

Estudio del convertidor *Push-Pull* para aplicaciones en amplificadores de audio

Study of the Push-Pull converter for audio-amplifiers applications

Guerrero-Barajas, J. U.^{1*} , Vazquez-Guzman, G.¹ , Sosa-Zúñiga, J. M.¹ , Martinez-Mendez, R.² , Aztatzi-Pluma, D.³  (*LIS19110761@irapuato.tecnm.mx)

Recibido: 14 de diciembre de 2023 Aceptado: 6 de enero de 2024

RESUMEN

En el presente artículo se analiza y diseña un convertidor Push-Pull para la alimentación de amplificadores de audio de calidad y potencia para aplicaciones en la industria automotriz.

Los amplificadores de audio, especialmente los de potencia, necesitan una fuente de alimentación óptima para funcionar eficazmente a todas las frecuencias audibles para el ser humano. Es esencial que estos amplificadores tengan un diseño preciso y un cálculo adecuado en el convertidor de potencia de la fuente de alimentación, ya que son los responsables de proporcionar la potencia necesaria a la etapa amplificadora de audio.

Cuando se trata de amplificadores de audio para la industria automotriz, la principal fuente de energía es la batería del vehículo. Sin embargo, esta energía debe transformarse mediante un convertidor para adaptarse a las necesidades del amplificador de audio. En este contexto, se propone el diseño y la implementación de un convertidor CD-CD Push-Pull, diseñado para elevar el voltaje de la batería y proporcionar un voltaje dual adecuado para alimentar amplificadores de diversas topologías.

Palabras clave: *Push-Pull, Voltaje, Amplificador, Alimentación.*

¹Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Silao-Irapuato km 12.5 El Copal, Irapuato, Gto. CP. 36821.

²Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad S/N. Toluca, Estado de México, México. CP. 50130.

³Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Blvd. Cuitzeo de los Naranjos 401, Los Naranjos, Abasolo, Gto. C.P. 36976.



ABSTRACT

In this article, the analysis and the implementation using numerical simulations of the Push-pull converter are presented. The push-pull topology is proposed to fill the requirements of the quality and power of the audio amplifiers used in the automotive industry.

The audio amplifiers, in particular the power amplifiers, needs an adequate and optimized power supply to get an efficient operation along all the audible frequencies for the humans. It is important for this equipment to make a precise design and an adequate calculus for the power converters used in the power supply, since they are the responsible to provide the necessary electric power for the audio

amplifier stage.

In the automotive industry, the battery is the main power source in a vehicle and the energy provided by the battery must be adapted and controlled in order to make it useful for the audio amplifiers. In this context, in this article a DC-DC push-pull converter is proposed to supply audio amplifiers. This power converter has the goal to boost and regulate the input voltage to supply the energy required by the audio amplifiers.

Keywords: *Push-Pull, Voltage source, Audio amplifier.*

INTRODUCCIÓN

Los convertidores de Corriente Directa a Corriente Directa (CD-CD) transforman un voltaje de entrada fijo en un voltaje de salida con un valor diferente. Funcionan de manera similar a los transformadores, pero trabajan con corriente continua en lugar de corriente alterna. Se usan en sistemas embarcados, especialmente en aplicaciones de accionamiento. Ejemplos comunes de estas aplicaciones incluyen motores para limpiaparabrisas y arranque de vehículos, así como en sistemas de audio como radiocasetes y reproductores de discos compactos en automóviles. Además, se aplican en otros sistemas embarcados como barcos, aviones y satélites. También se encuentran en dispositivos portátiles como reproductores de discos compactos y reproductores de audio [1].

Con el rápido avance de la electrónica de potencia, se ha observado un notable progreso en el desarrollo y aplicación de convertidores CD-CD, tanto aislados como no aislados. La literatura técnica ha reforzado las bases teóricas y prácticas en este campo [2].

Dentro de esta área de conocimiento se encuentran los convertidores CD-CD no aislados y aislados. Los convertidores no aislados, tales como el convertidor buck (reductor), boost (elevador) y buck-boost (reductor-elevador), son esenciales para transformar una fuente de corriente continua de un voltaje a otro, ya sea reduciéndolo o aumentándolo [3].

Por otro lado, los convertidores CD-CD aislados, como el Flyback, Forward, entre otros, permiten

implementar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, siendo fundamentales en aplicaciones donde se requiere una separación eléctrica entre la entrada y la salida del convertidor. Estas aplicaciones incluyen; fuentes de alimentación conmutadas, cargadores para computadoras, sistemas de iluminación, sistemas de energía renovable, entre otros [4].

A medida que se estudian las características más importantes de estos convertidores y sus aplicaciones prácticas, se logra apreciar cómo estos sistemas tecnológicos han evolucionado gracias al trabajo pionero de expertos en electrónica de potencia [2]. Este desarrollo continuo no sólo ha mejorado la eficiencia en la conversión de energía, sino que también ha ampliado significativamente las posibilidades de aplicación en diversos campos, como lo son los vehículos automotores [4].

El convertidor CD-CD conocido como Push-Pull se configura como un convertidor aislado basado en el convertidor reductor o también conocido como BUCK. El convertidor Push-Pull hace uso de dos interruptores para generar un voltaje pulsante en el devanado primario de un transformador, actuando esencialmente como un inversor de alta frecuencia. La función principal del transformador es ajustar el voltaje primario, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo, haciendo que este convertidor se comporte como un convertidor BUCK-BOOST dependiendo de la relación que este tenga y a su vez, también proporciona aislamiento entre la fuente de voltaje de entrada y el voltaje de salida [5].

El diseño del transformador empleado en un convertidor Push-Pull implica el uso de un devanado primario con derivación central y un devanado secundario también con derivación central. El accionamiento de los interruptores electrónicos se lleva a cabo mediante un circuito de control, asegurando que ambos interruptores generen flujos magnéticos iguales, pero de polaridad opuesta en el núcleo del transformador. Este enfoque permite obtener un balance adecuado en la operación del convertidor, contribuyendo a la obtención de una eficiencia entre el 80 y el 85 % [5].

En este artículo, se presenta el análisis y la validación mediante simulaciones numéricas de un convertidor CD/CD aislado del tipo Push-Pull, el cual transforma +12V CD a 40V CD (Voltaje en Corriente Directa). Este sistema se someterá a pruebas conectando como carga un amplificador de audio de 100W rms para evaluar su comportamiento, esto, una vez se haya validado el funcionamiento del sistema mediante los resultados de simulación. El informe proporcionará una explicación de cada etapa del sistema, con la intención de servir como referencia para futuros diseños similares con variación en voltaje y corriente de salida. La implementación experimental del convertidor bajo estudio no es parte de lo reportado en este trabajo y se deja para trabajos futuros.

METODOLOGÍA

Clases de amplificadores con alimentación simétrica

Los amplificadores de potencia son sistemas que aumentan la amplitud de una señal de voltaje y co-

riente con respecto a la señal de entrada. Es crucial que los puntos de operación se ubiquen dentro de un intervalo permitido de voltaje y corriente para garantizar una operación adecuada. Este rendimiento se mide considerando la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, conocida como eficiencia [6]. Por lo tanto, para lograr un desempeño óptimo, es necesario alimentar un amplificador de audio con un voltaje constante. Existen varios tipos de amplificadores de audio que se alimentan con un voltaje como el que brinda la topología Push-Pull, es decir, un voltaje simétrico ($V_{\pm}$), algunos de estos se describen a continuación.

Amplificadores clase A: Los amplificadores clase A consumen alta corriente continua de la fuente de alimentación, independientemente de la existencia o no de señal en la entrada de audio. Esta amplificación presenta la desventaja de generar una fuerte y constante cantidad de calor, que se debe disipar. Esto provoca un rendimiento muy reducido, ya que se pierde una parte importante de la energía que entra en el amplificador. Este tipo de amplificadores tiene un uso frecuente en equipos domésticos y en sistemas de audio, ya que proporcionan alta calidad de sonido, al ser muy lineal y con baja distorsión [7].

Amplificadores clase B: Este amplificador en particular se destaca porque no absorbe corriente cuando no hay señal en el circuito de entrada. Aunque su consumo es menor que en los amplificadores de clase A, la calidad es ligeramente inferior debido a la forma en la que se amplifica la señal. Se utiliza en sistemas telefónicos, dispositivos de seguridad portátiles y sistemas de alerta, sin embargo, tiene escasa aplicación en sistemas de audio [6].

Amplificador clase AB: Los amplificadores de clase AB siempre absorben una pequeña cantidad de energía, incluso si no hay una señal específica en la entrada. Son los más usados en sistemas de audio debido a su alto rendimiento. El nombre proviene de su comportamiento: con señales fuertes, actúan como amplificadores de clase B, pero con señales débiles, se comportan como los amplificadores de clase A [7].

Amplificador clase D: La amplificación de clase D, también llamada amplificación de conmutación, utiliza la conmutación de transistores para controlar el suministro de la energía. Lo que la hace especial es su alta eficiencia, es decir, posee mínimas pérdidas de energía en el proceso de amplificación de las señales. Esto resulta en la necesidad de menos dispositivos para disipar calor y una menor potencia del sistema en general, lo que a su vez reduce el tamaño y el peso del equipo [6].

A continuación, se presenta una tabla comparativa (Tabla 1) que muestra las topologías de amplificadores mencionadas. Cada clase se evalúa en términos de eficiencia, distorsión y aplicaciones para proporcionar una visión general de sus características más importantes.

Las clases de amplificadores antes mencionadas requieren de una alimentación constante con voltaje simétrico, por lo que son ideales para alimentarse con el convertidor CD-CD Push-Pull.

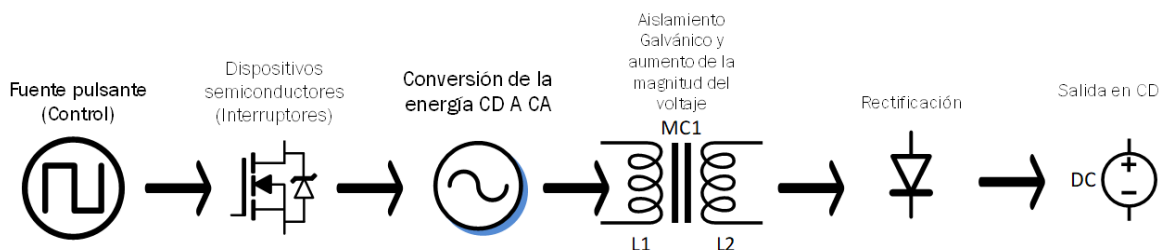
Tabla 1. Comparación de las topologías.

Clase del amplificador	Eficiencia	Distorsión	Aplicaciones
Clase A	Media-Baja	Baja	Equipos de audio Hi-Fi
Clase B	Media	Alta	Equipos de Telefonía
Clase AB	Media-Baja	Media	Equipos de audio convencionales
Clase D	Alta	Alta	Equipos de Car Audio

Definición del convertidor CD-CD aislado con topología Push-Pull

El convertidor CD-CD Push-Pull es un convertidor de electrónica de potencia que se encuentra en diversas aplicaciones, ya que destaca su versatilidad y eficiencia en la conversión de energía eléctrica. Esta estructura perteneciente a la categoría de convertidores reductores-elevadores, emplea dos interruptores controlados para generar un voltaje pulsante de la fuente de energía al devanado primario de un transformador [5]. Su funcionamiento es semejante al de un inversor de alta frecuencia, y su diseño implica el uso de un transformador con primario y un secundario que presentan derivaciones centrales. Los interruptores electrónicos que comúnmente se usan son los MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), los cuales se accionan (apagado y encendido) usando un circuito de control que genera pulsos que se diseñan para asegurar que generen flujos magnéticos opuestos en el embobinado primario del transformador del convertidor [8].

Lo que distingue al convertidor Push-Pull es su capacidad para reducir o aumentar el voltaje de entrada, adaptándose así a diversas aplicaciones con requisitos eléctricos específicos. Este dispositivo no solo cumple con la función de conversión eficiente, sino que también proporciona aislamiento galvánico entre la fuente de voltaje de entrada y la carga, mejorando la seguridad y robustez del sistema. En la Figura 1 se puede observar un esquema que muestra las etapas de topología del convertidor Push-Pull.

**FIGURA 1.** Esquema de las etapas del convertidor CD-CD Push-Pull.

En la Figura 2 se puede observar un esquema eléctrico simplificado que muestra la estructura de la topología del convertidor CD-CD Push-Pull. Puede verse que en la etapa de entrada se presentan dos dispositivos semiconductores, en este caso MOSFETs, que están conectados a la fuente de alimentación y a los dos devanados primarios del transformador. Por otro lado, en la salida, se tiene el secundario del transformador conectado a un rectificador en puente completo que, en conjunto con los capacitores de salida, producen al voltaje de salida en CD.

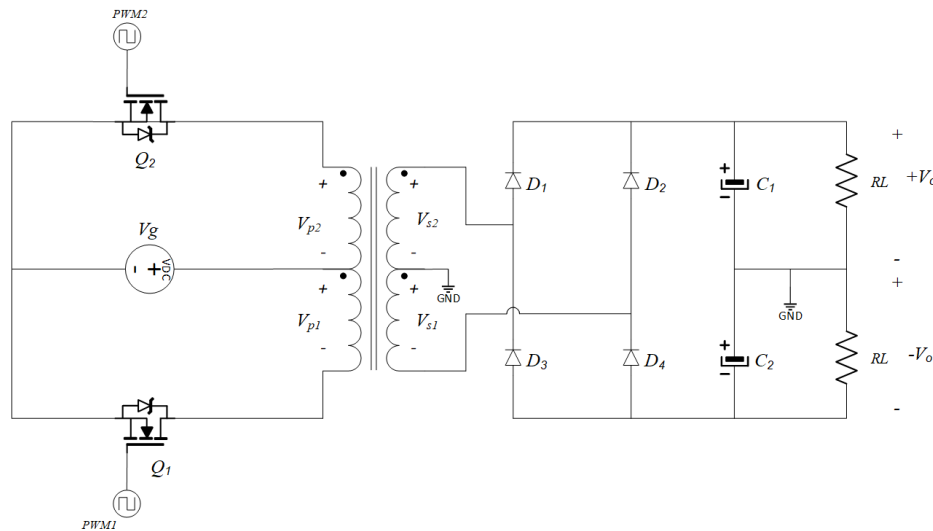


FIGURA 2. Circuito de la topología del convertidor Push-Pull.

Características principales del convertidor Push-Pull

- Este convertidor es una derivación del convertidor Buck
- Aplicaciones de media potencia
- Interruptores con referencia a tierra (facilita el accionamiento)
- Puede aumentar o reducir el voltaje de salida
- Generación de voltajes simétricos
- Posee aislamiento galvánico entre la entrada y la salida del convertidor
- Amplio rango de aplicaciones

Análisis del convertidor *Push-Pull*

Para llevar a cabo el análisis volt-segundo del convertidor, se consideran los MOSFETs, diodos y transformador como componentes ideales, excluyendo las capacitancias, inductancias y resistencias parasitas asociadas a dichos elementos y a las conexiones que los interconectan. Esta simplificación tiene como objetivo realizar el análisis en condiciones de estado estable e ideal, permitiendo una comprensión adecuada del comportamiento del convertidor sin la influencia de elementos secundarios derivados de imperfecciones en los componentes. Este enfoque proporciona una base sólida para evaluar el comportamiento y la eficiencia del convertidor en condiciones ideales, lo cual se usa como punto de referencia esencial para diseños más complejos una vez que se ha comprendido su funcionamiento [8].

El análisis de este convertidor consiste en estudiar su comportamiento a lo largo de un periodo de operación el cual se divide en tres intervalos que se describen a continuación:

INTERVALO 1: en este intervalo Q_1 , D_1 y D_4 se activan (estado ON) para el intervalo $0 < t \leq DT$.

En la Figura 3 se muestra el circuito equivalente de los elementos del circuito que se encuentran activados:

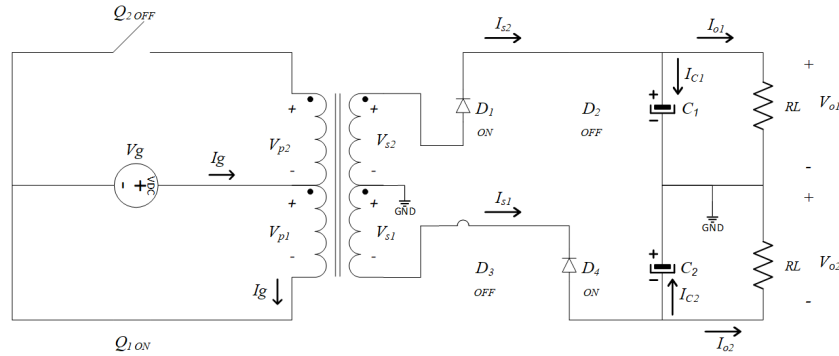


FIGURA 3. Circuito equivalente para el intervalo 1 del convertidor.

Al activar Q_1 se induce un voltaje en el devanado primario p_1 del transformador con un voltaje definido por V_g , de acuerdo con lo anterior se puede escribir la Ec. 1:

$$V_{p1} = V_g \quad (1)$$

Debido al voltaje aplicado en el devanado primario p_1 del transformador se induce un voltaje en el resto de los devanados del transformador. La siguiente ecuación Ec. 2 define el voltaje inducido en el devanado secundario 1 (V_{s1}):

$$V_{s1} = V_g \left(\frac{N_S}{N_P} \right) = V_{s2} \quad (2)$$

Para el caso del voltaje en el devanado secundario $s2$ del transformador se tiene la Ec. 3:

$$V_{s2} = V_g \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (3)$$

mientras que, el voltaje en el primario $p2$ está dado por la Ec. 4:

$$V_{p2} = V_g \quad (4)$$

El voltaje en el interruptor Q_2 está definido por la Ec. 5:

$$V_{Q2} = 2V_g \quad (5)$$

Analizando la salida del convertidor se tienen las ecuaciones Ec. 6 y Ec. 7:

$$V_{o1} = V_{s2} = V_g * \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (6)$$

$$V_{o2} = V_{s1} = -V_g * \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (7)$$

INTERVALO 2: en este intervalo Q_1 y Q_2 están desactivados para el intervalo $DT < t \leq T/2$.

En la Figura 4 se muestra el circuito equivalente de los componentes que se encuentran activados:

Al estar desactivados Q_1 y Q_2 la corriente en los dos devanados primarios es nula, por lo que se considera que idealmente no habrá voltaje ni corriente en el circuito, sin embargo, se deben considerar que en la práctica pueden existir energía magnética en el transformador por lo que se puede presentar un flujo de corriente en el circuito.

INTERVALO 3: en este intervalo Q_2 , $D2$ y $D3$ se activan para el intervalo $\frac{T}{2} < t \leq \frac{T}{2} + DT$

En la Figura 5 se muestra el circuito equivalente de los componentes que se encuentran activados:

Al activar Q_2 se induce un voltaje en el devanado primario $p2$ del transformador con un valor de voltaje de $-V_g$, de acuerdo con lo anterior se puede escribir la Ec. 8:

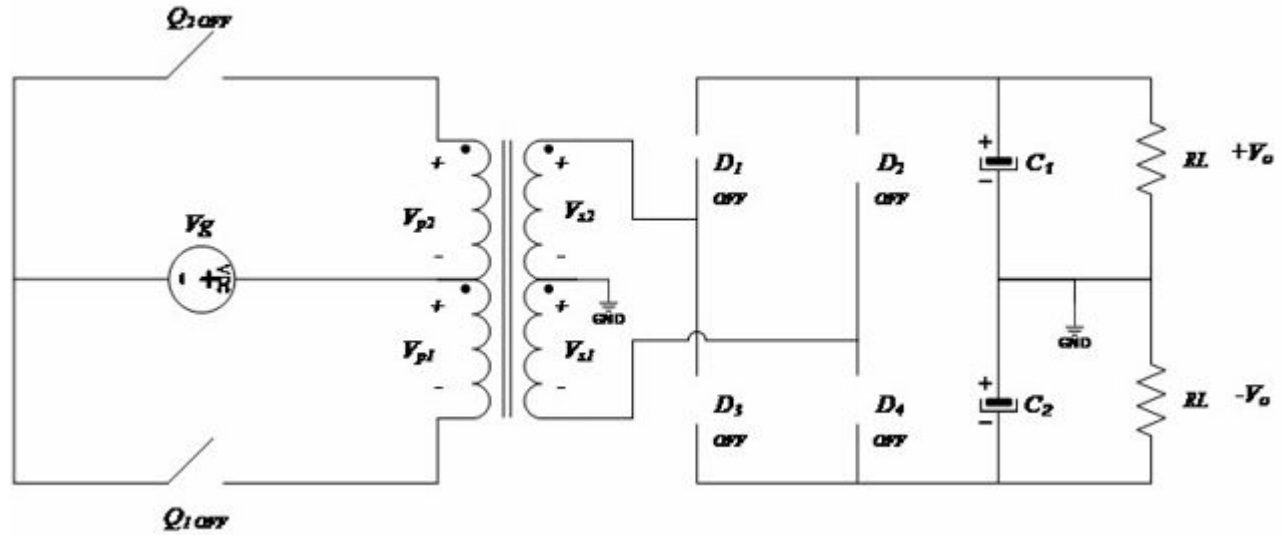


FIGURA 4. Circuito equivalente para el intervalo 2 del convertidor.

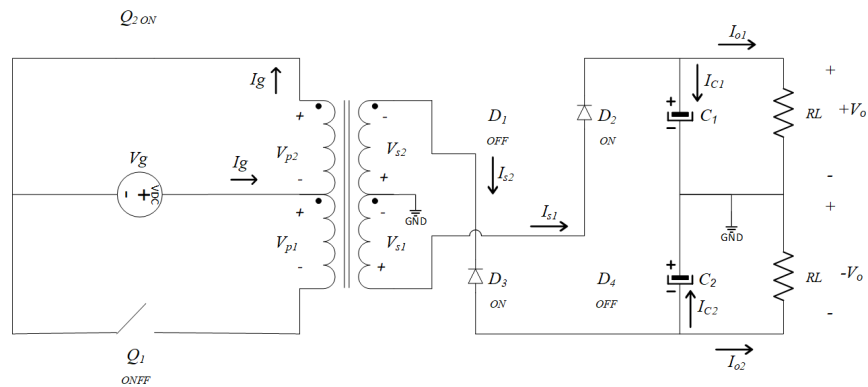


FIGURA 5. Circuito equivalente para el intervalo 3 del convertidor.

$$V_{p2} = -V_g \quad (8)$$

Debido al voltaje aplicado en el devanado primario $p2$ del transformador se inducen otros voltajes en el resto de los devanados del transformador. El voltaje en el primario $p1$ está dado por la Ec. 9:

$$V_{p1} = -V_g \quad (9)$$

Mientras que, el voltaje en el secundario $s1$ del transformador se define mediante la Ec. 10:

$$V_{s1} = -V_g \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (10)$$

por otro lado, el voltaje en el secundario $s2$ se puede obtener mediante la Ec. 11:

$$V_{s2} = -V_g \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (11)$$

El esfuerzo de voltaje para el interruptor 2 estará dado por Ec. 12:

$$V_{Q1} = 2V_g NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (12)$$

Analizando la salida del convertidor se tienen las ecuaciones Ec. 13 y Ec. 14:

$$V_{o1} = -V_{s1} = V_g * \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \quad (13)$$

$$V_{o2} = V_{s2} = -V_g * \left(\frac{N_S}{N_P} \right) NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (14)$$

Generación de los pulsos PWM

Una parte crítica en el desarrollo de convertidores CD-CD es la generación de la señal de control PWM (Modulación por Ancho de Pulso), la cual desempeña una función fundamental en el accionamiento preciso y sincronizado de los semiconductores encargados de suministrar voltaje y corriente a un componente específico.

La técnica PWM se refiere a la estrategia de ajustar la duración de los pulsos en una señal pulsante

para regular la cantidad de energía suministrada a un dispositivo o carga durante un periodo específico. Este método de modulación posibilita la variación en el suministro de voltaje y corriente al regular el tiempo durante el cual la señal PWM mantiene su estado alto o bajo.

Algunas propiedades esenciales de las señales PWM incluyen la frecuencia, que determina la rapidez de conmutación y el ciclo de trabajo que señala la proporción temporal durante la cual la señal permanece en estado alto. Un ciclo de trabajo superior implica una mayor potencia suministrada, mientras que una frecuencia más elevada puede afectar la eficiencia y la respuesta dinámica del sistema, además de que está relacionada con el tamaño de los elementos pasivos del sistema.

En los convertidores Push-Pull, los lapsos de inactividad, también conocidos como tiempos muertos, representan un elemento vital para este tipo de convertidores. Estos breves intervalos entre pulsos sirven para evitar cualquier coincidencia en la activación de los interruptores, asegurando un funcionamiento adecuado y minimizando las pérdidas de energía. La sincronización precisa de estos tiempos muertos se convierte en un factor crucial para prevenir cortocircuitos y evitar la destrucción parcial o total del sistema.

Una diversidad de circuitos integrados, tales como el TL494, SG2535, TL598, entre otros, se encuentran disponibles en el mercado para la generación de señales PWM en convertidores.

Transformador de alta frecuencia

En el diseño y fabricación del transformador de alta frecuencia, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: un voltaje de entrada (V_{in}) de 12 *VCD* y un voltaje de salida (V_O) de 80 *VCA* (Voltaje en Corriente Alterna) que entreguen a la carga 40 *VCD*. Para llevar a cabo el proceso de elevación de voltaje y proporcionar aislamiento al amplificador de audio, se consideró el uso de un transformador elevador de voltaje, como se ilustra en la Figura 6.

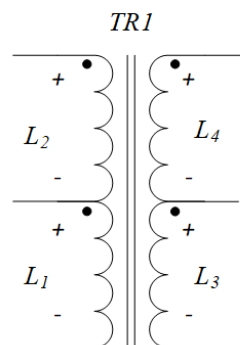


FIGURA 6. *Transformador de alta frecuencia.*

Este transformador trabaja bajo el principio de la topología Push-Pull, en la cual el devanado primario

del transformador está dividido en dos bobinas o bien tiene derivación central. Mediante la Ec. 15 se pueden obtener parámetros para realizar el diseño del transformador.

$$B = \frac{V_p * (10^8)}{4 * f_c * A_e * N_p} \quad (15)$$

Donde:

B es el flujo magnético en Teslas

V_p es el voltaje en el primario del transformador

f_c es la frecuencia de trabajo del convertidor en Hz

A_e es el área transversal del núcleo en cm^2

N_p es el número de espiras o vueltas de alambre que tendrá el embobinado primario

Para obtener V_p se tiene la Ec. 16.

$$V_p = 2V_{in} - V_{DS} \quad (16)$$

Para saber el valor de V_{DS} se debe consultar la hoja de datos del fabricante del MOSFET a utilizar; como el análisis que se realizó fue de manera ideal, se debe considerar un MOSFET que tenga bajas pérdidas en conducción y cumpla con los requisitos del convertidor. Se propone hacer uso del IRFZ44N el cual posee una R_{DS-ON} muy baja que es de $0,0175\Omega$ y un $V_{DS} = 3V$. Por lo tanto, se tiene:

$$V_p = 2(12V) - 3V = 21V$$

Con base en las hojas de datos de los núcleos de ferrita a utilizar se pueden obtener datos como son el área transversal A_e y su flujo magnético B . Para este caso se usa el modelo 5967001201 fabricado por la empresa FAIR-RITE, cuyas características son $A_e = 0,962 cm^2$ y $B = 2000 Gauss$. Con base en estos datos se puede determinar el número de vueltas que debe tener el transformador en su embobinado primario con ayuda de la Ec. 15:

$$N_p = \frac{21V * (10^8)}{4 * 45kHz * 0,962cm^2 * 2000} \quad N_p = 6,0637 \quad N_p \approx 6 vueltas$$

Para obtener el número de vueltas que debe tener el embobinado secundario del transformador, se hace uso de la Ec. 17:

$$V_{out} = 2 * \frac{N_S}{N_P} * V_{in} * D \quad (17)$$

Despejando se tiene

$$80V = 2 * \frac{N_S}{6} * 12V * 0,48$$

$$N_S = 41,6 \approx 42 \text{ vueltas}$$

VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Simulación de la topología

Para la validación del diseño descrito en las secciones anteriores se propone el uso del software PSIM para la obtención de resultados simulación con la cual se demuestre el funcionamiento de la topología Push-Pull. En la Figura 7 se muestra el circuito implementado en dicho software.

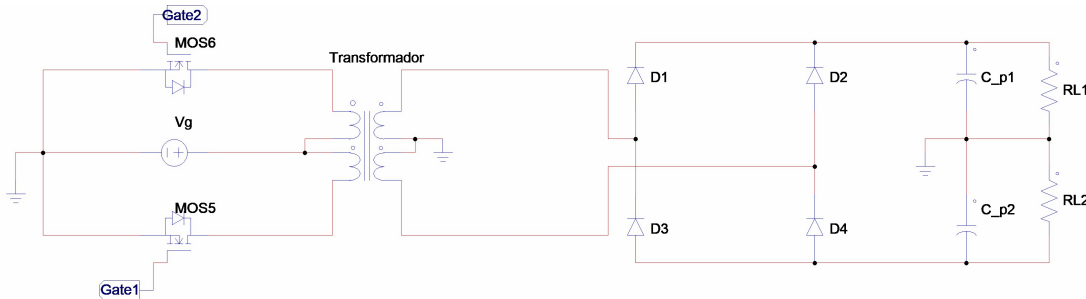


FIGURA 7. Esquema de simulación de la topología *Push-Pull*.

Para la generación de los pulsos PWM para el control del convertidor propuesto, se implementa un circuito basado en bloques que generan las señales de compuerta. Estos bloques son responsables de generar la señal PWM necesaria para controlar los MOSFETs del circuito. La frecuencia de operación se ha establecido en 45 kHz , tal y como se definió en las ecuaciones anteriores. La configuración del ciclo de trabajo se fijó el 50% , asegurando una distribución simétrica de los pulsos a lo largo de cada periodo. Este ciclo de trabajo óptimo garantiza un rendimiento eficiente del convertidor, minimizando las pérdidas de energía y maximizando la transferencia de potencia, sin embargo, se debe tomar en cuenta que, para diseños prácticos, el ciclo de trabajo no debe ser mayor del 48% ya que se podría presentar un corto circuito en el convertidor.

En las Figuras 8 y 9 se puede apreciar la configuración que se usó para los bloques de compuerta y el circuito implementado para generar las señales de control de las compuertas de los MOSFETs.

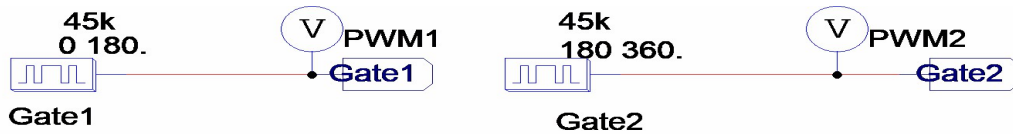


FIGURA 8. *Circuito de control de los MOSFETS.*

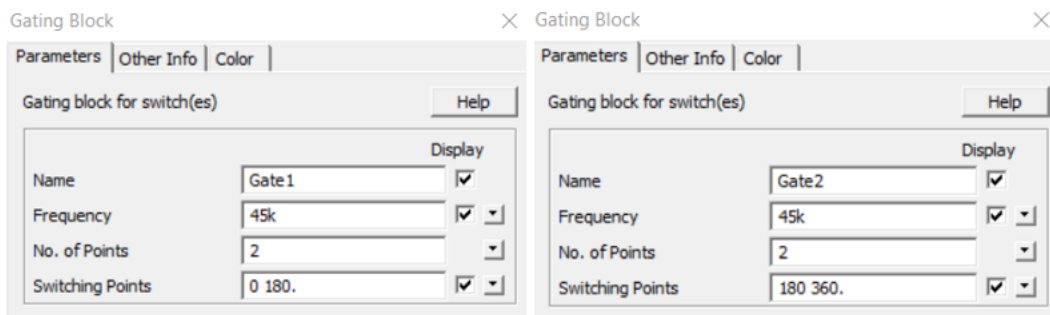


FIGURA 9. *Configuración de los bloques de compuerta.*

Una vez que ya se tiene la configuración de las señales de control se verifica si se configuró de manera correcta. En la Figura 10 se observan las gráficas de las señales PWM generados por los bloques de compuerta y dichas señales están siendo inyectadas en las compuertas de los MOSFETs. Notar que, cuando una señal está en nivel “1” la otra está en nivel “0”, esto quiere decir que los interruptores se accionan de manera complementaria.

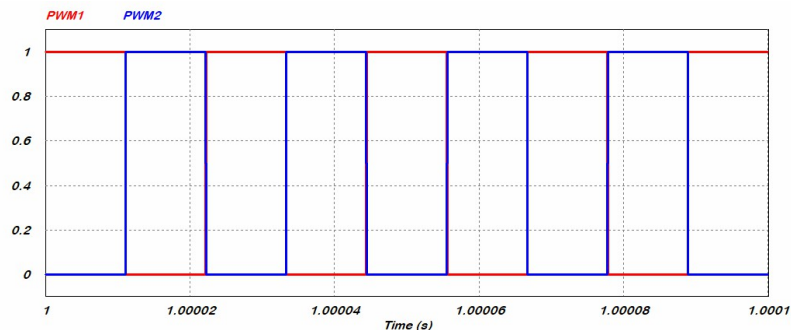


FIGURA 10. *Señales PWM de control configuradas con una frecuencia de 45kHz.*

Teniendo las señales de control se procede a insertar los parámetros calculados anteriormente para el transformador en su recuadro de configuración como se muestra en la Figura 11.

Parameter	Value	Display
Name	Toroidal	☒
Rp_1 (primary 1)	10	☒
Rp_2 (primary 2)	10	☒
Rs_1 (secondary 1)	0.001	☒
Rs_2 (secondary 2)	0.001	☒
Lp_1 (pri. 1 leakage)	0.00001	☒
Lp_2 (pri. 2 leakage)	0.00001	☒
Ls_1 (sec. 1 leakage)	0.00001	☒
Ls_2 (sec. 2 leakage)	0.00001	☒
Lm (magnetizing)	0.5	☒
Np_1 (primary 1)	6	☒
Np_2 (primary 2)	6	☒
Ns_1 (secondary 1)	21	☒
Ns_2 (secondary 2)	21	☒

FIGURA 11. Configuración en el simulador del transformador de doble devanado primario y secundario.

Una vez que se han configurado los parámetros calculados, se valida el voltaje en los embobinados primarios del transformador como se puede apreciar en la Figura 12, en donde se puede observar que se cumple con lo que se presentó en las Ec. 5 y Ec. 12. Dicho voltaje corresponde al voltaje máximo que debe soportar el MOSFET entre drenaje y fuente el cual equivale a 2 veces el voltaje aplicado en la entrada. Notar que se trata de un voltaje alterno y simétrico respecto del eje del tiempo.

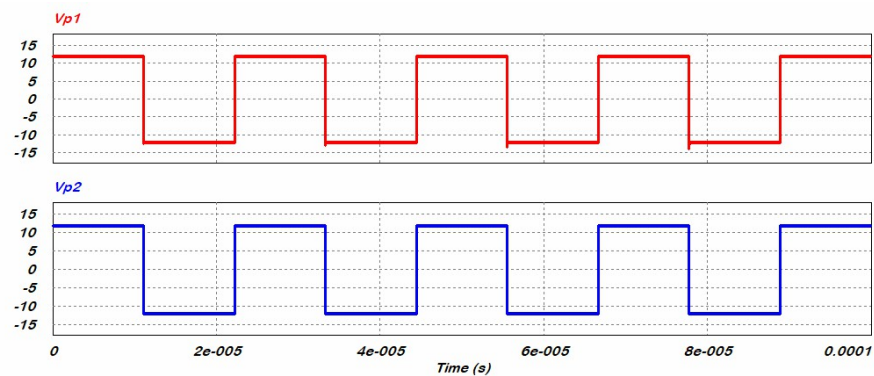


FIGURA 12. Señales de voltaje en los devanados primarios.

Una variable importante a evaluar en el diseño es la corriente que suministra la fuente de alimentación (V_g). En las Figuras 13 y 14 se observa la forma de onda de la corriente suministrada por V_g , notar que, el comportamiento de esta forma de onda es triangular y continua, es decir la corriente crece linealmente

cuando se somete el devanado a un voltaje constante y decrece cuando esta entrega la energía almacenada en el estado de operación anterior.

En la Figura 13 se observa un intervalo de la forma de onda de la corriente en el cual se produce la respuesta transitoria del sistema, en este intervalo la corriente que entrega la fuente V_g es de alrededor de $1,17A$. Por otro lado, en la Figura 14 se puede apreciar la corriente que suministra V_g cuando el sistema alcanza el estado estacionario, donde se puede observar que la corriente máxima consumida es de $38mA$. Es importante destacar que la corriente de entrada del sistema, la cual se extrae de una batería, no es discontinua y por lo tanto esta característica no producirá una reducción de la vida útil de la batería.

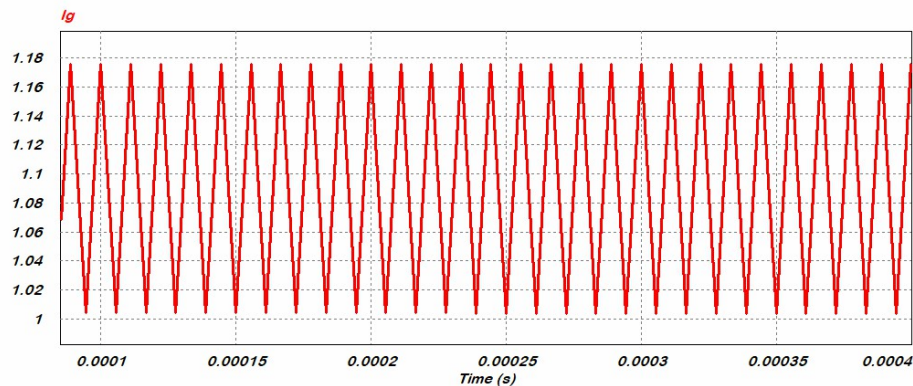


FIGURA 13. Corriente suministrada por V_g durante las respuesta transitoria.

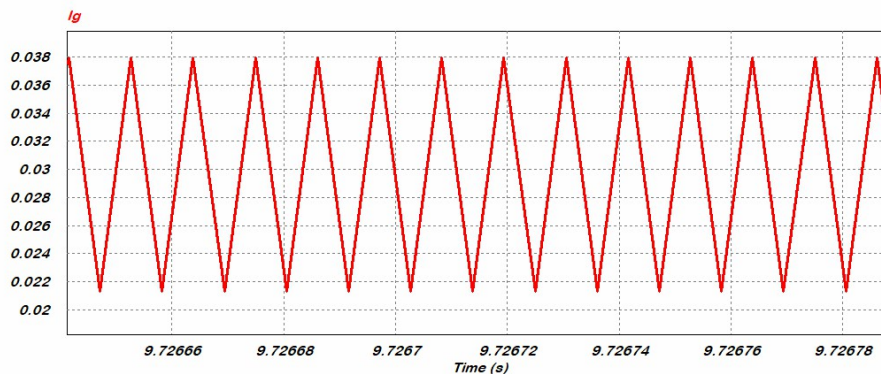


FIGURA 14. Corriente suministrada por V_g en estado estacionario.

En la Figura 15 se puede apreciar el voltaje de salida en los embobinados secundarios del transformador, con los cuales se puede afirmar que cumple con el voltaje de salida deseado que son $40V$ por bobina aproximadamente, es decir desde la derivación central a un extremo del embobinado.

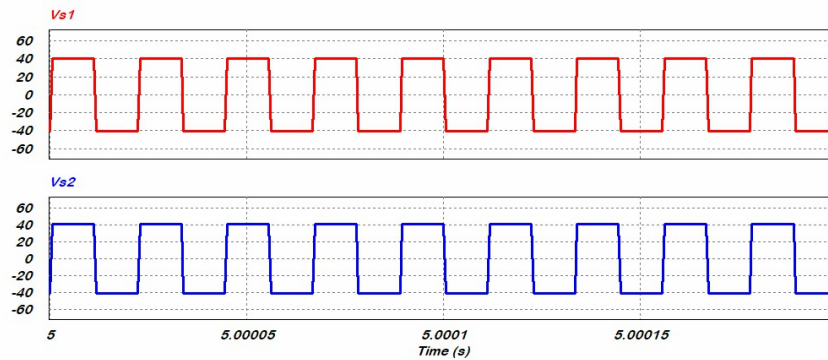


FIGURA 15. Voltajes de salida considerando como referencia la derivación central en los embobinados secundarios del transformador.

En la Figura 16 se puede apreciar el voltaje de salida del embobinado secundario del transformador, pero de extremo a extremo, en donde el valor máximo alcanzado es de aproximadamente $80V$, valor que se propuso en el diseño.

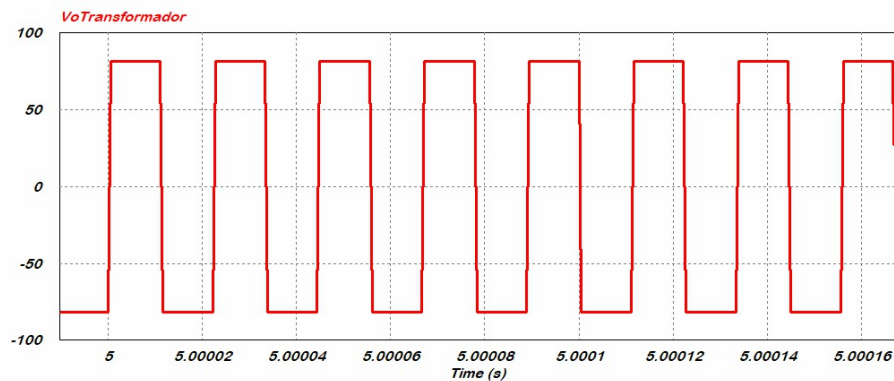


FIGURA 16. Voltaje de salida de extremo a extremo en los embobinados secundarios del transformador.

Con respecto a la etapa de salida, en la Figura 17 se muestra el voltaje de salida aplicado a la carga una vez que ya fue rectificado y filtrado. Como se puede apreciar se obtiene el valor de voltaje deseado, el cual es de ± 40 volts, siendo 40 volts positivos y 40 volts negativos aproximadamente.

Para fines comparativos, en la Figura 18 se puede observar el voltaje de salida y el voltaje de entrada, donde se puede ver que el voltaje de salida (80 volts) es mayor que el voltaje de entrada.

En la Figura 19 se puede apreciar el rizo del voltaje de salida en el puerto de salida del convertidor, que en este caso es de aproximadamente de $1mV$. Esta magnitud de rizo en el voltaje de salida es muy bajo y contribuirá a un adecuado funcionamiento del amplificador de audio.

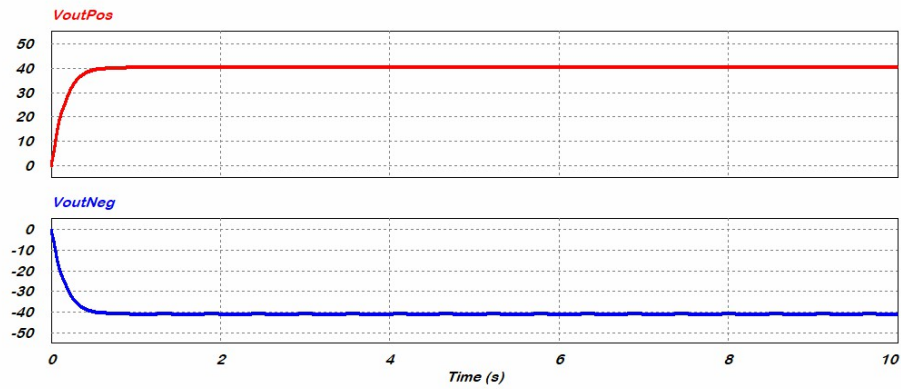


FIGURA 17. Voltajes de salida del convertidor.

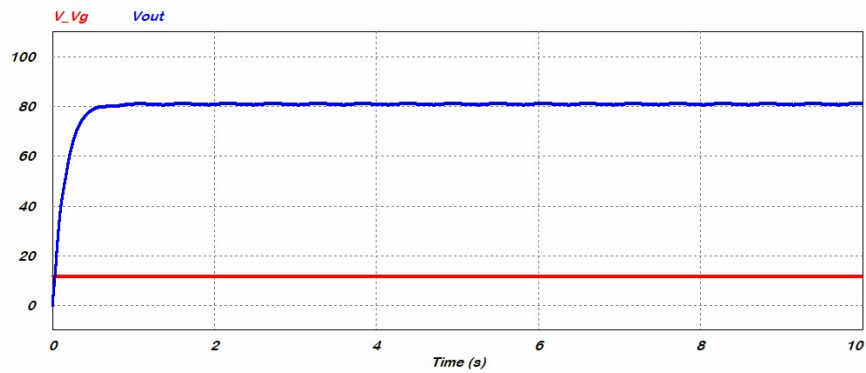


FIGURA 18. Voltaje de entrada y de salida del convertidor diseñado.

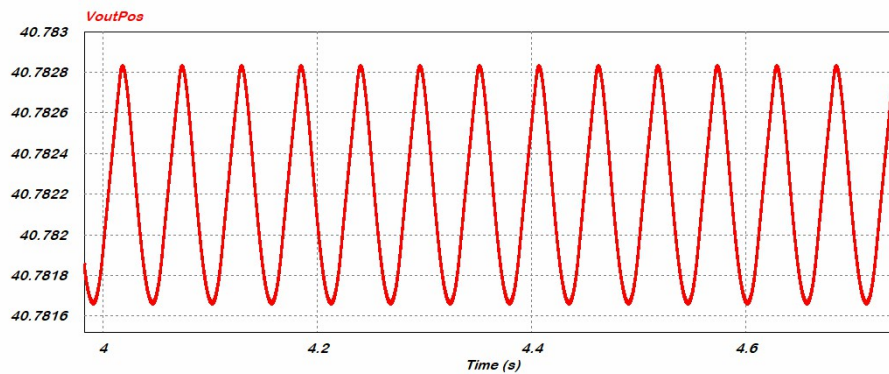


FIGURA 19. Magnitud del rizo del voltaje de salida del convertidor.

Por otro lado, el porcentaje de rizo corresponde a 0,055 %, como se puede apreciar en la Figura 19.

Comparación de resultados con relación al análisis

En la Tabla 2 se muestra la comparativa de los resultados obtenidos en el análisis y en simulación de algunos parámetros como lo son el voltaje que debe soportar el MOSFET, el voltaje a la salida del transformador y el voltaje rectificado y filtrado en la salida del convertidor.

Tabla 2. Comparación de resultados en análisis y en simulación.

Parámetro	Valor obtenido en el análisis	Valor obtenido en simulación
Voltaje drain-source máximo (V_{Q1} y $Q2$)	24V	23.64V
V_{s1}	42V	40.77V
V_{o1}	42V	40.78V
V_{o2}	-42V	-40.78V
Voltaje de salida de extremo a extremo	80V	81.56

CONCLUSIÓN

Después de haber realizado el análisis y la validación mediante simulaciones numéricas del del convertidor CD-CD con la topología Push-Pull, se ha confirmado de manera satisfactoria su funcionamiento apropiado. La comprobación se realizó mediante la comparación entre los resultados obtenidos en la simulación y el análisis teórico realizado previamente, donde se pueden percibir diferencias marginales entre ambos valores.

Estas diferencias entre la simulación y el análisis teórico, pueden ser corregidas ajustando algunos parámetros del sistema, aunque estas no representan un problema significativo en la operación del convertidor debido a que son valores despreciables ya que existe un rango de operación y una tolerancia para la alimentación en los amplificadores de audio. Los resultados sugieren que el convertidor CD-CD con topología Push-Pull es una solución viable y funcional para suministrar la energía necesaria a un amplificador de audio que opera con voltajes simétricos, en este caso se diseñó para un voltaje de 80 voltios en DC, distribuidos simétricamente en +40 y -40 voltios. Por lo tanto, este trabajo confirma la capacidad del convertidor para mantener una salida estable y confiable. Como actividades futuras de este trabajo, se buscará la implementación experimental del sistema y se validará bajo las condiciones de demanda reales de un amplificador de audio para aplicaciones en la industria automotriz.

REFERENCIAS

- [1] *Convertidores Electrónicos De Potencia*, Santander, febrero 2011, accedido El 12 De diciembre De 2023. [Online]. Available: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2264/course/section/2183/convertidores.pdf>
- [2] D. W. Hart, *Electrónica De Potencia*. Pearson Educación, 2005.
- [3] M. H. Rashid, *Electrónica De Potencia - Circuitos, Dispositivos*. Prentice Hall, 1999.
- [4] N. Mohan, *Power Electronics: Converters, Applications, And Design*, 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [5] S. S. Ang, *Power-Switching Converters*, 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor and Francis, 2005.
- [6] G. D. C. Abata, “Diseño e implementación de un amplificador para audio clase d, monofónico, de 100w,” Quito, 2015.
- [7] P. R. S. Almeida, “Análisis, diseño y construcción de amplificadores de potencia para radio frecuencia en clases a,” Quito, 1996.
- [8] J. E. B. Urón, O. A. G. Riaño, and L. E. C. Arévalo, “Convertidor cd/cd aislado tipo push-pull,” *Articulo De Divulgación*, junio 2017.