



## TEMA 5: Efectos de los Rectificadores sobre la red de alimentación.

### Índice

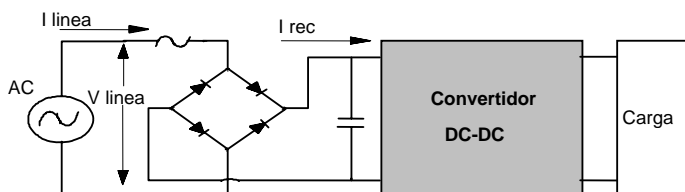
TEMA 5: Efectos de los Rectificadores sobre la red de alimentación.	
5.1.- Factor de Potencia.	1
5.1.1.- Definiciones:	2
5.1.2.- Consecuencias:	6
5.1.3.- Normativa:	6
5.2.- Métodos de mejora del Factor de potencia.	10

### 5.1.- Factor de Potencia.

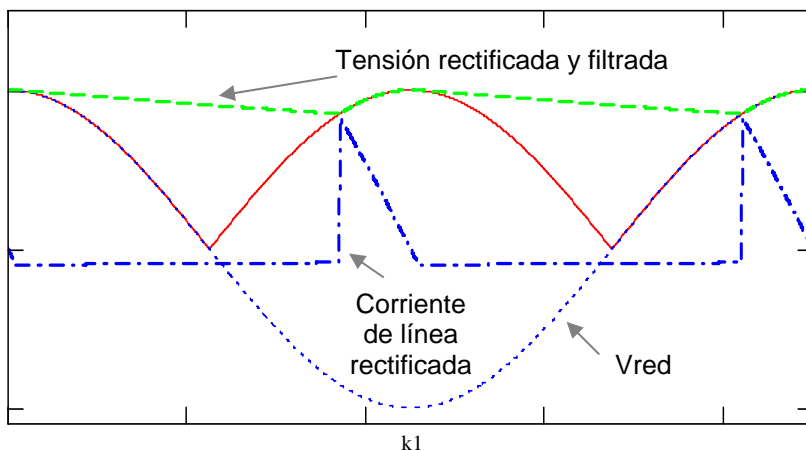
Con el significativo aumento del uso de circuitos electrónicos de potencia (rectificadores), y por tanto la existencia de cargas electrónicas conectadas a la red de distribución eléctrica, se cuestionan temas relacionados con el aprovechamiento y manipulación de la potencia eléctrica. Ante estas inquietudes habrá que analizar de que forma influye o modifica, a la línea de distribución alterna, la conexión de diversos circuitos electrónicos a la misma. Así como plantear la obtención de una magnitud perfectamente especificada (Factor de Potencia) que cuantifique el **grado de rendimiento en la utilización de la potencia eléctrica**.

En los sistemas de potencia, el uso de fuentes de alimentación conectadas a la red de distribución eléctrica (off-line) es una práctica habitual, siendo estas topologías quienes cuestionan nuevos temas concernientes a la caracterización de la sección de entrada de estos convertidores, así como sus efectos en la línea de distribución de potencia alterna y en los sistemas electrónicos conectados a ella. En estos sistemas cuando se menciona “fuente de alimentación conmutada off-line”, se refiere a una estructura típica formada por un puente **rectificador** de entrada y un condensador de filtrado conectados directamente a la red de potencia alterna, sin intervenir ningún transformador, seguido por un bloque que constituye la conversión de tensión continua en continua, tal como se muestra en la siguiente figura.

Los condensadores voluminosos de filtrado de la entrada son necesarios para proporcionar el rizado mínimo especificado en la tensión de entrada del convertidor dc-dc, y para proporcionar un



almacenamiento de energía en el caso de que haya alguna condición de fallo en la línea de distribución. Sin embargo por ellos circula la corriente AC de la línea solo cuando la tensión de dicho condensador es inferior a la tensión rectificadora de la línea, siendo la forma de onda característica la mostrada en la siguiente figura.



Esta corriente pulsante ocurre porque el condensador de filtrado permanece cargado cuando la tensión de entrada alcanza el valor de pico. Durante la mayor parte de cada semi-periodo de la tensión de entrada los diodos rectificadores permanecen bloqueados, y la corriente no fluye. Sin embargo, dado que los condensadores se descargan parcialmente durante cada semi-periodo, la

tensión de entrada excede a la tensión de carga del condensador durante cortos intervalos de tiempo, cercanos al instante de máxima tensión de pico de la línea, momento de consumo de corriente para la carga, corriente que debido a la pequeña impedancia de estos condensadores, será muy elevada. De esta forma se puede decir que la fuente de alimentación conmutada representa una carga no lineal a la línea de potencia de entrada.

Una vez examinada la forma de onda de la corriente de entrada, es más fácil entender el problema que representa el factor de potencia. Esta corriente pulsante no solo tiene un elevado valor RMS, sino también un elevado contenido de armónicos, pudiendo causar numerosos problemas en la red de distribución eléctrica.

Esta distorsión armónica tiene dos significantes efectos:

- Primero, los **armónicos** de la corriente de entrada producirán una **distorsión** en la tensión, debido a la impedancia finita de la fuente de potencia. Y esta tensión distorsionada contribuirá a las emisiones conducidas en forma de interferencias electromagnéticas (EMI).
- Segundo, las **componentes armónicas** de la corriente no están emparejadas con componentes de tensión, y por tanto, no producirán una potencia utilizable.

Llegado este momento es necesario abordar la definición de Factor de Potencia, la cuantificación de la distorsión armónica, y la relación entre ellas, así como su dependencia del tipo de cargas que se conecten a la red de distribución eléctrica.

### 5.1.1.- Definiciones:

Tradicionalmente se ha venido entendiendo por **Factor de Potencia** ("Power Factor") como un simple parámetro que representaba la eficiencia del proceso de utilización de la potencia eléctrica. En términos eléctricos el factor de potencia en una red de dos terminales se define como:

*"La razón entre la potencia media consumida por una carga cualquiera, medida en vatios, en los terminales de dicha carga y el producto de los valores rms de la tensión y corriente en los terminales, en voltio-amperios".*

con la siguiente formulación matemática:

$$FP = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} V_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt}{V_{e-rms} \cdot I_{e-rms}}$$

por tanto, para una sistema alimentado con tensión monofásica,

$$FP = \frac{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} V_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} V_e(t)^2 dt \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_e(t)^2 dt}}$$

donde  $V_e$  e  $I_e$  son la tensión y corriente de entrada de red, y únicamente en el caso de conservar su carácter senoidal (para cargas lineales) se corresponde  $FP = \cos\Phi$ , donde  $\Phi$  es el desplazamiento entre las componentes fundamentales de la corriente y la tensión de entrada.

En el caso de no ser las cargas lineales la corriente y tensión de línea dejarán de tener un carácter estrictamente senoidal, no pudiendo aplicar de forma directa que  $FP = \cos\Phi$ , introduciéndose en estos casos un nuevo parámetro conocido como factor de ángulo de fase o factor de desplazamiento (FD). Definido como:



“La relación entre la potencia activa total consumida por una carga alimentada por un generador de tensión senoidal y la potencia aparente suministrada por las componentes fundamentales de tensión y corriente”

siendo su expresión matemática de la siguiente forma

$$FD = \frac{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} V_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} V_{e-1}(t)^2 dt \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_{e-1}(t)^2 dt}}$$

donde  $V_{e-1}$  e  $I_{e-1}$  representan las componentes fundamentales de tensión y corriente de entrada. De dicha definición se obtiene, para el caso de tensión y corriente de entrada estrictamente senoidales, que **FD = cosΦ<sub>1</sub> = FP** .

Si suponemos que la tensión de entrada conserva su carácter senoidal, y es la corriente de entrada quien contiene las componentes armónicas, podemos desarrollar ambas de la siguiente forma:

$$V_e(t) = V_e \cdot \sin(\omega t) \equiv V_{e1} \cdot \sin(\omega t)$$

$$I_e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_e \cdot \sin(n\omega t + \phi_n) = I_1 \cdot \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_e \cdot \sin(n\omega t + \phi_n)$$

en términos de estas variables, la potencia activa resulta ser:

$$\text{Potencia activa} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt = V_{e-rms} \cdot I_{1-rms} \cdot \cos \phi_1$$

donde  $\phi_1$  es el ángulo de desfase entre la componente fundamental de la corriente y de la tensión de entrada, y  $I_{1-rms}$  es la amplitud rms de la componente fundamental de la corriente de entrada. Por tanto el factor de desplazamiento DF resultará igual a:

$$DF = \frac{V_{e-rms} \cdot I_{1-rms} \cdot \cos \phi_1}{V_{1-rms} \cdot I_{1-rms}} = \cos \phi_1$$

Con la ayuda de este nuevo concepto, se puede introducir una definición del factor de potencia en relación con las corrientes no senoidales de entrada:

$$FP = \frac{V_{e-rms} \cdot I_{1-rms} \cdot \cos \phi_1}{V_{e-rms} \cdot I_{e-rms}} = \cos \phi_1 \cdot \frac{I_{1-rms}}{I_{e-rms}} = DF \cdot DH$$

donde DH representa al cociente entre el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de línea y el valor eficaz de corriente de línea con todos sus armónicos, y es conocido por Factor de Distorsión Armónica (DH). Así la conclusión de este desarrollo se concentra en la siguiente expresión:

$$FP = DF \cdot DH$$

Con la expresión anterior, se pone de manifiesto que el **factor de potencia** es el producto de dos términos, uno que representa el **efecto de la distorsión**, y otro el **efecto del desplazamiento**. Una medida de la distorsión se puede obtener a través de DH, pero tradicionalmente existe un parámetro a tal efecto. Este parámetro se conoce como **Distorsión Armónica Total (DAT)**, cuya definición y relación con el factor de distorsión armónica se detalla a continuación:

$$DAT = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{(1)rms}^2}}{I_{(1)rms}} \cdot 100$$

donde  $I_{(n)rms}$  es el valor efectivo de la corriente del armónico  $n$ ésimo, cuyo valor se puede obtener mediante el desarrollo en serie de Fourier, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$I_{(n)-rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{con} \quad a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\theta) \cdot \cos(n\theta) \cdot d\theta \quad \text{y} \quad b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\theta) \cdot \sin(n\theta) \cdot d\theta$$

A efectos prácticos, DAT es la raíz cuadrada del cociente entre la potencia que podría disipar una resistencia a causa de la distorsión de las componentes de la forma de onda, y la potencia que podría disipar a causa únicamente de la componente fundamental. Además este parámetro proporciona una referencia manejable para la comparación entre diferentes formas de onda.

Ahora podemos relacionarlo con el factor de distorsión y con el factor de potencia de la siguiente forma :

$$DH = \sqrt{\frac{1}{1 + DAT^2}} \quad FP = \frac{I_{1-rms}}{I_{n-rms}} \cdot \cos \theta_1 = DH \cdot DF = \frac{DF}{\sqrt{1 + DAT^2}} \quad \text{Como conclusión}$$

destacar que asumiendo por factor de potencia la relación entre la potencia real y la aparente es aún posible tener una indicación significativa de la utilización de la potencia, para cargas no lineales, suministrada por la potencia aparente incorporando los armónicos de corriente.

El Factor de Potencia representa entonces la razón entre la potencia transmitida y el valor de VA del equipo de transmisión. Para cargas equilibradas el factor de potencia, tal como se ha descrito anteriormente, es el producto del factor de desplazamiento y el factor de distorsión. Sin embargo, para cargas no equilibradas el factor de desplazamiento es algo ambiguo a no ser que se especifique para cada fase por separado, siendo lo más conveniente en estos casos, especificar la corriente de línea para cada fase.

En el caso de un sistema trifásico, debemos tener en cuenta que la definición general es aplicable tanto al sistema trifásico completo como a cada una de las fases por separado:

$$PF = \frac{P_{total}}{S_{total}} \quad PF_R = \frac{P_R}{S_R} \quad PF_S = \frac{P_S}{S_S} \quad PF_T = \frac{P_T}{S_T}$$

Vamos a calcular el factor de potencia para un sistema trifásico, fase a fase, de forma general y poniendo como única condición que la tensión de entrada está equilibrada. La corriente podrá estar desequilibrada. Supondremos que no existe término de continua ni en la tensión de fase ni en la corriente. Si suponemos que la corriente de entrada está distorsionada pero la tensión de fase no lo está, entonces podemos desarrollar en serie de Fourier la expresión de la corriente :

$$v_k(t) = V_m \sin(\omega t) \quad k \in \{R, S, T\}$$

$$i_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nk} \sin(n\omega t + \varphi_{nk}) = I_{1k} \sin(\omega t + \varphi_{1k}) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nk} \sin(n\omega t + \varphi_{nk}) \quad k \in \{R, S, T\}$$

donde  $\varphi_n$  es el desfase existente entre la tensión y la corriente del armónico n.

Para determinar el factor de potencia de cada fase, calcularemos primero la potencia activa resolviendo la integral:

$$P_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_k(t) i_k(t) d(\omega t) = \frac{V_m I_{mk}}{2} \cos \varphi_{1k} = V_{RMS} I_{1RMSk} \cos \varphi_{1k} \quad k \in \{R, S, T\}$$

La potencia aparente vale:

$$S_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_0^{2\pi} v_k(t)^2 d(\omega t) \int_0^{2\pi} i_k(t)^2 d(\omega t)} = \sqrt{V_{RMSk}^2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \sum_{n=1}^{\infty} I_{nk} \sin(n\omega t + \varphi_{nk}) \right)^2 d(\omega t)}$$

con  $k \in \{R, S, T\}$ .



Si calculamos la integral de la corriente de la expresión anterior, que representa el valor eficaz de la corriente de entrada, se obtiene,

$$S_k = \sqrt{V_{RMSk}^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{nRMSk}^2} = V_{RMSk} I_{RMSk} \quad k \in \{R, S, T\}$$

ya que se cumple que el valor eficaz de la corriente de entrada es,

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \right)^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{nRMS}^2}$$

Si ahora aplicamos la definición del factor de potencia, PF obtenemos el factor de potencia para cada una de las fases:

$$PF_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{I_{1RMSk}}{I_{RMSk}} \cos \varphi_{1k} \quad k \in \{R, S, T\}$$

Podemos, por tanto distinguir dos términos en la expresión anterior que se definen como el factor de desplazamiento, DF, y el factor de distorsión armónica, DH. Dichos términos tendrán las siguientes expresiones,

$$DF_k = \cos \varphi_{1k} \quad k \in \{R, S, T\}$$

$$DH_k = \frac{I_{1RMSk}}{I_{RMSk}} \quad k \in \{R, S, T\}$$

La distorsión armónica también se describe mediante otra variable, la distorsión armónica total o THD que se define de la siguiente manera:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nRMS}^2}{I_{1RMS}^2}}$$

donde de la resolución de la expresión se obtiene,

$$I_{nRMS} = \sqrt{\frac{I_n^2 \cos^2 \varphi_n + I_n^2 \sin^2 \varphi_n}{2}} = \frac{I_n}{\sqrt{2}}$$

Para el caso particular de tener cargas que no distorsionen la corriente de entrada, el factor de potencia sólo está formado por el factor de desplazamiento, DF, y el factor de distorsión armónica valdrá DH=1. En ese caso el factor de potencia de cada fase vale,

$$PF_k = DF_k = \cos \varphi_{1k} \quad k \in \{R, S, T\}$$

donde  $\varphi_1$  es el desfase entre la tensión y la corriente de la fase correspondiente.

Si en el sistema equilibrado las cargas son todas iguales aunque no necesariamente lineales, entonces el factor de potencia total del sistema trifásico coincide con el factor de potencia de cada una de las fases.

$$PF_{total} = PF_R = PF_S = PF_T = DF_R DH_R = DF_S DH_S = DF_T DH_T$$

Caso de ser el sistema desequilibrado el factor de potencia total del sistema trifásico no nos da información directa del factor de potencia de cada fase y sólo nos indica si el uso de la red trifásica es eficiente o no.

### 5.1.2.- Consecuencias:

De esta forma, evitando los problemas obtenidos como consecuencia de los niveles tan elevados de corriente de pico y su gran contenido de armónicos, mediante el uso de métodos alternativos en el diseño de la sección de entrada de estos convertidores de alimentación (métodos a desarrollar en secciones posteriores), obtendremos beneficios para los usuarios de la red de distribución eléctrica. Los beneficios de la distribución eléctrica se muestran en diversas áreas:

- Los picos de corriente elevados pueden causar la destrucción de los conmutadores de protección ante sobrecorrientes o en los fusibles. Veamos a continuación unos valores de corrientes para estos convertidores típicos de alimentación (125Vac):

15 A- Circuito ( 80% disponible)		
VA disponibles	2640	2640
Eficiencia de la fuente ( $\mu$ )	75	75
Factor de Potencia (FP)	<b>0.65</b>	<b>0.95</b>
Corriente de pico (A)	12.8	9.02
Máxima Potencia de consumo (W)	1287	1881

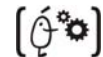
De los datos de esta tabla se puede observar como el factor de potencia condiciona la máxima potencia a consumir y por tanto el pico de corriente a soportar en el circuito. Destacar que para el caso normalmente utilizado de un puente rectificador completo más un condensador de filtrado como interface entre la tensión de línea AC y la entrada DC del convertidor conmutado, donde el factor de potencia tiene un valor típico de 0.65, solo se puede aprovechar el 48.75% de la potencia suministrada, siendo además el pico de corriente superior al permitido (80% del máximo).

- De esta forma es evidente la necesidad de una corrección del factor de potencia para aumentar la potencia estándar disponible en las tomas de corriente.
- Además un factor de potencia pequeño causado por un nivel elevado de corriente rms causa un aumento en las pérdidas de los transformadores y en los conductores, que deberán tener mayor sección y por tanto mayor coste.
- Otro problema aparecerá en sistemas de alimentación trifásica. En condiciones ideales, la corriente senoidal de cada fase esta equilibradas, de forma que la corriente en la línea neutra es nula. Sin embargo, si existen fuentes de alimentación en cada fase, las corrientes de entrada distorsionadas no senoidales no se cancelarán unas con otras, sino que se combinarán resultando una corriente elevada en la línea neutra. El tercer armónico de corriente generado en cada fase se combina directamente en fase con la línea neutra. El resultado puede ocasionar corrientes en la línea neutra que pueden exceder a las corrientes de cada línea, superando así el máximo permitido en el neutro. Además dado que la línea neutra no dispone de circuitos de protección, esto ocasionará un sobre calentamiento que puede causar daño en los cables utilizados.
- Por último mencionar que la distorsión de la corriente puede causar interferencias con otros equipos conectados a la red de distribución, o simplemente a equipos electrónicos situados en el mismo entorno. Por lo que habrá que utilizar unos filtros de interferencias (EMI), los cuales se verán sobredimensionados al tener que soportar elevados niveles de corriente de pico, aumentando el tamaño y el coste de los mismos.

Aparte de los beneficios que aquí se han descrito, existe otra consecuencia desembocada de forma natural: cumplir las exigencias internacionales que en materia de las perturbaciones que causan los equipos conectados al sistema público de baja tensión de alimentación existe.

### 5.1.3.- Normativa:

Debido al acelerado deterioramiento de la calidad de la potencia distribuida, la preocupación por regular el contenido armónico de la red de distribución estaba patente desde 1975 donde el Comité Europeo para la Estandarización en Electrotecnia (CENELEC) dictó la norma EN50006 que fue adoptada por 14 países europeos. Posteriormente en 1991 el CENELEC aprobó el estándar IEC-555-



2, dictado por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) en 1982 como estándar europeo (EN 60555-2). La norma IEC-555-2 fue revisada y en Abril de 1995 modificada por la normativa IEC 1000-3-2 que se ha adoptado en la actualidad como el estándar europeo EN 61000-3-2.

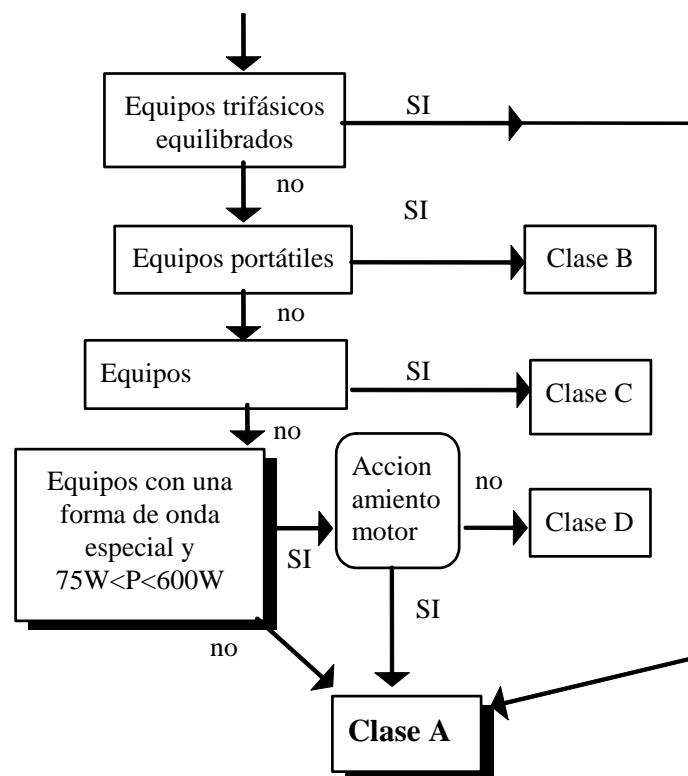
Dentro del estándar básico (IEC 1000) en parte tercera (IEC 1000-3) es el encargado de fijar la limitación de los armónicos de la corriente de entrada de aquellos equipos eléctricos y electrónicos que tengan que conectarse a la red de distribución alterna de baja tensión (220-240 V fase a neutro y 380-415 V fase-fase). En su sección segunda (IEC 1000-3-2) se detallan los límites para equipos con una corriente de entrada hasta de 16 A por fase. Estando en la actualidad como borrador la sección cuarta de la misma norma (IEC 1000-3-4) para los equipos con una corriente de entrada superior a 16 A por fase.

**Normas**

<b>1975:</b>	<b>EN 50006</b>
<b>1982:</b>	<b>IEC-555-2</b>
<b>1991:</b>	<b>EN 60555-2</b>
<b>1995:</b>	<b>IEC 1000-3-2</b>
<b>1998:</b>	<b>EN 61000-3-2</b>

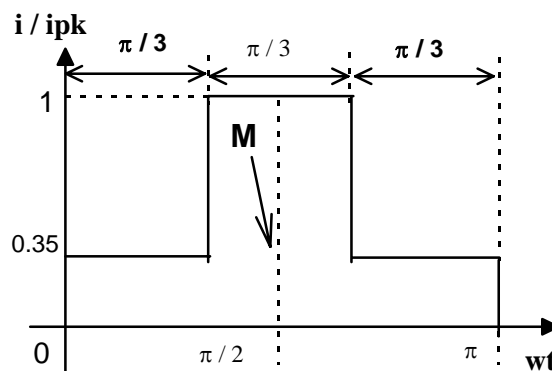
En toda esta normativa, se deduce que no se requieren equipos con una distorsión armónica total pequeña para la corriente de entrada (ITHD), sino un cumplimiento individual de los límites para cada armónico. Esta circunstancia avala las soluciones pasivas, pues ellas no consiguen un DAT pequeño pero son capaces de limitar las amplitudes de los armónicos de la corriente por debajo de lo establecido en la normativa. La conclusión es importante pues no es imprescindible obtener un  $FP \cong 1$  para verificar la normativa.

En la aplicación de la normativa cabe dividir los equipos en cuatro clases, donde en función de la clase a la que pertenezcan se les aplican límites distintos para cada armónico. Veamos en la siguiente figura un diagrama para la determinación de la clase correspondiente a cada equipo.



La clase D es la más controvertida debido a que cuenta con una forma de onda especial generada por el circuito rectificador y el condensador de filtrado, la cual es la más utilizada en la mayoría de equipos electrónicos de alimentación. Para nuestro estudio utilizamos equipos de

alimentación monofásicos quedando reducido a una catalogación en clase A o D, dependiendo de si la forma de onda de la corriente de entrada en un semi-periodo (referida a su valor de pico) está dentro de la máscara definida en la siguiente figura, al menos el 95% de la duración de cada semi-periodo, donde si esto se verifica dicho equipo pertenecerá a la clase D.



Máscara de la corriente de entrada para definir la clase D.  
La línea M coincide con el valor de pico de la corriente de entrada

Veamos a continuación los límites en amplitud establecidos para cada armónico dependiendo de la clase a la que pertenezca el equipo según la norma IEC 1000-3-2.

Armónico	Clase A	Clase B
Orden n	máx. Corriente (Arms).	máx. Corriente (Arms).
Impares		
3	2.30	3.45
5	1.14	1.71
7	0.77	1.155
9	0.40	0.60
11	0.33	0.495
13	0.21	0.315
15 ≤ n ≤ 39	2.25/n	3.375/n
Pares		
2	1.08	1.62
4	0.43	0.645
6	0.30	0.45
8 ≤ n ≤ 40	1.84/n	2.76/n

Armónico	Clase C (P>25W)	Armónico	Clase D (P>75W)	
Orden n	Máx. Valor expresado como porcentaje de la componente fundamt. de la corriente	Orden n	máx. Corriente permitida (mArms/W)	Máximo absoluto (A)
2	2	3	3.4	2.30
3	30 λ, (λ= factor de potencia)	5	1.9	1.14
5	10	7	1.0	0.77
7	7	9	0.5	0.40
9	5	11	0.35	0.33
11 ≤ n ≤ 39	3	13	0.296	0.21
		15 ≤ n ≤ 39	3.85/n	2.25/n



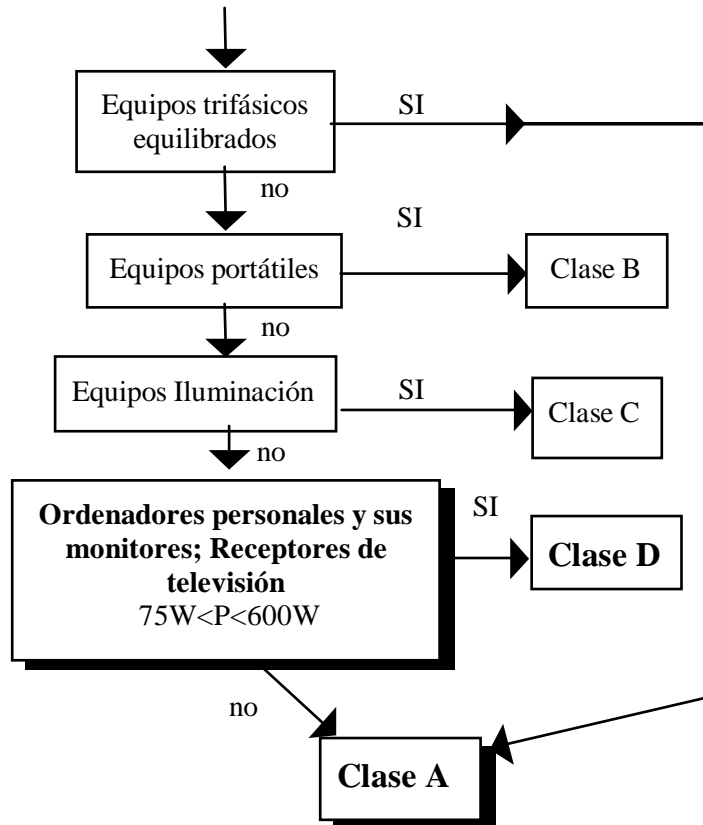


En la actualidad y desde el 1 de enero de 2004, se han eliminado las normas nacionales que divergieran de la actual revisión nº 14 de la citada norma. De esta forma la norma aplicable en la actualidad es la UNE-EN 61000-3-2/A14.

Esta modificación A14 a la Norma Europea EN 61000-3-2:1995 ha sido aprobada por el CENELEC el 03/10/2000 y ratificado por AENOR como norma española en diciembre de 2000.

La nueva versión clasifica a las fuentes de alimentación o bien en clase A o bien en clase D. Siendo Clase D las fuentes de alimentación de los ordenadores personales, de monitores de ordenadores personales y de receptores de televisión, todo ello siempre que no exceda de 600W. La idea es catalogar como clase D aquellos equipos de uso muy continuado y que, por tanto, contribuyen durante más tiempo a generar armónicos en la red. Así la norma es más estricta al imponer a cada armónico un límite que es proporcional a la potencia de entrada del equipo.

Queda patente que la nueva versión clasifica a las fuentes de alimentación de acuerdo a su aplicación en lugar de la versión anterior que lo hacía en función a la forma de onda de la corriente de entrada, tal y como se muestra a continuación:



Armónico	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Orden n	máx. Corriente (Arms).	máx. Corriente (Arms).	% del Fund. current	mA/Watt
<b>Impares</b>				
3	2.30	3.45	30*PF	3.4
5	1.14	2.16	10	1.9
7	0.77	1.12	7	1
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.50	3	0.35
13	0.21	0.32	3	0.296
15 ≤ n ≤ 39	2.25/n	3.338/n	3	3.85/n
<b>Pares</b>				
2	1.08	1.62	2	
4	0.43	0.65		
6	0.30	0.45		
8	0.23	0.35		
10	0.18	0.28		
12	0.15	0.23		
14 ≤ n ≤ 40	1.84/n	2.76/n		

Adicionalmente, la modificación 14ª, define los métodos de medida y los límites de los armónicos aplicables al análisis de armónicos estacionarios y fluctuantes

## 5.2.- Métodos de mejora del Factor de potencia.

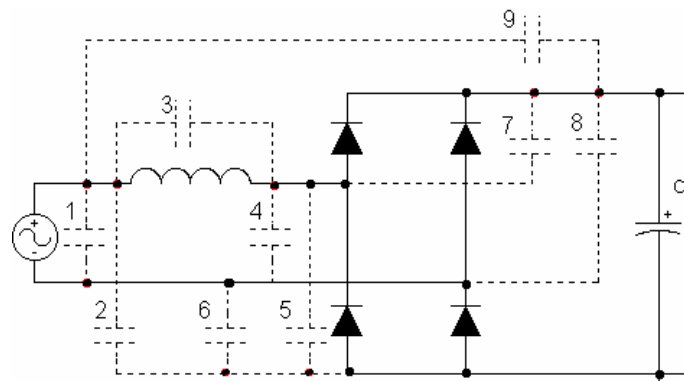
La mejora del Factor de potencia y de la distorsión armónica total implica, necesariamente, la modificación del circuito rectificador de la sección de entrada. Se han experimentado hasta la fecha dos posibles alternativas:

**A. Soluciones pasivas:** Aquellas que utilizan elementos reactivos y rectificadores no controlados como sistema de alimentación básico. Dichos elementos reactivos constituyen un filtro capaz de atenuar el contenido armónico de la corriente de entrada, y así cumplir la normativa que limita la amplitud de cada uno de los armónicos de la corriente de línea

Estas soluciones generalmente suponen diferentes topologías de filtros LC atendiendo a la reducción del tamaño y del coste. Considerando un rectificador en configuración de puente completo, existen dos posibilidades para la disposición del inductor: en serie con la entrada (parte de alterna) o en serie con la carga (en la parte de continua).

### L en serie con la línea

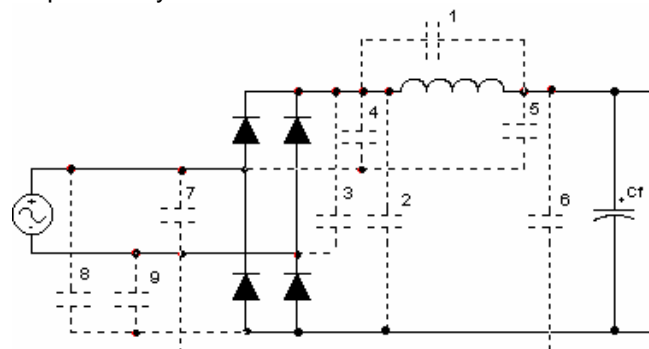
- Se puede reducir la distorsión de la corriente aumentando el valor de L.
- Reducción de la tensión y potencia de salida ante el aumento de L.
- Protege a los diodos rectificadores frente picos y transitorios espúreos de la entrada.



Representa las nueve posibilidades de añadir un condensador en el puente rectificador con la L en serie con la entrada, excluyendo las conexiones de C en paralelo con Cf y en serie con la entrada, la carga o con los diodos rectificadores.

### L en serie con la carga:

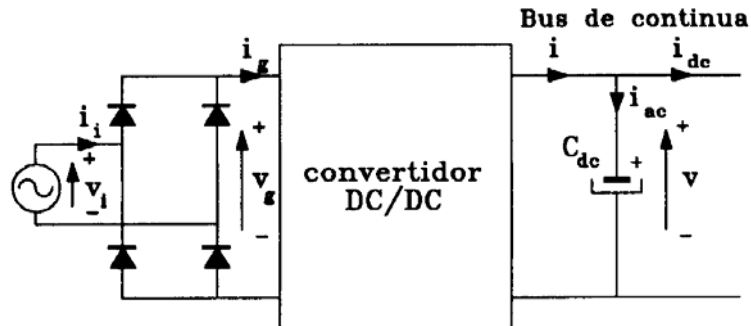
- Proporciona protección en ambas direcciones frente al ruido en modo diferencial, generado por la carga y por la línea.
- Independencia de la potencia y tensión de salida del rectificador con el valor de L.



Representa las nueve posibilidades de añadir un condensador en el puente rectificador con la L en serie con la carga, excluyendo las conexiones de C en paralelo con Cf y en serie con la entrada, la carga o con los diodos rectificadores



**B. Soluciones activas:** Aquellas que utilizan un convertidor conmutado como sistema rectificador de la tensión de entrada, donde con un control adicional o aprovechando el lazo de realimentación del convertidor (en modo discontinuo), pueda actuar sobre la corriente de entrada, convirtiendo al convertidor como un emulador de resistencia.



Estructura general de un convertidor AC/DC con corrección activa del FP.

El control del emulador de resistencia debe satisfacer dos necesidades:

- Forzar a que la corriente de entrada del emulador sea una senoide rectificada.
- Forzar a que la tensión de salida sea la deseada.

La primera de estas dos necesidades puede satisfacerse de dos maneras distintas:

1. Mediante la realización física de un lazo de realimentación de la corriente de entrada cuya referencia sea una senoide rectificada. Este sistema no exige ninguna característica especial a la topología de potencia a seleccionar como emulador de resistencia.
2. En ciertas topologías trabajando en modo de conducción discontinuo o en la frontera entre modo continuo y discontinuo (definido como el modo en el que la corriente por el diodo del emulador se anula durante el período de no conducción del transistor), es posible conseguir que la corriente de entrada al emulador tenga la misma forma de onda que la tensión, sin necesidad de ningún lazo de realimentación de corriente.

La comparación entre las diferentes soluciones pasivas y activas cabe realizarla bajo diferentes criterios, pues en función de cual sea la especificación prioritaria, tendrá sentido un tipo u otro de solución.

En este sentido, la tabla 1 muestra una comparación inicial en función de diversos criterios.

	PASIVO	ACTIVO	
• Respuesta dinámica	Pobre	Adecuada	
• Filtro EMI	Innecesario o pequeño	CCM: grande	DCM: Muy grande
• Circuitos control	Nulo	Promed.: grande	automat.: pequeño
• Semiconductores adicionales	Innecesarios o de baja potencia	entrada única: medio	rango universal: grande
• Regulación en tensión	ausencia	adecuada	
• tiempo ingeniería	pequeño	grande	
• Almacenamiento energía	grande	pequeño	
• Fiabilidad	máxima	media	
• Cumplimiento normativa	variable	siempre	
• Simplicidad	máxima	poca o media	
• DAT	grande	mínimo	

Tabla 1: Comparación entre las soluciones pasivas y activas en función de distintos criterios.

A la vista de la tabla 1, podemos concluir que las soluciones pasivas ofrecen un compromiso atractivo entre el coste y sus prestaciones, pues sobre todo son simples, fiables y robustas, no generan EMI y proporcionan una manera de verificar las normativas internacionales sobre la inyección de armónicos en la red. Sin embargo no son comparables con las soluciones activas en aspectos como la regulación de la tensión continua a su salida, la obtención de un factor de potencia máximo, o el peso que representan. La mayoría de ventajas que presentan los métodos pasivos se magnifican para aplicaciones de baja potencia ( $P_{salida} < 300W$ ).