

---

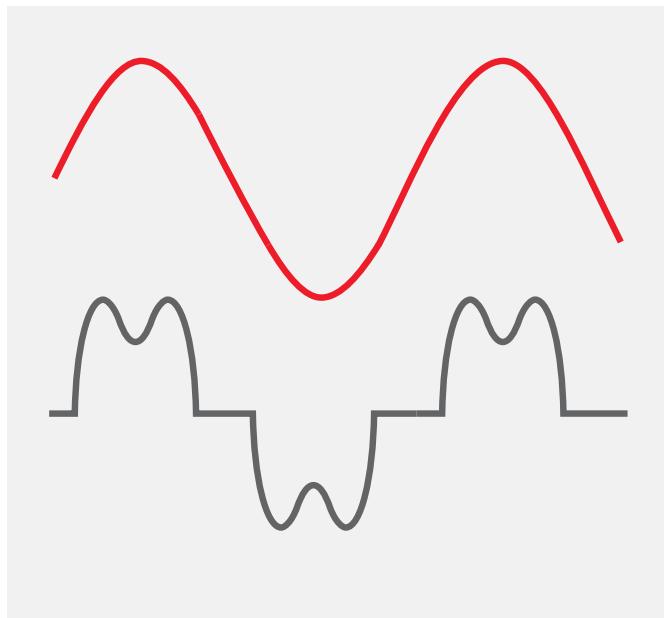
ARTÍCULO ESPECIALIZADO

# Convertidores regenerativos y de armónicos ultrabajos para mejorar la eficiencia y fiabilidad de procesos y sistemas



# ¿Qué son los armónicos eléctricos y por qué son importantes?

El funcionamiento de un equipo eléctrico es más eficiente y fiable cuando cuenta con una fuente de alimentación eléctrica limpia y sin perturbaciones. Sin embargo, por múltiples razones, a menudo las redes de energía están sometidas a perturbaciones electromagnéticas constantes o transitorias. Los armónicos son las perturbaciones continuas que con más frecuencia encontramos en prácticamente cualquier red. Pueden afectar, y mucho, no solo a la eficiencia de la red energética, sino también a su fiabilidad.



En condiciones ideales, el suministro eléctrico presenta una forma de onda sinusoidal pura (arriba). Sin embargo, la realidad es que suele estar distorsionada (abajo) debido a los molestos armónicos.

Los armónicos son una contaminación electromagnética en la red energética que da lugar a una distorsión en la forma de onda de corriente y tensión, haciéndola diferente a la forma de onda sinusoidal pura generada por el proveedor eléctrico. Los armónicos son generados por cargas no lineales, como iluminación LED, fuentes de alimentación ininterrumpibles, ordenadores o convertidores variables, debido a la constante conmutación de elementos de electrónica de potencia en su diseño.

La presencia de contenido armónico se mide como un valor porcentual llamado distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés), que es la relación entre todos los armónicos de tensión o corriente y la tensión o corriente fundamental. Cuando no hay presencia de armónicos de tensión o corriente, la THD es 0 %.<sup>1</sup>

Los armónicos inciden negativamente en las redes de suministro eléctrico y en los equipos conectados a ellas. Cuanto

mayor es el contenido armónico, mayor es la corriente de línea, lo que se traduce en más pérdidas en la red, por ejemplo, en componentes como transformadores, interruptores, interruptores automáticos y cables. Una mayor corriente de línea también supone el sobrecalentamiento del equipo de la red energética, lo que provoca fallos prematuros. Y, como una corriente con armónicos es una corriente distorsionada, existe el riesgo de que el equipo conectado empiece a funcionar mal y sufra una avería.

Quizá los armónicos no causen problemas de inmediato. Puede que los fallos de funcionamiento tarden en materializarse o que solo ocurran al entrar “en línea” ciertas combinaciones de equipos. A menudo, los usuarios ni siquiera relacionan los problemas con los armónicos. Sin embargo, es importante ser conscientes de que en instalaciones fundamentales, como los centros de datos, los armónicos pueden acarrear graves consecuencias que causan importantes daños económicos o relativos a la reputación. O, en el caso de los hospitales, pueden poner en peligro la vida de los pacientes. Así pues, a la hora de elegir los equipos, resulta vital cerciorarse de que no vayan a perjudicar al sistema eléctrico ni a los dispositivos conectados. A su vez, esto garantiza una mayor fiabilidad y eficiencia del proceso.

Tener en cuenta los armónicos al trabajar en proyectos nuevos puede influir mucho en la determinación del tamaño de los equipos eléctricos y la sostenibilidad del proyecto.

# Convertidores de frecuencia e importancia de su respuesta a los armónicos

Los convertidores de frecuencia ayudan a ahorrar enormes cantidades de energía en procesos con cargas variables, y lo consiguen ajustando la velocidad del motor a la necesidad exacta del proceso. Aun así, hay que tener en cuenta su posible efecto en la red energética y los equipos conectados.

## Función de los convertidores de frecuencia en la industria

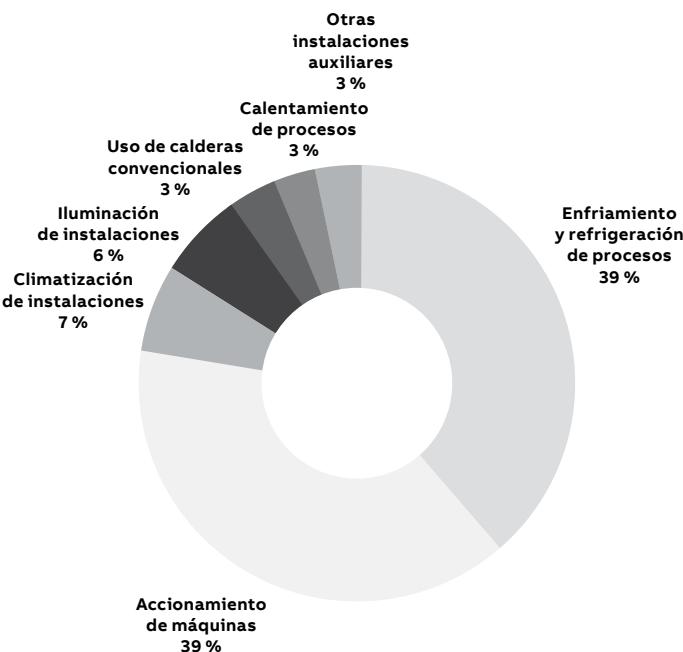
Los informes señalan que los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) representan aproximadamente el 50 % de la energía que se consume en un edificio comercial al uso.<sup>2</sup> Dado que la ocupación de un edificio comercial cambia a lo largo del día, la necesidad de sistemas HVAC también cambia. Según la amplia experiencia de ABB, los convertidores pueden recortar el consumo energético en los procesos HVAC entre un 20 y un 60 %, lo que significa reducir la huella de carbono de un edificio y brindar a los propietarios de las instalaciones importantes ahorros operativos.

Encontramos otro buen ejemplo en las plantas de lácteos, donde aproximadamente el 40 % de la energía se consume para enfriar y refrigerar procesos. Es fácil que otro 40 % se

destine a la producción automatizada y un 10 % a los sistemas de climatización de las instalaciones.<sup>3</sup> Todos estos procesos presentan fluctuaciones en la carga y, por lo tanto, la tecnología de frecuencia variable ofrece un gran potencial de ahorro energético.

Por otro lado, cabe recordar que, como sucede con otras cargas no lineales, los convertidores generan en la línea eléctrica armónicos que, como ya hemos mencionado, pueden tener un efecto potencialmente adverso en la red y los equipos conectados si superan ciertos límites. Así, se debe tener en cuenta el nivel de contenido armónico del convertidor de frecuencia ya en la fase de proyecto para evaluar qué efectos y consecuencias pueda tener para la instalación.

## Consumo eléctrico en la industria láctea, por actividad



### Efecto de los convertidores en la eficiencia de la red energética

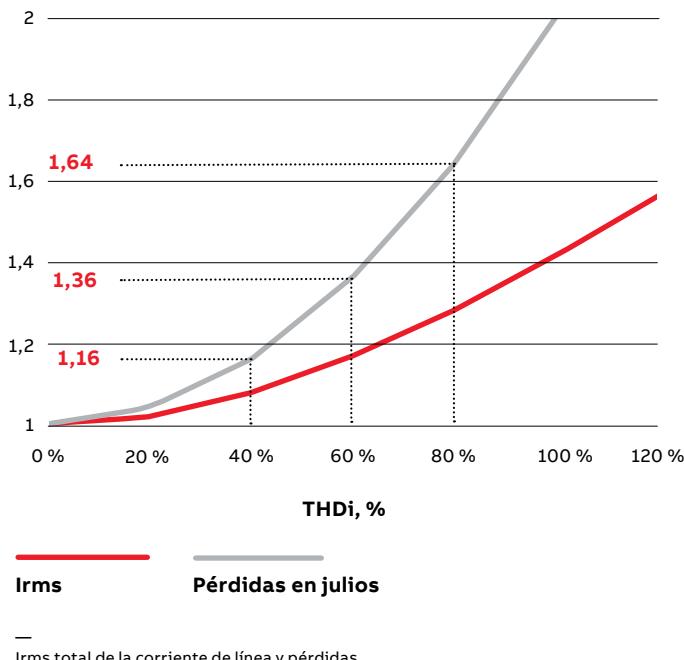
Aunque el uso de convertidores de frecuencia para controlar procesos nos ayuda a ahorrar energía, es importante entender cómo afectan estos convertidores a la eficiencia de la red energética a la que están conectados. Según la teoría, el paso de una corriente eléctrica por un conductor produce pérdidas que generan calor (son las llamadas pérdidas en julios):

$$P = I^2 \cdot R$$

donde  $P$  son las pérdidas de calor,  $R$  la resistencia del conductor y  $I$  la corriente de línea. La corriente total con armónicos, denominada corriente cuadrática media  $I_{rms}$ , es mayor a la corriente fundamental  $I_1$  y se puede expresar con la ecuación:

$$I_{rms} = I_1 \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}$$

A partir de estas fórmulas, es posible calcular cuántas veces aumenta el contenido armónico las pérdidas de la corriente de línea. Por ejemplo, las pérdidas de corriente  $I_{rms}$  con un valor THDi de 40 % se multiplican por 1,16 en comparación con un sistema sin armónicos, lo que se traduce en una menor eficiencia de la red y un mayor consumo energético para cubrir las necesidades del proceso.



### Efecto de los convertidores en los costes de un proyecto

Además de lo ya mencionado, una mayor corriente de línea también precisa que el sistema de energía esté sobredimensionado para llevar el exceso de corriente, lo que supone una menor sostenibilidad de las instalaciones y el aumento del consumo de materiales debido al mayor tamaño de los componentes.

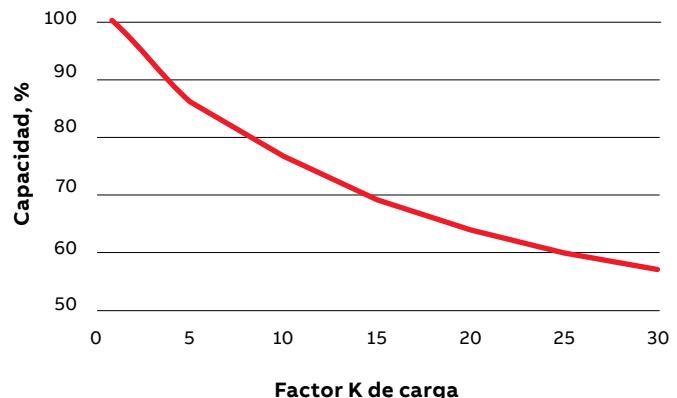
Un bajo contenido armónico significa que no se necesitan cables demasiado grandes. Cuando la THDi es elevada,

los cables tienen que estar sobredimensionados por el aumento de la corriente de línea. Ese sobredimensionamiento evita que el cable se recaliente y que un posible daño al aislamiento acabe provocando un incendio. Algunas recomendaciones sobre el tamaño de los cables tienen en cuenta la THDi de la red. Así, una THDi inferior al 10 % no precisa ningún otro sobredimensionamiento mientras que, con la típica THDi del 40 % en convertidores estándar de seis pulsos con impedancia integrada, se precisa un sobredimensionamiento de en torno al 10 %, y para una THDi del 70 % el sobredimensionamiento necesario es mayor al 20 %.

Otro elemento importante del sobredimensionamiento es el transformador, que suele ser uno de los componentes más caros de la red energética de un proyecto. Cuando un transformador genera una carga no lineal (como un convertidor), es necesario disminuir la capacidad del transformador para evitar un sobrecalentamiento y el consecuente fallo. Para una THDi cercana al 40 %, se recomienda que el equipo del transformador esté sobredimensionado alrededor de un 40 %; en el caso de una THDi inferior al 10 %, la recomendación es de aproximadamente el 10 %.

Underwriter Laboratories crearon el factor K con objeto de definir la capacidad de un transformador para trabajar con niveles variables de corriente de carga no lineal sin superar el aumento de temperatura asignado.<sup>4</sup> El factor K va de 1 a 50. Un factor K de 50 hace referencia a las condiciones armónicas más complicadas. Los transformadores estándar tienen un factor K de 1,0 y solo se asignan a cargas lineales que no generan armónicos. En el diagrama del típico derrateo de un transformador se puede observar cómo afectan varios tipos de carga a la capacidad del transformador y qué derrateo se requiere en los niveles de THDi habituales para convertidores de frecuencia estándar.

### Derrateo de transformador típico



### Efecto de los convertidores en la fiabilidad del proceso

La presencia de armónicos también puede generar un problema más serio que una menor sostenibilidad de las instalaciones y el aumento del consumo energético o de los costes del proyecto debido al sobredimensionamiento de los componentes. Nos referimos a la fiabilidad, concretamente, a la fiabilidad del suministro eléctrico que mantiene en marcha los procesos y sistemas de una instalación. Un fallo en el su-

### Estimación del factor K en cargas

Carga	Factor K
Motores, iluminación incandescente, calentamiento por resistencia, grupos electrógenos (sin convertidores de estado sólido)	K-1
Lámparas de descarga de alta intensidad, calentadores de inducción, máquinas de soldadura, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) con opción de filtro de entrada, controles de estado sólido y PLC	K-4
Circuitos de conectores múltiples en centros de salud, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) sin opción de filtro de entrada, equipos en líneas de montaje o producción, centros escolares y aulas	K-13
Convertidores de frecuencia SCR, circuitos con equipos de tratamiento de datos exclusivos, centros de cuidados críticos	K-20
Circuitos de conectores multifilares en laboratorios educativos, médicos, industriales y comerciales	K-30
Otras cargas que, según se ha identificado, generan cantidades de armónicos muy elevadas	K-40

ministro eléctrico puede tener graves consecuencias para instalaciones fundamentales, como hospitales, donde quizás ponga en peligro la vida de los pacientes; o en líneas de producción, donde puede causar enormes daños económicos. En el caso de los centros de datos, el tiempo de inactividad supone un gasto de 5.600 dólares por minuto, y el consiguiente daño a la reputación es incluso mayor.<sup>5</sup>

Por lo tanto, los generadores que dan a este tipo de instalaciones alimentación auxiliar deben estar preparados para sortear posibles problemas que puedan experimentar al alimentar cargas no lineales con un alto contenido de armónicos. Por regla general, un generador que trabaja con convertidores de seis pulsos necesita una sobredimensionación de entre 2 y 2,5. Si un generador no está sobredimensionado, puede que su regulador automático de tensión no funcione bien a causa del exceso de armónicos y, en estas circunstancias, es posible que el generador se dispare.

Otro aspecto de la fiabilidad del proceso es la capacidad de dar una potencia nominal a la aplicación controlada por un convertidor de frecuencia. Esto puede representar un auténtico problema, por ejemplo, en túneles largos donde los

cables del motor tienen una longitud de cientos de metros, lo que puede generar una importante caída de tensión que provoque una tensión inferior en el extremo del motor del ventilador. Cuando el funcionamiento es normal, esto puede dar lugar a una mayor concentración de humo de vehículos y una menor visibilidad dentro del túnel en horas punta. Pero, en el caso de una extracción de humo de emergencia, puede que los ventiladores no sean capaces de extraer el humo a la circulación asignada, lo que crea un riesgo para la seguridad de los usuarios del túnel.

El uso de transformadores elevadores intermedios es una solución cuando la tensión es más baja. Sin embargo, esto incrementa los costes del proyecto y, además, influye negativamente en la sostenibilidad del mismo al aumentar el número de componentes. Otra opción es usar convertidores de frente activo (AFE) con condensadores de bus de CC para el control de procesos. Con esta tecnología es posible subir la tensión a su nivel nominal en el extremo de la aplicación y dar una potencia nominal al motor, da igual si se produce una caída de tensión a lo largo de los cables.

Veremos esta tecnología en el capítulo siguiente.

# Tecnología de convertidores de frente activo y sus ventajas respecto a otras soluciones

El mercado actual ofrece muchas tecnologías de convertidores, con resultados de calidad energética muy diferentes. Cuando para una aplicación es fundamental tener un contenido armónico bajo, se deberían seleccionar con sumo cuidado los convertidores del proyecto para evitar componentes extra que resultan costosos, como filtros de armónicos, así como posibles efectos negativos en la fiabilidad del proceso.

## ¿Qué es la tecnología de convertidores AFE con condensadores de bus de CC?

El presente documento se centra en los convertidores de frente activo (AFE) con condensadores de bus de CC y sus ventajas. Hablaremos de la tecnología con más detalle.

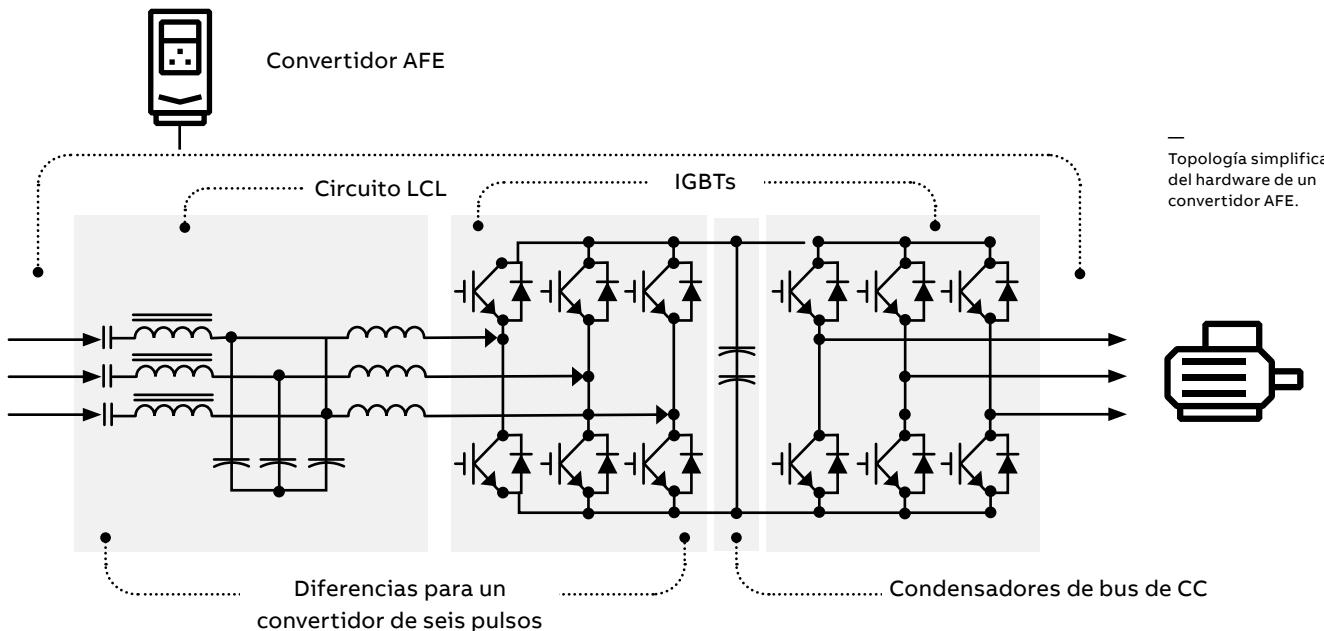
Los convertidores controlan el par y la velocidad de un motor de CA para responder a las necesidades de la aplicación, cambiando para ello la tensión y la frecuencia de entrada del motor. Los convertidores van instalados entre la alimentación eléctrica y el motor, y regulan la energía que llega a este. Dentro del convertidor, la energía circula primero por un rectificador que transforma la potencia de CA entrante en potencia de CC. A continuación, la potencia de CC circula por los condensadores del convertidor, que hacen que la forma de onda eléctrica sea suave. En el paso siguiente, un inversor vuelve a cambiar la potencia de CC entrante en potencia de CA antes de que llegue al motor. El inversor ajusta la tensión y la frecuencia de la corriente que llega al motor, lo que significa que el motor no va a funcionar al par y la velocidad nominales, sino a un par y una velocidad totalmente adaptados a las necesidades del proceso. Esto supone ahorrar enormes

cantidades de energía y mejorar la fiabilidad del proceso y la calidad del producto final.

Un convertidor AFE también transforma la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC), y luego vuelve a cambiar la CC a CA, como el típico convertidor de frecuencia de seis pulsos. La diferencia entre un convertidor de seis pulsos y uno AFE reside en cómo transforman los convertidores la CA en CC, y la electrónica empleada en esa transformación.<sup>6</sup>

En los convertidores AFE, transistores bipolares de puerta aislada (IGBTs) sustituyen los rectificadores de diodos de un convertidor de seis pulsos tradicional (convertidores de CA a CC). Durante muchos años, se han usado convertidores para controlar motores empleando IGBTs de salida a fin de generar una corriente sinusoidal para el motor. En los convertidores AFE, el control preciso de los IGBTs de entrada genera la onda de corriente sinusoidal que presenta la red.

Otra diferencia entre los convertidores AFE y los de seis pulsos es que incluyen un circuito LCL (inductor-condensador-inductor) integrado antes de los IGBTs de frente abierto.





La gama ABB de convertidores ACS880 industriales de armónicos ultrabajos, ACH580 para HVAC y ACQ580 para la industria del agua, se basa en tecnología de frente activo con condensadores de bus de CC.

Además, el circuito LCL elimina los armónicos por encima de la frecuencia de commutación del IGBT. Todo esto genera un contenido armónico de la corriente en la red inferior al 3 %, en contraste con la típica solución de seis pulsos, con una THDi de en torno al 40 %. En primer lugar, los convertidores de frente activo con condensadores de bus de CC no producen armónicos, mientras que otras tecnologías de frecuencia variable quizás requieran costosas soluciones adicionales para reducir los armónicos a un mínimo.

#### Ventajas de los convertidores de armónicos ultrabajos

ABB cuenta con una amplia cartera de convertidores de armónicos ultrabajos (ULH) industriales y para sectores específicos, aplicaciones de HVAC, aguas limpias y residuales, basados en tecnología de frente activo. Esta gama ofrece a la industria muchas ventajas.

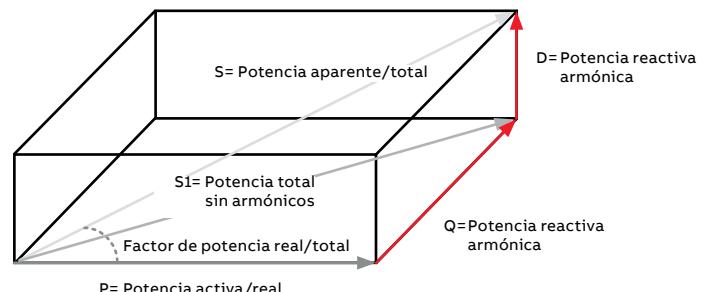
Con una THDi del 3 %, las instalaciones pueden evitar sobredimensionar en exceso los componentes de la red energética, como generadores, transformadores, aparamenta y cables en proyectos nuevos. Asimismo, al usar menos materiales, logran que los proyectos sean más sostenibles.

En proyectos de retrofit, cuando la infraestructura de la red energética ya está establecida, gracias a los convertidores AFE las instalaciones evitan que los equipos de la red se sobrecalienten y empiecen a fallar antes de tiempo, lo que puede suceder cuando el contenido armónico es demasiado alto y supera la capacidad portante de la red. Los convertidores AFE también permiten añadir una carga de convertidor de frecuencia extra a los transformadores y generadores *in situ* que ya están a “plena capacidad”, sin tener que sustituirlos por otros de mayor tamaño.

A parte de los armónicos, que son el componente de distorsión de la potencia reactiva, los convertidores ULH también controlan el componente de desplazamiento de la potencia reactiva. Si la distorsión de corriente y tensión es el resultado de comutar la electrónica de potencia en los dispositivos electrónicos, el desplazamiento de corriente y tensión significa que las ondas están fuera de fase. Esto sucede por las cargas inductivas y capacitivas en la red. Un ejemplo típico

de cargas inductivas son los motores que tienen varias aplicaciones en marcha, mientras que los servidores informáticos son un buen ejemplo de cargas capacitativas. En realidad, la potencia reactiva no hace ningún trabajo propiamente dicho, pero resulta necesaria en las cargas inductivas y capacitativas para mantener estable la tensión en la red.

Para estimar cuánta potencia reactiva hay en la red, se emplea un valor llamado factor de potencia, el cual indica la relación entre la potencia activa que realmente realiza el trabajo, y la potencia total que recibe el circuito. Cuanto más cerca de 1 está el factor de potencia, menos potencia reactiva hay en la red, menor es la corriente de línea, y más eficiente y fiable es la red.



El factor de potencia (PF) real es la relación entre dos componentes de potencia reactiva: los factores de potencia de distorsión y desplazamiento.

El PF de distorsión es la relación de la corriente fundamental y la corriente total con armónicos:  $1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

El PF de desplazamiento es la relación de la potencia activa respecto a la potencia total sin armónicos, y también es conocido como  $\cos\phi$ :  $P/S_1$ .

El PF real es una multiplicación del PF de distorsión y el PF de desplazamiento:  $\cos\phi \cdot 1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

Si no hay armónicos ( $THD_i = 0$ ) ni potencia reactiva generada por cargas inductivas o capacitativas, la corriente y la tensión están en fase, es decir:  $\phi = 0^\circ$  y  $\cos\phi = 1$ , PF total = 1.

A menudo, las empresas de servicios públicos penalizan a los clientes por un factor de potencia bajo porque a ellas les supone ofrecer una mayor capacidad de generación y distribución de energía, además de implicar más pérdidas en la línea eléctrica.

Los convertidores estándar cuyo diseño incluye condensadores de CC suelen compensar bien la potencia reactiva de las cargas inductivas que controlan (los motores).



Los convertidores emplean sus condensadores para suministrar corriente reactiva a los motores y evitar que el servicio de suministro origine la propia corriente reactiva.

Sin embargo, convertidores más sofisticados, con condensadores de CC y freno activo, como los convertidores ULH de ABB, pueden dar un paso más al compensar también otras cargas reactivas de la red. Así, potencialmente, los usuarios finales se ahorran la instalación en sus recintos de compensadores independientes de potencia reactiva.

Los convertidores ULH también mejoran la fiabilidad de instalaciones y operaciones. Como tienen un contenido armónico mínimo, eliminan las interrupciones de procesos que provocan las sobrecargas de red generadas por una mayor corriente de línea. También se evita el funcionamiento defectuoso de los dispositivos conectados resultante de una corriente distorsionada.

La función de elevación de tensión en los convertidores ULH de ABB garantiza una tensión nominal en los terminales del motor, incluso con los cables de motor largos y las redes frágiles habituales no solo en túneles, sino también, por ejemplo, en plantas de aguas limpias y residuales situadas en lugares alejados. En instalaciones de agua ubicadas en puntos remotos, puede resultar crucial contar con capacidades nominales de bombeo para garantizar un abastecimiento continuo de agua dulce a zonas urbanas, así como la eliminación de aguas

—  
Los convertidores regenerativos de armónicos ultrabajos ACS880 de ABB presentan más ventajas para aquellas aplicaciones donde es posible recuperar energía.

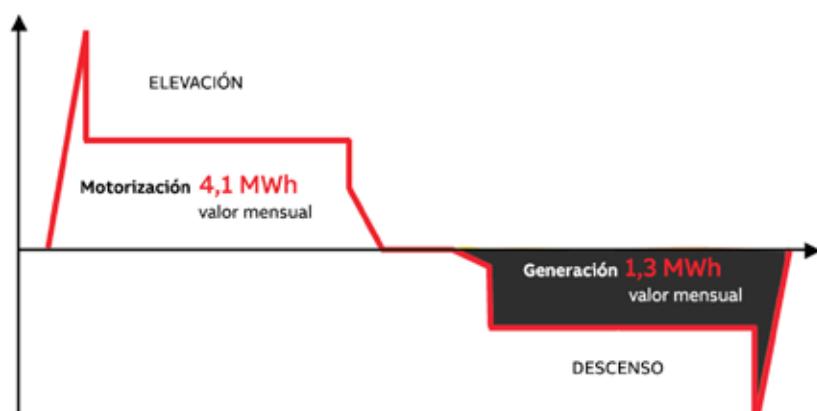
de tormenta y residuales. Las interrupciones en este tipo de servicio pueden implicar un coste de millones de euros y tener un efecto devastador para las comunidades atendidas.

Además de todas las ventajas ya mencionadas, un modelo de convertidor ULH con capacidad regenerativa permite recuperar energía de los procesos mecánicos del sistema, por ejemplo, durante la aplicación del frenado, en lugar de perderla en forma de calor por medio de resistencias de frenado o frenos mecánicos empleados, por ejemplo, en los sistemas de ascensores y grúas. Los convertidores con una unidad regenerativa integrada facilitan un frenado activo al usar como generador un motor de la aplicación, y luego llevan la energía de vuelta a la red o a un acumulador para su uso posterior.

Otro tipo de aplicación es el frenado puntual, cuando el objetivo no es ahorrar energía en el frenado regular, sino detener la aplicación lo antes posible cuando resulta necesario. Este tipo de frenado se puede usar en la ventilación de túneles cuando, en caso de incendio, los ventiladores de emergencia tienen que parar lo antes posible, por ejemplo, para limitar la propagación del humo.

Hay varias maneras de frenar una aplicación, por ejemplo, con choppers y resistencias de frenado, unidades externas de frenado regenerativo y convertidores matriciales, pero se considera que los convertidores ULH con capacidad regenerativa son una opción preferente por varias razones<sup>7</sup>. Además de minimizar el contenido armónico y la regeneración de energía, presentan las siguientes ventajas:

- sistema más eficiente ya que la unidad regenerativa es una parte íntegra del convertidor, no un componente independiente
- sistema menos complejo puesto que no se necesita ningún componente fuera del convertidor, como choppers o resistencias de frenado, ni unidades regenerativas independientes



—  
Un ejemplo práctico de una grúa de manejo de residuos con un motor de elevación de 55 kW, un motor de desplazamiento de 9 kW, un motor para carro de 4,5 kW y un motor para cuchara de agarre de 25 kW muestra que con el uso de convertidores regenerativos ABB se puede reducir el coste anual de energía en un 32 %, lo que supone un ahorro de 2.300 € a un precio de 0,15 € / kWh.

- la instalación ocupa menos espacio porque todos los componentes están integrados
- en comparación con el frenado por resistencia, se precisa menos aire acondicionado de la sala de control ya que no se pierde energía en forma de calor

### Tecnologías alternativas para mitigar los armónicos

Hay muchas formas de reducir los armónicos en las redes energéticas con convertidores de seis pulsos, y todas ellas afectan de manera diferente a la calidad de la energía de la red, lo que da lugar a una mayor o menor rentabilidad, fiabilidad o eficiencia energética. Se considera que la tecnología de convertidores de frente activo con condensadores de bus de CC es conveniente por varias razones. La primera de ellas es que no introduce armónicos, por lo que no se necesitan métodos adicionales de mitigación armónica.

Otro aspecto importante es el resultado de la mitigación armónica con cargas parciales, que es donde las aplicaciones con control de frecuencia están funcionando la mayoría del tiempo. Los convertidores de frente activo de ABB presentan un bajo contenido armónico con cargas parciales mientras que, por ejemplo, los filtros pasivos tienen ciertas limitaciones.

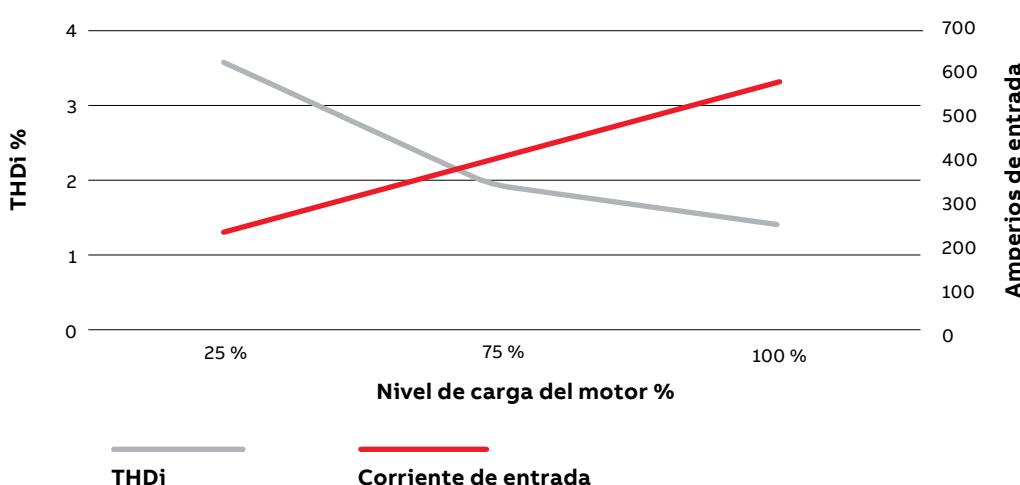
Los filtros pasivos de armónicos se ajustan a la frecuencia específica de armónicos a eliminar. Es posible instalar varios filtros pasivos en paralelo para reducir distorsiones significativas generadas por múltiples frecuencias de armónicos, pero esto implica una instalación de mayor tamaño y más costes.

Los sistemas de filtros pasivos se diseñan según la carga y, si cambia el perfil de carga, entonces también hay que cambiar los filtros pasivos instalados.

Por otro lado, cabe recordar que en cargas inferiores al 20-30 %, hay que desconectar los condensadores de los filtros pasivos para evitar efectos negativos en el factor de potencia de la instalación y problemas con la alimentación del generador, lo que mina su capacidad para reducir los armónicos.

Los filtros activos de armónicos ofrecen una reducción armónica mucho mejor que los filtros pasivos ya que detectan múltiples frecuencias de armónicos presentes en la red. Además, gracias a los IGBTs que integra su diseño, producen corrientes contra-armónicas para cancelar los armónicos generados por cargas no lineales. Sin embargo, su rendimiento en cuanto a la reducción de armónicos también cambia notablemente con la carga: al 50 %, la THDi puede ser fácilmente de un 12-14 %.

Los convertidores de múltiples pulsos son otra alternativa para mitigar los armónicos. En ellos, la distorsión armónica queda notablemente reducida con el uso de varios diodos extra en el rectificador (emplean más diodos que un convertidor de seis pulsos estándar). Sin embargo, la complejidad de la instalación, el enorme espacio ocupado y la necesidad de tener transformadores de cambio de fase son importantes inconvenientes de esta tecnología.



### Contenido armónico con carga nominal en distintas soluciones

	Rectificador de 6 pulsos sin reactancia	Rectificador de 6 pulsos con reactancia	Rectificador de 6 pulsos con filtro pasivo	Rectificador de 6 pulsos con filtro activo	Convertidor de múltiples pulsos	Convertidor de frente activo
THDi y respectiva onda de corriente	>100 %	~40 %	<10 %	<7 %	6 a 10 % (12 pulsos) <6 % (18 pulsos)	<3 %

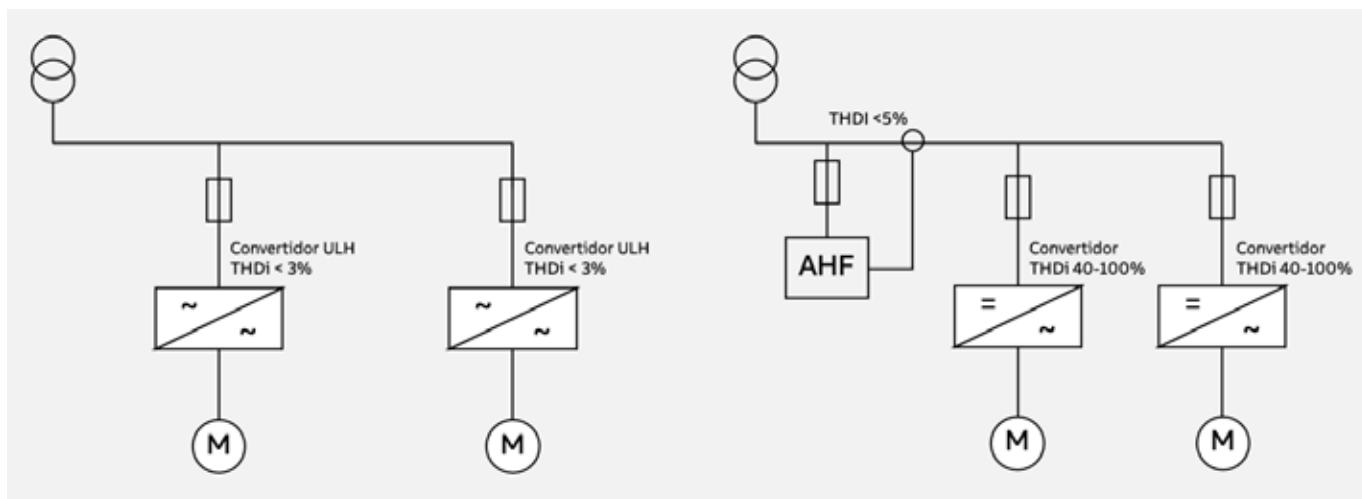
El mercado ofrece varias tecnologías de convertidores de frente activo. Además de convertidores de frente activo con condensadores de CC, también hay convertidores AFE sin condensadores de CC, llamados convertidores matriciales.<sup>6</sup> Quizá eliminar los condensadores de un conductor reduzca el coste, pero tiene un efecto negativo en su rendimiento, con limitaciones importantes en la tensión de salida del convertidor, la respuesta a los armónicos, el factor de potencia y el funcionamiento con cortes de red.

Por ejemplo, puede que un convertidor AFE sin condensadores solo produzca una tensión de salida del 92 % o menos si está funcionando en modo de armónicos bajos con una THDi de aproximadamente el 5 %. Los motores que no reciben la máxima tensión no pueden producir el par asignado a plena velocidad a menos que consuman más corriente para compensar esa falta de tensión. Sin embargo, esto hace que el motor se caliente, lo que acorta su vida útil. Y cuando los convertidores matriciales funcionan en modo de máxima tensión de salida, el contenido armónico en la corriente puede llegar al 10 %, lo que supera la referencia estándar de aceptación general para los convertidores con un bajo contenido armónico, que es una THDi del 5 %, si aplicamos directamente al convertidor la estricta norma IEEE 519.

Los convertidores AFE que incluyen en su diseño condensadores de bus de CC no tienen este problema y dan al motor la máxima tensión, además de reducir los armónicos a un mínimo.

A la hora de comparar diferentes tecnologías de mitigación armónica, también es importante considerar cómo afectan a la eficiencia del sistema. De primeras, los convertidores de frente activo son menos eficientes que las tradicionales soluciones de seis pulsos debido a la unidad de alimentación activa extra (IGBT) que incluye su diseño, pero se suelen pasar por alto las pérdidas que sufre el sistema por los filtros de armónicos, que ofrecen los mismos resultados de armónicos bajos. En realidad, las pérdidas generales en los sistemas con convertidores de armónicos ultrabajos son iguales o menores, y ofrecen las ventajas añadidas respecto a los filtros de armónicos independientes de presentar un factor de potencia unitario y eliminar caídas de tensión en los terminales del motor.

Se suele fomentar el uso de filtros activos de armónicos para instalaciones en grupo (con un filtro para varios convertidores) porque así la instalación sale más rentable. Sin embargo, a veces, se ignora el hecho de que los filtros activos solo mitigan los armónicos previos, los que se dirigen a la instalación, pero una THDi elevada está presente en todo el sistema, desde la fuente de armónicos hasta el filtro activo. Esto se traduce en un aumento de las pérdidas de energía en la parte posterior del sistema y una menor fiabilidad del mismo, aparte del riesgo de que el sistema sufra una sobrecarga por un contenido armónico excesivo en caso de producirse un fallo centralizado del filtro AHF. Los convertidores de frente activo simplemente no generan armónicos, por lo que se evitan los inconvenientes de otras tecnologías de reducción de armónicos.



Mitigación armónica en sistemas con convertidores ULH y un filtro activo de armónicos (AHF)

## Mitigación armónica con filtro pasivo

Contenido armónico con carga nominal = 10 %

Eficiencia del sistema = 87 %



## Mitigación armónica con filtro activo

Contenido armónico con carga nominal = 5 %

Eficiencia del sistema = 85,7 %



## Mitigación armónica con convertidores de frente activo

Contenido armónico con carga nominal = 3 %

Eficiencia del sistema = 87,9 %



# Conclusión

Al ajustar la velocidad del motor a la necesidad de la aplicación, los convertidores de frecuencia pueden ahorrar considerables cantidades de energía. Sin embargo, antes de tomar una decisión final, resulta fundamental evaluar cómo afectarán los convertidores al sistema energético, puesto que algunas tecnologías de frecuencia variable pueden tener un impacto negativo en la calidad de la energía en la red, lo que supone una pérdida de eficacia y fiabilidad del sistema, además de un aumento de los costes del proyecto.

En el caso de sistemas que precisan un contenido armónico mínimo, como suele suceder en instalaciones de servicios esenciales, los convertidores de frecuencia basados en tecnología de frente activo con condensadores de bus de CC, por ejemplo, los convertidores de armónicos ultrabajos de ABB, son la solución perfecta. Garantizan no solo la eficiencia del proceso en sí, sino también la de la red energética y, además, mejoran la fiabilidad del proceso controlado. La importante reducción de los gastos de capital y de explotación que ofrecen los convertidores de armónicos ultrabajos con frente activo los convierte en una opción de primer orden para empresarios y operadores de empresas de servicios públicos.

- (1) Technical guide No. 6 Guide to harmonics with AC drives (Guía técnica nº 6 Guía de los armónicos con accionamientos de CA), ABB Drives 2017.
- (2) Commercial Buildings Energy Consumption Survey (Estudio del consumo energético en edificios comerciales), Administración de Información Energética de EE. UU. (EIA) 2016.
- (3) Manufacturing Energy Consumption Survey – Dairy industry (Estudio del consumo energético en producción – Sector lácteo), Administración de Información Energética de EE. UU. (EIA) 2010.
- (4) Proposed requirements and proposed effective dates for the first edition of the standard for dry-type general purpose and power transformers (Propuesta de requisitos y fechas de entrada en vigor de la primera edición de la normativa para transformadores de potencia y de tipo seco de uso general) UL1561, Underwriters Laboratories 1991.
- (5) The Cost of Downtime (El coste del tiempo de inactividad), Gartner Research 2014.
- (6) Active front end drive technologies (Tecnologías de convertidores de frente activo), ABB Drives 2019.
- (7) Technical guide No. 8 Electrical braking, (Guía técnica nº 8. Frenado eléctrico), ABB Drives 2018.



---

**ABB Motion**

P.O. Box 1  
FI-00232  
Helsinki, Finlandia