

Potenciales de Ahorro de Energía utilizando Convertidores de Potencia Regenerativos en
Industrias con Alto Porcentaje de Carga Motriz

Jonathan Julian Sánchez Mondragon

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Sistemas de Distribución de Energía
Eléctrica.

Director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

(A Dios y a mi familia)

Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Estado Actual de la Tecnología de Frenado Regenerativo para Motores utilizados en la Industria, Enfocándose en Aplicaciones con Alto Porcentaje de Carga Motriz.	10
1.1 Métodos Regenerativos.....	13
1.2 Convertidores de Potencia	14
1.3 Rectificadores	16
1.3.1 Rectificadores no Controlados.....	18
1.3.2 Puente de Onda Completa.....	19
1.3.2.1 Puente Controlado de Onda Completa.....	20
1.4 Convertidores CC-CC.....	21
1.5 Convertidor CC-CC Reductor.....	22
1.6 Convertidor CC-CC Elevador.....	22
1.7 Inversor de Onda Cuadrada	24
2. Uso de Convertidores de Potencia Regenerativos en Industrias con Alto Porcentaje de Carga Motriz.....	33
3. El Impacto Potencial de la Implementación de Convertidores de Potencia Regenerativos en Industrias con Alto Uso de Carga motriz.....	37
4. Conclusiones	44
Referencias Bibliográficas	46

Tablas**Pág.**

Tabla 1. <i>Estado de los interruptores y tensión de la carga</i>	24
---	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Aplicación de frenado regenerativo en frenado masivo</i>	13
Figura 2. <i>Sistema de inyección de energía a la red procedente del frenado regenerativo en un sistema ferroviario</i>	14
Figura 3. <i>Diagrama de un convertidor de potencia</i>	15
Figura 4. <i>Estructura básica de un rectificador</i>	16
Figura 5. <i>Representación de los cuadrantes</i>	17
Figura 6. <i>Convertidor CC-CA monofásico de media onda alimentado con una carga resistiva</i> .	18
Figura 7. <i>Rectificador monofásico de onda completa</i>	19
Figura 8. <i>Esquema de un rectificador monofásico de onda completa controlado en un ángulo de 90° y suponiendo una carga resistiva</i>	20
Figura 9. <i>Esquema básico de un convertidor reductor</i>	22
Figura 10. <i>Estructura básica de un convertidor de tipo elevador</i>	23
Figura 11. <i>Esquema básico de un inversor monofásico</i>	24
Figura 12. <i>Modulación PWM mediante una señal de referencia sinusoidal y una portadora triangular</i>	26
Figura 13. <i>Circuito básico de un convertidor CA-CA</i>	27
Figura 14. <i>Forma de la onda de salida de un convertidor CA-CA con control todo o nada</i>	27
Figura 15. <i>Forma de onda de un convertidor CA-CA con control de fase</i>	28
Figura 16. <i>Factor de potencia</i>	30
Figura 17. <i>Convertidor</i>	35

Resumen

Título: Potenciales de ahorro de energía utilizando convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto porcentaje de carga motriz *

Autor: Jonathan Sánchez **

Palabras Clave: Convertidores de potencia, generación de energía, disminución de consumo energético

Descripción:

El uso de convertidores de potencia regenerativos puede proporcionar un mejor aprovechamiento de la energía en empresas donde se utiliza constantemente carga motriz. Estos convertidores permiten recuperar y reutilizar la energía generada durante el frenado o desaceleración de los motores, en lugar de disiparla como calor. Esto puede resultar en beneficios significativos desde la perspectiva del aprovechamiento y optimización de los recursos económicos y ambientales. Algunas de las aplicaciones de los convertidores de potencia regenerativos incluyen sistemas de frenado regenerativo en trenes, autobuses, tránsitos y vehículos eléctricos, así como también en sistemas de generación de energía renovable, como la energía eólica y la hidroeléctrica. El almacenamiento de energía mediante el uso de volantes de inercia o sistemas regenerativos de frenada puede mejorar los costos de las instalaciones aisladas de generación de energía.

El uso de convertidores de potencia regenerativos puede tener un impacto ambiental positivo al permitir un mejor aprovechamiento de la energía. Al recuperar y reutilizar la energía generada durante el frenado o desaceleración de los motores, se reduce la cantidad de energía desperdiciada y se disminuye la demanda de energía de fuentes convencionales. Esto puede tener los siguientes efectos: Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero Ahorro de recursos energéticos, Menor impacto en el medio ambiente.

Es importante destacar que el impacto ambiental de los convertidores de potencia regenerativos puede variar dependiendo del contexto específico de su implementación, así como de otros factores relacionados con la eficiencia energética y la gestión de los recursos. Por lo tanto, es fundamental realizar evaluaciones específicas y considerar las condiciones locales para determinar el impacto ambiental preciso.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Energy saving potentials using regenerative power converters in industries with high percentage of driving load*

Author(s): Jonathan Sánchez**

Key Words: Power converters, energy generation, reduction of energy consumption

Description:

The use of regenerative power converters can provide better use of energy in companies where motive load is constantly used. These converters allow the energy generated during braking or deceleration of the motors to be recovered and reused, instead of dissipating it as heat. This can result in significant benefits from the perspective of the use and optimization of economic and environmental resources. Some of the applications of regenerative power converters include regenerative braking systems in trains, buses, transits, and electric vehicles, as well as in renewable energy generation systems such as wind and hydropower. Energy storage using flywheels or regenerative braking systems can improve the costs of isolated power generation facilities.

The use of regenerative power converters can have a positive environmental impact by allowing better use of energy. By recovering and reusing the energy generated during braking or deceleration of motors, the amount of energy wasted is reduced and the demand for energy from conventional sources is reduced. This can have the following effects: Reduction of greenhouse gas emissions, Savings of energy resources, Less impact on the environment.

It is important to highlight that the environmental impact of regenerative power converters can vary depending on the specific context of their implementation, as well as other factors related to energy efficiency and resource management. Therefore, it is essential to carry out specific assessments and consider local conditions to determine the precise environmental impact.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Specialization in Electrical Energy Distribution Systems. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor of Sciences with Emphasis in Electrical Engineering.

Introducción

El frenado regenerativo es una tecnología que se ha empezado a implementar en industrias con alto porcentaje de carga motriz en los últimos años. Esta tecnología, basada en el aprovechamiento de la energía cinética generada durante el frenado de motores eléctricos (Hamada & Orhan, 2022), ofrece potenciales de ahorro de energía significativos y beneficios tanto económicos como medioambientales.

El consumo de energía preocupa constantemente al consumo de energía en las industrias que dependen mucho de motores eléctricos para operar, como la industria automotriz, la ferroviaria y la de elevación y transporte. Tradicionalmente, cuando un motor eléctrico se frena, la energía cinética generada se disipa en forma de calor a través de sistemas de frenado convencionales, como frenos mecánicos o resistencias de frenado (Bryant & Day, 2022). Esta energía desperdiciada representa una pérdida significativa en eficiencia energética (Singh, 2013).

El frenado regenerativo ofrece una solución innovadora a este problema al convertir la energía cinética generada durante el frenado en energía eléctrica que puede ser reutilizada. Esto se logra mediante el uso de convertidores de potencia regenerativos, que actúan como interfaces entre el motor eléctrico y la fuente de alimentación. Estos convertidores son capaces de invertir el flujo de energía entre el motor y la fuente de alimentación, permitiendo que la energía generada durante el frenado sea devuelta a la red eléctrica o almacenada en baterías para su uso posterior (Luis et al., 2021).

La implementación del frenado regenerativo en industrias con alto porcentaje de carga motriz puede resultar en importantes beneficios para ahorrar energía. En primer lugar, al recuperar y reutilizar la energía generada durante el frenado, se reduce la cantidad de energía eléctrica

requerida de la red de suministro (Luis et al., 2021). Esto se traduce en una disminución en los costos de energía para las industrias, lo que puede tener un impacto significativo en su rentabilidad.

Además del ahorro económico, el frenado regenerativo también tiene beneficios medioambientales. Al reducir la cantidad de energía requerida de fuentes de alimentación externas, se reduce la demanda de energía y, por lo tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de electricidad (Singh, 2013). Esto contribuye a la reducción de la huella de carbono de las industrias y a la mitigación del cambio climático.

A pesar de estos beneficios, estos sistemas que integran la funcionalidad de frenado regenerativo son tecnologías emergentes que no han alcanzado una alta penetración en el mercado industrial (Lima et al., 2021). Lo anterior se exceptúa en el ámbito de la movilidad eléctrica, en el que es ampliamente implementado (Apostolidou & Papanikolaou, 2018), esto puede deberse a la falta de conocimiento y a la percepción de su elevado costo.

En este sentido, es necesario revisar el estado actual del frenado regenerativo en la industria, para evaluar su viabilidad a largo plazo y estimar el potencial de ahorro energético que puede ofrecer. Esta revisión permitirá conocer la importancia de esta tecnología en términos de eficiencia energética, costos operativos y beneficios medioambientales.

Además, al conocer aspectos técnicos y económicos relacionados con la implementación del frenado regenerativo, se podrán identificar las barreras y desafíos que impiden su adopción en industrias locales. Esto permitirá generar recomendaciones y estrategias para superar dichas barreras y fomentar la implementación de esta tecnología, lo cual repercutiría en ahorros de energía, reducción de la huella de carbono y eficiencia energética.

El objetivo general de esta monografía es analizar los potenciales de ahorro en energía usando convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto porcentaje de carga motriz.

Para lograr ese objetivo general se propusieron como objetivos específicos: a) Realizar una revisión sistemática de la literatura científica y técnica para documentar las características y el estado actual de la tecnología de frenado regenerativo para motores utilizados en la industria, enfocándose en aplicaciones con alto porcentaje de carga motriz. b) Analizar y sintetizar los estudios, investigaciones y casos reportados en la literatura científica sobre el uso de convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto porcentaje de carga motriz, para comprender su eficacia en cuanto al ahorro energético y su viabilidad industrial. Y c) Evaluar la evidencia científica y técnica existente sobre el impacto potencial de la implementación de convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto uso de carga motriz, identificando las tendencias, desafíos y oportunidades más relevantes en este campo, y proporcionando recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

El resto del documento está organizado como sigue: en el capítulo 1, se presentarán los fundamentos del frenado regenerativo, se realizará una primera exploración sobre los conceptos, definiciones, marco normativo y antecedentes relacionadas con el frenado regenerativo en la industria. En el capítulo 2 se revisan datos sobre impactos potenciales que pueden lograrse implementando estas tecnologías en industrias de elevada carga motriz, partiendo de lo que está reportado en la literatura. Finalmente se presentan las principales conclusiones del trabajo y las referencias consultadas.

1. Estado Actual de la Tecnología de Frenado Regenerativo para Motores utilizados en la Industria, Enfocándose en Aplicaciones con Alto Porcentaje de Carga Motriz.

Los antecedentes del freno regenerativo se remontan a la búsqueda de métodos para aprovechar la energía generada durante el movimiento de un vehículo en lugar de desperdiciarla.

A lo largo de la historia, la ingeniería ha buscado formas de optimizar el consumo de energía y hacer que los objetos en movimiento sean más autónomos.

En los primeros tiempos, se utilizaba la tracción humana y animal, seguidos por los sistemas de propulsión por agua y vapor. Con la llegada de los motores de combustión, se logró un avance significativo. Sin embargo, en la actualidad, los motores eléctricos han ganado protagonismo, ya que se alimentan de electricidad y son capaces de mover una amplia gama de dispositivos, desde vehículos en la industria automotriz hasta aerogeneradores en aplicaciones industriales (Hamada & Orhan, 2022).

En este contexto, el freno regenerativo surge como una técnica para aprovechar la energía desechada durante el frenado de un vehículo. En vez de disiparse, esta energía cinética se puede transformar en electricidad y almacenar en una batería para su posterior uso.

El freno regenerativo, también conocido como KERS (Kinetic Energy Recovery System), es un sistema que se ha desarrollado a lo largo del siglo XX, pero ha ganado más protagonismo en el siglo XXI. La idea principal es utilizar un motor eléctrico para generar energía eléctrica a partir de la energía cinética generada durante el frenado del vehículo (Bryant & Day, 2022).

Aunque las primeras aproximaciones al freno regenerativo se remontan al siglo XIX, no fue hasta finales del siglo XX y principios del siglo XXI que esta tecnología maduró lo suficiente como para implementarse en la práctica en trenes eléctricos y automóviles de carreras (Hamada & Orhan, 2022).

En cuanto a los antecedentes específicos, se pueden mencionar varios hitos en el desarrollo del freno regenerativo. En el siglo XIX, el francés Louis Antoine Krieger, constructor de vehículos eléctricos, introdujo una especie de freno regenerativo en carruajes tirados por caballos. Cada rueda del carruaje tenía un motor que generaba energía eléctrica durante el frenado (Clegg, 1996).

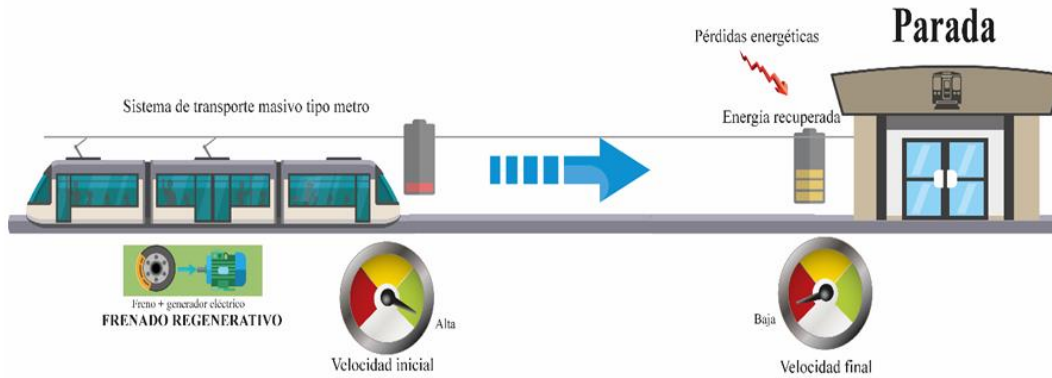
En la Reino Unido del siglo XX, John S. Raworth experimentó con controles regenerativos automáticos en tranvías, con el objetivo de controlar la velocidad y reducirla, generando así energía eléctrica (Clegg, 1996). Aunque este sistema se abandonó temporalmente debido a un incidente, el metro de Londres ha implementado el freno regenerativo en algunas de sus líneas desde 2010, logrando ahorros significativos de energía eléctrica (Pabón, 2022).

En la segunda mitad del siglo XX, se comenzó a trabajar en el desarrollo del freno regenerativo automático con el sistema KERS. En 2009, este sistema se implementó en las competiciones de Fórmula 1, gracias al respaldo de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA). Desde entonces, el sistema KERS se ha utilizado en varios modelos de vehículos de competición y lo han adoptado diferentes fabricantes (Pabón, 2022).

A partir de la década del 2000, el frenado regenerativo ha adquirido una mayor relevancia en diversas aplicaciones industriales, además de los vehículos eléctricos. Se ha extendido su implementación en equipos como turbinas eólicas, bombas, ascensores y otros dispositivos electromecánicos (Hamada & Orhan, 2022).

El frenado regenerativo es una tecnología de control que permite aprovechar la energía cinética durante la desaceleración o el frenado de un dispositivo. En lugar de disiparse en forma de calor, parte de esta energía cinética se convierte en energía eléctrica, lo que brinda la posibilidad de utilizarla de manera productiva. Un ejemplo de aplicación se encuentra en sistemas de transporte masivo, como los trenes eléctricos, según se observa en la Figura 1 (Padilla Villalba, 2020). Durante el frenado, la energía generada por la desaceleración se recupera y se devuelve a la red eléctrica o es almacenada, lo que resulta en un uso más eficiente de la energía y una reducción en el consumo total.

Figura 1.

Aplicación de frenado regenerativo en frenado masivo

Nota: Adaptado de Padilla Villalba, (2020)

1.1 Métodos Regenerativos

En el frenado regenerativo, se utilizan diferentes métodos técnicos para recuperar y almacenar la energía generada durante la desaceleración. Estos métodos incluyen sistemas de almacenamiento de energía, baterías y supercondensadores, y devolver la energía a la red eléctrica.

Almacenamiento en baterías: Durante el frenado regenerativo, la energía cinética del motor eléctrico se convierte en energía eléctrica. Esta energía se puede dirigir hacia baterías recargables, donde se almacena para su posterior uso. Las baterías son capaces de capturar y almacenar la energía de forma eficiente, y posteriormente, durante la aceleración, esta energía almacenada se puede utilizar para alimentar el motor eléctrico o suministrar energía a otros sistemas eléctricos del vehículo (Irland et al., 2021).

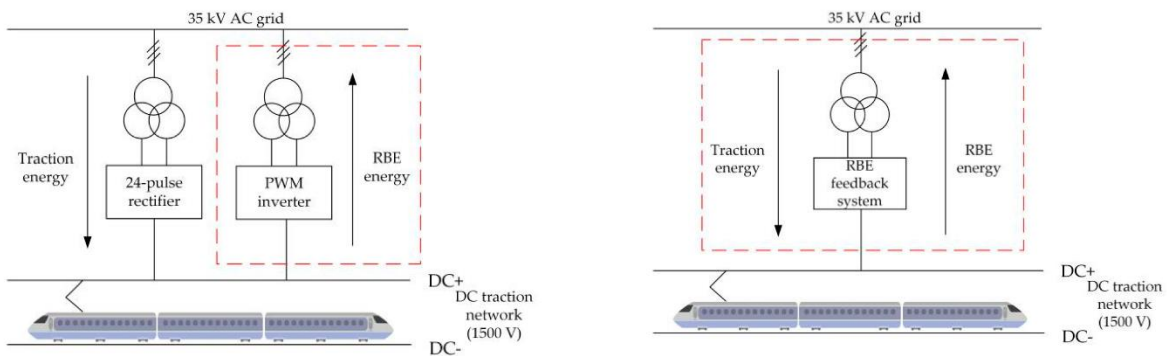
Uso de supercondensadores: Los supercondensadores son dispositivos de almacenamiento de energía que se caracterizan por su capacidad para cargar y descargar rápidamente grandes cantidades de energía. Durante el frenado regenerativo, la energía cinética generada se redirige hacia los supercondensadores, los cuales pueden capturar y almacenar la energía de forma eficiente (Irland et al., 2021). La ventaja de los supercondensadores radica en su alta potencia instantánea,

lo que significa que pueden liberar energía rápidamente cuando se necesita, como durante la aceleración.

Devolución a la red eléctrica: En ciertos casos, la energía generada durante el frenado regenerativo se puede devolver directamente a la red eléctrica. Esto implica la conexión del sistema de frenado regenerativo a la red de distribución eléctrica, lo que permite que la energía se inyecte nuevamente a la red y se utilice por otros consumidores eléctricos (Li et al., 2020). Esta opción es útil en aplicaciones donde la energía generada durante el frenado excede la capacidad de almacenamiento de las baterías o supercondensadores del vehículo. En la Figura 2 se observan dos tipos de estructuras de sistemas de inyección a la red eléctrica para aplicaciones ferroviarias.

Figura 2.

Sistema de inyección de energía a la red procedente del frenado regenerativo en un sistema ferroviario



Nota: Adaptado de López et al (2013)

1.2 Convertidores de Potencia

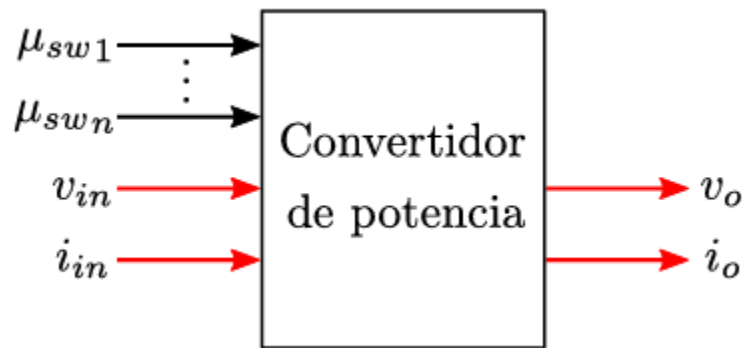
La potencia asociada con cualquier tipo de generación eléctrica se define a partir del producto entre el voltaje v y la corriente i de la fuente, según se presenta en la siguiente expresión:

$$P = (i)(v)$$

La energía eléctrica generada debe ser procesada por medio del convertidor de potencia, el cual presenta una potencia de entrada (P_{in}) y se envían señales de entrada para obtener una potencia de salida (P_o), según se observa en la Figura 3. Así, el convertidor transforma la energía eléctrica de entrada (corriente directa o alterna) en energía eléctrica con diferentes características de la de entrada (Martínez López, 2020), su eficiencia se determina según la relación entre la potencia de salida y la de entrada.

Figura 3.

Diagrama de un convertidor de potencia



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Existen diferentes tipos de convertidores, que dependen de la naturaleza de la entrada de entrada y de salida, los cuales se definen a continuación (Mañana Canteli, 2018):

Convertidores CA/CC o Rectificadores: Transforman corriente alterna en corriente continua y se utilizan en máquinas como motores de corriente continua, máquinas asíncronas y máquinas síncronas. También se utilizan en motores especiales como los motores paso a paso y los motores sin escobillas.

Convertidores CC/CC: Transforman una corriente continua de entrada en una corriente continua de salida, con la posibilidad de incluir aislamiento galvánico. Se utilizan en sistemas embarcados y en combinación con rectificadores no controlados para mejorar el factor de potencia.

Convertidores CC/CA o Inversores: Convierten corriente continua en corriente alterna, permitiendo controlar la frecuencia y el valor eficaz de la tensión o corriente de salida. Son fundamentales en el diseño de accionamientos basados en máquinas asíncronas y síncronas, y se utilizan para acoplar la energía generada por generadores eólicos.

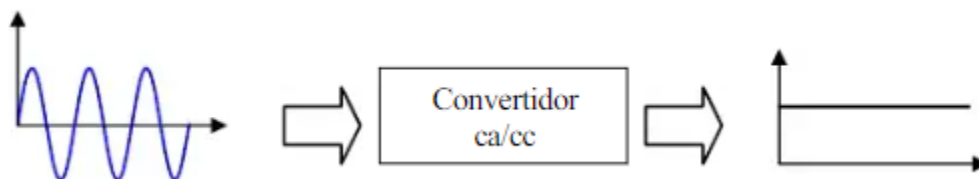
Convertidores CA/CA: Se utilizan en arrancadores suaves para reducir la intensidad demandada durante el arranque de motores de inducción. Pueden modificar el valor eficaz de la tensión de entrada conservando la frecuencia o generar una tensión de salida con una frecuencia submúltiplo de la de entrada. Los cicloconvertidores son un tipo específico de convertidores CA/CA.

1.3 Rectificadores

Corresponden a los dispositivos electrónicos que convierten una tensión en corriente alterna de tipo sinusoidal con una amplitud y frecuencia constante en tensión continua de salida, según se observa en la Figura 4.

Figura 4.

Estructura básica de un rectificador



Fuente: adaptado de Rotella, Mauricio & Morán, Luis & Navarrete, Pablo. (2003).

Para la selección de este tipo de convertidores debe tenerse en cuenta su rendimiento como una medida de las pérdidas que se generan durante el proceso de conversión, si se define la potencia activa consumida por el convertidor como P_e y P_s corresponde a la potencia activa cedida a la carga, entonces la potencia de pérdidas del convertidor, P_p , se puede calcular como:

$$P_p = P_e - P_s$$

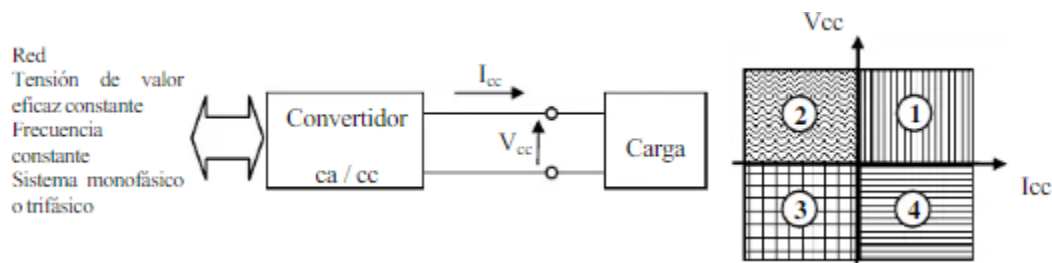
Asimismo, el rendimiento de este tipo de convertidor se define como:

$$\eta = 1 - \frac{P_p}{P_e}$$

Respecto al rendimiento, se prefiere que el rectificador tenga un mayor rendimiento. Sin embargo, debe considerarse que, aunque el motor transforma la energía eléctrica en mecánica, durante el frenado puede convertirse en un generador de forma que transforma la energía desde la red y hacia esta. De este modo se debe introducir el concepto de cuadrante, el cual se representa gráficamente en la Figura 5.

Figura 5.

Representación de los cuadrantes



Nota: Adaptado de López et al (2013)

El convertidor mostrado en la figura puede generar una tensión V_{cc} y una corriente I_{cc} . El funcionamiento del convertidor se divide en cuatro cuadrantes según los signos de V_{cc} e I_{cc} :

Cuadrante 1: $V_{cc} > 0, I_{cc} > 0$. En este cuadrante, la energía fluye desde el convertidor hacia la máquina. No se permite el flujo bidireccional de energía desde la máquina hacia la red.

Cuadrante 2: $V_{cc} > 0$, $I_{cc} < 0$. Aquí, la energía fluye desde la máquina hacia el convertidor. Este cuadrante se utiliza para conectar un generador a la red.

Cuadrante 3: $V_{cc} < 0$, $I_{cc} < 0$. Es similar al cuadrante 1, pero con el sentido de la corriente y la tensión invertidos, lo que resulta en un cambio de sentido de giro del motor.

Cuadrante 4: $V_{cc} < 0$, $I_{cc} > 0$. Es similar al cuadrante 2, pero la máquina gira en sentido opuesto.

Los rectificadores poseen diferentes configuraciones que dependen de las características de las tensiones de entrada y de salida. Si se requiere una tensión continua de salida constante a partir de una tensión alterna de entrada constante, se pueden utilizar rectificadores estáticos no controlados. Por otro lado, si se requiere una salida de tensión variable o ajustable, el rectificador debe contar con algún tipo de control. A continuación, se explican cada una de estas configuraciones.

1.3.1 Rectificadores no Controlados

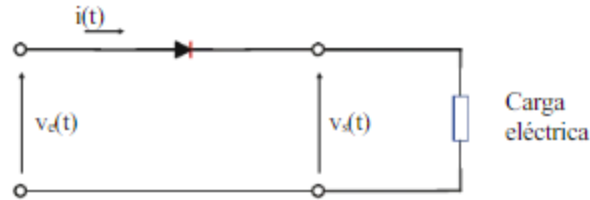
Puente de media onda. Se puede construir un rectificador simple utilizando un solo diodo, como se muestra en la Figura 6. Este tipo de rectificador es adecuado para aplicaciones de baja potencia. La tensión de entrada $v_e(t)$, es una forma de onda sinusoidal con una frecuencia constante y un valor eficaz constante.

$$v_e(t) = V_{em} \sin(\omega t)$$

En donde: $V_{em} = V_{e,rms} \sqrt{2}$, $V_{e,rms}$ corresponde al valor eficaz de la tensión de entrada.

Figura 6.

Convertidor CC-CA monofásico de media onda alimentado con una carga resistiva



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Cuando la corriente fluye en el sentido ánodo a cátodo, el diodo se comporta como un cortocircuito. En este caso, la carga conectada es una resistencia pura, lo que significa que la corriente y la tensión están en fase. La relación entre la tensión continua de salida y el valor eficaz de la tensión de entrada puede expresarse como:

$$V_{s,cc} = \frac{\sqrt{2}V_{e,rms}}{\pi}$$

1.3.2 Puente de Onda Completa

La estructura del puente monofásico de onda completa se presenta en la Figura 7, durante el semiciclo positivo $v_1(t)$ conducen los diodos D1 y D2 y en el negativo lo hacen los diodos D3 y D4.

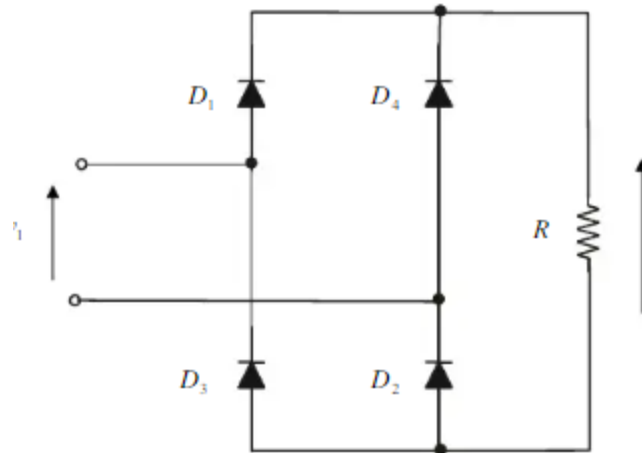
Si se define la tensión de entrada como $v_1(t) = V_{1,máx} \sin(\omega t)$ o, entonces:

$$v_L(t) = V_{1,máx} \text{abs}\{\sin(\omega t)\}$$

Siendo $v_{L,cc}(t) = \text{valor medio}\{v_L(t)\} = \frac{2V_{1,max}}{\pi}$

Figura 7.

Rectificador monofásico de onda completa



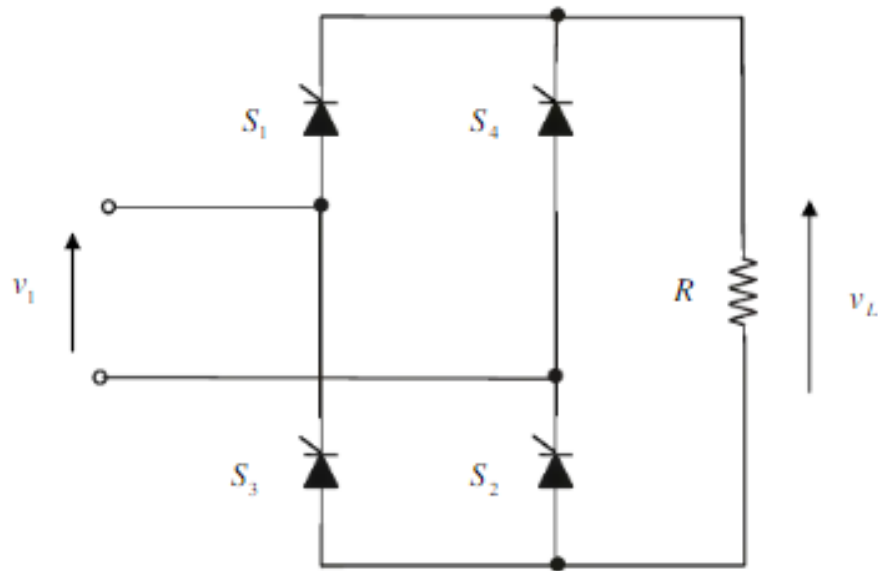
Nota: Adaptado de López et al (2013)

1.3.2.1 Puente Controlado de Onda Completa. Para regular la salida de un rectificador de onda completa, es posible reemplazar los diodos por tiristores, lo que se observa en el esquema de la Figura 8. Esto permite ajustar el valor de la tensión continua de salida al variar el ángulo de encendido de los tiristores.

Los tiristores S1 y S2 en el rectificador de onda completa controlado conducen durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada solo cuando se aplica una señal de control a sus terminales de puerta. De manera similar, los tiristores S3 y S4 conducen durante el semiciclo negativo de la tensión de entrada solo cuando se aplica una señal de control a sus terminales de puerta. Esta señal de control determina el momento preciso en que los tiristores se activan y permiten la conducción de corriente.

Figura 8.

Esquema de un rectificador monofásico de onda completa controlado en un ángulo de 90° y suponiendo una carga resistiva



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Si la tensión de entrada es $v_1(t) = V_{1,máx} \sin(\omega t)$

La tensión continua en la carga $v_{L,cc}(t)$ es:

$$v_{L,cc}(t) = \frac{V_{1,max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Donde α se encuentra entre 0 y 180°C

El valor eficaz de la tensión de salida corresponde a:

$$V_{L,rms} = \frac{V_{1,max}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

1.4 Convertidores CC-CC

Los convertidores CC-CC transforman una tensión de entrada continua en una tensión de salida continua con un valor diferente. A diferencia de los convertidores de corriente alterna a corriente continua, utilizan una fuente de alimentación de corriente continua en lugar de corriente alterna.

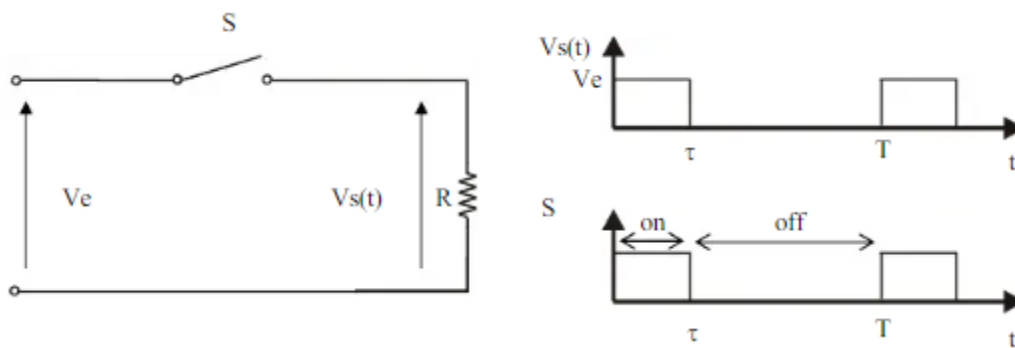
Se suelen usar en sistemas embarcados, automóviles, barcos y aviones, y en dispositivos portátiles, reproductores de CD y walkmans. Estos convertidores ofrecen ventajas como una variación continua de la salida, una respuesta dinámica rápida y una alta eficiencia en la conversión de energía.

1.5 Convertidor CC-CC Reductor

Corresponden a los convertidores en los que la tensión de salida es inferior a la de entrada, en cualquier caso, en la Figura 9 se presenta un esquema básico de este tipo de convertidores, el interruptor S puede ser cualquier interruptor de potencia con control de activación y desactivación.

Figura 9.

Esquema básico de un convertidor reductor



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Teniendo en cuenta que la tensión de entrada es continua y su valor es V_e , el valor medio de la tensión de salida $V_s(t)$ se calcula como:

$$V_s = \text{valor medio}\{V_s(t)\} = \frac{\tau}{T} V_e$$

1.6 Convertidor CC-CC Elevador

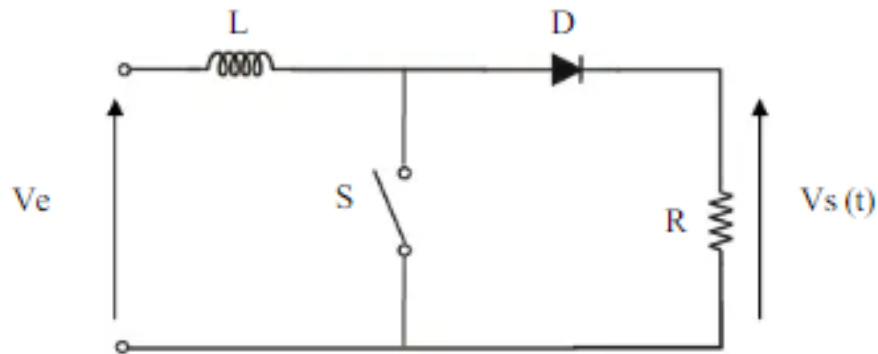
Los convertidores CC-CC también pueden usarse para elevar una tensión continua, existen diferentes configuraciones que pueden usarse para ello y en la Figura 10 hay una estructura básica del circuito. Su funcionamiento consiste en que cuando el interruptor S se cierra durante un tiempo

t1 la inductancia (L) almacena energía conforme la intensidad aumenta lo que se representa según la expresión:

$$V_e = L \frac{\Delta I}{t_1}$$

Figura 10.

Estructura básica de un convertidor de tipo elevador



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Si luego del intervalo t1 el interruptor S se abre durante un tiempo t2, la intensidad almacenada en la inductancia es transferida a la carga por medio del diodo D. Si los ciclos t1 y t2 se repiten la tensión medida en la carga superior de tensión a la entrada se expresa como:

$$V_s = V_e \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)$$

Si el ciclo de trabajo se expresa como:

$$k = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

Entonces:

$$V_s = V_e \left(\frac{1}{1 - k} \right)$$

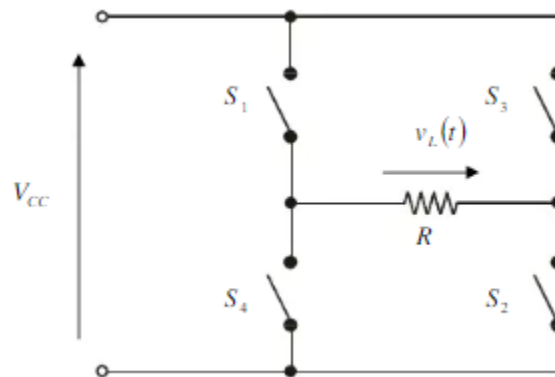
Inversores: Los convertidores CC-CA, también conocidos como inversores, transforman corriente continua en corriente alterna. Se usan en aplicaciones, como la alimentación de equipos electrónicos en sistemas de respaldo de energía. También son esenciales para regular la velocidad de las máquinas asíncronas mediante la variación de la frecuencia de alimentación. Además, se clasifican en dos grupos principales: convertidores de onda cuadrada y convertidores PWM.

1.7 Inversor de Onda Cuadrada

Este tipo de inversores se basa principalmente en el funcionamiento alternado de los interruptores del circuito que se presenta en la Figura 15. Con base en la tensión de alimentación continua, se obtiene una tensión alterna en la carga al abrir y cerrar los interruptores en una secuencia específica. En la Tabla 1 se presenta el estado de los interruptores y la tensión en la carga.

Figura 11.

Esquema básico de un inversor monofásico



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Tabla 1.

Estado de los interruptores y tensión de la carga

S1	S2	S3	S4	$v_L(t)$
----	----	----	----	----------

Off	Off	Off	Off	0
On	On	Off	Off	-Vcc
Off	Off	On	On	Vcc

Inversor PWM: El inversor de modulación de anchura de pulsos (PWM) se diferencia del inversor de onda cuadrada en su estrategia de control de los interruptores del puente. Utilizando la modulación de anchura de pulsos, se logra una reducción en la distorsión armónica y se obtienen ventajas como menor THD, requisitos de filtro reducidos y control de la amplitud de salida. Sin embargo, su implementación implica circuitos de control más complejos y pérdidas más elevadas debido al aumento en la frecuencia de conmutación. El control se realiza mediante la comparación de una señal sinusoidal de referencia con una señal portadora triangular, determinando así el estado de los interruptores en cada semiciclo. En la Figura 16 se presenta las señales moduladora y portadora y la forma de la onda de salida.

Se deben definir algunos parámetros a considerar en este tipo de inversores:

El índice de modulación de frecuencias se define como la relación entre la frecuencia de las señales portadores y de referencia, según la expresión:

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{referencia}}$$

Si su valor es elevado, un aumento de la frecuencia en la que son generadas los armónicos y se generan mayores pérdidas de conmutación en los semiconductores que actúan como interruptores. De forma análoga, el índice de modulación de amplitud corresponde a la relación entre las señales de referencia y portadora:

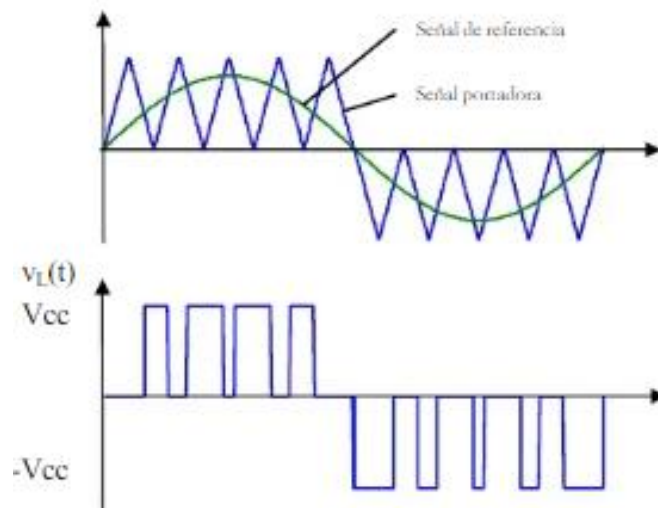
$$m_a = \frac{V_{referencia}}{V_{portadora}}$$

Cuando $m_a \geq 1$, la amplitud de la frecuencia fundamental de la tensión de salida V_1 se relaciona de forma directamente proporcional con m_a de forma que:

$$V_1 = m_a V_{cc}$$

Figura 12.

Modulación PWM mediante una señal de referencia sinusoidal y una portadora triangular



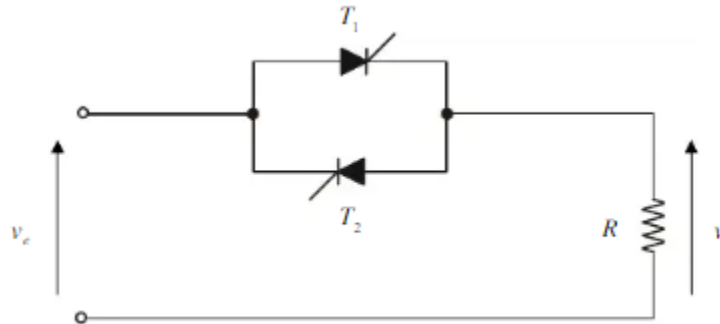
Nota: Adaptado de López et al (2013)

Convertidores CA-CA: Este tipo de convertidores permiten la convertir corriente alterna en corriente alterna, esta conversión disminuye el valor eficaz en la tensión de entrada y también puede disminuir la frecuencia de entrada que pueden tomar algunos valores. Se usan principalmente en la construcción de arrancadores suaves para motores de inducción, calentadores, regulación de temperatura, entre otras aplicaciones industriales.

Su circuito eléctrico básico está en la Figura 13 y lo forman dos transistores conectados en antiparalelo, su control en la tensión de salida se realiza con los ángulos de encendido de los trisiores T1 y T2 que se pueden realizar mediante el control de todo o nada o el control de fase, que se explican a continuación.

Figura 13.

Circuito básico de un convertidor CA-CA

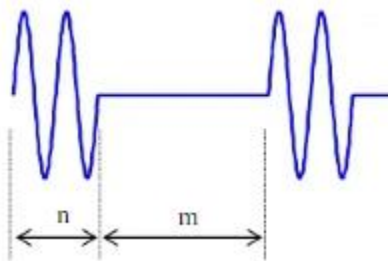


Fuente: adaptado de Rotella, Mauricio & Morán, Luis & Navarrete, Pablo. (2003).

Control todo o nada: Este tipo de control se fundamenta en la activación/desactivación periódica de los tiristores para que la salida sea activa durante n ciclos y se conecte durante otros m, de modo que el efecto global que se obtiene es la reducción del valor eficaz, en la Figura 14 se presentan las formas de onda de salida en este tipo de control.

Figura 14.

Forma de la onda de salida de un convertidor CA-CA con control todo o nada



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Si el valor eficaz de la tensión de entrada al convertidor es $V_{e,rms}$ el valor eficaz de la tensión será:

$$V_{L,rms} = V_{e,rms} \sqrt{\frac{n}{n+m}}$$

Si el ciclo de trabajo se expresa como:

$$k = \frac{n}{n + m}$$

Se puede reescribir como:

$$V_{L,rms} = V_{e,rms} \sqrt{k}$$

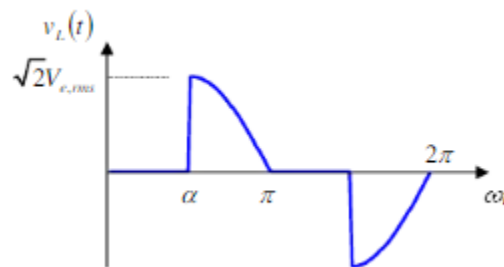
El valor de k puede variar entre 0 y 1.

Control de fase: En la Figura 15 se presenta la forma de la onda de la tensión de salida, según el ángulo α de encendido se puede controlar el valor eficaz de salida:

$$V_{L,rms}(\alpha) = V_{e,rms} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

Figura 15.

Forma de onda de un convertidor CA-CA con control de fase



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Un convertidor CA-CA con control de fase es un dispositivo que permite modificar la forma de onda de la corriente alterna de entrada para obtener una corriente alterna de salida con características distintas, como valor eficaz, frecuencia o ambas. Estos convertidores son utilizados en aplicaciones donde se requiere controlar la potencia suministrada a la carga mediante el control del valor eficaz de la tensión suministrada.

Con un TDi del 3%, la instalación en nuevos proyectos puede evitar partes demasiado grandes de la red eléctrica, incluidos generadores, transformadores, interruptores y cables. Además, utilizar menos material hace que el proyecto sea más sostenible. Al instalar infraestructura de red en proyectos de modernización, los convertidores AFE ayudan a prevenir el sobrecalentamiento y fallas prematuras de los equipos de red, que pueden ocurrir cuando el contenido de armónicos es demasiado alto y excede la capacidad de la red.

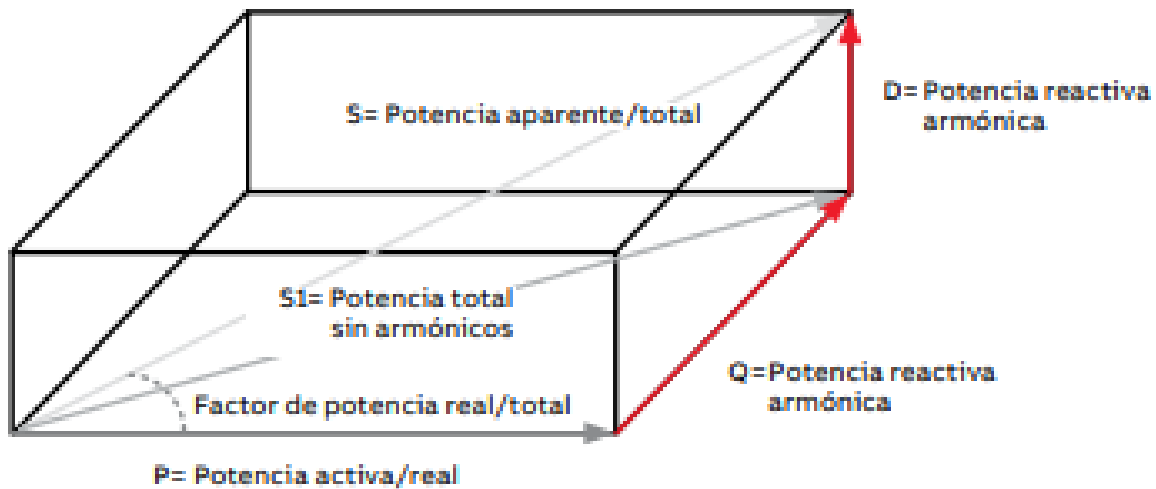
Los variadores AFE también permiten agregar cargas adicionales sin tener que reemplazar transformadores locales y generadores de "capacidad total" por otros más grandes. Además de los armónicos que componen el componente de distorsión de potencia reactiva, el convertidor ULH también controla el componente de desplazamiento de potencia reactiva.

Si la distorsión de la corriente y el voltaje es causada por el movimiento de la electrónica de potencia en un dispositivo electrónico, entonces el desplazamiento de la corriente y el voltaje significa que las ondas están desfasadas. Esto depende de las cargas inductivas y capacitivas de la red. Un ejemplo común de carga inductiva es un motor que ejecuta múltiples aplicaciones, mientras que un servidor de computadora es un buen ejemplo de carga capacitiva.

La potencia reactiva no funciona sola, sino que se requiere por cargas inductivas y capacitivas para mantener constante el voltaje de la línea. Se utiliza un valor llamado factor de potencia para estimar la cantidad de potencia reactiva presente en la red. Este valor representa la relación entre la potencia activa que trabaja y la potencia total que recibe el circuito. Cuanto más cercano esté el factor de potencia a 1, menor será la potencia reactiva en la red, menor será la corriente de la red y más eficiente y confiable será la red.

Figura 16.

Factor de potencia



**

Nota: Adaptado de López et al (2013)

Los factores de potencia bajos a menudo penalizan a los clientes, ya que las empresas de servicios públicos deben adaptarse a una mayor capacidad de generación y distribución de energía y a mayores pérdidas en la red. Los convertidores estándar diseñados para contener condensadores de CC normalmente compensan bien la potencia reactiva de la carga inductiva (motor) que impulsan. El inversor utiliza condensadores para proporcionar potencia reactiva al motor y evitar que la empresa genere su propia potencia reactiva. Sin embargo, los inversores avanzados, como los inversores ABB ULH con condensadores de CC y frontales activos, pueden ir un paso más allá al compensar otras cargas reactivas en la red. De esta forma, los usuarios finales pueden ahorrar el coste de instalar compensadores de potencia reactiva independientes en sus edificios.

** 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: $1 / \sqrt{1+THD^2}$ 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: $\cos\phi \cdot 1 / \sqrt{1+THD^2}$ Si no hay armónicos ($THDi = 0$) ni potencia reactiva generada por cargas inductivas o capacitivas, la corriente y la tensión están en fase, es decir: $\phi = 0^\circ$ y $\cos\phi = 1$, PF total = 1

Los inversores ULH también aumentan la fiabilidad de la instalación y el funcionamiento. El contenido de armónicos se minimiza, eliminando las interrupciones del proceso debido a la sobrecarga de la línea debido al aumento de la corriente de la línea. También evita que los dispositivos conectados funcionen mal debido a una corriente distorsionada. La función de aumento de tensión de variación de ABB ULH garantiza la tensión nominal en los terminales del motor incluso en redes vulnerables, como las que se encuentran habitualmente en túneles y cables de motor largos, así como en plantas de purificación de agua y puntos de descarga de residuos remotos.

Para el suministro remoto de agua, la capacidad nominal de la bomba puede ser importante para garantizar un suministro continuo de agua limpia en áreas urbanas y la eliminación de aguas pluviales y residuales. La interrupción de este tipo de servicios puede costar millones de dólares y tener un impacto devastador en las comunidades a las que sirven. Además de todas las ventajas mencionadas anteriormente, los modelos de convertidores ULH con potencia regenerativa permiten recuperar energía de procesos mecánicos del sistema, como durante el frenado, sin perder energía en forma de calor a través de resistencias de frenado o frenos mecánicos. Se utiliza, por ejemplo, en sistemas de elevación y grúas. Los inversores con unidades regenerativas integradas facilitan el frenado activo utilizando el motor de la aplicación como generador y luego devolviendo la energía a la red o batería para su uso posterior.

Otro campo de aplicación es el frenado inteligente, donde el objetivo no es ahorrar energía mediante frenadas frecuentes, sino detener la aplicación lo más rápido posible cuando sea necesario. Este tipo de frenado se puede utilizar cuando es necesario detener los ventiladores de emergencia del túnel lo más rápido posible para limitar la propagación del humo en caso de incendio. Hay muchas formas de ralentizar una aplicación, incluidas resistencias y chopper de

frenado, frenos regenerativos externos y convertidores matriciales, pero los convertidores regenerativos ULH se consideran la opción preferida por varias razones.

Además de reducir el contenido de armonía y recuperación de energía, ofrece las siguientes ventajas. -En la forma en que no requiere componentes, no componentes complejos, no componentes complejos, no elegibles, por lo que no se necesitan componentes, porque no los necesitan. No. Necesita un pozo, sus propias reservas de recuperación o componentes independientes. Debido a que todos los componentes se comparan con todos los componentes, hay muchas formas de reducir la armonía de las redes de energía, para que requiera consumo de energía en comparación con la reducción de la tecnología energética, de modo que la calidad de la energía eólica y todo sean rentabilidad, confiabilidad, confiabilidad, fiabilidad. mayor o menos para la eficiencia energética.

Se supone que la tecnología del convertidor activo con el condensador de condensador CC es útil por diferentes razones. La primera es que no se introducen armónicos, por lo que no se requieren técnicas adicionales de reducción de armónicos. Otro aspecto importante es la reducción de armónicos resultante durante la carga parcial, cuando las aplicaciones de control de frecuencia están activas la mayor parte del tiempo. Mientras que los convertidores activos frontales de ABB tienen un bajo contenido de armónicos a carga parcial, los filtros pasivos tienen ciertas limitaciones, p. Los filtros de armónicos pasivos están sintonizados a las frecuencias específicas de los armónicos que se van a eliminar. Se pueden instalar múltiples filtros pasivos en paralelo para reducir la distorsión severa causada por múltiples frecuencias armónicas, pero esto requiere una mayor huella y un mayor costo.

Los sistemas de filtrado pasivo se basan en la carga y cuando el perfil de carga cambia, los filtros pasivos instalados también deben reemplazarse. Por otro lado, conviene recordar que con

cargas inferiores al 20-30%, el condensador debe desconectarse del filtro pasivo para no afectar negativamente el factor de potencia del dispositivo y no debilitar los problemas de suministro de energía del generador. La capacidad de reducir los armónicos. Los filtros de armónicos activos proporcionan una reducción de armónicos mucho mejor que los filtros pasivos porque detectan más frecuencias de armónicos en la red.

Además, gracias a los IGBT integrados en el diseño, generan corrientes antimónicas para eliminar los armónicos provocados por cargas no lineales. Sin embargo, el rendimiento de la reducción de armónicos depende en gran medida de la carga. Al 50%, el THDi puede llegar fácilmente al 12-14%. Los convertidores multipulsos son otra alternativa para la reducción de armónicos. Aquí, el uso de algunos diodos adicionales en el rectificador reduce significativamente la distorsión armónica (utiliza más diodos que un convertidor estándar de 6 pulsos). Sin embargo, la complejidad de la instalación, el gran tamaño y la necesidad de un transformador son las principales desventajas de esta tecnología.

2. Uso de Convertidores de Potencia Regenerativos en Industrias con Alto Porcentaje de Carga Motriz

En industrias con un alto porcentaje de carga motriz, el uso de convertidores de potencia regenerativos puede ofrecer importantes beneficios, especialmente en términos de ahorro energético y eficiencia. Estos convertidores, al permitir un flujo bidireccional de potencia, son capaces de regenerar energía, lo que implica ahorros económicos tanto en el consumo eléctrico como en la potencia instalada en el sistema.

Los convertidores regenerativos de potencia, con una topología back-to-back, son capaces de realizar pruebas de potencia y energía de forma eficiente, lo que resulta en ahorros económicos

significativos tanto en el consumo eléctrico durante el ensayo como en la potencia instalada en el laboratorio. En el contexto industrial, los convertidores regenerativos de potencia pueden ser beneficiosos en aplicaciones con un alto porcentaje de carga motriz, ya que permiten un flujo bidireccional de potencia, lo que implica la capacidad de regenerar energía y lograr importantes ahorros económicos y energéticos.

Un inversor controla el par y la velocidad de un motor de CA para cumplir con los requisitos de la aplicación cambiando el voltaje y la frecuencia de entrada del motor. El inversor se instala entre la fuente de alimentación y el motor para regular la potencia de entrada. En el convertidor, la corriente pasa primero a través de un rectificador que convierte la corriente alterna de entrada en corriente continua.

Luego, la energía CC pasa a través del capacitor inversor para suavizar la forma de onda eléctrica. En el siguiente paso, el inversor convierte la energía CC de entrada nuevamente en energía CA antes de llegar al motor. El inversor regula el voltaje y la frecuencia de la corriente suministrada al motor. Esto significa que el motor no funciona con el par y la velocidad nominales, sino con un par y una velocidad totalmente adecuados a los requisitos del proceso. Esto significa importantes ahorros de energía y una mayor confiabilidad del proceso y calidad del producto final.

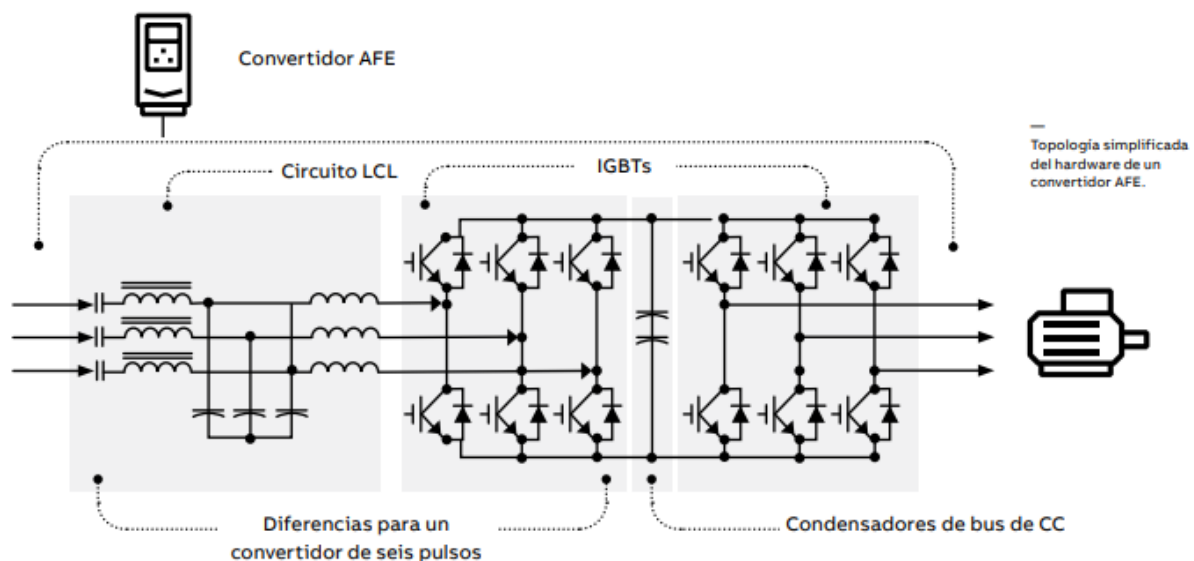
Los convertidores AFE también convierten corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) y luego cambian la corriente continua a corriente alterna como un convertidor de frecuencia tradicional de seis pulsos. La diferencia entre un convertidor de 6 pulsos y un AFE es cómo el convertidor convierte CA a CC y los componentes electrónicos utilizados para esa conversión.

En un convertidor AFE, un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) reemplaza al diodo rectificador. - Convertidores de impulsos (convertidores de corriente alterna a corriente continua). Durante muchos años, se han utilizado inversores para accionar motores utilizando IGBT de salida

para generar corriente sinusoidal para el motor. El control preciso del IGBT de entrada en el convertidor AFE produce una corriente sinusoidal suministrada desde la red. Otra diferencia entre el AFE y el convertidor de 6 pulsos es que hay un circuito integrado LCL (inductor-condensador-inductor) delante del IGBT expuesto.

Figura 17.

Convertidor



Nota: Adaptado de López et al (2013)

Además, el circuito LCL rechaza armónicos por encima de la frecuencia de conmutación del IGBT. Todo esto da como resultado un contenido de corriente armónica de menos del 3% en la red, a diferencia de una solución típica de 6 pulsos con un THDi de alrededor del 40%. En primer lugar, los convertidores activos frontales con condensadores fijos no generan armónicos, mientras que otras tecnologías de frecuencia variable pueden requerir costosas soluciones adicionales para reducir los armónicos.

El mercado ofrece varias tecnologías de transductores activos. Además de los convertidores activos frontales con condensadores de CC, existen convertidores AFE sin

condensadores de CC, llamados convertidores matriciales. Quitar los condensadores de los conductores puede reducir los costos, pero impone limitaciones significativas al inversor, ya que tiene un impacto negativo en el rendimiento. . . Dominio del voltaje de salida, respuesta armónica, factor de potencia y operación de falla de línea.

Por ejemplo, un convertidor AFE sin condensador solo puede producir una tensión de salida del 92 % o menos cuando funciona en modo armónico con un THDi inferior al 5 %. Un motor que no funcione a pleno voltaje no producirá el par nominal a máxima velocidad si no consume más corriente para compensar el déficit de voltaje. Sin embargo, esto hará que el motor se sobrecaliente y acorte su vida útil.

Y cuando el convertidor matricial funciona en modo de voltaje de salida total, el contenido de armónicos de la corriente puede alcanzar el 10%. Esto es más alto que el estándar de referencia generalmente aceptado de 5% THDi para convertidores de bajos armónicos cuando se aplican requisitos estrictos. El estándar IEEE 519 se aplica directamente al convertidor. Los convertidores AFE que incluyen condensadores DC en su diseño no tienen este problema y, además de reducir los armónicos al mínimo, aseguran la máxima tensión del motor.

Al comparar diferentes técnicas de mitigación de armónicos, es importante considerar cómo afectan la eficiencia del sistema. Inicialmente, los convertidores frontales activos son menos eficientes que las soluciones tradicionales de seis pulsos debido al banco de energía activo (IGBT) adicional incorporado en el diseño, pero los costos del sistema debidos al filtro generalmente se ignoran. Da los mismos resultados de armónicos bajos. En la práctica, los sistemas con convertidores de armónicos muy bajos tienen pérdidas totales idénticas o menores, el mismo factor de potencia que los filtros de armónicos independientes y ofrecen la ventaja adicional de eliminar las caídas de tensión en los terminales del motor.

En instalaciones grupales (un filtro para múltiples transductores) generalmente se recomienda utilizar filtros de armónicos activos. Esto hace que la instalación sea más eficiente. Sin embargo, aunque los filtros activos solo atenúan los armónicos directos dirigidos a la instalación, lo que a menudo se pasa por alto es la presencia de un alto THDi en todo el sistema, desde la fuente de armónicos hasta el filtro activo.

Esto no solo aumenta las pérdidas de energía en el backend del sistema y reduce la confiabilidad del sistema, sino que también crea el riesgo de sobrecarga del sistema debido al contenido excesivo de armónicos en caso de una falla del filtro AHF centralizado. Los convertidores frontales activos no generan armónicos, evitando así las desventajas de otras técnicas de reducción de armónicos. Al ajustar la velocidad del motor según las necesidades de la aplicación, los convertidores de frecuencia pueden ahorrar cantidades significativas de energía. Antes de decidirse, hay que evaluar cómo afectará el inversor a su sistema eléctrico. Esto se debe a que algunas tecnologías de frecuencia variable pueden tener un impacto negativo en la calidad de la energía de la red, provocando pérdidas de eficiencia. Aumenta la confiabilidad y los costos del proyecto.

3. El Impacto Potencial de la Implementación de Convertidores de Potencia Regenerativos en Industrias con Alto Uso de Carga motriz

Aumentar la eficiencia energética es una forma rápida, fácil y económica de reducir el consumo de energía, reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y mejorar la seguridad energética. Al mejorar la eficiencia energética, se utiliza menos energía para realizar el mismo trabajo, lo que reduce la cantidad de energía necesaria y las emisiones de CO₂ asociadas. Esto es muy importante en el cambio climático y las cuestiones medioambientales. La eficiencia energética se logra con varias medidas, como el uso de tecnologías más eficientes, la optimización

de los procesos de producción, la mejora de la eficiencia del transporte y la introducción de políticas y regulaciones que promuevan la eficiencia energética.

El aumento de la eficiencia energética tiene otros beneficios más allá de la reducción de las emisiones de CO₂. Por ejemplo, ayuda a reducir los costos de energía, mejorar la calidad del aire y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. También puede contribuir a la creación de empleo y al desarrollo económico sostenible. Aumentar la eficiencia energética es una estrategia importante para reducir el consumo de energía, reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la seguridad energética. Se trata de una solución eficaz y asequible que puede contribuir significativamente a la lucha contra el cambio climático y contribuir a un futuro más sostenible. El potencial de ahorro de energía en la industria y los servicios públicos es enorme.

Cerca del 70 % de toda la energía la consumen los millones de motores eléctricos instalados en la industria mundial. Mejorar la eficiencia energética de estos motores puede tener un impacto significativo en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO₂. Implementando medidas de eficiencia energética, como el uso de convertidores de frecuencia, se puede optimizar el funcionamiento de los motores eléctricos y reducir el consumo de energía. Los convertidores de frecuencia permiten ajustar la velocidad del motor según los requisitos específicos de cada aplicación, evitando el funcionamiento a plena carga cuando no es necesario y reduciendo el consumo de energía.

Además del ahorro de energía, una mayor eficiencia en la industria y los servicios públicos puede proporcionar otros beneficios, incluidos menores costos operativos, una mayor vida útil de los equipos y una mejor calidad del servicio. El potencial de ahorro de energía en los sectores industrial y de servicios públicos es significativo, especialmente en términos del consumo de energía de los motores eléctricos. La implementación de medidas de eficiencia energética, como

el uso de variadores de frecuencia, puede ayudar a reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂, además de proporcionar otros beneficios adicionales.

Todos los motores se accionan eléctricamente para proporcionar el par o la velocidad requeridos. Dependiendo del procedimiento que se realice y de la cantidad de energía a entregar, algunos requieren más velocidad y otros menos. Para evitar el desperdicio de energía, la velocidad del motor debe ser aproximadamente la misma que la del proceso. Cabe señalar que los convertidores de frecuencia pueden ser una solución eficaz para optimizar la velocidad de los motores eléctricos y reducir el consumo de energía. Los convertidores de frecuencia permiten ajustar la velocidad del motor según los requisitos específicos de cada aplicación, evitando el funcionamiento a plena carga cuando no es necesario y reduciendo el consumo de energía. Los convertidores de frecuencia permiten ajustar la velocidad del motor a los requisitos cambiantes del proceso, evitando el desperdicio de energía y mejorando la eficiencia energética en aplicaciones industriales y de servicios públicos.

Los convertidores de frecuencia pueden reducir el consumo de energía mediante un funcionamiento más eficiente. Los convertidores de frecuencia ajustan la velocidad de los motores eléctricos según las necesidades de la aplicación, reduciendo el consumo de energía del motor entre un 20 y un 70 por ciento. Al adaptar la velocidad del motor a las necesidades específicas de cada proceso, el convertidor de frecuencia reduce el consumo de energía al evitar el funcionamiento a plena carga cuando no es necesario. Esto permite un uso más eficiente de la energía y mejora la eficiencia energética en una variedad de sectores industriales y servicios públicos.

Es importante destacar que los convertidores de frecuencia que ofrecen una solución eficiente y fiable para optimizar el funcionamiento de los motores eléctricos y reducir el consumo

de energía. Estas tecnologías se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales y comerciales para reducir significativamente el consumo de energía y los costos operativos. El control inteligente de motores mediante convertidores de frecuencia puede aumentar la productividad y mejorar la eficiencia energética, al tiempo que extiende la vida útil del equipo, previene el desgaste y previene paradas inesperadas que causan tiempo de inactividad, haciendo que los convertidores de frecuencia formen parte del proceso.

Los convertidores de frecuencia permiten ajustar la velocidad de los motores eléctricos según los requisitos específicos de cada aplicación. Esto reduce el consumo de energía del motor entre un 20% y un 70%, evitando que funcione a plena carga cuando no es necesario. Evite el desperdicio de energía y aumente la eficiencia energética ajustando la velocidad del motor según las necesidades de la aplicación.

Además del ahorro energético, utilizar un convertidor de frecuencia tiene otros beneficios. Por ejemplo, extender la vida útil del equipo y prevenir tiempos de inactividad no planificados mejora la productividad y reduce los costos de mantenimiento. Además, al no operar a plena carga, se minimizan las pérdidas de la planta y se optimiza el control operativo. El uso de variadores de velocidad en motores puede proporcionar muchos beneficios, incluida una mayor eficiencia energética, una mayor productividad y vida útil del equipo. Si bien estos beneficios tienen implicaciones financieras y operativas, también ayudan a proteger el medio ambiente al reducir el consumo de energía.

La implementación de convertidores de energía regenerativa puede proporcionar diferentes retornos de la inversión, dependiendo de varios factores, como el tipo de industria, el tamaño del sistema y la eficiencia energética lograda. No existe una respuesta correcta para cada situación. Sin embargo, es importante señalar que el objetivo principal de los convertidores de potencia

regenerativa es recuperar y reutilizar la energía generada durante el frenado o desaceleración de máquinas y equipos.

Esto puede reducir significativamente el consumo de energía y los costos operativos a largo plazo. Para obtener más información sobre el período de recuperación de la inversión para implementar convertidores de energía renovable en su situación específica, le recomendamos que se comunique con un experto en el campo o con un proveedor de equipos y soluciones de energía renovable. Pueden evaluar las necesidades y circunstancias específicas de su industria y proporcionar una cotización más precisa. Es importante señalar que el ahorro de energía se puede estimar, pero no garantizar.

Algunos ejemplos de áreas donde se pueden implementar convertidores de energía regenerativa incluyen:

Industria de la automoción: Esta industria puede utilizar convertidores de potencia regenerativos para recuperar la energía generada durante el frenado de vehículos eléctricos o híbridos. Esta energía se puede almacenar y reutilizar posteriormente, aumentando la eficiencia energética y reduciendo el consumo de combustible. Industrias manufactureras: las industrias manufactureras pueden utilizar convertidores de potencia regenerativa para recuperar la energía generada durante el frenado o desaceleración de máquinas y equipos.

Esto puede reducir significativamente el consumo de energía y los costos operativos. Sector del transporte: En el sector del transporte, se pueden implementar convertidores de energía regenerativa en trenes, tranvías y otros sistemas de transporte público para recuperar la energía generada durante el frenado. Esta energía puede devolverse a la red o utilizarse para alimentar otros sistemas a bordo. Industria de energías renovables: la industria de las energías renovables puede utilizar convertidores de energía renovable para optimizar la eficiencia de los sistemas de

generación de energía, como parques eólicos y solares. Estos convertidores ayudan a maximizar la captura y el uso de la energía producida a partir de fuentes de energía renovables.

Industria Automotriz: Los vehículos eléctricos e híbridos utilizan sistemas de frenado regenerativo para recuperar energía durante la desaceleración y frenado, lo que contribuye a aumentar la eficiencia energética y reducir el consumo de combustible.

Energía Renovable: En sistemas de generación de energía renovable, como parques eólicos y plantas solares, los convertidores regenerativos pueden utilizarse para optimizar la conversión y distribución de la energía generada, maximizando la eficiencia del sistema.

Industria de Elevadores: Los convertidores regenerativos son empleados en sistemas de elevación para recuperar la energía generada durante la desaceleración y frenado de los elevadores, lo que contribuye a reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia del sistema.

Pruebas de Potencia: En laboratorios y entornos de pruebas, los convertidores regenerativos son utilizados para realizar pruebas de potencia y energía de forma eficiente, lo que resulta en ahorros económicos tanto en el consumo eléctrico durante el ensayo como en la potencia instalada en el laboratorio.

Industria Ferroviaria: En sistemas de transporte ferroviario, los convertidores regenerativos pueden recuperar la energía generada durante el frenado de los trenes, lo que contribuye a reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia del sistema.

Industria Minera: En aplicaciones de maquinaria pesada y equipos mineros, los convertidores regenerativos pueden recuperar la energía generada durante las operaciones de desaceleración, lo que contribuye a reducir el consumo de energía y optimizar la eficiencia operativa. En la agricultura, los convertidores de energía regenerativa pueden ser útiles de varias maneras:

Eficiencia Energética: Los convertidores regenerativos pueden recuperar la energía generada durante operaciones como el frenado de maquinaria agrícola, lo que contribuye a reducir el consumo de energía y optimizar la eficiencia operativa en el campo.

Uso de Equipos Inteligentes: La implementación de convertidores regenerativos puede permitir el uso de equipos agrícolas inteligentes, como sistemas de riego inteligente y gestión de maquinaria, lo que contribuye a una gestión más eficiente de los recursos y ahorro de energía.

Sostenibilidad: Al recuperar y reutilizar la energía generada durante las operaciones agrícolas, los convertidores regenerativos pueden contribuir a prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

4. Conclusiones

Para responder al primer objetivo específico que es realizar una revisión sistemática de la literatura científica y técnica para documentar las características y el estado actual de la tecnología de frenado regenerativo para motores utilizados en la industria, enfocándose en aplicaciones con alto porcentaje de carga motriz, se puede decir que el frenado regenerativo es una tecnología que permite recuperar energía durante la desaceleración y frenado de motores, especialmente en aplicaciones con alto porcentaje de carga motriz. Este proceso implica la conversión de energía cinética en energía eléctrica, que puede almacenarse o utilizada para alimentar otros sistemas. El frenado regenerativo se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde vehículos eléctricos e híbridos hasta maquinaria industrial, y ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia energética y reducción del desgaste de los sistemas de frenado tradicionales.

Para responder al segundo objetivo de analizar y sintetizar los estudios, investigaciones y casos reportados en la literatura científica sobre el uso de convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto porcentaje de carga motriz, para comprender su eficacia en términos de ahorro energético y su viabilidad industrial, los convertidores regenerativos de potencia ofrecen la capacidad de recuperar energía durante el funcionamiento de motores en aplicaciones industriales con alto porcentaje de carga motriz.

La tecnología permite un flujo bidireccional de potencia, lo que implica la capacidad de regenerar energía y lograr ahorros económicos y energéticos, y una mayor eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Los estudios y casos de aplicación reportados en la literatura científica destacan la viabilidad y eficacia de los convertidores regenerativos en términos de ahorro energético, lo que los posiciona como una opción favorable para su implementación en el contexto industrial.

Y por último Tras evaluar la evidencia científica y técnica existente sobre el impacto potencial de la implementación de convertidores de potencia regenerativos en industrias con alto uso de carga motriz, identificando las tendencias, desafíos y oportunidades más relevantes en este campo, y proporcionando recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, se puede indicar que los convertidores regenerativos de potencia ofrecen una solución prometedora para mejorar la eficiencia energética en industrias con alto uso de carga motriz.

La evidencia científica y técnica disponible resalta la capacidad de estos convertidores para recuperar energía, reducir costos operativos y contribuir a la sostenibilidad ambiental en entornos industriales. Además, se identifican tendencias hacia una mayor adopción de esta tecnología, así como desafíos relacionados con la integración y optimización de los sistemas de convertidores regenerativos. Las oportunidades más relevantes incluyen la aplicación de estrategias de gestión energética y la mejora continua de la eficiencia operativa. En cuanto a las recomendaciones para futuras investigaciones, se destaca la importancia de estudios que aborden la integración de convertidores regenerativos en sistemas industriales específicos, así como la evaluación de su impacto a largo plazo en términos de ahorro energético y rentabilidad.

Referencias Bibliográficas

- Aimola, R., Canono, C.J., & García, J.N. (2014). *Design, fabrication, and testing of flywheel kinetic energy storage and regenerative braking system on a bicycle*. Manila, Filipinas: Mapua Institute of Technology.
- Apostolidou, N., & Papanikolaou, N. (2018). Energy saving estimation of athens trolleybuses considering regenerative braking and improved control scheme. *Resources*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/resources7030043>
- Aswin, J.I., & Karuppasamy, K. (2015). Design and optimization of flywheel for automobile applications. *International Journal of mechanical engineering and research*, 5(1).
- Ballantine, R. (2000). *Richard's 21st Century Bicycle Book*. London, UK: Pan Books.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Bryant, D., & Day, A. (2022). Electronic braking systems. *Braking of Road Vehicles*, 229–277. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822005-4.00010-X>
- Cantorin Benites, R.A. (2018). *Freno regenerativo en la eficiencia energética de vehículos híbridos utilizados en Lima Metropolitana* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Clegg, S.J. (1996). *A Review of Regenerative Braking Systems* (No. 471).
- Clegg, S.J. (1996). *A Review of Regenerative Braking Systems*. Leeds, U.K.: University of Leeds.
- Díaz González, G., Barbón Álvarez, A., & Gómez-Aleixandre Fernández, J. (2002). *Variación de la velocidad de los motores eléctricos*. Universidad de Oviedo.

- Escobar García, C.F., Martínez Peña, J.A., & Téllez González, G.A. (2005). *Control de un motor brushless DC con frenado regenerativo* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Fernández Gómez, J. (2021). *Eficiencia energética en el sector industrial*.
- Hamada, A.T., & Orhan, M.F. (2022). An overview of regenerative braking systems. *Journal of Energy Storage*, 52, 105033. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.105033>
- Henrique Nenevê, G. (2022). *Design of a small-scale pico-hydro system using pumps as turbines* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico de Braganca.
- Hibbeler, R.C. (2011). *Mechanics of Materials (8th ed.)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hunt, H. (2016). *Bicycles are not held up by the gyroscopic effect*. (University of Cambridge)
Recuperado en noviembre de 2018 de <http://www2.eng.cam.ac.uk/~hemh1/gyrobike.htm>
- Irland, I., Moreira, G., & Oxley, C. (2021). *Regeneración de energía en ascensores* [Tesis de pregrado]. Universidad de la República.
- Juvinall, R.C., & Marshek, K.M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design (5ta ed.)*. Hoboken, NJ.: John Wiley & Sons.
- Li, S., Wu, S., Xiang, S., Zhang, Y., Guerrero, J.M., & Vásquez, J.C. (2020). Research on synchronverter-based regenerative braking energy feedback system of urban rail transit. *Energies*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/en13174418>
- Lima, A.D.S., Guedes, A.R., Sa, E.M., & Antunes, F.L.M. (2021). Case Study: Variable-Voltage DC Bus with Energy Recovery System for Industrial Plants. *IEEE Access*, 9, 101277–101288. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3095754>

- López López, A.J.; Pecharromán, R.R.; Cucala, A.P.; Fernández-Cardador, A. *Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos*. *Anales de Mecánica y Electricidad*. Vol. XC, n°. III, pp. 12 - 18, May 2013.
- Luis, J., Hernández, G., Montserrat, C., Cuevas, G., Sepulveda, N.M., Merced, J., García, L., Ramon, L., & Villalba, M. (2021). Control de velocidad de una máquina de inducción con frenado regenerativo. *Identidad Energética*, 4(1), 1–6.
- Mantilla Peñalba, L.F., & Ciro Quispe, E. (2004). Motores eléctricos de alta eficiencia: características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad. *Revista Energía Computación*, 2004, 12(1), 11-19. <http://hdl.handle.net/10902/1936>
- Mañana Canteli, M. (2018). *Regulación, control y protección de máquinas eléctricas*. Universidad de Cantabria.
- Martínez López, M.J. (2020). *Modelado y control de convertidores de potencia* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.
- Maryland Metrics. (2018). Recuperado en noviembre de 2018, de <https://mdmetric.com/Ch6.8wGO.pdf>
- Mathew, M. (2009). *Design of flywheel for improved Energy storage using computer aided analysis*. Rourkela, India: National Institute of technology of Rourkela.
- Nayak, S.K. (2014). *Design of Kinetic Energy Recovery System for Bicycle*. Rourkela, India: National Institute of Technology of Rourkela.
- Pabón, D. (2022, July 27). *Frenado regenerativo: cómo y por qué funciona en los coches eléctricos*. <https://Economiacircularverde.Com/Como-Funciona-El-Frenado-Regenerativo-En-Un-Coche-Electrico/>.

- Padilla Villalba, H.G. (2020). *Recuperación de energía por medio de frenado regenerativo en sistemas de transporte eléctrico masivo tipo metro basado en procesos de simulación* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Perfect Fit Industries, Inc. (2018). Recuperado de pfibearings.com: <http://ecatalogue.pfibearings.com/eCatalogue REV>
- Robotics. (2016). *Sprocket and Chain Guide*. Recuperado de <http://www.revrobotics.com/content/docs/Sprocket-Guide.pdf>
- Roldán Viloría, J. (2014). *Motores de corriente continua. Motorización de máquinas y vehículos: características, cálculos y aplicaciones*. Ediciones Paraninfo S.A.
- Rotella, Mauricio & Morán, Luis & Navarrete, Pablo. (2003). ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS DE MEDIA TENSION PARA CARGAS DE BAJA VELOCIDAD.
- Sevilleja Aceituno, D. (2021). *Eficiencia energética en el sector industrial* [Tesis de pregrado]. Universidad Carlos III de Madrid.
- Singh, M. (2013). Regenerative Braking: A Good Source of Green Energy. In *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)* (Issue 4).
- Spencer Vargas, D.O. (2019). *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para un motor eléctrico* [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile.
- Vanegas, L.V. (2018). (Universidad Tecnológica de Pereira) Recuperado de [utp.edu.co](http://blog.utp.edu.co): <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2016/05/Cap-10-A-y-TParte-1.pdf>