

Introducción General

1.1 Antecedentes

Durante muchos años, las cargas conectadas a los sistemas eléctricos se constituían básicamente de elementos con características lineales, tanto resistivas (alumbrado incandescente, calefacción, etc.) como inductivas (motores, alumbrado fluorescente, etc.) siendo la corriente resultante en la mayoría de los casos atrasada en relación a la tensión debido al predominio de cargas inductivas. Como consecuencia, el factor de potencia (o simplemente el factor de desplazamiento) resultante es bajo, más puede ser conducido a un valor próximo a la unidad por medio de la instalación de bancos de capacitores en paralelo con las cargas.

En los últimos años, con la utilización de convertidores estáticos en las diversas aplicaciones, la inyección de elevado contenido armónico de corriente al sistema eléctrico pasó a ser un factor preocupante, pues el factor de potencia de las instalaciones se redujo por la distorsión de la forma de onda de corriente. Esta inyección de armónicos se debe principalmente a la naturaleza no lineal de las cargas conectadas al sistema, como por ejemplo, los equipos electrónicos industriales que utilizan

rectificadores a diodos o a tiristores, tanto monofásicos como trifásicos.

Debido a la creciente preocupación por la eficiencia de los equipos y la disponibilidad de dispositivos semiconductores de alta velocidad y potencia, las fuentes de alimentación conmutadas están siendo cada vez más empleadas en sistemas industriales, comerciales y también en los residenciales. La tendencia para los próximos años es que casi la totalidad de energía suministrada por las empresas o instituciones de gobierno será procesada electrónicamente. Basta observar que las simples lámparas incandescentes van siendo desplazadas por lámparas fluorescentes compactas (con balastro electrónico, pero sin dispositivo preregulador del factor de potencia) **[01]**.

Dentro de este contexto, se han adoptado políticas de racionalización del consumo de energía eléctrica que están siendo incentivadas. Una de las formas de racionalizar el consumo es obtenida a partir del uso de equipos electrónicos con procesamiento de energía optimizada, o sea, equipos que presenten elevado rendimiento del factor de potencia, obteniéndose a sí mismo un mejor uso de energía eléctrica.

En relación al **factor de potencia**, la obtención de elevados valores de éste, implica una reducción del contenido

armónico de las corrientes drenadas por tales equipos a la red de suministro de corriente alterna.

Elevar el factor de potencia de una estructura significa reducir la diferencia entre los valores de potencia consumida (KW) y potencia demandada (KVA) de la red de corriente alterna, en busca de igualdad entre tales valores **[02]**.

En aplicaciones industriales de potencia (arriba de 1 KW.), los sistemas con alimentación trifásica son los más generalmente recomendados, en donde la conversión CA-CD tiende a ser dominada por rectificadores convencionales a diodos y rectificadores controlados por tiristores, acoplados con filtros capacitivos con valores grandes. La característica no lineal de la corriente de entrada de estos rectificadores generan serias anomalías a la red de suministro de energía, como son las siguientes:

- Distorsión del voltaje de entrada debido a los altos picos de la corriente requerida por el rectificador, pudiendo perjudicar el funcionamiento de otros equipos conectados al mismo punto
- Inyección de alto contenido armónico en la corriente de entrada
- Incremento de pérdidas en las líneas de transmisión
- Reducción del factor de potencia a la entrada de la etapa de rectificación

- Necesidad de generar una gran cantidad de potencia reactiva, elevando el costo de todo el sistema
- Decremento en la eficiencia de la estructura, motivado por el alto valor eficaz de la corriente de entrada al rectificador
- Interferencia electromagnética en los sistemas de comunicación, control y otros equipos conectados a la red de distribución o a equipos cercanos al nuestro, y esto nos obliga a utilizar filtros EMI, sobredimensionados para soportar las altas corrientes de entrada
- Destrucción de la protección de sobrecorriente por los picos elevados de corriente

Todas estas anomalías descritas las sufren los sistemas monofásicos, pero también los sistemas trifásicos equilibrados fase a fase, y además, un sistema trifásico tiene problemas añadidos en el caso de estar desequilibrado; como por ejemplo:

- Para un sistema trifásico desequilibrado, si tenemos una alta distorsión armónica, tendremos corrientes no nulas por la línea de neutro. Esto puede traer graves problemas ya que la línea de neutro generalmente está dimensionada sólo para una fracción de la corriente de línea **[03]**.

1.2 Normatividad

Toda la influencia negativa que las fuentes de alimentación ejercen sobre la red eléctrica, ha llevado a las empresas del sector eléctrico a efectuar la medición del factor de potencia de las instalaciones tanto comerciales y sobre todo las industriales logrando con esto tener un valioso instrumento, ya que un elevado valor de THD (distorsión armónica total) es sinónimo de bajo factor de potencia.

Como resultado de esto, surgen normas reguladoras internacionales, nacionales, regionales y militares, con la finalidad de limitar los niveles de distorsión armónica de corriente inyectada a la red y reducir el nivel de interferencia electromagnética.

En 1975 la norma europea EN50006 fue presentada por la CENELEC (Comisión Europea para la Normalización Eléctrica) y sustituida en 1982 por la IEC-555 (Comisión Internacional Electrotécnica) y revisada en 1991.

Desde 1996 existen normas más estrictas sobre armónicos en el ámbito industrial tales como las normas IEEE-519 (IEEE: Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos) en el apartado de Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia.

La norma europea IEC-61000-3-4 (Compatibilidad Electromagnética parte 3-4: Limitación en Emisión de Corrientes

Armónicas en Sistemas de Potencia para Bajo Voltaje en Equipos Eléctricos y Electrónicos con Corriente de entrada menor o igual a 16 Amperes por fase) que aunque difiere de la IEEE-519 en naturaleza, ambas fijan un máximo de distorsión armónica permitida [04, 05].

En la mayoría de los países europeos, así como en Canadá, se rigen por los estándares publicados por la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC).

Para el caso de los límites de distorsión de armónicos de voltaje y de corriente se establece la Norma 61000-3-2 (que reemplaza a la Norma EN60555/2 a partir del año 2002), mostrada en la tabla 1.1 y 1.2 respectivamente [24].

Tabla 1.1

LIMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE (NORMA EN 61000-3-2)	
Orden de armónico (n)	Tasa máxima de armónicos de Voltaje (%)
ARMONICOS	IMPARES
3	0.85
5	0.65
7	0.60
9	0.40
11	0.40
13	0.30
15-39	0.25
ARMONICOS	PARES
2	0.30
4-40	0.20

Tabla 1.2
LIMITES DE DISTORSION DE CORRIENTE (NORMA EN 61000-3-2)

Orden de armónico (n)	Tasa máxima de armónicos de Corriente (%)
ARMONICOS	IMPARES
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15-39	$0.15 \left(\frac{15}{n} \right)$
ARMONICOS	PARES
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$(8 \leq n \leq 40)$	$0.23 \left(\frac{8}{n} \right)$

En respuesta a las necesidades impuestas por las nuevas normas, se ha hecho una investigación intensiva acerca de filtros armónicos, pero se ha dado aún una mayor prioridad a la investigación sobre una nueva generación de convertidores de potencia que deben cumplir con las características de: alto factor de potencia (lo más cercano a la unidad), baja distorsión de corriente sin necesidad de ningún filtro adicional, alta densidad de potencia, alta eficiencia y esquema simple de control. El requerimiento de alta eficiencia obliga al uso de convertidores conmutados; el requerimiento de baja interferencia electromagnética hace preferible el uso de

esquemas de conmutación a frecuencia constante mediante controladores PWM.

Existen distintos tipos de soluciones al problema de conversión CA/CD que cumplen con el requerimiento de corrección del factor de potencia y además buscan obtener una corriente sinusoidal de línea o sólo cumplir las normas existentes. El interés en soluciones que obtengan corriente de línea sinusoidal radica en que podrían satisfacer cualquier norma futura [06]; por lo que en este trabajo de tesis se presenta el "Estudio de un Rectificador Trifásico empleando un convertidor básico CD-CD Zeta Aislado", que logre formar parte de esa nueva generación de convertidores de potencia que satisfacen lo mejor posible las 4 características antes señaladas y merezca ser reconocido como Corrector de Factor de Potencia.

1.3 Las Armónicas y el Factor de Potencia

En el pasado, la responsabilidad de proveer una onda de voltaje de una sola frecuencia recayó en los suministradores de potencia eléctrica y en su mayoría, las cargas de los consumidores tuvieron un pequeño efecto sobre la forma de onda del voltaje. Suele producirse una desviación permanente (distorsión) de la onda de tensión respecto a una senoidal pura cuando funcionan máquinas eléctricas con núcleo magnético saturado y ciertos convertidores estáticos, tales como rectificadores, fuentes conmutadas y otras cargas no lineales.

En general, todos los convertidores electrónicos de potencia (incluyendo los utilizados para proteger cargas sensibles) pueden contribuir a aumentar el nivel de perturbaciones presentes en la red distorsionando la forma de tensión de las mismas debido a las corrientes armónicas inyectadas a la red.

Ahora bien, esta desviación de una sinusoidal pura es equivalente a sumar una o más ondas sinusoidales puras de diferente frecuencia de acuerdo al método propuesto por el matemático Francés Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822 [21]. Cualquier señal periódica puede ser representada como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)] \quad (1.1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (1.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (1.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (1.4)$$

De donde a_0 representa el valor medio de la función $f(t)$, a_n y b_n son los coeficientes de amplitud de Fourier.

Los coeficientes de amplitud son siempre cero o positivo de tal manera que entre mayor sea el valor de "n" el resultado es más exacto. Los senos y cosenos de una misma frecuencia pueden combinarse en una misma senoide, dando como resultado una expresión alternativa para una serie de Fourier como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n \omega_0 t + \theta_n) dt \quad (1.5)$$

$$\text{Donde } C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{y} \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-b_n}{a_n}\right)$$

O también puede ser:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \text{sen}(n \omega_0 t + \theta_n) dt \quad (1.6)$$

$$\text{Donde } C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

El término a_0 que es una constante, en aplicaciones eléctricas representa un voltaje o una corriente directa. El coeficiente C_n es la amplitud de cada una de las frecuencias tanto fundamental como de las armónicas; θ_n es el coeficiente de fase y su valor puede variar entre 0 y 2π radianes.

El valor eficaz de $f(t)$ se puede calcular a partir de la serie de Fourier:

$$F_{rms} = \sqrt{a_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1.7)$$

El grado de presencia de armónicas en una onda no sinusoidal pura ya sea de voltaje o corriente se evalúa por lo que se conoce como la Distorsión Armónica Total (DAT o THD, por sus siglas en inglés). El THD se puede definir de dos formas. La primera definición, muestra al THD como un porcentaje de la componente fundamental de la onda, y se designa como THD_F [22].

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{nrms}^2}}{V_{1rms}} \times 100\% \quad (1.8)$$

El término V_{1rms} es el valor rms de la componente fundamental y V_{nrms} es el valor rms de la componente armónica de orden "n". La ecuación anterior se da en términos del voltaje pero también es aplicable para la corriente.

En la opinión de algunos, la definición anterior exagera el problema armónico. Por lo que un método alternativo designado como THD_R calcula el THD como un porcentaje del valor rms total en lugar del valor rms de la componente fundamental. Esta definición es usada por la Canadian Standard Association (CSA) y la International Electrotechnical Commission (IEC) [23].

$$THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{nrms}^2}}{V_{rms}} \quad (1.9)$$

V_{rms} Es el valor eficaz total de la onda de voltaje, combinando (1.8) y (1.9) obtenemos:

$$THD_R = THD_F \left(\frac{V_{1rms}}{V_{rms}} \right) \quad (1.10)$$

Cuando un sistema de distribución de energía eléctrica se encuentra contaminado de componentes armónicas, el *valor total rms de la corriente* será mayor que el *valor rms de la componente fundamental*; debido a ello, el factor de potencia del sistema también será afectado.

Si las ondas de voltaje y corriente son sinusoidales puras y si el ángulo de desfase entre la onda de voltaje y la onda de corriente es θ , la potencia aparente del circuito puede encontrarse multiplicando la *magnitud rms del voltaje* (V_{rms}) por la *magnitud rms de la corriente* (I_{rms}). De esta manera el factor de potencia (FP) se define como la relación entre la potencia real (P) y la potencia aparente (S):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \theta}{V_{rms} I_{rms}} = \cos \theta \quad (1.11)$$

Para cargas lineales, el desfase entre el voltaje y la corriente resulta en valores diferentes para la potencia real y la potencia aparente.

La multiplicación de dos ondas sinusoidales de diferentes frecuencias crea una onda sinusoidal, cuyo valor promedio es cero. Así, ninguna de las corrientes de mayor orden produce potencia real si el voltaje tiene una sola frecuencia. De la ecuación (1.11) podemos escribir:

$$FP_{Tot} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{P}{V_{rms} I_{1rms} \sqrt{1 + \left(\frac{\%THD_F}{100}\right)^2}} \quad (1.12)$$

Donde THD_F se refiere a la distorsión armónica total de la corriente y FP_{Tot} es el llamado *factor de potencia total*, el cual algunas veces se le denomina *factor de potencia verdadero*.

El "IEEE Standard 519" define el factor de potencia total como la relación entre la potencia total de entrada, en watts, entre la potencia total aparente en voltamperes. Este factor de potencia puede descomponerse en dos factores, llamado uno *factor de desplazamiento* (FP_{desp}) y el otro *factor de distorsión* (FP_{dist}), el primero tiene que ver con el ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de voltaje y corriente y el otro factor depende de las componentes armónicas.

De la ecuación (1.12) obtenemos estos dos factores:

$$FP_{Tot} = \frac{P}{V_{1rms} I_{1rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\% THD_F}{100} \right)^2}} \quad (1.13)$$

$$FP_{desp} = \frac{P}{V_{1rms} I_{1rms}} \quad (1.14)$$

$$FP_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\% THD_F}{100} \right)^2}} \quad (1.15)$$

Estas tres ecuaciones son válidas sólo cuando el voltaje es senoidal y la corriente está distorsionada.

1.4 La Importancia de la Corrección del Factor de Potencia

Con la finalidad de demostrar la importancia de llevar a cabo la corrección del factor de potencia, se presenta el análisis de un rectificador trifásico (puente de Graetz) convencional a diodos, con un capacitor como filtro e inductores en la línea el cual se muestra en la fig.1.1.

Los parámetros seleccionados son:

$$V_a = 311 \text{ sen } (\omega t); \quad C_o = 100 \text{ } \mu\text{F}; \quad L_a = 1\text{mH};$$

$$V_b = 311 \text{ sen } (\omega t + 120^\circ); \quad R_o = 200 \text{ } \Omega; \quad L_b = 1\text{mH};$$

$$V_c = 311 \text{ sen } (\omega t - 120^\circ); \quad f_r = 60 \text{ Hz}; \quad L_c = 1\text{mH};$$

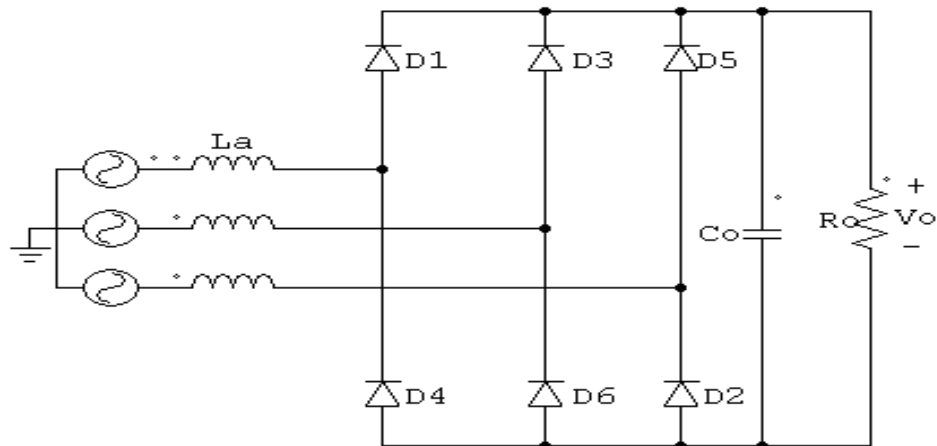


Fig. 1.1 Rectificador Trifásico a diodos, con filtro capacitivo e inductores en la línea

En la fig. 1.2 se presentan las formas de onda de voltaje y de corriente en las líneas de alimentación.

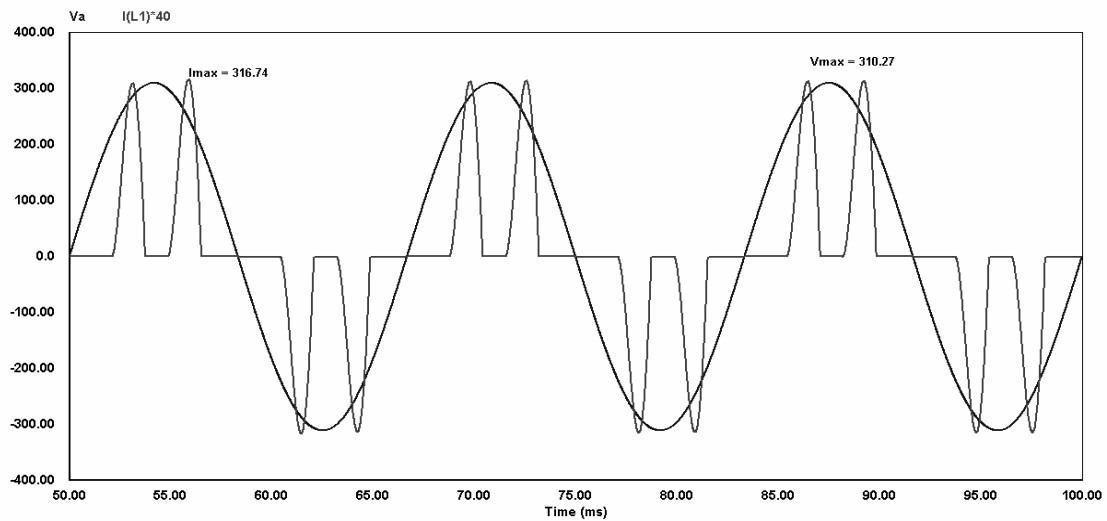


Fig.1.2 Tensión y corriente de fase A

En la fig. 1.3 se observa el espectro de frecuencia de las armónicas de corriente de la fase A (fundamental, 5a, 7a, 11a, 13a, 17a y 19a).

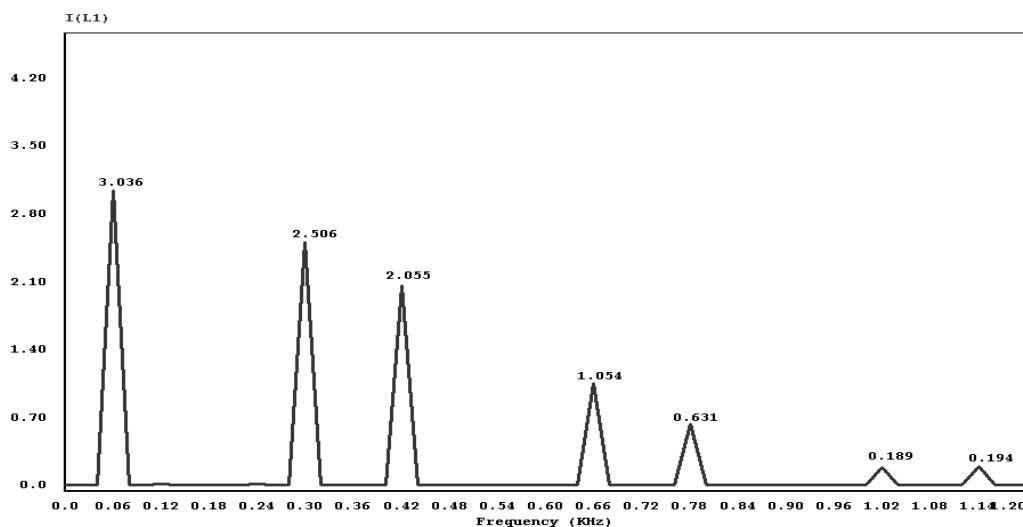


Fig. 1.3 Armónicos de corriente en fase A

A continuación se presentan los cálculos de la distorsión armónica total (THD) y del factor de potencia utilizando la ecuación (1.8) y simplificando tenemos en la tabla 1.3:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{19} I_{nrms}^2}}{I_{1rms}} \times 100 = \frac{\sqrt{1.77^2 + 1.45^2 + 0.74^2 + 0.44^2 + 0.13^2 + 0.27^2}}{2.14} \times 100 = 114\%$$

Tabla 1.3 Valores para obtener el THD

Armónico No.	Frecuencia Hz.	Componente en Amp rms	I^2 (amp)
1	60		-----
5	300	1.77	3.13
7	420	1.45	2.10
11	660	0.74	0.54
13	780	0.44	0.19
17	1020	0.13	0.01
19	1140	0.27	0.07

Σ	6.04
$\sqrt{\quad}$	2.45
THD	114%

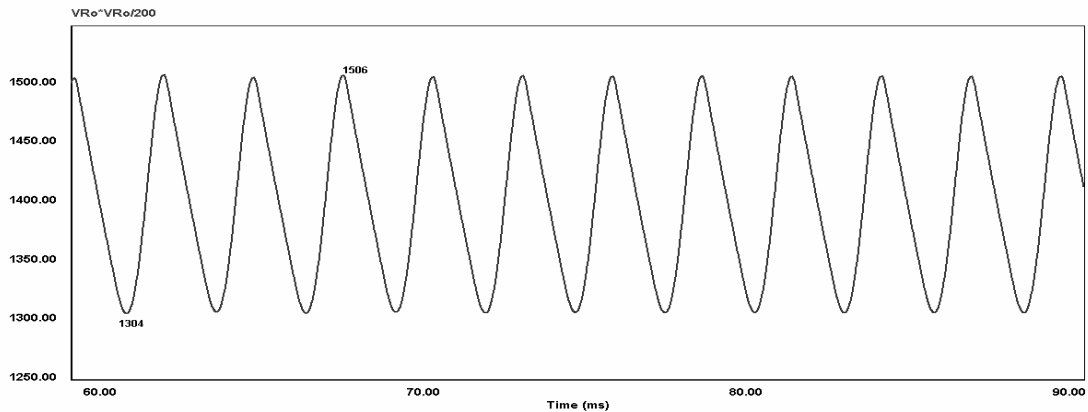
Aplicando la ec. 1.15 obtenemos el factor de distorsión

$$FP\ dist = \frac{1}{\sqrt{1 + (1.14)^2}} = 0.66$$

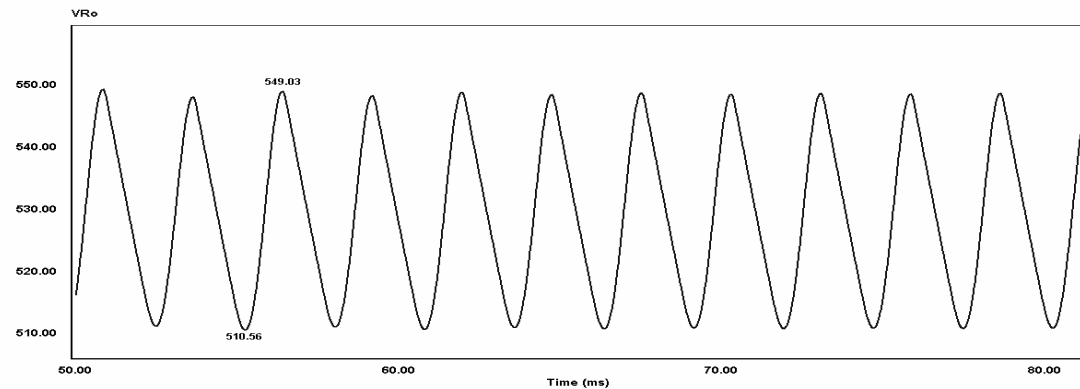
Ahora encontraremos el factor de desplazamiento FP_{desp} . En la fig.1.4 se muestran los valores de potencia, voltaje y corriente en la carga R_o , el voltaje rms en la carga es $V_{rms}=530$ y la potencia en la carga es de:

$$P = \frac{530^2}{200} = 1404.5\ W$$

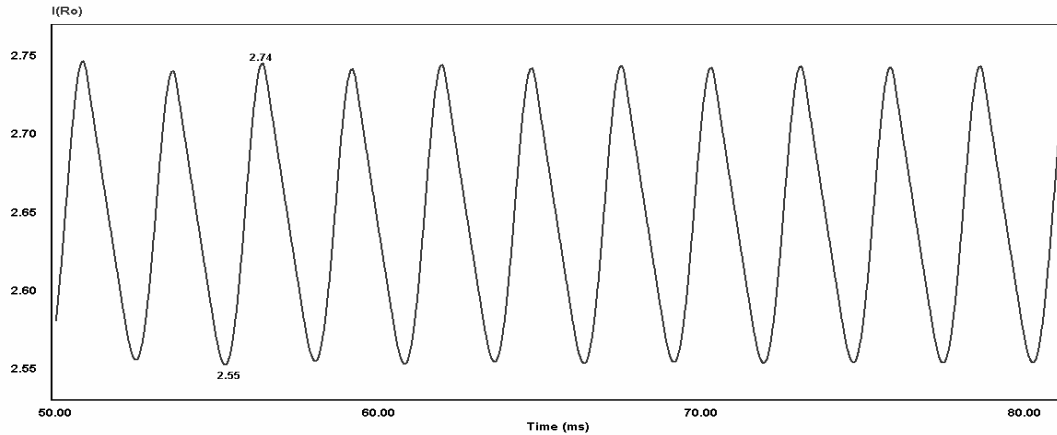
$$FP_{desp} = \frac{1404.5}{\sqrt{3} \times 220 \times 5.61} = 0.65$$



a)



b)



c)

Fig. 1.4 a) Potencia, b) Voltaje y c) Corriente en la carga R_o

Aplicando la ecuación (1.13) para obtener el factor de potencia total obtenemos:

$$FP = \frac{1404.5}{\sqrt{3} \times 220 \times 5.61} \times \frac{1}{\sqrt{1+1.14^2}} = 0.65 \times 0.66 = 0.43$$

$$FP_{\text{desplaz}} = 0.65; \quad FP_{\text{distorsión}} = 0.66$$

Se puede mejorar el factor de potencia de esta estructura aumentando el valor de los inductores de línea.

La Fig. 1.5 muestra el circuito para un valor en los inductores de 10 mH, y en la fig. 1.6 se presentan las formas de onda de voltaje y de corriente en las líneas de alimentación.

$$V_a = 311 \text{ sen } (\omega t); \quad C_o = 100 \text{ } \mu\text{F}; \quad L_a = 10\text{mH}$$

$$V_b = 311 \text{ sen } (\omega t + 120^\circ); \quad R_o = 200 \text{ } \Omega; \quad L_b = 10\text{mH}$$

$$V_c = 311 \text{ sen } (\omega t - 120^\circ); \quad f_r = 60 \text{ Hz}; \quad L_c = 10\text{mH}$$

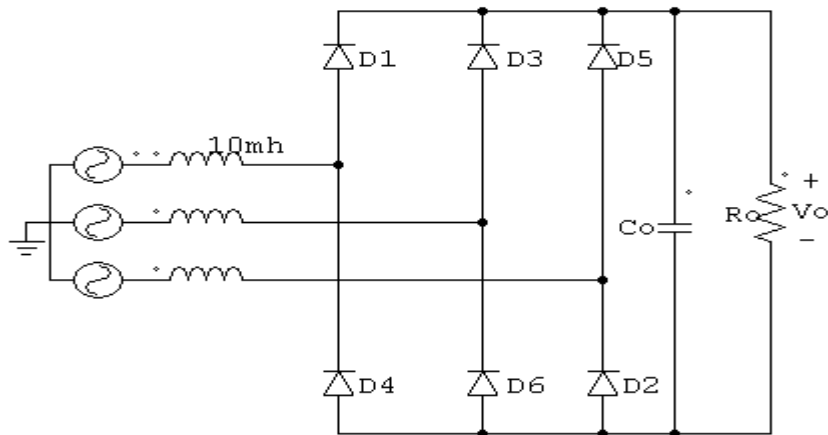


Fig. 1.5 Rectificador convencional a diodos, con filtro capacitivo e inductores de línea

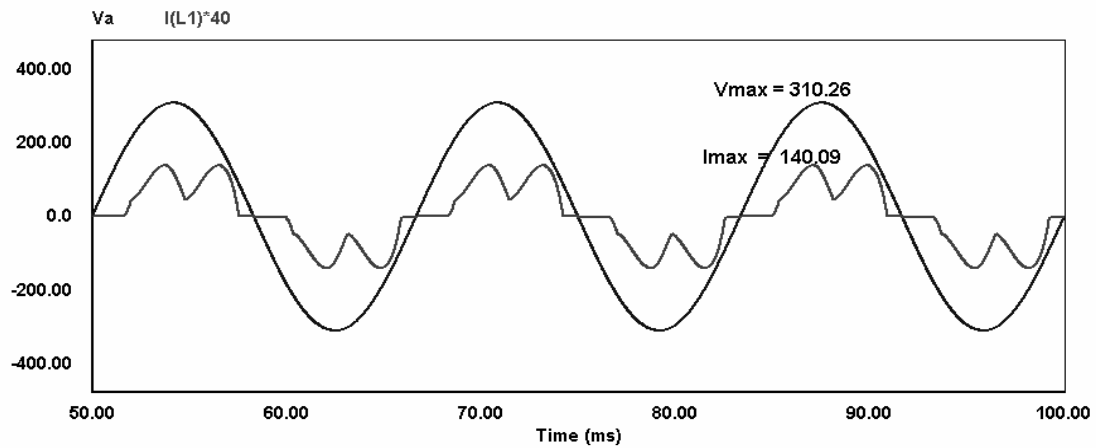


Fig. 1.6 Tensión y corriente de fase A

En la fig. 1.7 se observa el espectro de armónicas de la corriente de la fase A (fundamental, 5a, 7a, 11a, 13a, 17a y 19a).

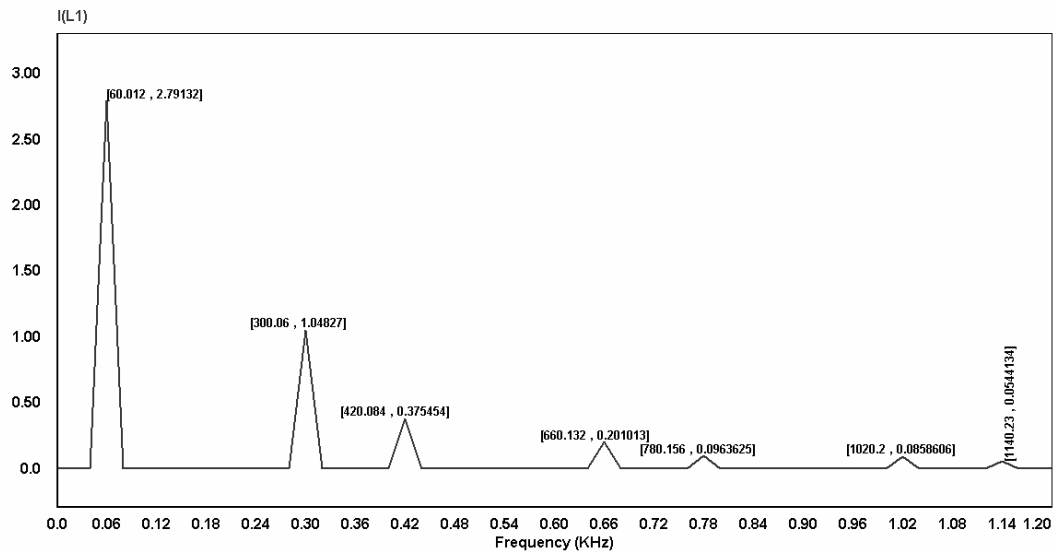
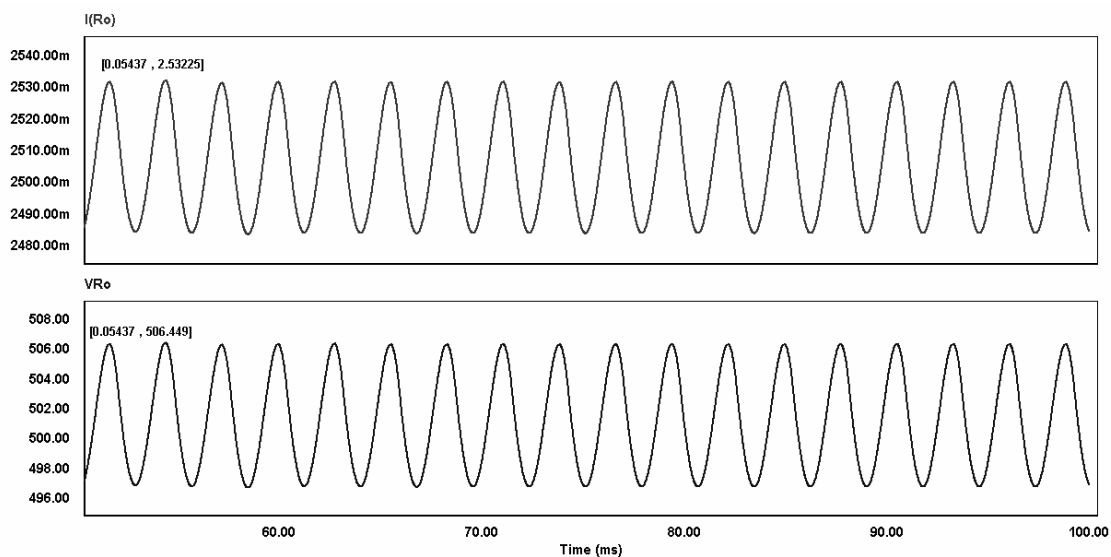


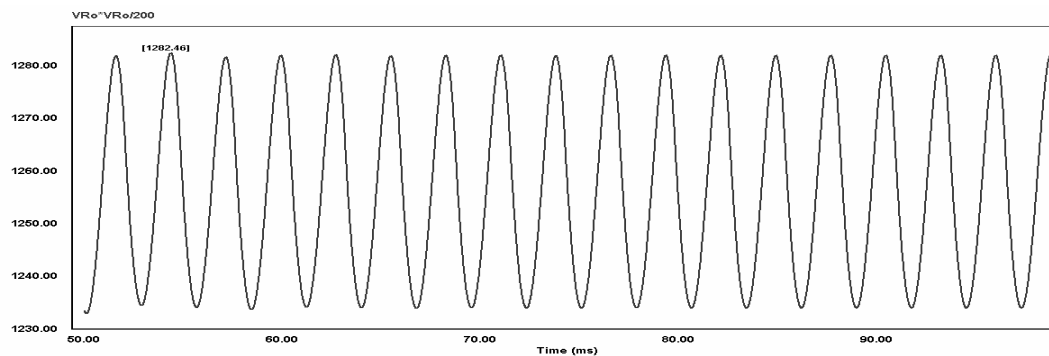
Fig.1.7 Armónicos de corriente en fase A

En la fig.1.8 se muestran los valores de voltaje, corriente y potencia en la carga R_o , el voltaje rms en la carga es $V_{rms}=506$

y la potencia en la carga es de: $P = \frac{506^2}{200} = 1280 \text{ W}$



a), b)



c)

Fig. 1.8 a) Corriente, b) voltaje y c) Potencia en la carga Ro

A continuación se presentan los cálculos de la distorsión armónica total (THD) y del factor de potencia utilizando la ecuación (1.8) y simplificando tenemos en la tabla 1.4:

Tabla 1.4 Valores para obtener el THD

Armónico No.	Frecuencia Hz.	Componente en Amperes	I ² (amp)
1	60		
5	300	0.74	0.548
7	420	0.26	0.068
11	660	0.142	0.020
13	780	0.067	0.004
17	1020	0.060	0.003
19	1140	0.038	0.001

Σ	0.644
$\sqrt{\quad}$	0.802
THD	40.50

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{19} I_{nrms}^2}}{I_{1rms}} \times 100 = \frac{\sqrt{0.74^2 + 0.26^2 + 0.142^2 + 0.067^2 + 0.085^2 + 0.054^2}}{1.98} \times 100 = 40.50 \%$$

Aplicando la ec. 1.15 obtenemos el factor de distorsión

$$FP_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.4050)^2}} = 0.92$$

Ahora encontraremos el factor de desplazamiento FP_{desp} ...

$$FP_{desp} = \frac{1280}{\sqrt{3} \times 220 \times 3.51} = 0.96$$

$$FP = \frac{1280}{\sqrt{3} \times 220 \times 3.51} \times \frac{1}{\sqrt{1 + 0.4046^2}} = 0.96 \times 0.92 = 0.88$$

$$FP_{desplaz} = 0.96$$

$$FP_{distorsión} = 0.92$$

A pesar de mejorarse el factor de potencia, la estructura de la fig. 1.5 todavía representa desventajas, como son: estructura no aislada, tensión de salida no regulada y THD alta.

La corrección o compensación del factor de potencia en un sistema tiene los siguientes beneficios tanto económicos como de ahorro de energía; no importando el método de solución aplicado:

- ❖ Elimina los cargos por bajo factor de potencia.
- ❖ Permite recibir una bonificación económica por parte de la compañía suministradora.
- ❖ Disminuye las pérdidas de energía por efecto Joule en los cables de alimentación.
- ❖ Disminuye la caída de tensión en los conductores de alimentación, es decir, se mejora la regulación de la tensión del sistema.

- ❖ Libera de capacidad reactiva a los transformadores de distribución, por lo que se les pueden instalar otras cargas en el sistema.

Ahora bien, la finalidad de corregir el factor de potencia es reducir o eliminar el costo de energía reactiva en la factura de consumo, evitar una mayor caída de voltaje en las líneas y por tanto, liberar al sistema de transportar energía innecesaria (reactiva-inductiva). Para lograr esto, es necesario realizar un estudio detallado del funcionamiento del sistema y proponer algunos de los métodos tradicionales o novedosos (convertidores correctores de factor de potencia) para corregir esta importante magnitud y mejorar la calidad de la energía.