}{dt} = ri^2(t), \quad (3.5)$$

donde r es la resistencia del conductor y $q(t)$ es la carga instantánea.

Se ve que la tasa instantánea de transferencia de energía es la potencia instantánea, $p(t)$ y ésta se relaciona directamente con los portadores y la resistencia de la carga.

3.4. Propuesta del modelo de descomposición.

Desde un punto de vista práctico (ingenieril) las únicas variables medibles son $v(t)$ e $i(t)$. A partir de ellas es posible conocer $p(t)$ y de ésta, en base a lo planteado en la ecuación (3.3) se deberá encontrar un par de funciones del tiempo, tales que describan precisamente los dos fenómenos energéticos existentes en el sistema fuente-carga: almacenamiento y transformación; en el presente trabajo llamaremos, respectivamente, a estas funciones, $r(t)$ y $a(t)$.

De la ecuación (3.3),

$$a(t) = p_d(t)$$

y

$$r(t) = p_r(t).$$

Así

$$p(t) = a(t) + r(t), \quad (3.6)$$

La $a(t)$ será llamada potencia instantánea activa y la $r(t)$ potencia instantánea reactiva.

Las condiciones fisico-matemáticas que deberán cumplir $a(t)$ y $r(t)$ son:

A. Como $r(t)$ debe describir el proceso de almacenamiento en los elementos reactivos y el regreso del flujo de energía a la fuente, su promedio en un ciclo, en los sistemas bajo estudio en este trabajo, será:

$$\int_0^T r(t) dt = 0 \quad (3.7)$$

B. Ya que $a(t)$ debe describir el flujo de energía de transformación o absorción (disipación en el caso puramente resistivo), y dado que se supuso que la carga es pasiva, deberá cumplirse que:

$$a(t) \geq 0 \quad \forall t \quad (3.8)$$

Además, para cumplir con la ley de conservación de la energía,

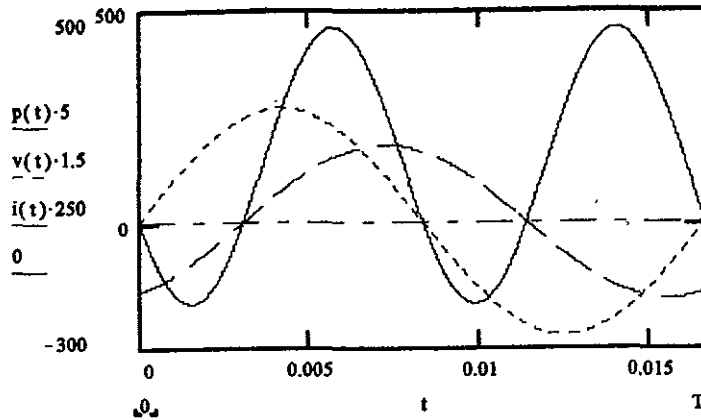
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad (3.9)$$

Dadas las condiciones que deberán cumplir $a(t)$ y $r(t)$, se entiende que, desde un punto de vista estrictamente matemático, existe un número infinito de tal par de funciones.

Desde el punto de vista de los fenómenos físicos de transferencia de energía, para un sistema dado y en un momento determinado (recordar el supuesto de estacionariedad en el comportamiento del sistema), las funciones $a(t)$ y $r(t)$ son únicas.

Previo a la postulación de la metodología propuesta para encontrar el par único ($a(t), r(t)$) para un sistema dado, veremos las dificultades que encierra el tratar de encontrar restricciones adicionales a (3.7), (3.8) y (3.9), tales que permitan, por métodos analíticos, encontrar el par de funciones únicas para un cierto sistema.

En un sistema fuente senoidal y carga R-L, a partir de $v(t)$ e $i(t)$, es posible evaluar $p(t)$. En ésta solamente es posible indicar los intervalos para los cuales el flujo instantáneo de energía es positivo (por convención: de la fuente hacia la carga) o negativo.



Gráfica 3.4
Tensión, corriente y potencia instantánea
para una carga lineal

De la inspección de los intervalos donde $p(t) < 0$, podemos conocer la magnitud de la energía almacenada ya que los lóbulos negativos indican la energía regresada a la fuente.

En los intervalos donde $p(t) > 0$ se encuentran sumados los efectos de almacenamiento y transformación.

Es posible así, conocer la cantidad de energía transformada y almacenada, mas no la forma instantánea de estos procesos. El solo conocimiento de $v(t)$ e $i(t)$ no permite, para cargas generales, obtener condiciones analíticas adicionales tales que permitan la evaluación del par $a(t)$, $r(t)$.

Dada la dificultad de la metodología expuesta en el párrafo anterior se optó por proponer una ecuación para la componente de la potencia instantánea que indica la energía de transformación, $a(t)$ y encontrar $r(t)$ por diferencia de (3.6),

$$r(t) = p(t) - a(t) \quad (3.10)$$

A partir de la citada proposición analítica se estudia el cumplimiento de las restricciones dadas en las ecuaciones (3.7), (3.8) y (3.9).

De acuerdo a la expresión instantánea de la ley de Joule, ecuación (3.5), la potencia instantánea de transformación es,

$$p(t) = ri^2(t),$$

y de acuerdo a la definición dada a $a(t)$,

$$a(t) = ri^2(t)$$

A partir de la definición de la R_{eq} , como el elemento que genera un consumo equivalente al generado por todas las componentes que transforman energía en la carga arbitraria, y recordando que R_{eq} es constante, en el ciclo de evaluación de $a(t)$, por estar todas las variaciones temporales de la carga contenidas en la forma de la $i(t)$, se propone que:

$$a(t) = R_{eq}i^2(t) \quad (3.11)$$

Se ve que la $a(t)$, así definida, cumple con:

$$a(t) \geq 0 \quad \forall t,$$

que es la condición (3.8), y

$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T R_{eq}i^2(t)dt = \frac{R_{eq}}{T} \int_0^T i^2(t)dt = R_{eq}I^2 = P, \quad (3.12)$$

cumpliendo con la condición 3.9.

Calculando la $r(t)$, a partir de la ecuación (3.10), y promediando,

$$\int_0^T r(t)dt = \int_0^T p(t)dt - \int_0^T a(t)dt = P - P = 0$$

Se cumple con la condición 3.7.

3.5. Comparación con otros modelos.

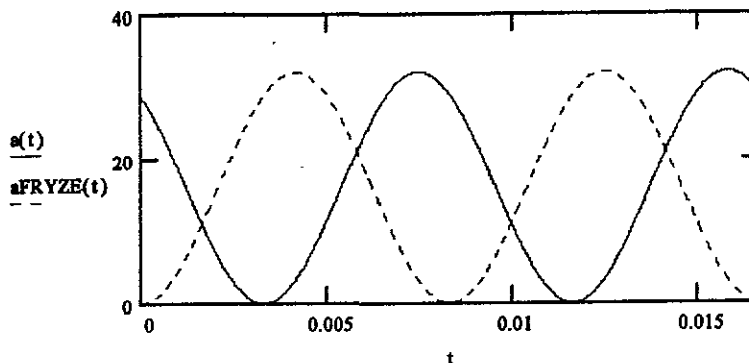
El presente trabajo expone una descomposición, en el dominio del tiempo, de la potencia instantánea. La literatura reporta, tal como se expuso en el capítulo 2, descomposiciones en los dominios de la frecuencia y del tiempo. En esta sección se realiza la comparación entre el resultado principal de este trabajo y las expresiones para las componentes de la potencia instantánea derivadas por algunos autores comentados en el capítulo anterior.

3.5.1 Dominio del tiempo.

Fryze [41], define una conductancia G , como el cociente entre la P y el cuadrado de la tensión eficaz, V^2 . El consumo instantáneo en base a esta G , será:

$$a_{\text{FRYZE}}(t) = G v^2(t). \quad (3.13)$$

Si bien la promediación de $a(t)$ y de $a_{\text{FRYZE}}(t)$ conducen a la misma P , no son instantáneamente idénticos. En el caso de una carga lineal o R-L, $a(t)$ y $a_{\text{FRYZE}}(t)$ presentan un corrimiento de fase.



Gráfica 3.5
 $a(t)$ y $a_{\text{FRYZE}}(t)$ para la carga R-L

Para el caso general o no-lineal hay, además, un cambio en la forma. En el siguiente capítulo se ejemplifica este caso.

La $a_{\text{FRYZE}}(t)$ es coincidente con la expresión dada por Page [43] para la potencia activa instantánea. En los párrafos siguientes se mostrará que la forma en que la energía se transforma instantáneamente viene dada por la $a(t)$, propuesta en el presente trabajo, y no por la $a_{\text{FRYZE}}(t)$.

Page, citado y comentado en la revisión de la literatura, basa su análisis en el trabajo de Fryze. La expresión de Page para la potencia activa instantánea parte de la definición de la componente de corriente en fase, $i_p(t)$, con la tensión de excitación, $v(t)$. Siendo,

$$i_p(t) = K v(t), \quad (3.14)$$

Page define la potencia activa instantánea como:

$$i_p(t)v(t) = K v^2(t),$$

siendo K el cociente entre P y V^2 (Ver ecuaciones 2.8).

La metodología que aplica Page (Fryze) consiste en proyectar la función $i(t)$ sobre la función $v(t)$. En esta proyección existe solamente la componente común o en fase entre ambas funciones.

De lo anterior se ve que la componente instantánea de la potencia activa, resultante de este enfoque en el dominio del tiempo, tiene la forma de una senoide cuadrática. En el capítulo 2 se comentó la crítica de Czarnecki [47] a esta proposición. Las gráficas 2.1 y 2.2 ilustran la inconsistencia que encierra la citada definición de la potencia activa instantánea.

3.5.2. Dominio de la frecuencia.

En el capítulo 2 se expusieron y comentaron, por considerarlos ejemplos representativo del enfoque en el dominio de la frecuencia, parte de los trabajos realizados por Shepherd y Emanuel. En base a estas ideas se desarrolla, a continuación, la derivación de la expresión para la potencia activa instantánea.

Si a una carga no-lineal se la alimenta con una tensión senoidal,

$$v(t) = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t),$$

la corriente resultante puede ser expresada en términos de series de Fourier, como:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n)$$

Para una onda típica de corriente (sin componente de CD) solamente posee armónicas impares, se tiene que la potencia instantánea es:

$$p(t) = v(t) \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n) = 2V\text{sen}(\omega t) [I_1 \text{sen}(\omega t + \phi_1) + I_3 \text{sen}(3\omega t + \phi_3) + \dots]$$

Al calcular la potencia promedio se ve que solamente contribuye a ella la componente de la primera armónica - fundamental - de la corriente. Así,

$$P = V I_1 \cos\phi_1.$$

La componente instantánea activa es:

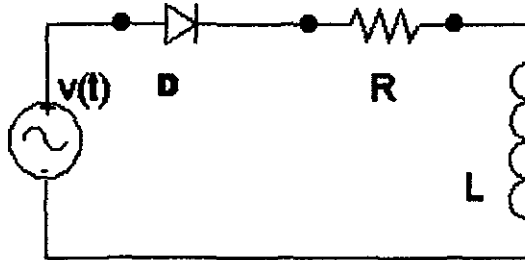
$$a_{\text{FOU}}(t) = v(t) \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega t + \phi_1),$$

por ser la única que contribuye al consumo. La expresión de la componente reactiva instantánea, $r_{\text{FOU}}(t)$ será,

$$r_{\text{FOU}}(t) = v(t) \sum_{n=3}^{\infty} \sqrt{2}I_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n)$$

La $a_{FOU}(t)$ tendrá la forma de una senoide cuadrática y existirá todo el ciclo. Como se explicó en el capítulo 2, esta forma de flujo de energía no existe en general, o sea para una carga arbitraria.

En relación al cálculo de la resistencia equivalente, los resultados que se encuentran coinciden con la R_e citada y cuestionada en otra parte de este capítulo. A modo de ejemplo veremos el cálculo, a partir de la descomposición de Fourier y del modelo planteado en este trabajo, de R_e Y R_{eq} en un circuito alimentado por una senoide y cuya carga consiste en un diodo en serie con una carga R-L.



$R := 287$ $L := .625$ Valores arbitrarios de R y de L

$$i_{dr}(t) := \frac{V}{Z} \left(\sin(\omega \cdot t - \phi) + \sin(\phi) \cdot \exp\left(\frac{-R}{L} \cdot t\right) \right)$$

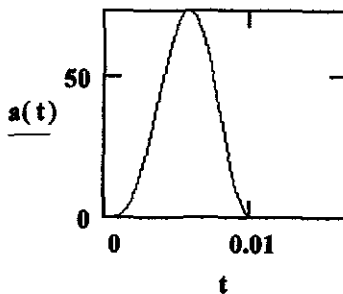
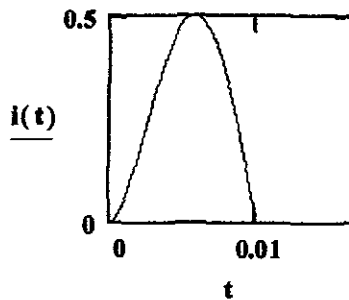
$$I_{rms} := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad R_{eq} := \frac{P}{I_{rms}^2}$$

$$R_{eq} = 287.008$$

Coincide con la R

La potencia activa instantánea:

$$a(t) := R_{eq} \cdot i(t)^2$$



La forma de $a(t)$ da el flujo real de la potencia instantánea activa en el circuito

Análisis por serie de Fourier: los coeficientes de la serie son:

$$a_0 := \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \qquad a_n := \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) dt$$

$$b_n := \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) dt$$

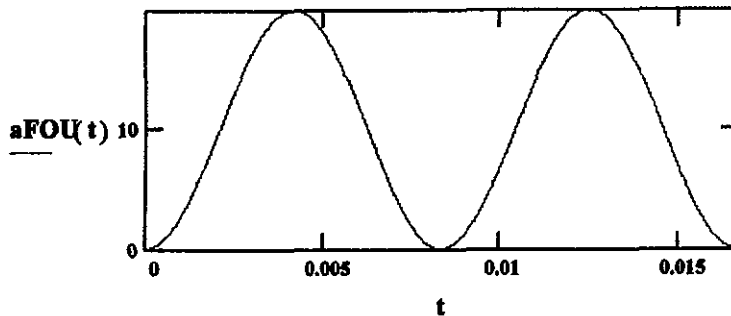
La corriente, expresada en serie de Fourier es:

$$iFOU(t) := a_0 + \left[\sum_{n=1}^{19} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) \right] \cdot 2$$

La componente fundamental de la iFOU(t) es: $b_1 = 0.11$

La resistencia equivalente, R_e : $Re := \frac{V}{b_1} \qquad Re = 1.64 \cdot 10^3 \quad \Omega$

La potencia activa instantánea es: $aFOU(t) := v(t) \cdot b_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$



Vemos que se cumple el principio de balance de energía: $PFOU := \frac{V^2}{Re}$

La potencia activa instantánea, aFOU(t), existe cuando la corriente real, $i(t) = 0$, contradiciendo la física del sistema

Se cumple además que: $PFOU = 19.65 \text{ Watts} = P$

3.6. Demostración de la unicidad de la $a(t)$.

Dado que la expresión propuesta para $a(t)$ cumple con las condiciones dadas en (3.8), (3.9) y (3.10) resta estudiar la cuestión acerca de la existencia de otras expresiones de $a(t)$ que cumplan con las citadas restricciones.

En el capítulo anterior se comentó que la expresión de la potencia instantánea activa se deriva a partir de la suposición consensada acerca de la existencia de una “corriente activa” .

Los autores que utilizan el enfoque en el dominio del tiempo coinciden en general con la proposición de Page, que en base al trabajo de Fryze, postula que:

$$p_p(t) = \frac{P}{V^2} v^2(t) . \quad (3.15)$$

El cociente $\frac{P}{V^2}$ puede ser visto como una conductancia equivalente G_{eq} . Así la (3.15) será:

$$p_p(t) = G_{eq} v^2(t) \quad (3.16)$$

A diferencia de al anterior, la propuesta del presente trabajo se expresa a la potencia activa instantánea como:

$$a(t) = R_{eq} i^2(t) \quad (3.17)$$

Debe notarse que (3.16) y (3.17) no son trivialmente duales; mientras (3.17) tiene siempre significado físico, (3.16) falla en este sentido.

Si bien en el capítulo 2 se comentaron las críticas de Czarnecki a la expresión (3.15) se demostrará que la expresión (3.17) es la única posible para la potencia instantánea activa que cumple con las restricciones físico-matemáticas dadas en (3.8), (3.9) y (3.10).

Supóngase que la expresión de la potencia instantánea activa, $p_p(t)$ es proporcional tanto a $v^2(t)$ como a $i^2(t)$, así,

$$p(t) = K_V v^2(t) + K_I i^2(t) + p_q(t) . \quad (3.18)$$

Donde K_V y K_I son constantes de proporcional con la dimensión adecuada.

Dividiendo entre $v(t)$, resulta que:

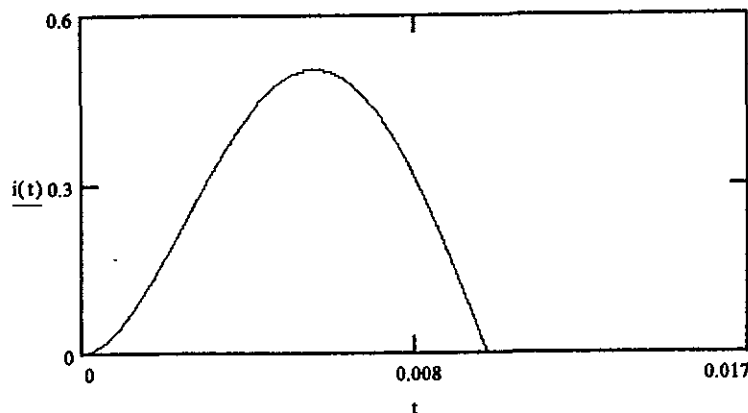
$$i(t) = i_v(t) + i_l(t) + i_q(t) \quad (3.19)$$

siendo $i_v(t) + i_r(t)$ una descomposición arbitraria de la corriente activa e $i_q(t)$ la corriente reactiva, ya mencionada en otra parte de este trabajo.

En las definiciones anteriores solamente $i_r(t)$ depende directamente de $i(t)$. En efecto,

$$i_r(t) = \frac{K_1 i^2(t)}{v(t)} \quad (3.20)$$

Para una carga general pueden existir intervalos para los cuales $i(t) = 0$. (por ejemplo carga DRL y excitación senoidal).



Gráfica 3.6
Corriente en el circuito DRL

Entonces, y utilizando (3.18), en el citado intervalo resulta que:

$$i_v(t) + i_q(t) = 0$$

La igualdad anterior puede ser entendida de dos formas: la primera se basa en la evidencia física: en el ejemplo mencionado, no existe flujo de portadores en el circuito; la segunda, matemáticamente correcta, indica que en el sistema existen dos corrientes iguales y opuestas, que se cancelan entre si.

Czarnecki [35] comenta el esquema anterior de razonamiento afirmando que cualquier descomposición puede conducir a malas interpretaciones. En particular cero puede ser siempre descompuesto en la suma de dos o más términos diferentes de cero.

Sean $x_1(t)$ y $x_2(t)$, dos funciones arbitrarias, tales que:

$$x_1(t) + x_2(t) = 0 \quad (3.21)$$

Sean, por ejemplo

$$x_1(t) = A \sin(\omega t) \quad \text{y} \quad x_2(t) = A \sin(\omega t - \pi)$$

Cumpliendo con (3.21).

Czarnecki concluye que: "Si se considera un sólo término, $x_1(t)$, se puede afirmar que existe una oscilación de tal cantidad. Es fácil olvidar que esto resulta de una descomposición artificial".

Tal descomposición artificial se realizó en (3.18). La evidencia física indica que, en los intervalos donde

$$i(t) = 0,$$

la única solución es que:

$$i_v(t) = i_q(t) = 0,$$

De (3.17) resulta que:

$$i_v(t) = K_v v(t)$$

y dado que

$$v(t) \neq 0,$$

Se concluye que, necesariamente, $K_v = 0$.

Así la única descomposición posible para la potencia instantánea, tal que cumple con las condiciones (3.8), (3.9) y (3.10) es:

$$p(t) = K_I i^2(t) + p_q(t).$$

donde, de acuerdo a las ecuaciones (3.11) y (3.12), resulta que $K_I = R_{eq}$; lo anterior conduce a la conclusión de que la única expresión para la potencia activa instantánea es:

$$a(t) = R_{eq} i^2(t).$$

3.7. El modelo $(a(t), r(t))$ mediante la descomposición de la $v(t)$.

En párrafos anteriores se abordó la cuestión de la no-existencia física de las corrientes “activa” y reactiva” propuestas en la literatura. En el capítulo 2, al comentar el modelo propuesto por Page, se expuso que, dada la equivalencia funcional entre el espacio de vectores y de funciones, es posible entender la “corriente en fase”, $i_p(t)$, como la proyección del vector de corriente sobre el vector de tensión, considerado a éste como referencia.

Partiendo del hecho de que toda la información de las transferencias energéticas entre fuente y carga son consecuencia del flujo de portadores, la proyección anterior implica la pérdida de parte de la información contenida en la onda de corriente. Esto explica, desde una perspectiva física, lo comentado extensamente respecto a la componente activa de la corriente.

La explicación matemática de esta inconsistencia parte del hecho de que cada componentes del vector $i(t)$, en un espacio k -dimensional, sobre una base ortonormal, posee información que define la forma de la onda de corriente y así los intercambios energéticos entre la fuente y la carga. El producto,

$$i_p(t)v(t),$$

llamado por Page potencia instantánea activa, carece de la suficiente información para la explicación adecuada de la transferencia energética, ya que la $i_p(t)$ es una función que solamente posee una componente: la fundamental. Las gráficas 2.1 y 2.2, y los comentarios acerca de ellas, ilustran esto último.

Un sistema típico de distribución puede ser visto como una fuente de tensión casi ideal (amplitud máxima y frecuencia constantes con impedancia interna - de corto-circuito - muy baja). Esta fuente tiene conectada en general una carga de tipo serie la cual incluye los elementos de transformación y almacenamiento, lineales o no.

Dado lo anterior se aborda la cuestión de la descomposición de la tensión $v(t)$ en sus dos componentes, una activa, $v_p(t)$, o en fase con la corriente - considerada ésta como referencia, en este enfoque - y calculada con:

$$v_p(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)v(t)dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt} i(t) = \frac{P}{I^2} i(t)$$

La integral del numerador es el producto interno de $v(t)$ e $i(t)$. La integral del denominador es el módulo al cuadrado de la referencia. El vector $v_p(t)$ tiene la misma

forma (dimensión) que $i(t)$ y el cociente entre P e I^2 es la resistencia equivalente, R_{eq} , definida en otra parte de este capítulo.

La componente reactiva, $v_q(t)$, se calcula con:

$$v_q(t) = v(t) - v_p(t)$$

Como se observa, se invirtió el orden de la proyección y de acuerdo a esta forma de realizar la proyección, la potencia instantánea es:

$$p(t) = v(t)i(t) = [v_p(t) + v_q(t)] i(t) = v_p(t)i(t) + v_q(t)i(t). \quad (3.22)$$

Los últimos dos términos de (3.22) coinciden con las componentes activa, $a(t)$, y reactiva, $r(t)$, definidas a partir del principio de conservación de la energía, en el presente trabajo. La presencia de la $i(t)$, en la evaluación de la potencia instantánea, garantiza que en ambas componentes de la potencia instantánea, existe la información completa del intercambio energético.

3.8. Esquema general de la instrumentación para el cálculo de $a(t)$ y $r(t)$.

El sistema de instrumentación propuesto para la evaluación de $a(t)$ y $r(t)$ es alimentado por las únicas variables físicas conocibles por medición directa: $v(t)$ e $i(t)$.

La potencia instantánea, $p(t)$ se calcula mediante la utilización de un multiplicador analógico, mostrado en la figura 3.7 como X' .

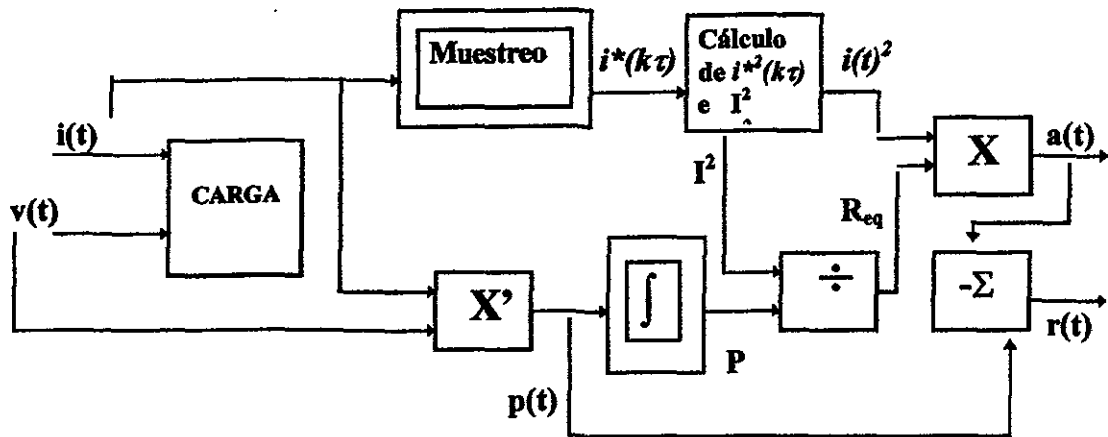
El bloque rotulado como Muestreo permite disponer de una colección de muestras o de la corriente: $i^*(k\tau)$, siendo τ el período de muestreo y k el número de la muestra. Con estas muestras es posible evaluar el cuadrado de esta discretización de la corriente, $i^{*2}(k\tau)$, así como el cuadrado de la corriente eficaz, I^2 .

La selección adecuada del período de muestreo, τ , y de la cuantificación (# de bits) asegura que la discretización de la corriente será una buena representación de la señal analógica [60].

La potencia promedio P , calculada mediante un integrador a partir de de la potencia instantánea, $p(t)$ y el cuadrado de la corriente eficaz, I^2 , permiten el cálculo, mediante un bloque divisor, de la resistencia equivalente, R_{eq} .

El bloque multiplicador, X , permite la evaluación de $a(t)$ como el producto entre $i^{*2}(k\tau)$ y R_{eq} . La $r(t)$ es calculada a través de un bloque substractor.

El esquema de instrumentación propuesto es:



Gráfica 3.7
Instrumentación propuesta para la
evaluación de $a(t)$ y $r(t)$.

4. Ejemplos de aplicación del modelo.

4.1. Consideraciones generales.

En este capítulo se presenta el cálculo del par $[a(t), r(t)]$ en cuatro aplicaciones particulares, consideradas como representativas de las cargas presentes en sistemas eléctricos en baja tensión, y una general. En los cinco ejemplos planteados se supone una excitación dada por:

$$v(t) = \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t) \text{ Volts.}$$

El programa utilizado para el estudio de los diferentes casos requiere que los parámetros tengan valor numérico. La asignación de estos es absolutamente arbitraria y en cada ejemplo deben ser definidos.

4.2. Caso 1: carga lineal o R-L.

$$R := 300 \Omega \quad L := .8 \text{ H} \quad \phi := \text{atan}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right) \quad Z := \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \Omega$$

La expresión de la corriente:

$$i(t) := \frac{V \cdot \sqrt{2}}{Z} \cdot \text{sin}(\omega \cdot t - \phi)$$

$$p(t) := v(t) \cdot i(t)$$

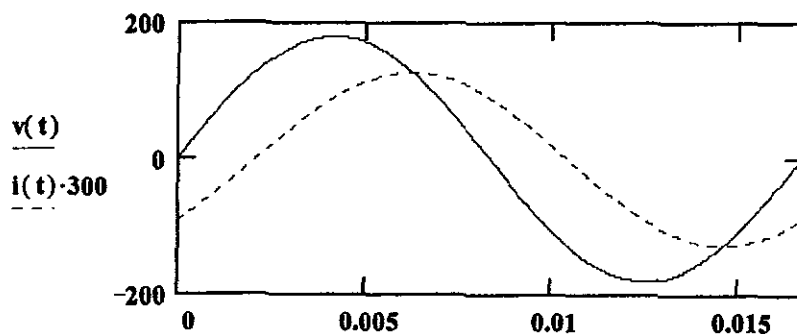
$$P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 26.739 \text{ W}$$

La corriente eficaz es:

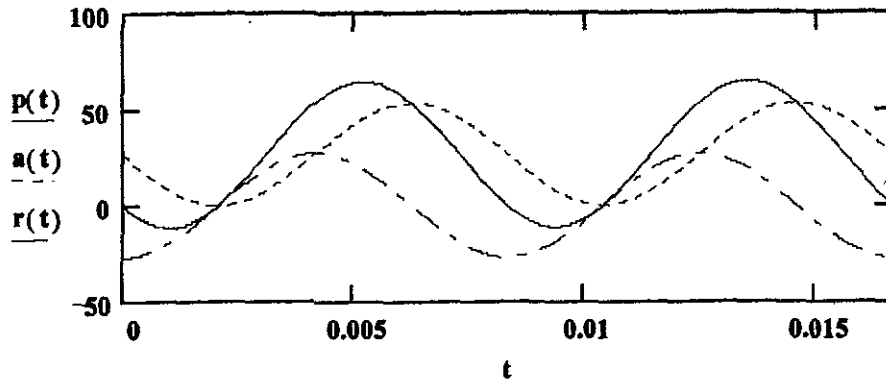
$$I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

Cálculo de la resistencia equivalente: $Req := \frac{P}{I^2} \quad Req = 300.001 \Omega$

Descomposición de $p(t)$: $a(t) := Req \cdot i(t)^2 \quad r(t) := p(t) - a(t)$



Gráfica 4.2.1.
Tensión y corriente instantáneas



Gráfica 4.2.2.

Potencias instantáneas $p(t)$, $a(t)$ y $r(t)$

Se cumple que:

$$\int_0^T r(t) dt = 4.374 \cdot 10^{-9} = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt = 26.739 \quad W = P$$

Comentario: es posible observar que se cumplen las condiciones o restricciones físico-matemáticas - ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10) - para $a(t)$ y $r(t)$. De la gráfica de $a(t)$ se ve que ésta es cero en los puntos que $i(t) = 0$.

4.3. Caso 2: diodo y carga RL.

$$R := 287 \Omega \quad L := .625 \text{ H} \quad Z := \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \Omega \quad \phi := \text{atan}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

Definición de la corriente [61]:

$$i_{dr}(t) := \frac{V \cdot \sqrt{2}}{Z} \cdot \left(\sin(\omega \cdot t - \phi) + \sin(\phi) \cdot \exp\left(\frac{-R}{L} \cdot t\right) \right) \quad (4.1)$$

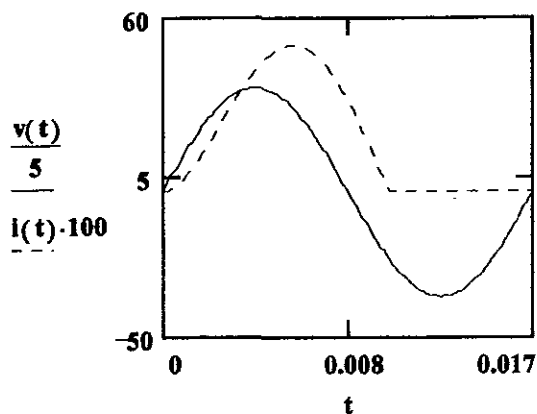
$$i(t) := \text{if}(\omega \cdot t < \pi \cdot 1.22, i_{dr}(t), 0) \quad (4.2)$$

$$p(t) := v(t) \cdot i(t) \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 19.64 \text{ W}$$

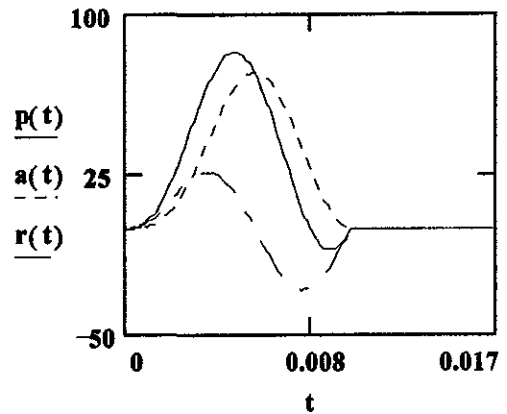
La corriente eficaz: $I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$

Cálculo de la resistencia equivalente: $R_{eq} := \frac{P}{I^2} \quad R_{eq} = 286.86 \Omega$

Descomposición de p(t): $a(t) := i(t)^2 \cdot R_{eq} \quad r(t) := p(t) - a(t)$



Gráfica 4.3.1.
Tensión y corriente instantáneas



Gráfica 4.3.2.
Potencias instantáneas:
p(t), a(t) y r(t)

Se cumple que:

$$\int_0^T r(t) dt = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt = 19.64 \quad W = P$$

Comentario: la observación de la gráfica de $a(t)$ y $r(t)$ muestran que ambas no existen cuando la corriente en el circuito es cero. Se reafirma el hecho que las transferencias de energía se deben al flujo de portadores. Las ecuaciones (4.1) y (4.2) son utilizadas para definir la onda de corriente.

4.4. Caso 3: dos SCR en antiparalelo y carga R-L.

$$L := .9H \quad R := 200 \Omega \quad Z := \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \Omega \quad \phi := \text{atan}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

El ángulo de disparo es: $\alpha := \frac{\pi}{2}$

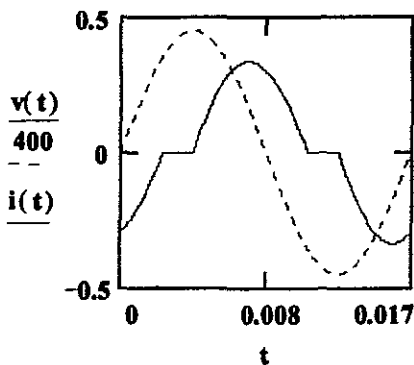
Definición de la corriente [61]:

$$i1(t) := \frac{V \cdot \sqrt{2}}{Z} \left[\sin(\omega \cdot t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) \cdot \exp\left[\left(\frac{R}{L}\right) \cdot \left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)\right] \right] \quad (4.3)$$

$$i2(t) := \text{if}\left(t > \frac{\alpha}{\omega}, i1(t), 0\right) \quad i3(t) := \text{if}(t > .01075, 0, i2(t)) \quad (4.4)$$

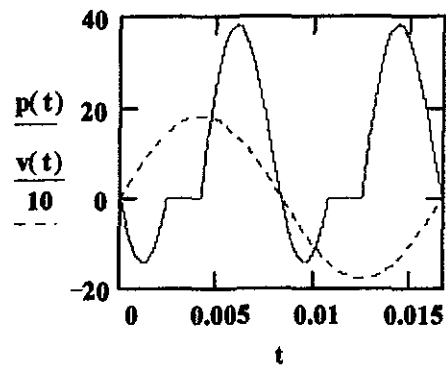
$$i(t) := i3(t) - i3\left(t - \frac{\pi}{\omega}\right) - i3\left(t + \frac{\pi}{\omega}\right) \quad (4.5)$$

$$p(t) := v(t) \cdot i(t) \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 9.2 \text{ W} \quad I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$



Gráfica 4.4.1

Tensión y corriente instantáneas

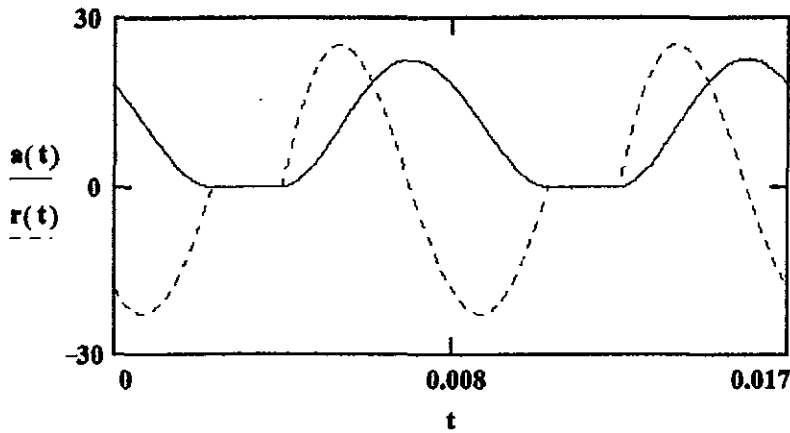


Gráfica 4.4.2

Tensión y potencia instantáneas

Cálculo de la resistencia equivalente, Req: $Req := \frac{P}{I^2} \quad Req = 200 \Omega$

Descomposición de p(t): $a(t) := i(t)^2 \cdot Req \quad r(t) := p(t) - a(t)$



Gráfica 4.4.3.
Potencias instantáneas a(t) y r(t)

Se cumple que:

$$\int_0^T r(t) dt = 3.66 \cdot 10^{-5} = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt = 9.19 \text{ W} = P$$

Comentario: la observación de las gráficas de la corriente, a(t) y r(t) muestran que, en ondas periódicas analizadas en estado permanente, existe información (energía en el caso de a(t) y r(t)) del ciclo anterior. Las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5) definen, a partir del modelo de Dewan [61], la onda de corriente.

4.5. Caso 4: fuente de alimentación conmutada o lineal.

Definición de la corriente:

$$\text{pull}(t) := \text{if}\left(t < \pi \cdot \frac{1}{7 \cdot \omega}, 5 \cdot \sin(7 \cdot \omega \cdot t), 0\right) \quad (4.6)$$

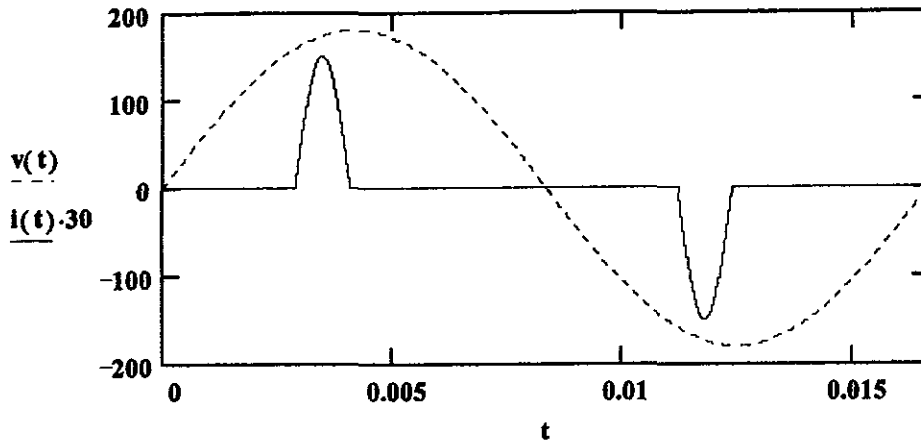
$$\text{pul}(t) := \text{if}(t > 0, \text{pull}(t), 0) \quad (4.7)$$

$$i(t) := \text{pul}\left(t - \frac{\pi}{2.9 \cdot \omega}\right) - \text{pul}\left(t - \frac{\pi}{2.9 \cdot \omega} - \frac{\pi}{\omega}\right) \quad (4.8)$$

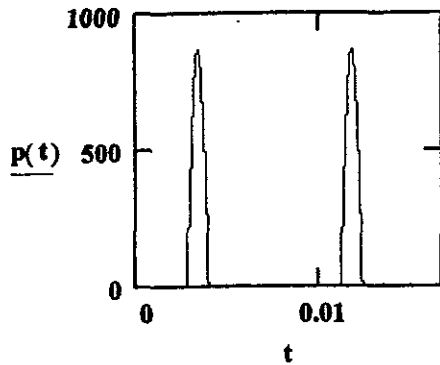
$$p(t) := i(t) \cdot v(t) \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 78.48 \text{ W} \quad I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

Cálculo de la Req. $Req := \frac{P}{I^2} \quad Req = 43.94 \quad \Omega$

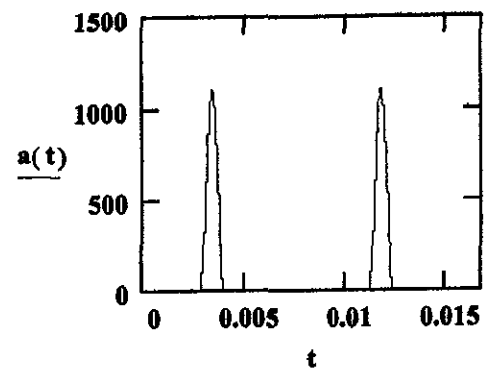
Descomposición de p(t): $a(t) := Req \cdot i(t)^2 \quad r(t) := p(t) - a(t)$



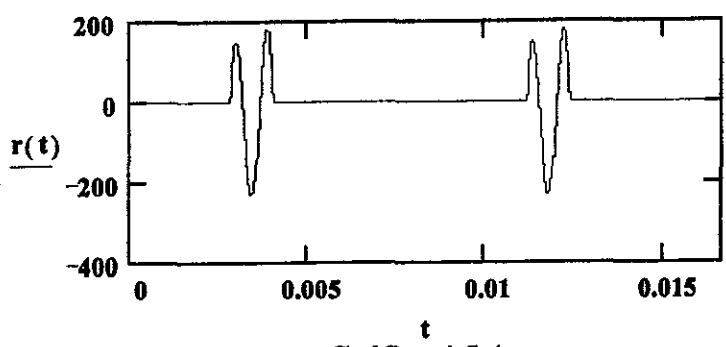
Gráfica 4.5.1.
Tensión y corriente instantáneas



Gráfica 4.5.2
Potencias instantánea, p(t)



Gráfica 4.5.3
Potencias instantánea activa



Gráfica 4.5.4.
Potencias instantánea reactiva

Se cumple que :

$$\int_0^T r(t) dt = 2.67 \cdot 10^{-4} = 0$$

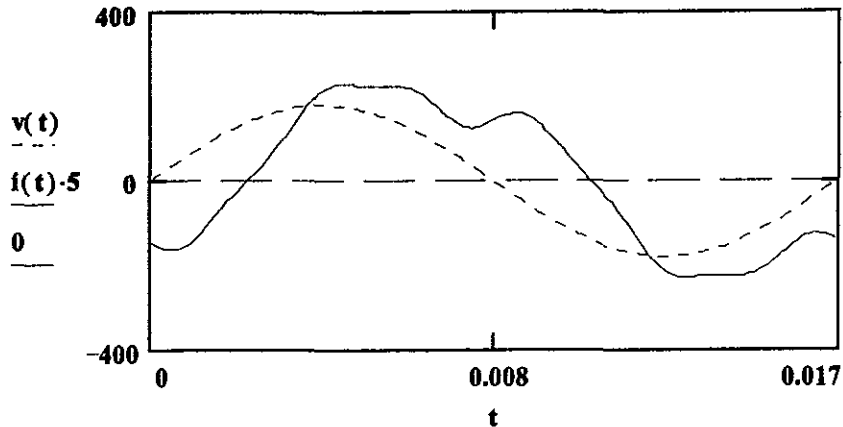
$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt = 78.47 \text{ W} = P$$

Comentario: la forma de la onda de la corriente, definida por las ecuaciones (4.6), (4.7) y (4.8), es típica de una fuente de alimentación lineal o conmutada [23]. Se observa que la corriente adelanta a la tensión, debido a la predominancia del efecto del capacitor de filtro.

4.6. Caso 5: carga arbitraria.

Definición de la corriente:

$$i(t) := 45 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{4}\right) - 10 \cdot \sin\left(3 \cdot \omega \cdot t - \frac{\pi}{13}\right) - 2 \cdot \sin\left(5 \cdot \omega \cdot t - \frac{\pi}{7}\right) - 3 \cdot \sin(7 \cdot \omega \cdot t)$$



Gráfica 4.6.1
Tensión y corriente instantáneas

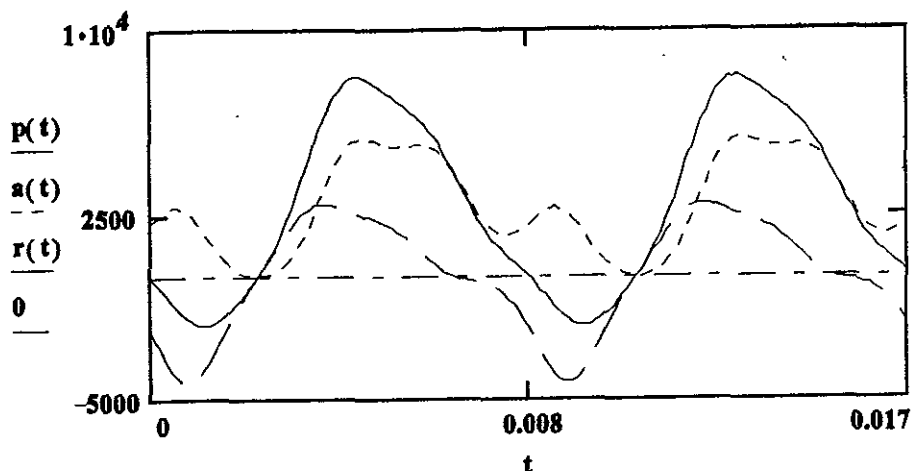
La corriente eficaz:

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

$$p(t) := i(t) \cdot v(t) \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 2.866 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Cálculo de la resistencia equivalente: $Req := \frac{P}{I^2} \quad Req = 2.675 \ \Omega$

Descomposición de p(t): $a(t) := i(t)^2 \cdot Req \quad r(t) := p(t) - a(t)$



Gráfica 4.6.2.
Potencias instantáneas: $p(t)$, $a(t)$ y $r(t)$

Se cumple que:

$$\int_0^T r(t) dt = -0.027$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt = 2.866 \cdot 10^3 \quad W = P$$

Comentario: dada una forma arbitraria de corriente, expresada en este ejemplo en términos de una serie de Fourier, que puede incluir elementos reactivos y no lineales, el modelo propuesto para la descomposición de $p(t)$, ofrece la posibilidad de contar con la forma real de la potencia activa instantánea y la potencia reactiva instantánea. Es posible observar que la promediación de la $r(t)$, salvo errores debidos al cálculo numérico, es cero. El promedio de $a(t)$ es P .

4.7. Conclusiones.

Las diferentes formas de onda de las componentes $a(t)$ y $r(t)$ resultantes muestran que, en general, la onda a promediar a los efectos del consumo, $a(t)$, tiene una forma (ancho de banda) arbitraria, mientras que la $r(t)$ no es simétrica y así el almacenamiento de energía en la carga. partir de estas formas de onda será posible la realización de compensadores, en el dominio del tiempo y de medidores de consumo real. En el siguiente capítulo se abordan en detalle estas dos cuestiones.

5. Aplicación del modelo a la compensación y a la medición.

5.1. Consideraciones generales.

En el capítulo anterior se mostró la aplicación de la descomposición de la potencia instantánea en el par $[a(t), r(t)]$ en varios circuitos. Tal como se planteó en los objetivos de este trabajo, la utilidad de los resultados de la descomposición planteada debe ser evaluada en tres aspectos principales:

- A. Existencia física de las componentes encontradas.**
- B. Realización de compensadores.**
- C. Adecuada medición del consumo.**

El punto A fue comentado extensamente a lo largo de los capítulos 3 y 4. En el presente se aborda el punto B, comenzando con un resumen los conceptos generales de la compensación y ejemplificando la aplicación del modelo de descomposición como base teórica para la realización de compensadores.

La utilidad del modelo planteado en el trabajo a la medición (punto C) se plantea en la última parte del capítulo.

5.2. Compensación.

A partir del aumento en la cantidad de cargas no lineales conectadas a la línea se ha incrementado la necesidad de reducir pérdidas en los sistemas de distribución y los efectos de las armónicas sobre los equipos conectados a la red [7]. A los acondicionadores de línea se los llama filtros activos, dispositivos de cancelación de armónicas o simplemente compensadores.

En todos los casos se trata de que la red de distribución vea una carga puramente resistiva o al menos de tipo R-L o lineal. Así, el concepto de compensación involucra la corrección de reactivos, a la frecuencia fundamental y la eliminación de la polución armónica.

El primero de estos, basado en dispositivos semiconductores, fue creado, en la década de los 70, para compensar los reactivos a 60 Hz. El Reactor controlado por Tiristores, TCR por sus siglas en idioma inglés, también conocido como Compensador Estático de Vars (Voltamperios reactivos) a su vez produce gran cantidad de armónicas. Por esto se requiere la instalación de filtros que eliminen las armónicas generadas por la operación de los conmutadores de silicio.

Antes de la aparición de las cargas no lineales y/o variantes en el tiempo (conmutadas) las técnicas de compensación se limitaban a la cancelación, en la red, de las corrientes reactivas que solamente generaban pérdidas en la distribución y no eran medidas por los equipos que reportan el consumo de un usuario (el promedio de la potencia reactiva, en un ciclo, es cero).

Los proveedores del servicio penalizan a los consumidores, cuyo equipo genera más allá de cierta cantidad de Vars. La medición del factor de potencia, PF, en instalaciones industriales provee al prestador del servicio con la información necesaria.

Estos medidores, diseñados para operar con ondas senoidales de tensión y corriente, indican el ángulo de desfase entre éstas y, de acuerdo a la norma vigente, se evalúa la cantidad de reactivos que se inyectan a la red.

La definición del factor de potencia, PF, es:

$$PF = \frac{P}{S}$$

P es la potencia activa y S es la potencia de fasor o aparente.

Si V e I son los valores eficaces de la tensión y la corriente, respectivamente, ϕ es su ángulo de desfase y C la capacidad necesaria para llevar el PF a la unidad, o sea compensar los reactivos a la frecuencia de línea ($f= 60$ Hz y $\omega=2\pi f$), se tiene que [31]:

$$PF = \frac{I \cos \phi}{\sqrt{(V\omega C - I \sin \phi)^2 + I^2 \cos^2 \phi}} = 1 .$$

El valor de C necesario para la compensación de los reactivos [19] es:

$$C = \frac{\sin \phi}{\omega Z}$$

Donde la impedancia Z es:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

o bien,

$$Z = \frac{V}{I}$$

Pese a algunos problemas de operación, los compensadores realizados con bancos de capacitores han operado por más de 50 años. Los problemas actuales, en presencia de cargas no-lineales, se refieren a la aparición de circuitos resonantes (inductancia de la red y capacidad del banco) a ciertas armónicas.

Así, aparecen sobre el banco sobretensiones que queman los fusibles protectores de aquéllos, activan protecciones, destruyen contactores, etcétera [62].

Las tecnologías más recientes de compensación se plantean la cancelación de reactivos, a la frecuencia fundamental, y de no-linealidades, armónicos. Para cumplir estos dos objetivos se utilizan una gran variedad de dispositivos y configuraciones: filtros activos de tensión, filtros activos de corriente, filtros universales, etcétera. [62]

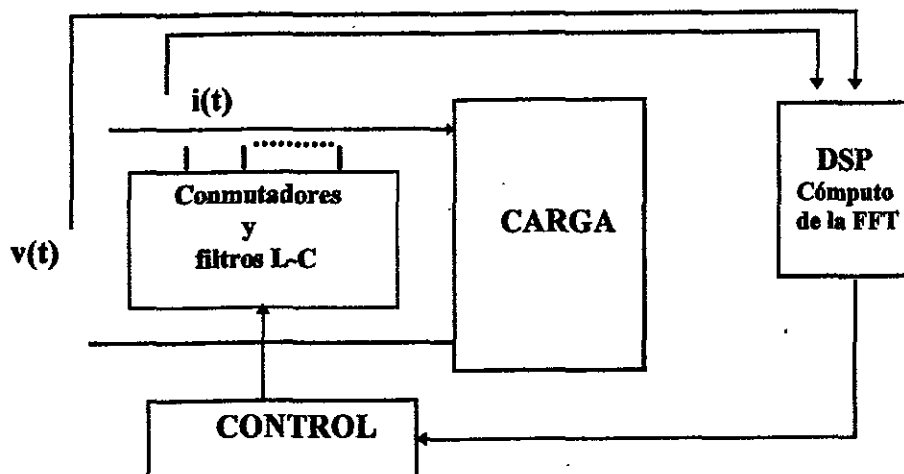
En bajas potencias (< a 1500 Watts) el mercado ofrece una serie de circuitos integrados que, con mínima circuitería auxiliar, garantizan factores de potencia mayores que .99, corrigiendo el factor de distorsión y el llamado ángulo de desplazamiento - el ya citado PF clásico, o $\cos\phi$ - [63].

En potencias mayores se utilizan, entre otros arreglos, bancos de capacitores conmutados, comandados desde un analizador de armónicas construido al efecto. En esta metodología, que trabaja en el dominio de la frecuencia, la información “instantánea” es provista por un sistema realizado alrededor de un microprocesador.

Dado que se requieren análisis en tiempo real se utiliza un tipo especial de microprocesador llamado DSP (por las siglas de “Digital Signal Processor”) capaz de realizar transformadas rápidas de Fourier (FFT) o sea, el análisis armónico, en los tiempos requeridos para el control de los filtros que corticuitarán las señales no deseadas.

El microprocesador y su circuitería asociada generan las señales de control de cada uno de los filtros sintonizados a las armónicas de interés (generalmente de la tercera a la novena). Cada uno de estos está constituido por un par LC y un conmutador electrónico: SCR, TRIAC, MOSFET o IGBT.

El esquema general de un filtro en base a un banco de capacitores conmutados se muestra a continuación.



Gráfica 5.1
Esquema general de banco de capacitores conmutados.

La operación de cualquier tipo de compensador demanda energía de la red de distribución. Si bien la compensación de las no-linealidades se justifica por la necesidad de disminuir o cancelar los efectos de interferencia que las armónicas producen en los equipos conectados a la red y de reducir las pérdidas en los sistemas de distribución, no se ha encontrado una justificación económica de su utilización; vale decir estudios de la eficiencia de sistemas eléctricos con cargas no lineales con y sin compensación.

La electrónica integrada y su circuitería asociada, para el caso de compensadores en baja potencia requiere, además del costo adicional del equipo - una fuente conmutada "compensada" que cuesta 20% más que una no compensada [64] un gasto energético adicional.

Los estudios de pérdidas en líneas de conducción de energía eléctrica y transformadores [22] son limitados y se cree que aún falta realizar un balance energético real, entre sistemas físicos con contenido armónico típico y los mismos sistemas provistos de compensadores.

Mientras esto ocurre, los proveedores del servicio eléctrico han optado por penalizar a los usuarios que generan ruido armónico más allá de las recomendaciones existentes [24] o normalizar el tipo de carga - máximo contenido de armónicas permitido - que puede ser conectada a la red [23].

5.3. Propuesta de utilización del modelo en la compensación.

El modelo de descomposición de la potencia instantánea en dos componentes, $a(t)$ y $r(t)$, puede ser utilizado para la realización de compensadores, que operan en el dominio del tiempo, y que no requieren, en principio, de tanta circuitería como la necesaria en la realización de compensadores con DSP.

Interesa destacar el hecho de que el usuario podrá compensar los efectos de almacenamiento (reactivos), con su contenido armónico lineal y no-lineal, y/o compensar la totalidad de la $p(t)$, en reactivos y no-linealidades.

A continuación se ejemplifican estos dos casos de compensación.

5.3.1. Reactivos lineales y no-lineales.

El análisis en el dominio del tiempo ofrece la posibilidad de disponer de la forma de onda de la potencia reactiva instantánea, $r(t)$.

De la fórmula general,

$$p(t) = a(t) + r(t),$$

se ve que restando $r(t)$ a la anterior expresión, el sistema solamente conserva la potencia instantánea activa (lineal o no-lineal). La corriente instantánea de compensación que deberá inyectar el compensador en la red, será:

$$i_{\text{comp}}(t) = \frac{r(t)}{v(t)}.$$

La $i_{\text{comp}}(t)$ puede ser sintetizada mediante el convertidor de potencia adecuado.

5.3.2. Compensación completa de la $p(t)$.

Dado el modelo propuesto y de acuerdo a lo establecido por el antes citado Grupo de Trabajo del IEEE [44] en el sentido de que más del 99% de la potencia activa se debe a la fundamental, se presenta a continuación la técnica que parte del hecho que la red espera ver una carga resistiva y así proveer una forma de onda senoidal de corriente, en fase con la tensión senoidal de pulsación ω , aplicada al sistema en cuestión.

Si este sistema consume P , se espera que la expresión de $p_c(t)$, donde el subíndice "c" indica "potencia instantánea compensada", sea:

$$p_c(t) = P(1 - \cos 2\omega t). \quad (5.1)$$

La “potencia instantánea compensada”, llamada también potencia instantánea lineal, en otra parte del trabajo, es la provista por la red a una carga compensada, o sea, puramente resistiva. La expresión de la corriente a través de la carga compensada (equivalente a una hipotética resistencia de valor R) es:

$$i_c(t) = \frac{\sqrt{2}V}{R} \text{sen}(\omega t),$$

y la potencia instantánea lineal es:

$$p_c(t) = \frac{\sqrt{2}V}{R} \text{sen}(\omega t) \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) = \frac{2V^2}{R} \text{sen}^2(\omega t) \quad (5.2)$$

Dado que (ecuación (1.3)),

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5.3)$$

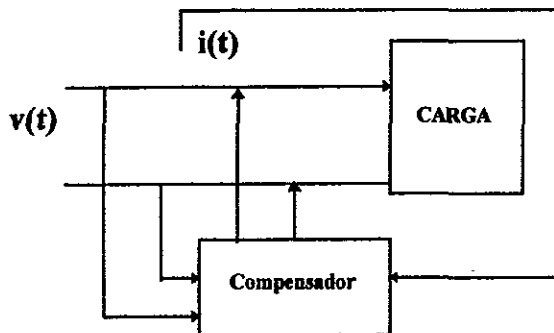
Reemplazando (5.3) en (5.2), resulta (5.1),

$$p_c(t) = P(1 - \cos 2\omega t).$$

La potencia de compensación, $p_{\text{comp}}(t)$ para un sistema que consume instantáneamente $p(t)$, sin compensar, deberá ser,

$$p_{\text{comp}}(t) = p_c(t) - p(t)$$

El siguiente esquema ilustra el esquema general de un compensador en paralelo con la carga.



Gráfica 5.2
Esquema general de la compensación

La red de distribución “ve” una nueva carga: el compensador, alimentado con $v(t)$, en paralelo con la carga original.

5.4. Ejemplos de aplicación en compensadores.

Se presentan a continuación dos ejemplos de aplicación de la descomposición, propuesta en el trabajo, como base teórica para la realización de compensadores. En los ejemplos se muestra la forma de onda de la corriente necesaria para la compensación. El dispositivo a utilizar como compensador deberá generar la forma de onda propuesta e inyectar esta corriente en la red. En ambos casos se considera una red de distribución en baja tensión donde la excitación viene dada por:

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$

Los valores asignados a los parámetros de los circuitos son arbitrarios.

5.4.1. Reactivos lineales y no-lineales.

Caso de estudio: 2 SCR's en antiparalelo y carga R-L.

$$R := 500 \Omega \quad L := 1.3H \quad Z := \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \Omega \quad \phi := \text{atan}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

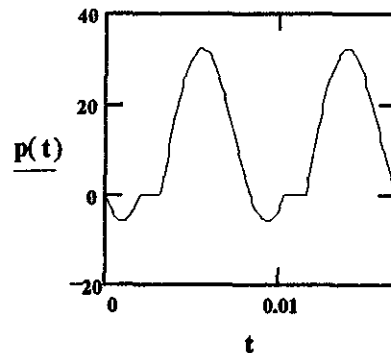
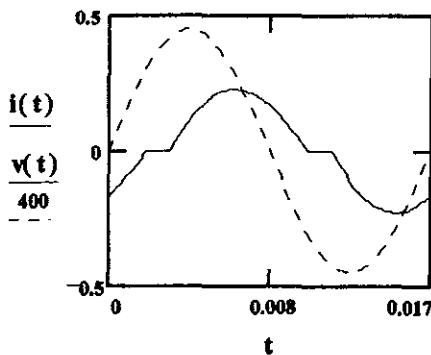
Ángulo de disparo de los SCR's: $\alpha := 1.2$ radianes

Definición de la corriente [62]:

$$i_1(t) := \frac{V}{Z} \left[\sin(\omega \cdot t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) \cdot \exp\left[\left(\frac{R}{L}\right) \cdot \left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)\right] \right]$$

$$i_2(t) := \text{if}\left(t > \frac{\alpha}{\omega}, i_1(t), 0\right) \quad i_3(t) := \text{if}(t > .0103, 0, i_2(t)) \quad i_4(t) := -i_3\left(t + \frac{\pi}{\omega}\right)$$

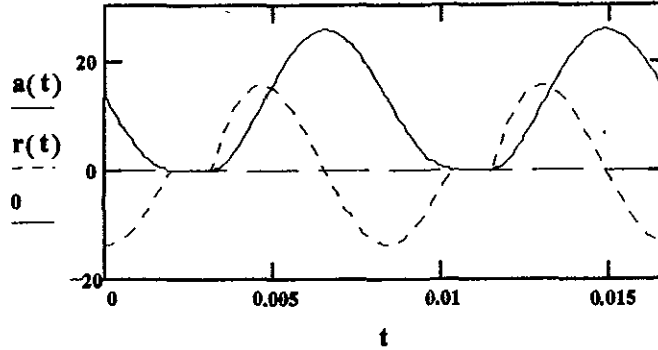
$$i(t) := i_3(t) - i_3\left[t - \left(\frac{\pi}{\omega}\right)\right] + i_4(t) \quad \text{La potencia instantánea: } p(t) := v(t) \cdot i(t)$$



Cálculo de a(t) yr(t):

$$P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad Req := \frac{P}{I^2}$$

$$a(t) := i(t)^2 \cdot Req \quad r(t) := p(t) - a(t)$$



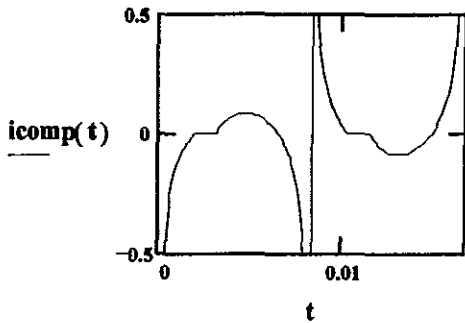
Gráfica 5.5
Potencias instantáneas activa y reactiva, a(t) y r(t)

Compensación de reactivos lineales y no-lineales

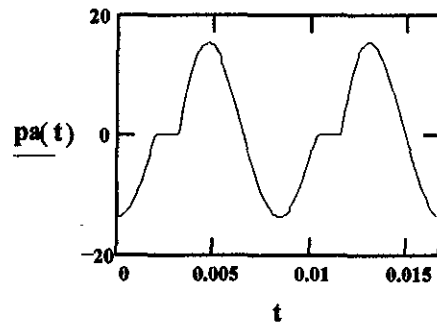
$$i_{comp}(t) := \frac{r(t)}{v(t) + .01}$$

Con esta técnica de compensación la potencia provista por el compensador (alimentado con v(t)), pa(t), será:

$$pa(t) := v(t) \cdot i_{comp}(t)$$



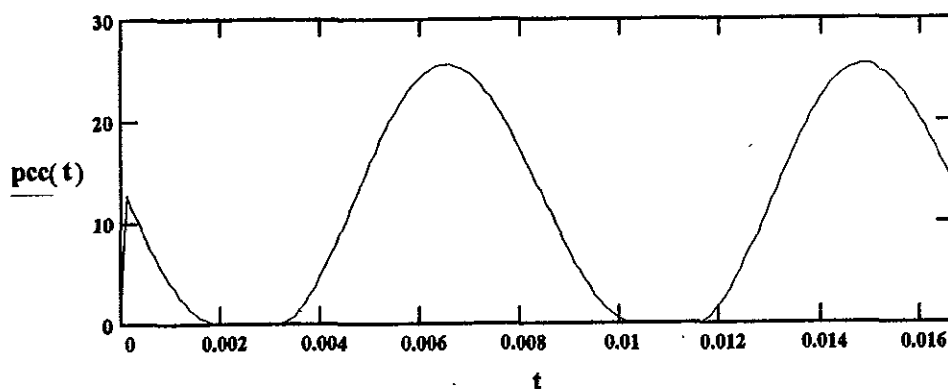
Gráfica 5.6
Corriente de compensación



Gráfica 5.7
Potencia de compensación

Al inyectar en la red la potencia $p_a(t)$, la potencia instantánea entregada por aquella al conjunto carga-compensador, será:

$$p_{cc}(t) := p(t) - p_a(t)$$



Gráfica 5.8

**Potencia instantánea luego
de la compensación**

De la comparación de las gráficas 5.5 y 5.8 se ve que se compensaron los reactivos lineales y no-lineales; $p_{cc}(t)$ es idéntica a $a(t)$.

5.4.2. Compensación completa, caso de diodo y carga R.

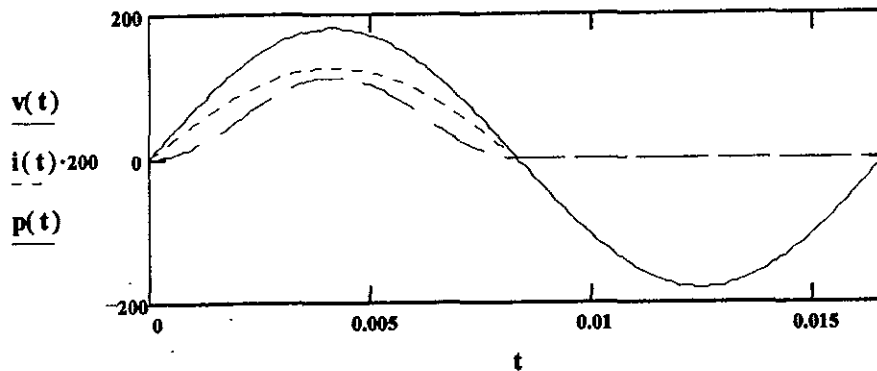
$$R := 287 \ \Omega$$

Definición de la corriente:

$$i(t) := \text{if}\left(t < \frac{\pi}{\omega}, \frac{v(t)}{R}, 0\right) \quad \text{La corriente eficaz: } I := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

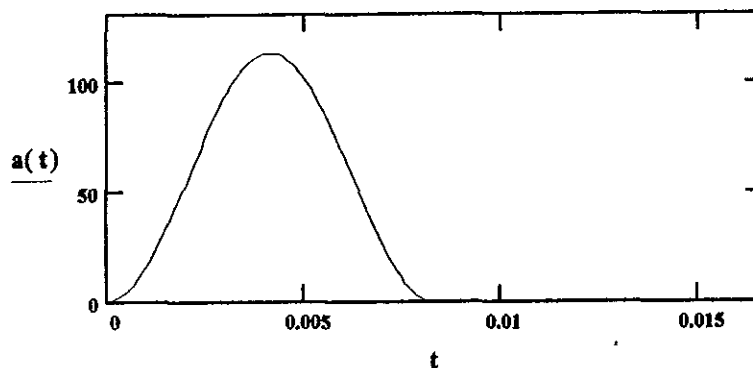
$$p(t) := i(t) \cdot v(t) \quad P := \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad P = 28.099 \text{ W}$$

$$\text{Cálculo de la resistencia equivalente: } R_{eq} := \frac{P}{I^2} \quad R_{eq} = 287 \ \Omega$$



Gráfica 5.9
Tensión, corriente y potencia instantánea

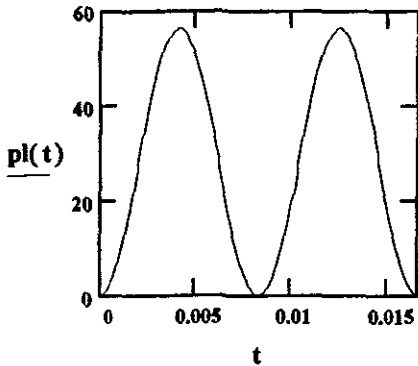
$$\text{Descomposición de la } p(t): \quad a(t) := R_{eq} \cdot i(t)^2 \quad r(t) := p(t) - a(t) \quad r(t) := 0$$



Gráfica 5.10
Potencia activa instantánea

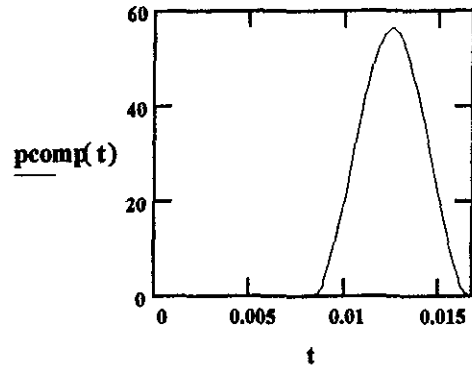
La línea "espera" proveer a la carga una potencia lineal, $p_l(t)$. En este ejemplo no hay componente $r(t)$ por no haber reactivos en el sistema. La potencia instantánea que deberá entregar el compensador será $p_{comp}(t)$.

$$p_l(t) := P \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t))$$



Gráfica 5.11
Potencia "lineal" instantánea

$$p_{comp}(t) := p_l(t) - p(t)$$

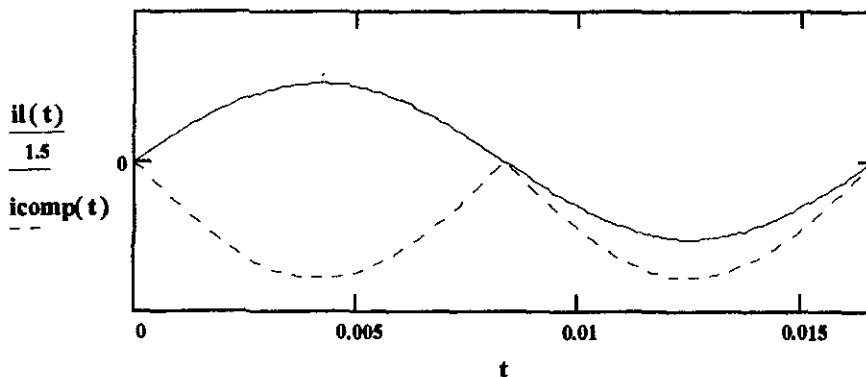


Gráfica 5.12
Potencia de compensación

El compensador, alimentado con $v(t)$ deberá inyectar una corriente $i_{comp}(t)$ a la línea, de tal modo que ésta "vea" al conjunto carga-compensador como una nueva carga que demanda una corriente "lineal", $i_l(t)$.

$$i_l(t) := \frac{p_l(t)}{v(t)}$$

$$i_{comp}(t) := \frac{p_{comp}(t)}{v(t)}$$



Gráfica 5.13
Corriente "lineal" y corriente de compensación.

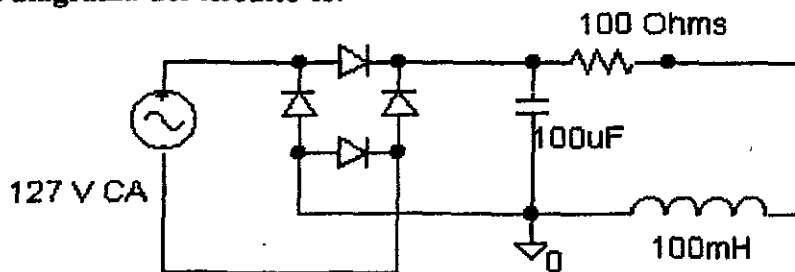
5.5. Medición del consumo.

En el capítulo 3 se comentó el hecho de que los modelos derivados de la descomposición de la corriente de línea en una componente activa y una reactiva indican siempre que la potencia activa instantánea es una función de una senoide cuadrática.

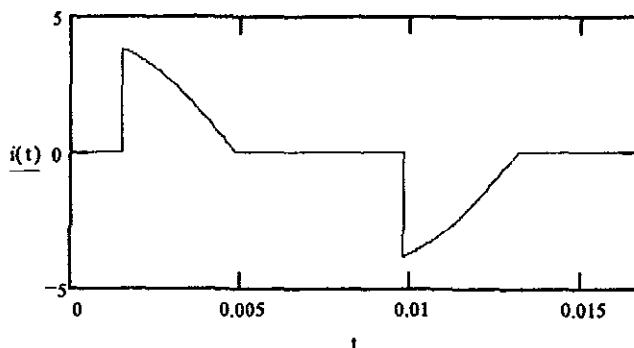
Bajo este criterio un medidor de consumo con un ancho de banda igual al doble de la frecuencia de línea (60 Hz) sería capaz de registrar el consumo real de un usuario cualquiera. Los reportes [8 ,9] respecto a los errores en la medición de esta variable y a la reciente realización de medidores de consumo más precisos [13, 14] indican que el supuesto respecto a la forma de onda de la potencia instantánea activa han sido erróneos.

El cómputo de la $a(t)$, efectuado mediante la técnica expuesta en este trabajo, permite seleccionar el ancho de banda apropiado del integrador que evalúa la potencia promedio, P . Éste deberá ser mayor o igual al ancho de banda de la señal $a(t)$ [65] de acuerdo a la precisión buscada en la medición del consumo.

A modo de ejemplo, se calculará el ancho de banda requerido para un registro del consumo, con un error menor al 1%, de una fuente de alimentación lineal provista de carga R-L. El diagrama del circuito es:



Gráfica 5.14
Fuente de alimentación con carga R-L



Gráfica 5.14
Corriente instantánea en la fuente

La expresión de la corriente, en serie de Fourier, es:

$$i(t) = .704\text{sen}(\omega t) + .113\text{sen}(3\omega t) - .251\text{sen}(5\omega t) + \dots + .045\text{cos}(\omega t) - .565\text{cos}(3\omega t) + \dots$$

Dado que la tensión de alimentación es:

$$v(t) = \sqrt{2} V\text{sen}(\omega t),$$

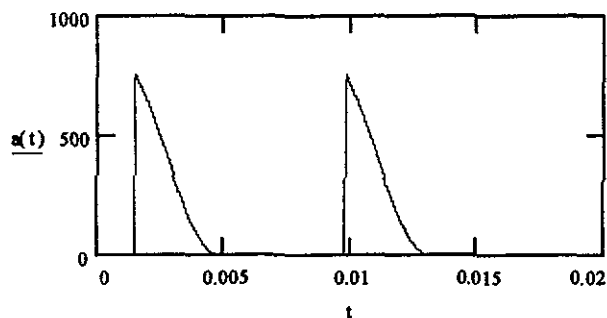
se tiene que:

$$p(t) = i(t)v(t) = \sqrt{2} V\text{sen}(\omega t)i(t)$$

De la aplicación del modelo resulta que $R_{eq} = 52.28 \Omega$.

Utilizando la ecuación (3.11),

$$a(t) = i^2(t)R_{eq}$$



Gráfica 5.15
Potencia activa instantánea, a(t)

A través del análisis de Fourier de $a(t)$ se encuentra que existen componentes de la potencia activa instantánea de amplitud menor al 1% a partir de los 6.6 KHz. Seleccionando este ancho de banda para el diseño del wathhorímetro es posible realizar la medición del consumo con el error deseado.

6. Conclusiones.

6.1. Introducción.

En la introducción del trabajo y la revisión de la literatura se comentó detalladamente acerca de lo que se ha conseguido en el desarrollo de la teoría de potencia de circuitos eléctricos; después de cien años de avance en su formulación solamente está bien establecida la que estudia los sistemas balanceados y con formas de onda de tensión y corriente senoidales. Se sabe, además, cuales fenómenos producen un incremento de la corriente eficaz, como compensar circuitos con cargas no-lineales y así mejorar el factor de potencia.

La aplicación o implementación de una técnica inadecuada o aún incorrecta de análisis de la potencia (teoría) puede, en la práctica, tener implicaciones técnicas y financieras durante un largo período dada la magnitud de las inversiones de capital y recursos ocupados por los prestadores del servicio eléctrico.

Al tratar con sistemas eléctricos siempre están presentes dos visiones: la del usuario quien desea una onda de tensión senoidal y que se le cobre por la energía útil que esta senoide desarrolla en su equipo y la del prestador del servicio, para quien lo importante es contar con sistemas de distribución sin pérdidas y cobrar lo justo a los usuarios.

Se considera que el presente trabajo aporta un modelo que, desde la óptica del prestador del servicio, permite la medición correcta del consumo a la vez que ofrece información, en el dominio del tiempo, para el desarrollo de compensadores.

6.2. Generales.

Se presentó un modelo, en el dominio del tiempo, para la descomposición de la potencia instantánea $p(t)$, con claro sentido físico e ingenieril (aplicabilidad). La metodología se comprobó en sistemas (cargas) cuyo modelo es conocido, y para los cuales los flujos de transferencia de energía entre fuente y carga son identificables y no están sujetos a discusión en lo referente a su existencia y su sentido.

Dada la controversia que ha generado la descomposición de la potencia instantánea, $p(t)$, a partir de la suposición de dos componentes, activa y reactiva, de la corriente de línea, la formulación del modelo planteado se basa en un principio de la física clásica: el de conservación de la energía. En base a las ecuaciones de Maxwell y a la ley de Joule se encuentran las componentes de la potencia instantánea.

A diferencia de otros modelos, no se intenta la adaptación del modelo clásico ($S^2=P^2+Q^2$) a las nuevas condiciones de los sistemas eléctricos ni se introducen términos cuestionables como lo es, por ejemplo la llamada potencia de distorsión D, por su no-existencia física.

El promedio de $a(t)$ es P. Así una medición adecuada del consumo P, en un intervalo determinado, implica necesariamente, para el caso de cargas no-lineales, la utilización de integradores (watthorímetros) de ancho de banda suficiente, ya que la $a(t)$ puede tener componentes de frecuencia muy superiores a los 60Hz.

Si el sistema posee no-linealidades pero no posee elementos capaces de almacenar energía y reintegrarla a la línea, solamente existe $a(t)$, utilizable para la evaluación del consumo real y eventualmente la compensación de no-linealidades, no así la $r(t)$. El modelo propuesto es, de alguna manera, el regreso al viejo modelo de dos componentes para la potencia eléctrica [1], la diferencia radica en el hecho de que $a(t)$ y $r(t)$ incluyen los efectos de las no-linealidades del sistema bajo estudio.

En el capítulo 3 se comparó el modelo propuesto con tres de los más difundidos. En cada caso se explicó las razones de sus inconsistencias, a la vez que se reforzó la idea de las bondades del modelo de descomposición propuesto .

En definitiva el modelo propuesto permite expresar la potencia instantánea activa o de transformación, mediante una función, $a(t)$, de claro sentido físico y, como se mostró en el capítulo 5, utilizable para una medición correcta y diseño de equipos de compensación. La $r(t)$, por su parte, ofrece la posibilidad de disponer de una expresión en el dominio del tiempo utilizable para la síntesis de compensadores y, si es necesario, el cálculo de la energía que se almacena en el sistema.

La aplicación del modelo de descomposición planteado en el trabajo, permite cualquier forma de compensación de acuerdo a las consideraciones económicas o de interferencia relevantes. Así, a partir del conocimiento de $r(t)$ es posible la compensación de los reactivos lineales y no-lineales y el conocimiento de $a(t)$ permite la realización de compensadores capaces de eliminar las no-linealidades de la energía de transformación.

6.3. Temas abiertos para futuros proyectos de investigación.

6.3.1. La realización de compensadores mediante las bases ofrecidas por nuestro método de descomposición de $p(t)$, deberá ser comparada con las formas actuales de realización: filtros activos controlados mediante microprocesadores.

6.3.2. El trabajo presentado trata con sistemas monofásicos. La extensión del modelo a sistemas trifásicos con carga no-lineal y/o desbalanceado permitirá extender los alcances de la técnica de realización de compensadores propuesta.

6.3.3. En el texto se definió el concepto de impedancia instantánea. Se considera que este es un concepto que merece más atención y estudio por el hecho de que puede ofrecer un camino alternativo a las metodologías de análisis del comportamiento de circuitos con cargas arbitrarias, no-lineales y/o variantes en el tiempo.

7. Apéndice.

1. Registros realizados en el marco de un proyecto del Programa Universitario de Energía (PUE), en subestaciones ubicadas en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Las gráficas 7.1 y 7.2 muestran, respectivamente, la forma de onda de la tensión y la corriente en el edificio principal en noviembre de 1996.

2. Registros realizados durante un estudio patrocinado por el PUE. Las gráficas 7.3 y 7.4 muestran el registros de ondas de corriente en la planta de Computadoras Tandem, Guadalajara, Jal., 1994.

3. Reporte de registros realizados por P. Strafford [66]. Gráficas 7.5, 7.6 y 7.7.

4. Registros realizados por personal del Departamento de Transmisión y Distribución del Instituto de Investigaciones Eléctricas en las oficinas centrales de CAPUFE en Cuernavaca, Morelos. Gráficas 7.8, 7.9 y 7.10.

Gráfica 7.1.

ANALISIS DE DISTORSION ARMONICA - TENSION -
Edificio principal
FECHA: 3-2-94 HORA: 12:35



ARMONICA #	%	ARMONICA #	%
3	1.32	15	0.18
5	1.01	17	0.18
7	0.43	19	0.15
9	0.33	21	0.12
11	0.26	23	0.11
13	0.16	25	0.12

FACTOR DE DISTORSION : 1.81 %

Gráfica 7.2.

ANALISIS DE DISTORSION ARMONICA - CORRIENTE -
Edificio principal
FECHA: 3-2-94 HORA: 12:38



ARMONICA #	%	ARMONICA #	%
3	2.87	15	0.22
5	1.43	17	0.20
7	0.59	19	0.21
9	0.44	21	0.16
11	0.33	23	0.16
13	0.27	25	0.14

FACTOR DE DISTORSION : 3.34 %

Gráfica 7.3.



THDi = 14.2 %

ORDEN DE LA ARMONICA	%
3	9.93
5	9.55
7	2.13
9	2.36
11	.3

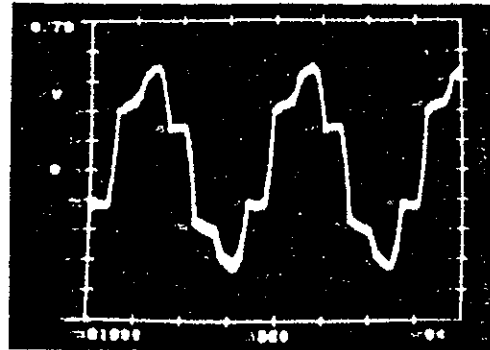
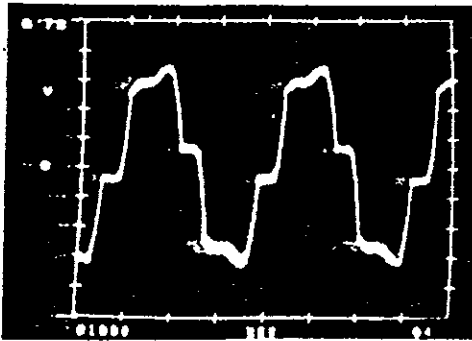
Gráfica 7.4.



THDi = 28.48 %

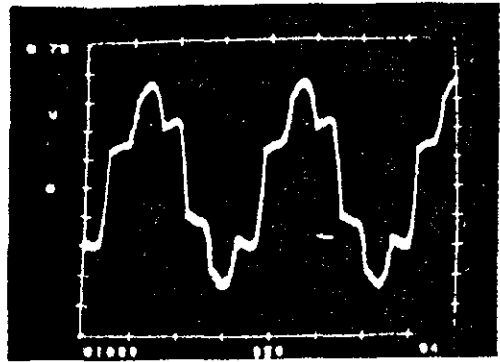
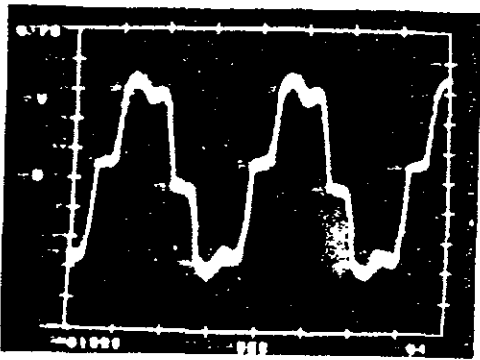
ORDEN DE LA ARMONICA	%
3	12.86
5	15.48
7	5.62
9	1.6
11	.5

Gráfica 7.5.



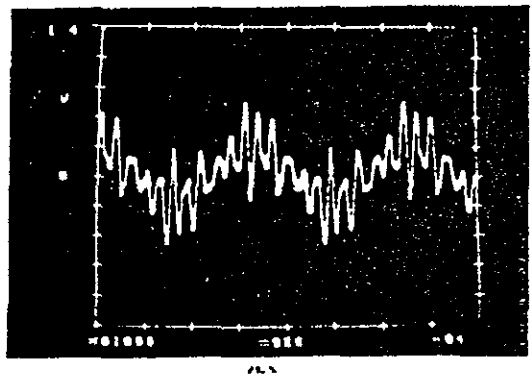
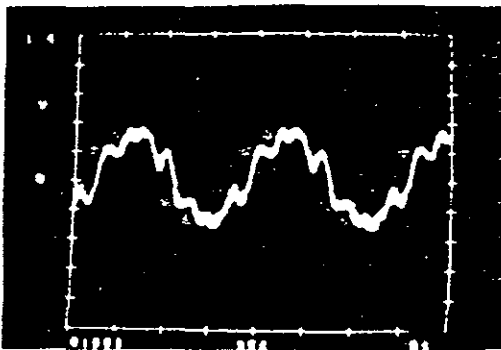
Registro de la corriente en un transformador Δ - Δ y en uno Δ -Y

Gráfica 7.6.



**Registro de la corriente en un transformador Δ - Δ y en uno Δ -Y.
(diferente contenido armónico)**

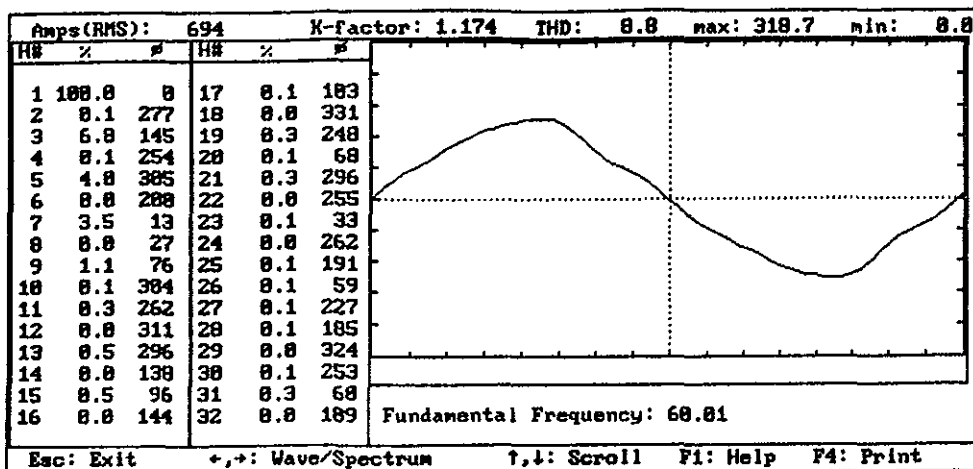
Gráfica 7.7.



Registro de la corriente en el banco de capacitores.

Gráfica 7.8.

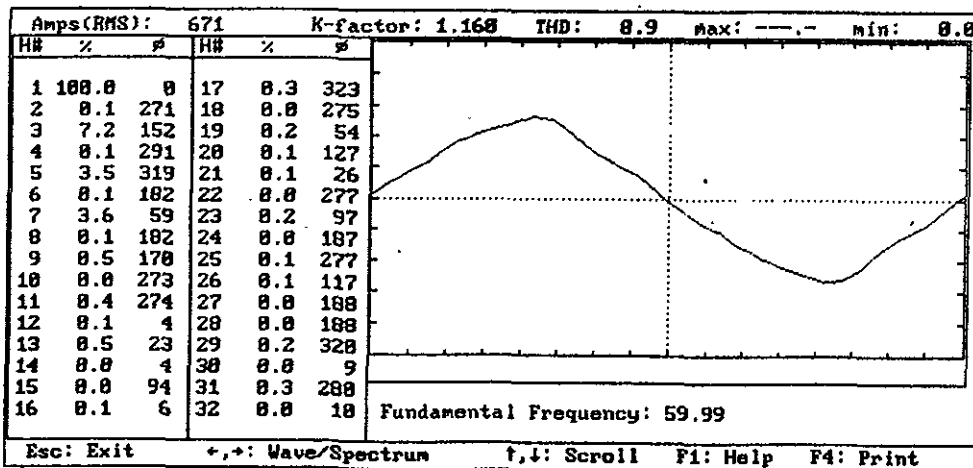
Meter: 0001 PHASE C CURRENT ANALYSIS start time: 19:36:18 06-16
current time: 19:51:20 06-16



ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Gráfica 7.9.

Meter: 0001 PHASE A CURRENT ANALYSIS start time: 19:36:18 06-16
current time: 19:36:18 06-16



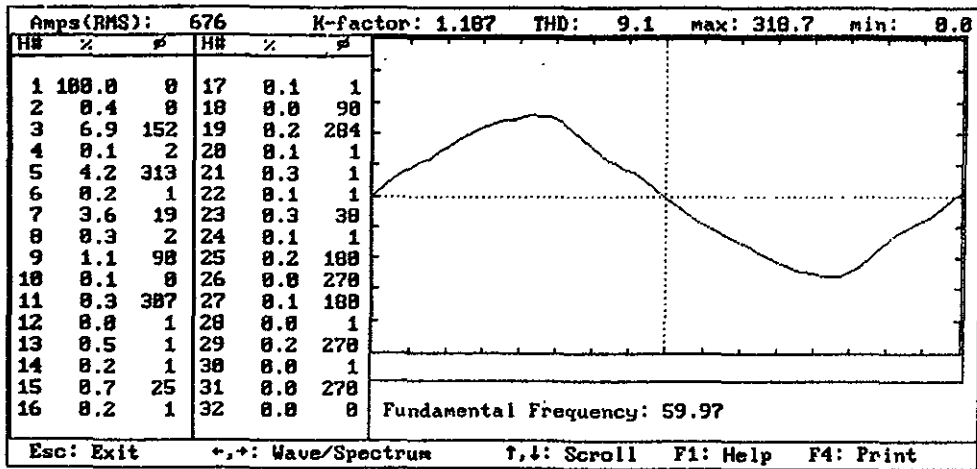
Gráfica 7.10.

Meter: 0001

PHASE C CURRENT ANALYSIS

start time: 19:36:18 06-16

current time: 20:06:30 06-16



8. Referencias.

- 1. Steinmetz, C., "Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena", McGraw-Hill, New York, 1897.**
- 2. First International Conference on Power Quality. End User Applications and Perspectives, Gif-Sur-Yvette, París, Francia, Octubre 15-18, 1991.**
- 3. Stratford, R., Capacitors on AC system having large rectifier loads, Industrial Power Systems, Vol. 4, No. 1, 1961.**
- 4. Lowestein, M. , Zucker, M, Controlling Harmonics While Improving Power Factor, Electrical System Design, Marzo, 1988, págs. 38-44.**
- 5. Czarnecki, L., Power Theory of Electric Circuits: Common Data Base of Power Related Phenomena and Properties, European Transactions on electric Power, ETEP, Vol. 4 No. 6, Noviembre, 1994, págs. 491-498.**
- 6. IEEE Working group, Power line Effects on communication Line Interference, "IEEE Tutorial Course: Power System Harmonics", IEEE, 1984.**
- 7. Meliopoulos, A. , Chekravarhi, K. & Ortmeier, T., Effects of Harmonics on Power System Equipment and Loads, "IEEE Tutorial Course: Power System Harmonics", IEEE, 1984.**
- 8. Bagzouz, T. & Owen, T., Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter Performance, IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-104, No. 2, Febrero, 1985, págs. 399-406.**
- 9. Stevens, R., Harmonics and Related Factors Affecting Metering Accuracy, "IEEE Tutorial Course, Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performancs of Meters and Definitions of Power", 1990, págs. 61-66.**
- 10. Watanabe, E., & Stephan, R., New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electric Systems With Generic Loads, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, Abril, 1993, págs. 697- 703.**
- 11. Nowomiejski, G., Generalized Theory of electrical Power, Archiv für Elektrotechnik, No. 63, 1981, págs. 175-182.**
- 12. Enslin, R., Measurement and Compensation of Fictitious Power Under Nonsinusoidal Voltage and Current Conditions, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Vol. 37, No. 3, Septiembre, 1988, págs. 403-408.**
- 13. López, R. , Montañó, J.C., Reactive Power Meter for Nonsinusoidal systems, Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol 26, No. 3, Septiembre, 1977, págs. 258-260.**
- 14. Matouka, M., A Wide Range Digital Power/Energy Meter for Systems with Nonsinusoidal Waveforms, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 29, No. 1, Febrero, 1982, págs. 18-27.**
- 15. Czarnecki, L., Measurement Principle of a Reactive Power Meter for Nonsinusoidla Systems, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol 30, No. 3, Septiembre, 1981, págs. 209-212.**
- 16. Tanaka, T., A New Mwthod of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Acive Power in Three-Phase Circuits, trabajo presentado en la Reunión de Invierno de Potencia, 95 WM 037-2 PWRD,**

17. Peng, Z., **Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power System**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement , Vol 45, No. 1, Febrero, 1996, págs 293-298.
18. López, R. et al, **Reactive Power Meter for Nonsinusoidal Systems**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM 26 , No. 3, Septiembre, 1977, págs 258-260.
19. Filipski, P., **The Measurement of Distorsion Current and Distorsion Power**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol IM 33, No. 1, Marzo, 1984, págs. 36-40.
20. Willems, J., **Comentario al artículo Some Considerations about the Best Approach to the Study of Electric System under Non-Sinusoidal Conditions: Frequency-Domain or Time-Domain Approach ?**, de A. Ferrero. Presentado en el "2nd International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions", Stresa, Italia, Setiembre 8-10, 1993.
21. **IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, A Survey of North American Electric Utility Concerns Regarding Nonsinusoidal Waveforms**, presentado en el 1995 PES-IEEE- Winter Meeting.
22. Emanuel, A., **Effects of Voltage and Current Distortion on Iron and Cooper Losses**, publicado en el IEEE Power System Harmonics: Totorial Course, 1984.
23. Rodríguez, E. & Arau, J., **Corrección del Factor de potencia en Sistemas de alimentación Conmutados**, 1er. Seminario de Electrónica del CENIDET, Cuernavaca, Mor., Agosto 5-7, 1998.
24. Arseneau, R. et al, **Application of IEEE Standard 519-1992 Harmonic Limits for Rvenue Billing Meters**, presentado en la Reunión de Invierno de Potencia, 96 WM 085-1 PWRD.
25. Velazquez, R. **Comunicación personal**.
26. Elliot, D., **"Fast Transforms Algorithms, Analyses, Applications"**, Academic Press, London, 1988.
27. Cox, M. D. & Baghzouz, Y., **A Review of Power According to the IEEE Standard Dictionary**, IEEE Tutorial Course, Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performancs of Meters and Definitions of Power, 1990, págs. 31-36.
28. Czarnecki, L., **Comments on Active Power and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry**, Power Engineering Society Winter Meeting, Enero 21-25, 1996.
29. Zeveke, G. & Ionkin, P. , **"Principios de Electrotecnia"**, Vol 1., Grupo Editor de Buenos Aires, 1967.
30. Czarnecki, L., **Misinterpretations of some Power Properties of Electric Circuits**, Power Engineering Society Winter Meeting, Enero 30, Febrero 3, 1994.
31. Shepherd, W. & Zand, P., **"Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits"**, Cambridge University Press, 1979.
32. Czarneki, L., **Comparison of power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveform**, IEEE Tutorial Course, Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performancs of Meters and Definitions of Power, 1990, págs. 43-50.

33. Kluster, N. & Moore, V., On the definition of Reactive Power Under Non-Sinusoidal Conditions, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, Sept/Oct. 1980, págs. 1845-1853.
34. Marshall, D., et al, A Comparative Evaluation of Power Theories, presentado en el 2nd Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Stressa, Italia, Septiembre 8-10, 1993.
35. Czarnecki, L., Comment on "Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems: In search of a Physical Meaning and a Better Resolution", European Transactions on Electric power, ETEC Vol. 4, No. 5, 1994.
36. Ferrero, A., Some considerations about the Best Approach to the Study of Electric Systems under Non-Sinusoidal Conditions: Frequency-Domain or Time-Domain Approach ?. European Transactions on Electric power, ETEC Vol. 4, No. 5, 1994.
37. Czarnecki, L., Power Theory of Electric Circuits: Common Data Base of Power Related Phenomena and Properties, European Transactions on Electric Power, ETEP Vol 4, No. 6, 1994, págs. 491-498.
38. Slonim, M & Van Wyk, J., Power components in a system with sinusoidal and nonsinusoidal voltages and/or currents, IEE Proceedings, Vol. 135, Pt., B, No. 2, Marzo, 1988, págs. 76-84.
39. Budeanu, C., "The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal system," Rumanian National Institute, No. 2, 4, 1927.
40. Emanuel, A., Powers in Nonsinusoidal Situations A Review of Definitions and Physical Meaning, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5 No. 3, Julio, 1990, págs. 1377-1389.
41. Fryze, S., Active-, reactive-, and apparent powers in networks with non-sinusoidal waveforms of voltage and current, Przegl. Elektr., No. 7, 8, 1931.
42. Depenbrock, M., Wirk-, und Blindleistung, ETG-Fachtagung "Blindleistung" Aachen, Octubre, 1979.
43. Page, C., Reactive Power in Nonsinusoidal Situations, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-29, No.4, Diciembre, 1980, págs. 420-423.
44. IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definitions of Power, Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads; a Discussion, IEEE/PES Winter Meeting, Enero 29, Febrero 2, 1994, págs. 79-101.
45. Filipski, P., A New Approach to Reactive Current and Reactive Power Measurement in Nonsinusoidal Systems, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. IM 29, No. 4, Diciembre, 1980, págs. 423-426.
46. Apostol, T., "Linear algebra", Wiley, NJ, 1997.
47. Czarnecki, L., Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-34, No. 3, Septiembre, 1985, págs. 399-404.
48. Joule, J. P., "The Scientific Papers", Publicado por The Physical Society of London, London, 1884.
49. Plonus, M., "Applied Electromagnetics ", Mc Graw Hill, NY, 1978.

50. Nikolski, V., "Electrodinámica y propagación de ondas de radio", Editorial Mir, Moscú, 1976.
51. Desoer, C. & Kuh, E., "Basic Circuit Theory", McGraw-Hill International Edition, 1969, págs. 321-322.
52. Baud, J.C., Mesures de valeurs efficaces avec les multimètres numériques ou analogiques, *Electronique Applications*, No. 5, 1978, págs. 137-142.
53. de La Peña, L., Comunicación personal.
54. Kouril, F. & Vrba, K., "Non-Linear and Parametric Circuits", Halsted Press: a division of John Wiley & Sons, NY, 1988.
55. Hart, D., "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, NY, 1997.
56. Rashid, M., "Electrónica de Potencia", Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1995.
57. Serway, R., "Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics", Harcourt Brace & Co., NY, 1990.
58. Arlken, G. & Griffing, D., "University Physics", Academic Press, Boston, 1989.
59. Halliday, D., & Resnick, R., "Física, parte 2", Compañía Editorial Continental, México, 1978.
60. Kuo, B., "Sistemas de control digital", CECSA, México, 1997.
61. Dewan, S., "Power Semiconductor Devices", Wiley, NY, 1971.
62. Cárdenas, V., Echavarría, R., Nuñez, C. & Martínez, S., Calidad en la Potencia eléctrica (Power Quality): Eliminación de Armónicos de Corriente mediante Filtros Activos, 1er Seminario de Electrónica del CENIDET, Cuernavaca, Mor., Agosto 5-7, 1998, págs. 65-71.
63. Pryce, D., Specialized IC's correct power factor in switching supplies, *EDN*, Julio, 1991, págs. 106-114.
64. Strassberg, D., Power-factor-corrected switching power supplies, *EDN* Abril 11, 1991, págs. 90-97.
65. Proakis, J., "Digital Communications", 3^{era} Edición, McGraw Hill, Inc. NY, 1995.
66. Stratford, R., Harmonic pollution on Power systems-A Change in Philosophy, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol IA-16, No. 5, Sept./Oct., 1980, págs. 43-49.