

ESTUDIO DE LOS INVERSORES CON APLICACIÓN EN FUENTES DE SOLDADURA

STUDY OF INVERTERS WITH APPLICATION IN WELDING POWER SOURCES

Luis Aarón Alonso Arellano

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
MIP23110003@irapuato.tecnm.mx

Adolfo Rafael López Núñez

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
adolfo.ln@irapuato.tecnm.mx

Marcos Jesús Villaseñor Aguilar

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
marcos.va@irapuato.tecnm.mx

Mario Alberto Juárez Balderas

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
mario.jb@irapuato.tecnm.mx

Manuel Rico Secades

Universidad de Oviedo, campus Gijón, España
mrico@uniovi.es

Recepción: 9/diciembre/2024

Aceptación: 6/febrero/2025

Resumen

En el presente artículo se realiza un análisis exhaustivo de los inversores utilizados en aplicaciones de soldadura de arco, destacando la implementación de inversores resonantes conectados en serie con tanques resonantes. Estos tanques están compuestos por elementos pasivos y presentan diversas topologías, siendo las configuraciones LCL serie y CLL serie-paralelo las más destacadas para esta aplicación. Asimismo, se examinan otros estudios que, aunque no utilizan tanques resonantes, presentan inversores con diferentes topologías innovadoras. Este artículo ofrece una visión integral de las distintas estrategias y configuraciones de inversores empleadas, subrayando sus ventajas y desafíos en el contexto de la soldadura de arco. Los resultados y discusiones presentados proporcionan una valiosa perspectiva sobre las tendencias actuales y futuras en el diseño de fuentes

de soldadura, contribuyendo al avance y optimización de esta tecnología en aplicaciones industriales, con el fin de ofrecer referencias de diseño para posteriormente el diseño y fabricación de fuentes de soldadura de alta eficiencia y confiabilidad.

Palabras Clave: Corrector del factor de potencia, Corriente directa, Distorsión armónica total, Inversor, Tanque resonante.

Abstract

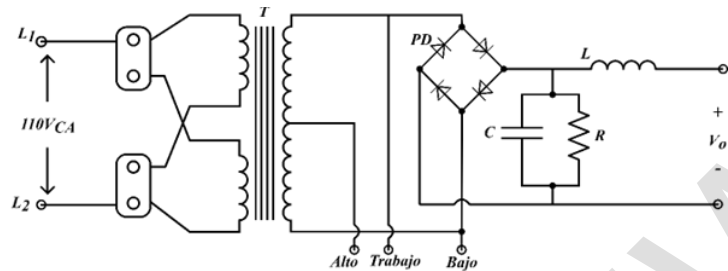
In this article, an exhaustive analysis of inverters used in arc welding applications is conducted, highlighting the implementation of resonant inverters connected in series with resonant tanks. These tanks are composed of passive elements and exhibit various topologies, with the series LCL and series-parallel CLL configurations being the most notable for this application. Additionally, other studies are examined that, although not using resonant tanks, present inverters with different innovative topologies. This article provides a comprehensive overview of the various inverter strategies and configurations employed, emphasizing their advantages and challenges in the context of arc welding. The results and discussions presented offer valuable insights into current and future trends in the design of welding power sources, contributing to the advancement and optimization of this technology in industrial applications, with the aim of providing design references for the subsequent design and manufacture of highly efficient and reliable welding power sources.

Keywords: Direct current, Inverter, Power factor corrector, Resonant tank, Total harmonic distortion.

1. Introducción

La soldadura es un proceso que une piezas metálicas mediante la fusión de sus bordes o la adición de material de relleno, resultando en una unión fuerte y duradera. En la soldadura por arco se utiliza una fuente de corriente eléctrica, estas fuentes tradicionales están compuesta por un transformador robusto, un puente de diodos y una bobina para reducir el rizado de la corriente del arco, como se muestra en la

Figura 1. Estas fuentes tradicionales son pesadas y tienen un bajo factor de potencia (FP), alta distorsión armónica total (THD) y pueden inyectar armónicos en la red eléctrica [Das, 2020].



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama eléctrico de fuentes de soldadura tradicionales.

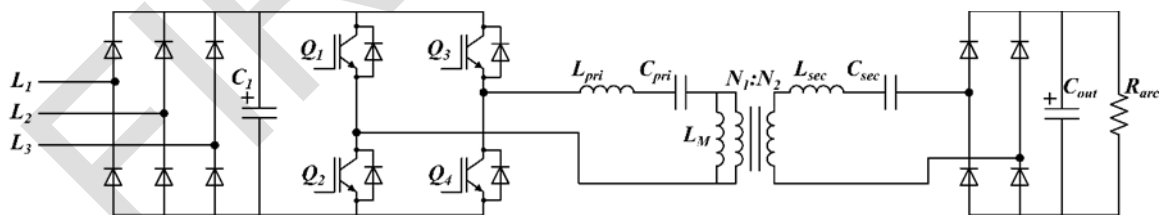
El avance de la tecnología y la electrónica de potencia generó la implementación de topologías de convertidores CD-CA (inversores) como fuentes de soldadura que disminuyen el tamaño y peso de las fuentes de soldadura convencionales, además de obtener una eficiencia mayor del 90% [Das, 2020]. Las fuentes inversoras ofrecen al usuario la facilidad de manejo debido que facilita la inicialización y la mantener el arco eléctrico [Navarro-Crespin, 2012]. Además de su versatilidad al permitir diferentes técnicas de soldadura como son la soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW por sus siglas en inglés), soldadura por gas inerte de metal (MIG por sus siglas en inglés) y soldadura de gas inerte con electrodo de tungsteno (TIG por sus siglas en inglés) [Navarro-Crespin, 2013].

Actualmente, estas fuentes de soldadura, conocidas como inversoras, son populares entre los usuarios debido a sus características superiores en comparación con las tradicionales. Ofrecen una mayor calidad de soldadura, facilidad para generar y mantener el arco eléctrico, y una mayor eficiencia eléctrica. La evolución de estas tecnologías ha permitido la integración de sistemas de control avanzados que optimizan el rendimiento y la seguridad durante el proceso de soldadura. Estos sistemas no solo mejoran la precisión y la calidad del trabajo, sino que también reducen el consumo energético y los costos operativos. Por lo tanto, el estudio y la innovación en las topologías de inversores continúan siendo áreas cruciales para el desarrollo de soluciones de soldadura más eficientes y sostenibles.

2. Métodos

En el apartado anterior se discutieron los sistemas tradicionalmente utilizados, los cuales están siendo reemplazados por sistemas avanzados que implementan tecnología del campo de la electrónica de potencia, como lo son los inversores. Esto representa una vasta zona de investigación, destacando especialmente la aplicación de inversores resonantes. Estos inversores resonantes consisten en la conexión en serie de un tanque resonante a la salida del inversor. Estos inversores tienen múltiples aplicaciones, incluyendo calentamiento por inducción, balastos de lámparas, equipos ultrasónicos, telecomunicaciones y fuentes de soldadura.

Esta última aplicación es la que se resalta en este artículo, ya que se han estudiado diversas topologías y configuraciones para mejorar la eficiencia y el rendimiento en el ámbito de la soldadura. Como es el caso [Altanneh, 2019], cuyo objetivo es el uso de un algoritmo de control que permite una conmutación suave tanto en el encendido como en el apagado del inversor de las máquinas de soldadura por arco metálico de gas (GMAW por sus siglas en inglés) con convertidor de resonancia en serie (SRC por sus siglas en inglés). La topología del SRC elegida se presenta en la Figura 2, compuesta por un rectificador trifásico de entrada de 380 V_{rms} con una frecuencia de 50 Hz , seguido por un inversor puente completo. Luego, se encuentra un tanque resonante LLC en serie, seguido por un transformador de alta frecuencia y un rectificador puente completo, con un capacitor de filtrado al final.

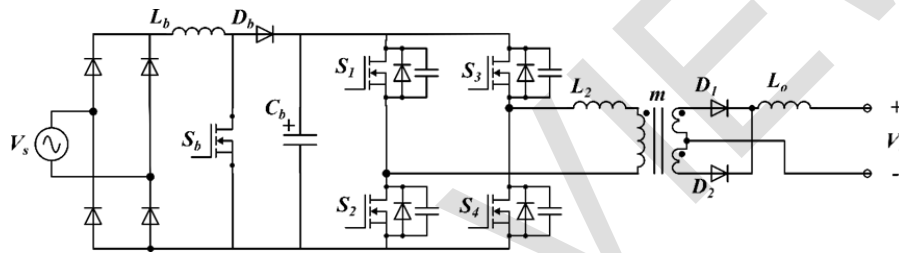


Fuente: [Altanneh, 2019]

Figura 2 Diagrama esquemático de un SRC.

En [Bellec, 2018] se aborda cómo mejorar el factor de potencia y gestionar el control del voltaje CD en sistemas de soldadura de arco que utilizan corriente pulsada. La corrección del factor de potencia es esencial para optimizar la eficiencia energética y reducir la interferencia electromagnética en el proceso de soldadura. Se exploran

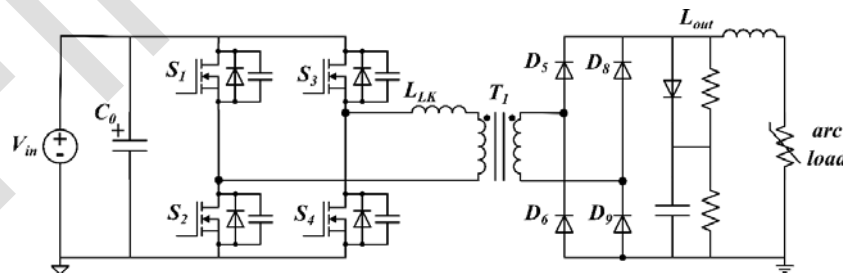
métodos tanto activos como pasivos para lograr una corrección efectiva del factor de potencia. En cuanto al control del voltaje CD, el documento destaca su importancia para mantener la estabilidad del arco y garantizar una soldadura de calidad. Se describen técnicas como la modulación por ancho de pulso (PWM) y el control adaptativo, que permiten ajustes precisos del voltaje para adaptarse a las condiciones cambiantes del proceso de soldadura. Además, se abordan los límites operativos tanto del voltaje como de la corriente pulsada, subrayando la necesidad de mantener estos parámetros dentro de rangos específicos para asegurar resultados óptimos en el inversor resonante mostrado en la Figura 3.



Fuente: [Bellec, 2018]

Figura 3 Circuito inversor resonante puente completo con convertidor de CD-CD.

De acuerdo con [Kar, 2020] el cual propone un convertidor de transición resonante modulado por fase PMRTC (Figura 4), utilizando MOSFETs de carburo de silicio SiC, para aplicaciones de soldadura manual por arco metálico MMAW, operando a una potencia máxima de 1.3 kW.



Fuente: [Kar, 2020]

Figura 4 Diagrama esquemático del PMRTC.

La topología utiliza conmutación suave parcial sin necesidad de componentes adicionales, lo que aumenta la eficiencia y reduce el tamaño y costo del sistema,

así como la técnica de modulación por ancho de pulso con desplazamiento de fase, el cual permite regular la corriente y tensión de la carga y minimizar las pérdidas de conmutación en los dispositivos semiconductores. En el artículo menciona que, en la longitud de los cables de salida debido a las altas frecuencias, lo que afecta las especificaciones del equipo de soldadura. Además, se observó que el aumento en la frecuencia de conmutación mejora la estabilidad del arco al reducir el rizado de corriente.

En el trabajo de [Kar, 2021] se presenta un convertidor resonante LCC, ilustrado en la Figura 5, que emplea componentes de carburo de silicio (SiC) con el propósito de mejorar la eficiencia del sistema en aplicaciones de soldadura. Este convertidor se caracteriza por proporcionar un voltaje de circuito abierto OCV más alto que el voltaje promedio necesario para iniciar el arco eléctrico, típicamente en el rango de 50 a 100 V, aprovechando la ganancia armónica de la red resonante en condiciones sin carga. Una vez que el arco se ha iniciado, el voltaje tiende a disminuir hasta alcanzar su valor nominal.

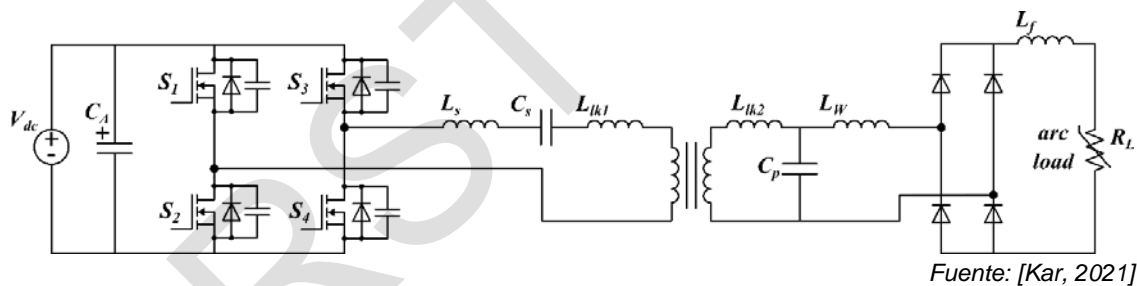
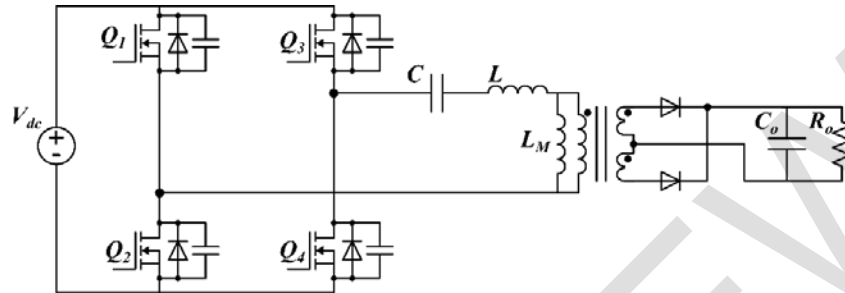


Figura 5 Diagrama convertidor resonante LCC.

Para reducir las pérdidas por conmutación, se implementan estrategias de conmutación suave, específicamente la modulación de cruce por cero de voltaje (ZVS). Además, este convertidor basado en SiC ofrece una capacidad inherente de limitación de corriente en cortocircuito, lo que simplifica el control y mejora la robustez del sistema. El diseño fue validado mediante simulación y experimentación en un modelo de 1 kW de potencia.

En [Wu, 2021] Presentan una fuente alimentación para soldadura por arco con gas metálico GMAW, el cual consta de tres inversores resonante LLC puente completo

que se muestra en la Figura 6 los cuales están conectados en paralelo, con el cual se tiene el objetivo de tener una alta potencia y que este permita reducir las pérdidas de energía, mejorar la eficiencia de conversión eléctrica y disminuir la interferencia electromagnética (EMI) durante el proceso de soldadura.

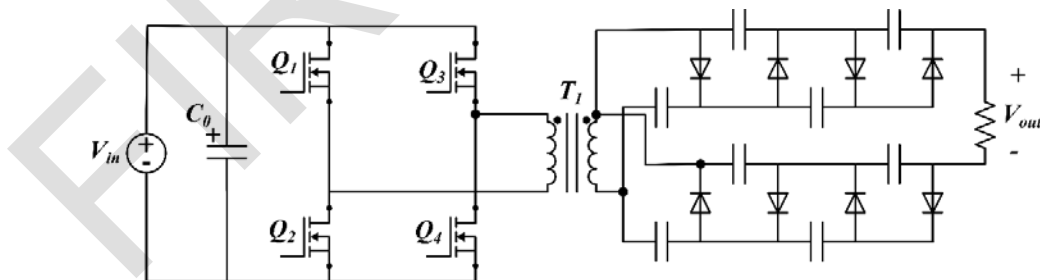


Fuente: [Wu, 2021]

Figura 6 Inversor resonante CLL.

Se realizaron pruebas de simulación de carga y pruebas de soldadura utilizando la fuente de alimentación propuesta, donde esta alcanza una corriente de salida de 210 A, mantiene la forma estable del voltaje y la corriente necesarios, logrando la ignición completa del arco con una alta eficiencia de energía.

El artículo [Zhao, 2021] propone el diseño de un módulo de fuente de alimentación de alto voltaje para aplicaciones de soldadura espacial, el cual se observa en la Figura 7, con una salida de 1 kV y 200 W a partir de una entrada de 100 V.



Fuente: [Zhao, 2021]

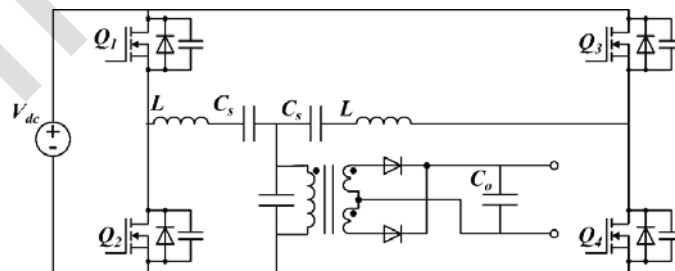
Figura 7 Módulo de fuente de alimentación de alto voltaje.

Se enfoca en la mejora de la eficiencia del convertidor de alto voltaje mediante un circuito resonante en serie de puente completo con una técnica de modulación cambio de fase, buscando satisfacer las exigencias de las tecnologías

aeroespaciales modernas. El artículo concluye que los sistemas de fuentes de alimentación de alto voltaje para el espacio están en una fase de desarrollo rápido. La topología del circuito, los componentes electrónicos y la protección de aislamiento son aspectos clave para el desarrollo futuro. El módulo de potencia propuesto cumple con los requisitos de flexibilidad, estabilidad y confiabilidad para aplicaciones de soldadura espacial y otras aplicaciones de alto voltaje en entornos aeroespaciales.

En el artículo de [Zeng, 2020] presenta una revisión exhaustiva de los convertidores resonantes LLC, destacando sus ventajas, topologías comunes y aplicaciones industriales. En las que destacan los convertidores LLC resonante de medio puente, puente completo y el TL. Y menciona las principales aplicaciones de estas en la industria. De acuerdo con el interés de este documento, menciona que el inversor resonante LLC puente completo, como el que se muestra en la Figura 6, es el implementado como fuente de soldadura debido a que las tensiones de voltaje y corriente de los interruptores son bajas, por lo que este tipo de convertidor es adecuado para condiciones de potencia media y alta.

De acuerdo con [Casanueva, 2023] el cual muestra la caracterización de un proceso de soldadura TIG realizado mediante una fuente de alimentación de soldadura por arco, capaz de proporcionar corriente directa o corriente pulsada. La fuente de alimentación (Figura 8) se basa en convertidores resonantes LCC y un circuito de control basado en FPGA.



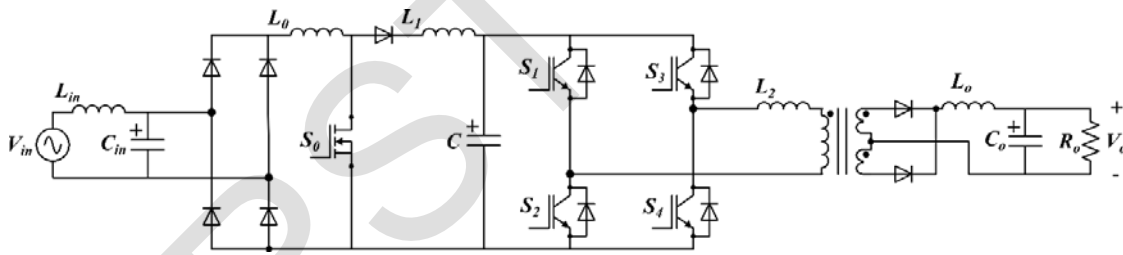
Fuente: [Casanueva,2023]

Figura 8 Fuente de corriente de CD.

Se probó con corriente continua y pulsada de hasta 1 kHz con diferentes anchos de pulso. La operación de la fuente de alimentación se comparó con la de una máquina

de soldadura comercial. Los resultados muestran un mejor rendimiento de la fuente de alimentación propuesta comparada con la comercial, con mayor eficiencia, mejor factor de potencia y menor consumo de energía.

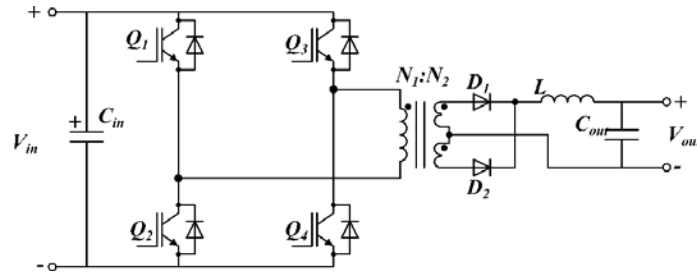
Dentro de las fuentes de soldadura, se pueden encontrar algunas topologías en las cuales no se implementen tanques resonantes, como es el caso de [Das, 2020] donde los autores realizaron un estudio en el que simularon cuatro diferentes topologías como fuentes de soldadura: inversor medio puente y puente completo. Aplicaron una modulación PWM y compararon el rendimiento a una baja frecuencia de 60 Hz y una alta frecuencia de 20 kHz. En dichas simulaciones, se obtuvo una mayor eficiencia al operar los convertidores a alta frecuencia. Al comparar los resultados obtenidos por el inversor puente H completo, la simulación mostró una eficiencia del sistema del 60% a baja frecuencia y del 92% a alta frecuencia. Además, el factor de potencia fue de 0.6 a baja frecuencia y de 0.9 a alta frecuencia y una menor THD a alta frecuencia, obteniendo mejores resultados de eficiencia del convertidor puente completo, con convertidor boost que se ilustra en la Figura 9.



Fuente: [Das, 2020]

Figura 9 Convertidor de CD-CD.

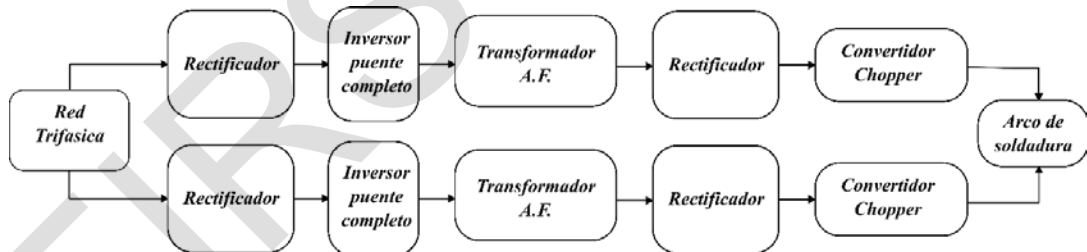
En el trabajo de [Zhou, 2021], se implementa una estrategia para el transformador de aislamiento de alta frecuencia presente en la topología de un inversor, esta topología se observa en la Figura 10, con un boost conectado en la entrada, cumpliendo la función de corrector de potencia y fuente de tensión. Dado que este sistema opera a alta frecuencia, el transformador es propenso a la saturación debido a las asimetrías del circuito. Por ello, los autores proponen la aplicación de un circuito digital integral que controle el sesgo de corriente continua a la salida del sistema, evitando así que el transformador llegue a la saturación.



Fuente: [Zhou, 2021]

Figura 10 Inversor puente completo implementado en [Zhou, 2021].

Esta configuración ofrece una rápida respuesta a variaciones de carga y voltaje, y un límite inherente de corriente de cortocircuito, mejorando el rendimiento y la calidad de la soldadura. A su vez tiene una THD en su corriente de alimentación al convertidor tiene un THD de 5% y un factor de potencia o por sus siglas en inglés FP, este cercano a la unidad. En el artículo [Zhang, 2023], presenta el diseño de una fuente de alimentación para soldadura con múltiples salidas, optimizada para aleaciones de aluminio. La máquina incluye dos grupos de convertidores, cada uno con una unidad rectificadora trifásica, un convertidor de puente completo, un transformador de alta frecuencia, una unidad rectificadora y un convertidor chopper, el diagrama de bloques de esta topología mencionada se muestra en la Figura 11.

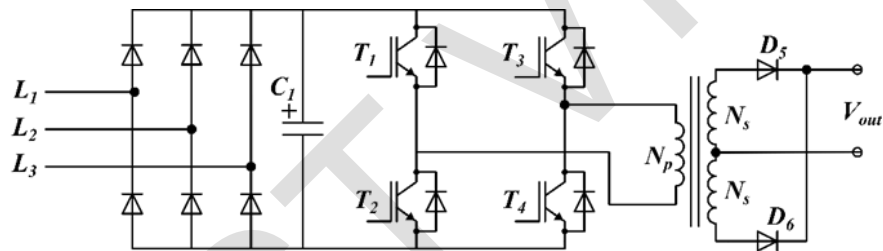


Fuente: elaboración propia

Figura 11 Diagrama de bloques de fuente de soldadura de múltiples salidas.

El sistema puede proporcionar doble corriente continua (CD) o corriente alterna (CA) única, adaptándose a distintos requisitos de soldadura. Los autores analizaron los principios de funcionamiento del convertidor, considerando la variación de la corriente de carga en el rendimiento del circuito. Se establecieron modelos de pequeña y gran señal para diseñar un algoritmo de control específico para la fuente de alimentación propuesta.

En [Mikno, 2024] realizan la comparativa entre las fuentes soldaduras tradicionales de transformador con salida de corriente alterna CA y las fuentes actuales de corriente directa, como es el caso del convertidor de la Figura 12, el cual está conformadas por un inversor de electrónica de potencia. Se estudian las pérdidas de energía en los rectificadores de salida y en los cables de conexión de entrada, así como las caídas de voltaje en rectificadores y resistencias del sistema, como los brazos de soldadura y los cables de entrada. Lo que da como resultado que las mayores pérdidas se producen en el rectificador de salida y en los cables de conexión de entrada. Las pérdidas en el rectificador de salida y en la línea son inevitables, pero las pérdidas y caídas de voltaje en los cables de entrada pueden minimizarse, especialmente durante la operación sincrónica de varias máquinas conectadas en paralelo.



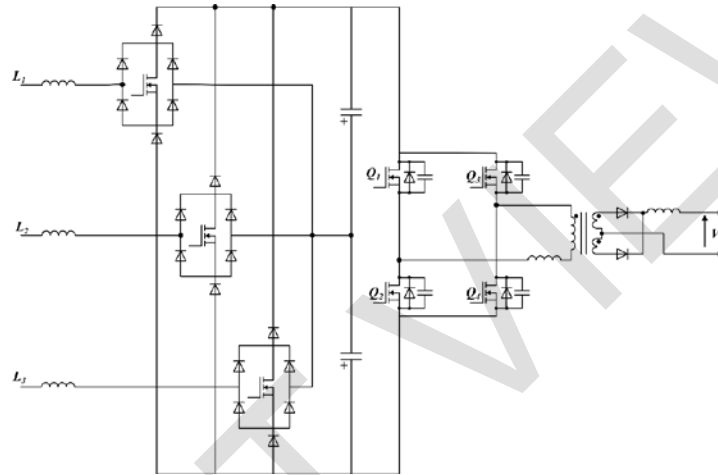
Fuente: [Mikno, 2024]

Figura 12 Inversor puente completo.

La operación sincrónica de múltiples máquinas de soldadura afecta negativamente la calidad de las soldaduras debido a las pérdidas de energía y caídas de voltaje. El trabajo de [Brezovnik, 2024] implementa una topología de soldadura por resistencia puntual (RSW) con un inversor modulado por ancho de pulso (PWM) que alimenta un transformador. La topología consta de un inversor puente completo conectado a la salida al primario de un transformador de aislamiento y en el lado secundario, un rectificador de onda completa proporciona corriente directa de soldadura, esta topología se muestra en la Figura 12. El sistema es no lineal y variante en el tiempo debido a la histéresis magnética y la electrónica. Se presenta una nueva metodología para calcular las corrientes de soldadura y primarias de manera analítica, utilizando circuitos equivalentes. Los resultados de las simulaciones

numéricas realizadas en Simulink confirman la validez de estas expresiones, lo que permite optimizar el diseño del sistema de soldadura.

En el artículo de [Bellec, 2021] Este trabajo aborda el desarrollo e implementación de la solución más adecuada para la corrección del factor de potencia en un convertidor Vienna trifásico, que a su vez conecta un inversor y este sistema forma parte de una fuente de energía de soldadura, teniendo en cuenta la no linealidad del arco eléctrico, esta topología se puede observar en la Figura 13.



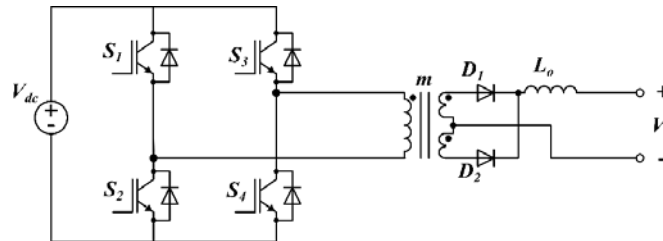
Fuente: [Bellec, 2021]

Figura 13 Convertidor Vienna trifásico conectado a un inversor puente completo.

Dado el crecimiento del mercado de la soldadura por arco y la consecuente contaminación armónica, se propone la digitalización de un controlador de corriente auto-oscilante por cambio de fase (PSSOCC), previamente disponible solo en su versión analógica, para mejorar el control de la corriente de entrada en la red. A pesar de algunas imprecisiones bajo condiciones de ruido, se concluye que este controlador tiene un gran potencial para ser implementado en futuras fuentes de soldadura multiproceso de 650 A, ofreciendo una solución eficiente y de alto rendimiento para reducir la contaminación armónica en sistemas de soldadura por arco.

En [Paul, 2023] presenta el diseño de un convertidor CD-CD, el cual consta de un inversor puente completo de alta corriente y potencia, como el que es mostrado en la Figura 14, el cual se utiliza para alimentar cargas de soldadura ligeras y cumplir

con tres objetivos principales: rendimiento de control deseado, alta eficiencia en toda la carga y una gestión térmica superior.



Fuente: [Paul, 2023]

Figura 14 Convertidor CD-CD.

El artículo propone el uso de módulos convertidores conectados en paralelo abordando problemas térmicos y de eficiencia. Al distribuir la pérdida de potencia entre varios módulos, se mejora la disipación de calor al aumentar el área superficial. Cada módulo está diseñado para operar de forma autónoma, lo que permite activar o desactivar módulos en función de la demanda de corriente, mejorando la eficiencia en cargas pequeñas. El diseño propuesto de módulos convertidores paralelos controlados por un solo controlador PWM ofrece una solución para alimentar cargas de soldadura de alta corriente y características variables, logrando una distribución óptima de las pérdidas de potencia y mejorando la eficiencia térmica y operativa. Para aplicaciones de corrientes mayores, es posible añadir más módulos, pero el control de estos sistemas se vuelve cada vez más robustos, por lo que puede ser requerido la implementación de un FPGA.

3. Resultados

Mediante el estudio de las topologías de inversores más implementada es la de puente H completo, ya que permite a la salida la mayor potencia. En la Tabla 1, se resumen las características principales de cada inversor resonante revisado antes, así como se añaden algunos artículos de relevancia al tema que, aunque algunos no son tan recientes, permite analizar las tendencias de los convertidores en esta aplicación. En cambio, cuando se implementan otra topología de inversores en soldadura, es decir, donde no se implementan tanques resonantes, cambian las

características como se muestra en las Tabla 2, sin embargo, cabe resaltar que el inversor puente completo es el más utilizado al igual que cuando se implementan circuitos resonantes.

Tabla 1 Resumen de inversores resonantes en soldadura por arco eléctrico.

| Referencia | Inversor | Tanque resonante | Alimentación de entrada | Frecuencia de trabajo | Tensión de salida | Corriente de salida |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| [Kar, 2017] | Puente completo | CLL S | 320 VCD | 50 kHz | 25 VCD | 100 A |
| [Bellec, 2018] | | | 230VCA | 100 kHz | 15 VCD | 300 A |
| [Zhao, 2021] | | | 100VCD | 50 kHz | 1 kV | 200 mA |
| [Altanneh, 2019] | | | 380 Vrms | 5 – 15 kHz | 30 VCD | 166 A |
| [Fan, 2013] | | | 48 VCD | 10 – 23 kHz | 48 VCD | 15 A |
| [Lai, 2015] | | | 400 VCD | 100 kHz | 12 VCD | 50 A |
| [Wu, 2021] | | | 220 VCA | 70 – 250 kHz | 29 VCD | 70 A |
| [Shklovski, 2012] | | CLL S-P | 230 VCA | 40 kHz | 90 VCD | 250 A |
| [Villegas, 2015] | | | 48VCD | 10 kHz | 17 Vrms | 15 Arms |
| [Kar, 2021] | | LC P | 200 VCD | 100 kHz | 16.6 VCD | 60 A |
| [Kar, 2020] | | LC SP | 325VCD | 100 – 150 kHz | 15 – 25 VCD | 60 A |
| [Casanueva, 2011] | | LCC SP | 220 VCA | 100 kHz | 50 VCD | 25 A |
| [Casanueva, 2023] | | | - | 0.5 – 1 kHz | 11 VCD | 300 A |
| [Navarro, 2012] | | bifásico | | 220 Vrms | 125 kHz | 40 VCD |

Fuente: elaboración propia

Tabla 2 Resumen de otras topologías implementadas en soldadura de arco.

| Referencia | Topología de inversor | Alimentación de entrada | Frecuencia de trabajo | Tensión de salida | Corriente de salida |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| [Bardin, 2012] | Puente completo | 310 VCD | 25 kHz | 24 – 28 VCA | 160 Arms |
| [Das, 2020] | | 320 VCD | 20 kHz | 10 VCD | 50 A |
| [Zhou, 2021] | | 537 VCD | 30 kHz | 60 VCD | 500 A |
| [Narula, 2014] | | 270 VCD | 50 kHz | 20 VCD | 125 A |
| [Zhang, 2023] | | 540 VCD | 20 kHz | 50 VCD | 50 – 250 A |
| [Mikno, 2024] | | 400 VRMS | 1 kHz | 5.7 – 12 VCD | 200 A |
| [Brezovnik, 2024] | | 530 VCD | 1 kHz | 8.9 VCD | 20 kA |
| [Bellec 2021] | | 650 VCD | 10 kHz | 28.2 VCD | 248 A |
| [Paul, 2023] | | 560 VCD | 20 kHz | 24.5 VCD | 1.4 kA |
| [Wang, 2011] | Puente completo push pull | 155 VCD | 20 kHz | 40 VCA | 100 ACA |
| [Madhulingam, 2017] | Medio puente | 230 V | 40 kHz | 26 – 42 VCD | 160 A |

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

De acuerdo con el estudio de los inversores con aplicación como fuentes de soldadura se puede determinar que:

- Las diferentes técnicas de soldadura y los materiales que se implementan en cada una de ellas son de gran importancia debido que permiten caracterizar el sistema de soldadura, ya sea si la salida es requerida en CD o CA, así como la potencia de esta.
- La implementación de inversores conlleva a que estos trabajen a alta frecuencia, ya que esta es proporcional al valor y tamaño de los elementos reactivos del sistema, cumpliendo la mayor característica de las máquinas de soldar invertir al ser compactas, y entre más grande sea la frecuencia del sistema estos tienen un menor valor y tamaño, pero pueden generar pérdidas en materiales magnéticos.
- Estos sistemas se enfocan en mejorar la eficiencia eléctrica mediante controles digitales, los cuales permiten al usuario tener un mayor control y tener una buena calidad al fundir los metales.
- Algunos artículos proponen el uso de módulos convertidores conectados en paralelo para abordar los problemas térmicos y de eficiencia, y tener una mayor potencia.

5. Conclusiones

A partir del estudio y análisis de los diversos artículos revisados, se puede concluir que los convertidores con aplicaciones de soldadura de arco eléctrico más implementados tienen las siguientes características:

- Estos sistemas se enfocan en mejorar la eficiencia eléctrica mediante controles digitales, los cuales permiten al usuario tener un mayor control y tener una buena calidad al fundir los metales.
- Se utilizan circuitos correctores del factor de potencia cuando se alimentan de la red eléctrica, ya que permiten erradicar la inyección de armónicos y mejorar la eficiencia del sistema. El convertidor boost es el circuito mayormente empleado como corrector de factor de potencia, del cual se derivan diversas técnicas de control y modulación para lograr una mayor eficiencia.
- Los sistemas de soldadura tienen dos estados: circuito cerrado (cuando se está soldando, con alta corriente y baja tensión en la salida) y circuito abierto (cuando

no se ha iniciado el arco eléctrico, y se necesita entre 50 y 100 V para ionizar el aire y comenzar la soldadura).

- En [Kar, 2021] se propone aumentar el voltaje en circuito abierto utilizando un inversor boost y un sistema de control que permita al inversor funcionar correctamente en ambos estados.
- La soldadura por arco eléctrico se caracteriza por tener un voltaje bajo y una corriente bastante elevada en su salida. En la mayoría de los casos, se implementa el inversor de puente completo, ya que ofrece la mayor potencia posible en comparación con el inversor de medio puente.
- En la implementación de inversores con tanques resonantes, el tanque resonante CLL serie es el más utilizado.
- El Control por deslizamiento por fase es el más utilizado en estos sistemas.
- La eficiencia de las fuentes de soldadura que emplean tecnología de inversores puede mejorarse mediante técnicas de modulación óptimas, como es el caso de la modulación de fase deslizante [Navarro-Crespin, 2013].
- La implementación de controles digitales avanzados para mantener una mayor eficiencia puede generar que los sistemas de soldadura sean costosos, como es el caso de implementar tarjetas robustas como son las DSPICES o FPGAs, y hacer que estos no sean tan económicos ni costeables para el mercado, por ende, debe de existir un equilibrio económico y de eficiencia.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Altanneh, N. S., Uslu, A., Aydemir, M. T., Design of a series resonant converter GMAW welding machine by using the harmonic current technique for power transfer. *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 2, febrero 2019.
- [2] Bardin, V., Borisov, D., Zemskov, A., A new class of welding machines. *International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, octubre 2012.
- [3] Bellec, Q., Le Claire, J. C., Benkhoris, M., Coulibaly, P., Power factor correction and DC voltage control limits for arc welding application using pulsed current. *IECON 2018*, vol. 44th, octubre 2018.

- [4] Bellec, Q., Le Claire, J. C., Benkhoris, M. F., Coulibaly, P., A new robust digital non-linear control for power factor correction—arc welding applications. *Energies*, vol. 14, issue 4, MDPI AG, febrero 2021.
- [5] Brezovnik, R., Ritonja, J., Derivation of Analytical Expressions for Fast Calculation of Resistance Spot Welding System Currents. *Mathematics*, vol. 12, issue 16, MDPI, agosto 2024.
- [6] Casanueva, R., Azcondo, F. J., Díaz, F. J., Brañas, C., TIG welding machines: A design for multiple two-phase resonant converter modules. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 5, pp. 53-58, septiembre 2011.
- [7] Casanueva, R., Brañas, C., Diaz, F. J., Azcondo, F. J., Ferreño, D., Setien, J., Characterization of an energy efficient pulsed current TIG welding process on AISI 316 and 304 stainless steels. *Heliyon*, vol. 9, issue 9, Elsevier Ltd, septiembre 2023.
- [8] Das, J., Halder, D., Rejman, M., Design and Analysis of Soft Switching PWM DC-DC Power Converter with High-Frequency Transformer Link for Portable Arc Welding Machine. *Symposium TENSYP*, 10 ed., junio 2020.
- [9] Fan, S., Cai, B., Wang, Z., Analysis and Design of LLC Resonant Converter for Electron Beam Welding Filament Power Supply. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 3rd ed., Busan, Korea, 2013.
- [10] Kar, A., Ghosh, K., Sengupta, M., Barman, B., Analysis and design of efficient SiC-based load-resonant converter with advanced features for arc welding applications. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2021.
- [11] Kar, A., Nanda, A., Mainak, S., Design, analysis, fabrication and practical testing of a lab developed power converter prototype in electric arc welding. *National Power Electronics Conference (NPEC)*, Pune, India, pp. 373, 2017.
- [12] Kar, A., Sengupta, M., Design, analysis and experimental validation of a variable frequency silicon carbide-based resonant-converter for welding applications. *Sādhanā*, 2020.
- [13] Lai, Y. S., Su, Z. J., Chang, Y. T., Novel Phase-Shift Control Technique for Full-Bridge Converter to Reduce Thermal Imbalance under Light-Load

- Condition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1651-1659, marzo 2015.
- [14] Madhulingam, R., Design and development of improved power quality based micro-buttt welding power supply. *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 7, pp. 746-755, junio 2017.
- [15] Mikno, Z., Stepien, M., Analysis of welding conditions at synchronous operation of resistance welding machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 133, issue 3-4, pp. 1915-1927, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, julio 2024.
- [16] Narula, S., Singh, B., Bhuvanewari, G., PFC bridgeless converter for welding power supply with improved power quality. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, pp. 213, 2014.
- [17] Navarro-Crespin, A., Casanueva, R., Azcondo, F. J., Performance improvements in an arc-welding power supply based on resonant inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 3, pp. 888-894, 2012.
- [18] Navarro-Crespin, A., Lopez, V. M., Casanueva, R., Azcondo, F. J., Digital control for an arc welding machine based on resonant converters and synchronous rectification. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, issue 2, pp. 839-847, mayo 2013.
- [19] Paul, A. K., Design of continuous-duty high-power converter for multi-purpose welding applications. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, Elsevier Ltd, diciembre 2023.
- [20] Shklovski, J., Janson, K., Development of constant-power source for arc welding. *Biennial Baltic Electronics Conference*, vol. 13th, octubre 2012.
- [21] Villegas, P. J., Diaz, J., Pernia, A. M., Martinez, J. A., Nuno, F., Prieto, M. J., Filament power supply for electron beam welding machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1421-1430, marzo 2015.
- [22] Wang, J. M., Wu, S. T., Yen, S. C., Chiu, H. J., A simple inverter for arc-welding machines with current doubler rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5278-5281, noviembre 2011.

- [23] Wu, K., Wang, Y., Cao, X., Zhan, J., Hong, X., Yin, T., GMAW power supply based on parallel full-bridge LLC resonant converter. *International Journal of Electronics*, vol. 109, issue 12, pp. 2135-2157, Taylor and Francis Ltd., 2022.
- [24] Zeng, Z., LLC resonant converter topologies and industrial applications -A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, issue 3, pp. 73-84, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., septiembre 2020.
- [25] Zhang, J., Chen, S., Zhao, H., Yu, Y., Liu, M., Designing a Multi-Output Power Supply for Multi-Electrode Arc Welding. *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, abril 2023.
- [26] Zhao, W., Jiang, Y., Wu, J., Huang, Y., Zhu, Y., An, J., Wan, C. A., Space High-Voltage Power Module. *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, Frontiers Media S.A., abril 2021.
- [27] Zhou, Y., Qi, B., Zheng, M., Cong, B., A Novel DC Bias Suppression Strategy for Single-Phase Full-Bridge DC-DC Arc Welding Converter. *Electronics*, febrero 2021.