



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**



**TESIS**

**ANÁLISIS DE CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL EN  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON ALMACENAMIENTO DE  
ENERGÍA**

Que para obtener el Grado de:  
**Maestría en Ciencias de la Ingeniería**

Presenta:  
**Ing. Diana Karen García Ventura**

**G22073005**

**N° de CVU 1240218**

Director de Tesis:  
**Dr. Pedro Martín García Vite**  
**N° de CVU 227310**

Co-Directora de Tesis:  
**Dra. Ana Lidia Martínez Salazar**

Cd Madero, Tamaulipas 10 de Abril de 2025



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Ciudad Madero**  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **24/Marzo/2025**

**Oficio No. U11.013/2025**

**ASUNTO:** Autorización de Impresión

**C. DIANA KAREN GARCÍA VENTURA**  
**No. DE CONTROL G22073005**  
**P R E S E N T E**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

|              |                                 |
|--------------|---------------------------------|
| PRESIDENTE : | DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE    |
| SECRETARIO:  | DRA. ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR |
| VOCAL :      | DR. NELSON RANGEL VALDEZ        |
| SUPLENTE:    | DR. ULISES PÁRAMO GARCÍA        |

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

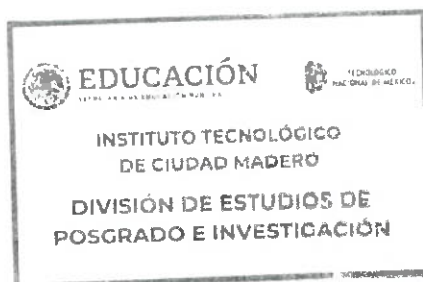
**"Análisis de convertidor bidireccional en sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía"**

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*  
*"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®*

  
**RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo  
RCG/NRV/jarX



**2025**  
Año de  
**La Mujer**  
**Indígena**

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos  
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110  
e-mail: [depi\\_cdmadero@tecnm.mx](mailto:depi_cdmadero@tecnm.mx) [www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx)  
[www.cdmadero.tecnm.mx](http://www.cdmadero.tecnm.mx)



## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos por su amor incondicional y apoyo, a mi director de tesis el Dr. Pedro Martín García Vite por su paciencia, por sus conocimientos y consejos desde el día uno de conocerlo.

## **AGRADECIMIENTOS**

En agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM) - Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM) por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de posgrado en Maestría en ciencias de la ingeniería.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el programa de beca que sustentó económicamente mis estudios.

Principalmente a mi Director de tesis el Dr. Pedro Martín García Vite y a mi Codirectora la Dra. Ana Lidia Martínez Salazar por brindarme sus consejos, apoyo, confianza y todo su conocimiento, sin lo cual esto no hubiera sido posible.

A mi Comité Tutorial por la paciencia en mis exposiciones y por sus consejos en cada una de ellas.

A mi amiga Maria Andrea Olivo Calles que me animó a ingresar al programa de posgrado, por su apoyo y amistad incondicional, a mis demás compañeros tesistas por las asesorías y críticas constructivas que me ayudaron a la mejora continua.

# **Análisis de convertidor bidireccional en sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía**

Diana Karen García Ventura

## **Resumen**

El convertidor de doble puente activo es una topología avanzada en sistemas de energía, caracterizada por la presencia de dos puentes activos en paralelo. Su funcionamiento se basa en principios específicos que involucran componentes cruciales y configuraciones variadas. El control y la modulación son aspectos fundamentales para optimizar su rendimiento. Entre las ventajas destacan su alta eficiencia y versatilidad, aunque presenta desafíos como la complejidad de control. El doble puente activo encuentra aplicaciones en diversas áreas, desde sistemas de energía renovable hasta accionamiento de motores en diversos ámbitos e incluso vehículos eléctricos.

Examinando investigaciones actuales, se vislumbra un futuro prometedor con posibles mejoras y avances. En este proyecto se pretende analizar la viabilidad y funcionamiento del convertidor bidireccional DAB y su interacción con sistemas fotovoltaicos integrando componentes de almacenamiento de energía.

En conclusión, el convertidor de doble puente activo emerge como una opción potente, respaldada por su rendimiento eficiente y aplicaciones versátiles. A medida que la investigación continua, se espera un crecimiento significativo y una contribución sustancial a los sistemas de energía avanzados

# **Analysis of bidirectional converter in photovoltaic systems with energy storage**

Diana Karen García Ventura

## **Abstract**

The double-active bridge converter is an advanced power system topology characterized by two parallel active bridges. Its operation is based on specific principles that involve crucial components and varied configurations. Control and modulation are fundamental aspects of optimizing its performance. Its high efficiency and versatility are among the advantages, although it presents challenges such as control complexity. The double active bridge finds applications in various areas, from renewable energy systems to motor drives in various fields and even electric vehicles.

Examining current research shows a promising future with possible improvements and advances. This project aims to analyze the viability and operation of the bidirectional DAB converter and its interaction with photovoltaic systems that integrate energy storage components.

In conclusion, the dual active bridge converter emerges as a powerful option, backed by its efficient performance and versatile applications. As research continues, significant growth and substantial contributions to advanced energy systems are expected.

# Índice

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Análisis de convertidor bidireccional en sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía .....</b> | <b>V</b>   |
| <b>Analysis of bidirectional converter in photovoltaic systems with energy storage .....</b>               | <b>VI</b>  |
| <b>Índice .....</b>                                                                                        | <b>VII</b> |
| <b>Índice de figuras .....</b>                                                                             | <b>IX</b>  |
| <b>Abreviaturas .....</b>                                                                                  | <b>X</b>   |
| <b>1    Introducción .....</b>                                                                             | <b>1</b>   |
| 1.1    Planteamiento del problema.....                                                                     | 4          |
| 1.2    Justificación .....                                                                                 | 5          |
| 1.3    Objetivos .....                                                                                     | 6          |
| 1.3.1    Objetivo general .....                                                                            | 6          |
| 1.3.2    Objetivos específicos.....                                                                        | 6          |
| 1.4    Alcances y delimitaciones .....                                                                     | 7          |
| 1.4.1    Alcances.....                                                                                     | 7          |
| 1.4.2    Delimitaciones .....                                                                              | 7          |
| 1.5    Hipótesis .....                                                                                     | 8          |
| 1.6    Organización de la tesis .....                                                                      | 8          |
| <b>2    Marco teórico .....</b>                                                                            | <b>9</b>   |

|          |                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1      | Energía solar y sistemas fotovoltaicos .....           | 10        |
| 2.2      | Microrredes aisladas con fuentes fotovoltaicas .....   | 12        |
| 2.3      | Convertidores de potencia.....                         | 13        |
| 2.4      | Convertidor de doble puente activo.....                | 14        |
| 2.5      | Control del convertidor DAB DC-DC. ....                | 15        |
| 2.6      | Modelo ideal del convertidor DAB DC-DC .....           | 17        |
| 2.7      | Modulación por cambio de fase.....                     | 20        |
| 2.8      | Sistema de almacenamiento de energía de baterías ..... | 23        |
| 2.9      | Seguimiento del Punto de máxima potencia MPPT.....     | 25        |
| 2.10     | Convertidor CD-CD en sistemas fotovoltaicos.....       | 26        |
| 2.11     | Configuraciones fotovoltaicas .....                    | 27        |
| <b>3</b> | <b>Antecedentes .....</b>                              | <b>28</b> |
| <b>4</b> | <b>Metodología.....</b>                                | <b>32</b> |
| 4.1      | Operación del convertidor doble puente activo .....    | 35        |
| 4.2      | Procedimiento de Simulación .....                      | 36        |
| <b>5</b> | <b>Resultados .....</b>                                | <b>37</b> |
| <b>6</b> | <b>Conclusiones.....</b>                               | <b>45</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliografía.....</b>                               | <b>52</b> |

# Índice de figuras

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Sistema de energía fotovoltaica aislada.....                                                   | 11 |
| Figura 2 Sistema aislado de energía fotovoltaica interconectada a la red .....                          | 12 |
| Figura 3 Topología básica del convertidor de doble puente activo.....                                   | 15 |
| Figura 4 Esquema del modelo convertidor bidireccional DAB .....                                         | 18 |
| Figura 5 Derivación del convertidor DAB sin pérdidas con respecto a modulación por cambio de fase. .... | 19 |
| Figura 6 Voltajes en la terminal del transformador.....                                                 | 20 |
| Figura 7 Fuente PV conectada a una carga a través de un convertidor de potencia.....                    | 26 |
| Figura 8 Esquema general de metodología.....                                                            | 34 |
| Figura 9 Conmutación del DAB.....                                                                       | 35 |
| Figura 10 Señales de control del convertidor .....                                                      | 38 |
| Figura 11 Señales de voltaje del primario ( $V_p$ ) y secundario ( $V_s$ ) del convertidor.....         | 39 |
| Figura 12 Voltajes de la resistencia , inductor y capacitor del convertidor.....                        | 39 |
| Figura 13 Corrientes de la resistencia , inductor y capacitor del convertidor. ....                     | 40 |
| Figura 14 Simulación utilizando una batería de litio como fuente.....                                   | 41 |
| Figura 15 Gráficas obtenidas de los tiempos de descarga a 2,4 y 8 horas.....                            | 41 |
| Figura 16 Voltajes y corrientes del DAB .....                                                           | 42 |
| Figura 17 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de $+90^\circ$ .....                           | 42 |
| Figura 18 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de $+45^\circ$ .....                           | 43 |
| Figura 19 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de $0^\circ$ .....                             | 43 |
| Figura 20 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de $-45^\circ$ .....                           | 44 |
| Figura 21 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de $-90^\circ$ .....                           | 44 |

## Abreviaturas

|      |                                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------|
| DAB  | Doble Puente Activo (Dual Active Bridge )                               |
| BESS | Sistema de Almacenamiento de Baterías (Battery Energy Storage System)   |
| MPPT | Seguimiento de Punto de Máxima Potencia (Maximum Power Point Tracking ) |
| CD   | Corriente Directa                                                       |
| CA   | Corriente Alterna                                                       |
| PWM  | Modulador De Ancho De Pulso (Pulse-Width Modulation)                    |
| D    | Ciclo de Trabajo                                                        |
| DCM  | Modo De Conducción Discontinua (Discontinuous Conduction Mode )         |
| Vin  | Voltaje de entrada                                                      |
| Vout | Voltaje de salida                                                       |
| Voc  | Voltaje de circuito abierto                                             |
| Vmp  | Voltaje a máxima potencia                                               |
| GTO  | Tiristor de apagado de puerta (Gate Turn-Off Thyristor)                 |
| SCR  | Rectificador Controlado De Silicio                                      |
| BJT  | Transistor de unión bipolar (Bipolar Junction Transistor)               |

---

## 1 Introducción

Dentro de las energías limpias, la solar fotovoltaica es de las fuentes más implementadas para la producción de energía eléctrica, por medio del efecto fotovoltaico mediante paneles solares que pueden ser de interconexión a la red o de tipo aislado.

No obstante, todo el recurso disponible no puede ser aprovechado debido a que la eficiencia en los paneles por sí solos es baja [2] e irregular, su generación no es constante y depende de las condiciones ambientales de irradiancia y temperatura, esto ha dado pie al estudio y desarrollo de dispositivos auxiliares que permiten una generación más estable y eficiente del sistema de manera integral.

Lo anterior es posible gracias a la electrónica de potencia y la apertura que brinda, permitiendo la integración de elementos de generación, gestión y administración de la energía. Por ejemplo, dispositivos de procesamiento como convertidores de potencia o dispositivos de almacenamiento, como bancos de baterías.

En sistemas de generación eléctrica por fuentes fotovoltaicas, el papel que juegan los dispositivos de almacenamiento es vital ya que brinda autonomía al sistema, permitiendo abastecer de energía de respaldo aun en situaciones de baja o nula irradiancia [3], por ejemplo, en condiciones de sombreado parcial o durante la noche.

El incluir bancos de almacenamiento conlleva grandes beneficios al sistema, pero también restricciones que nos dan la pauta para la selección del convertidor a utilizar se deben considerar los tiempos de carga y descarga en relación con la energía suministrada y la

demanda del sistema, existiendo un flujo de potencia de manera bidireccional con diferentes niveles de tensión.

Entre las topologías de convertidores existen varias que permiten controlar un flujo bidireccional, no obstante, sus limitaciones de control de corriente y voltaje nos hacen descartarlos para estos sistemas.

De esta manera, sobresale como opción el convertidor de topología Doble Puente Activo (DAB, por sus siglas en inglés), ya que satisface todas las necesidades de la propuesta, además de ofrecer una estructura de control sencilla y de fácil implementación de potencia en de corriente directa a corriente directa (C.D.-C.D.).

El convertidor de doble puente activo está compuesto como su nombre lo dice, por dos puentes completos de transistores enlazados por un transformador, que actúan alternadamente y con un ángulo de fase permitiendo el flujo en ambos sentidos de manera simétrica, entre sus limitantes frente a otros convertidores sencillos está el número de elementos, sin embargo, gracias a esta robustez pueden controlar mayor densidad de potencia, y actuar en sentido reductor o elevador según las necesidades requeridas [4].

El modo de operación del doble puente activo se determina por medio del orden la secuencia de pulsos de control aplicados en los transistores que lo constituyen, estableciéndose un ángulo de fase de control. Estas señales generalmente proceden de un sistema digital como un microcontrolador o una computadora. Para generar una secuencia adecuada, el microcontrolador debe recolectar la información mediante sensores para determinar el escenario en el que opera la pequeña red [5].

El microcontrolador se puede encargar de tareas adicionales como el algoritmo de seguimiento de máxima potencia, el despliegado de datos para visualización de usuario o depuración, activación de protecciones y almacenamiento de datos.

En esta propuesta se presenta la implementación de un convertidor doble puente activo capaz de acondicionar y controlar el flujo de potencia en forma bidireccional, interconectado a una fuente fotovoltaica que a su vez estará en comunicación con un banco baterías.

En bancos de almacenamiento de baterías, las baterías de plomo-ácido han sido la opción dominante para los sistemas solares fotovoltaicos por muchos años, pero con el crecimiento en la fabricación de los vehículos eléctricos, la tecnología de baterías de iones de litio ha mejorado y se ha convertido en una opción viable para estos sistemas solares [6].

Entre las ventajas de implementar baterías de iones de litio resaltan su alta densidad energética, es decir, más energía almacenada con menos peso, permitiendo ahorrar hasta un 70% en espacio y un 70% en peso en comparación con una de plomo-ácido; requieren poco mantenimiento y son más resistentes a las descargas irregulares; sin emisión de contaminantes, altas corrientes de carga y descarga [6].

Otra ventaja relevante es que pueden conectarse en paralelo para aumentar su capacidad, el resto de las baterías no se deben conectar así, ya que disminuye drásticamente su vida útil [6].

Por el contrario, a otros dispositivos de almacenamiento, las baterías de iones de litio poseen controladores electrónicos integrados que regulan sus ciclos de carga y descarga, previniendo con ello el sobrecalentamiento por sobrecargas [7].

Para el sistema de almacenamiento de energía, las baterías de iones de litio son óptimas para cubrir esta necesidad, aunque, actualmente no son tan utilizadas por su alto precio. Los avances entorno a la tecnología de baterías de litio en México hasta ahora es una industria en desarrollo [8].

Solamente se conoce el yacimiento del mineral en Sonora, pero la situación cambiará en el futuro próximo. Según especialistas se motivará la creación de la cadena de valor en torno a las baterías de litio en el país [8].

## 1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años el uso de la energía verde ha ido en aumento propiciando la búsqueda de técnicas y configuraciones óptimas en una microrred aislada inteligente que incremente la eficiencia global del sistema de generación.

Entre las fuentes de energías verdes, la solar fotovoltaica se distingue debido, principalmente, a la abundancia, la fácil instalación y de fácil acceso. Tiene grandes beneficios, pero también grandes desafíos que desde hace años han sido el foco de atención de muchos investigadores.

Algunos de estos inconvenientes involucran mala calidad de la energía por inestabilidad de frecuencias y voltajes, producción intermitente por la falta de sistemas eficientes de almacenamiento de respaldo y la necesidad de dispositivos que permitan controlar un flujo en ambas direcciones.

Para minimizar algunas de las desventajas de generación intermitente y de bajo voltaje, se ha apoyado de sistemas de almacenamiento de energía y otras fuentes que brindan robustez y permiten una mejor gestión de la energía.

Uno de los mecanismos más importantes para el respaldo de energía es el uso de bancos de baterías. Al contener un banco de baterías, la estructura del sistema implementado es aún más variable debido a que, en un momento dado, este banco funciona como fuente o como carga.

Ya que resulta de vital importancia un seguimiento para suministrar un voltaje óptimo, dado que este punto de operación es variable en el tiempo, en la literatura [11-15] se plantea el uso de convertidores de potencia que facilitan el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT por sus siglas en inglés) y mejoran el rendimiento.

Así mismo, se han introducido dispositivos de potencia que ayudan a controlar y gestionar de manera más eficiente la conversión de energía.

Por consiguiente, se busca explorar los beneficios obtenidos con un sistema de almacenamiento de energía en un sistema de generación con una fuente de energía solar fotovoltaica.

Partiendo de la estructura de convertidores unidireccionales operados con algoritmos de control, contemplando el reto que sugiere la integración de un sistema de gestión de energía y la incorporación del convertidor bidireccional basado en la estructura monofásica del doble puente activo o DAB (por sus siglas en inglés).

Esta propuesta se centrará en el diseño, implementación y análisis de un convertidor bidireccional tipo doble puente activo y en la gestión de los dispositivos de almacenamiento de energía.

## **1.2 Justificación**

Los convertidores basados en electrónica de potencia proporcionan un mecanismo ideal para el manejo de flujo de energía, además de acondicionar los niveles adecuados de voltaje. Dichas funciones se pueden realizar conectando diversas etapas o convertidores que cumplan con alguna tarea en particular.

Para este proyecto se requiere validar mediante el análisis del convertidor bidireccional su factibilidad en integración con sistemas fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de energía para lo cual se sustentará mediante simulaciones en Matlab-Simulink.

Esta configuración en su estructura básica se denomina: doble puente activo. Sin embargo, el reto principal consiste en gestionar la operación de la energía cuando se incorporan fuentes de almacenamiento.

.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de un convertidor de potencia con la cualidad de gestionar un flujo bidireccional para su interconexión a una microrred conformada por una fuente de energía verde y una batería de litio, con el fin de evaluar su desempeño y eficacia en aplicaciones fotovoltaicas..

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar el convertidor tipo doble puente activo, considerando la capacidad de potencia, la relación de transformación y el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.
- Analizar y caracterizar el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía, considerando diferentes escenarios de operación.
- Obtener el modelo con datos reales del convertidor bidireccional basado en la estructura de doble puente activo, operado en forma aislada.
- Implementar técnicas de control para evaluar el comportamiento del convertidor.
- Integrar el sistema fotovoltaico, con el fin de evaluar el desempeño del sistema de almacenamiento de energía en Matlab-Simulink.
- Implementar las rutinas de adquisición y procesamiento de datos, para realizar la evaluación y análisis.

## 1.4 Alcances y delimitaciones

### 1.4.1 Alcances

- Análisis del convertidor doble puente activo en forma aislada para simulación de su comportamiento de manera arbitraria, evaluando su estabilidad y eficiencia.
- Identificación de variables que afectan la eficiencia del convertidor y modelado matemático para el diseño del convertidor de doble puente activo en Matlab-Simulink.
- Análisis del convertidor integrando una batería y una resistencia para evaluar los comportamientos de carga y descarga del elemento de almacenamiento de energía al variar las condiciones de operación.
- Simulación del convertidor en diversos escenarios de operación usando la técnica de control de cambio de fase, variando el ángulo de operación de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , para demostrar su eficiencia y el sentido del flujo de la energía.

### 1.4.2 Delimitaciones

A continuación, se presentan las delimitaciones del presente proyecto:

- Tiempos y costos para conseguir los materiales adecuados para la realización experimental del proyecto.
- Complejidad del modelo matemático e información limitada del desarrollo experimental.
- Este proyecto no se centra en la eficiencia del convertidor sino en la gestión de la potencia y funcionalidad del mismo en aplicaciones fotovoltaicas.

## **1.5 Hipótesis**

La implementación de un convertidor de doble puente activo DAB en un sistema fotovoltaico con almacenamiento de energía, mejoraría la eficiencia global del sistema, debido a que el DAB puede operar con alto rendimiento en una amplia gama de condiciones de carga, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiere una conversión de energía eficiente y flexible, como en sistemas de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos.

La relación de transformación del convertidor DAB podría afectar significativamente la eficiencia por tanto es de los puntos vitales a considerar en su diseño, además del tipo de dispositivos de almacenamiento, con base a la literatura se recomienda uso de baterías de litio ya que mejoraría la estabilidad del sistema de manera integral.

## **1.6 Organización de la tesis**

La organización de la presente tesis se distribuyó abordando, en primera instancia, la introducción a los convertidores de potencia bidireccionales, centrándose en el convertidor de doble puente activo fijando los alcances y limitaciones del proyecto y los objetivos a realizar.

En la Sección 2 se encuentra el marco teórico y estado del arte de los convertidores, sistemas fotovoltaicos y a su vez los sistemas de gestión de la energía.

En la Sección 3 y 4 respectivamente se abordan los antecedentes del proyectos y se ilustra la metodología que ha sido utilizada para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

En la Sección 5 se exponen los resultados obtenidos con base a lo establecido y, por último, en la Sección 6 se presentan las conclusiones.

---

## 2 Marco teórico

La energía fotovoltaica es la forma más directa de convertir la radiación solar en electricidad y se basa en el efecto fotovoltaico por medio de arreglos de celdas fotovoltaicas, configuradas en módulos para crear un panel solar completo [21].

Una celda fotovoltaica es la unidad básica de transformación de energía. Las celdas PV se construyen generalmente con silicio, material semiconductor más empleado en el mercado, que hace posible la generación de un flujo eléctrico a partir de la irradiancia incidente sobre él [21].

Por otro lado, una microrred de corriente directa opera de manera autónoma, básicamente es un sistema eléctrico aislado de baja o media tensión. Conformada por fuentes de generación, sistemas de distribución y dispositivos de almacenamiento de energía. Regulada por un sistema jerárquico de control y gestión de energía [21].

Entre los principales beneficios que las microrredes proporcionan al mercado energético se encuentra el aumento de la eficiencia energética, reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, aumento en la penetración de las renovables y reducción del costo energético [22], sin embargo, se tienen desafíos relacionados con el almacenamiento de energía.

En el área de electrónica de potencia específicamente ha dado pie al estudio y desarrollo de dispositivos que permitan un mejor procesamiento de la energía con menos pérdidas, para

esto, se ha planteado la instalación de convertidores de potencia en aplicaciones fotovoltaicas, específicamente, los del tipo C.D.-C.D. involucran diversas topologías, que son seleccionadas con base a su disposición final, evaluando las etapas de control y técnicas de modulación [23].

Los convertidores de primera generación se denominan convertidores clásicos funcionan en un modo de un solo cuadrante y en baja. Históricamente, el desarrollo de los convertidores de primera generación abarca mucho tiempo [23].

Sin importar qué topología se utilice en el diseño, un convertidor consiste principalmente de uno o varios dispositivos de conmutación como lo son los MOSFET y los IGBT, un circuito controlador, un transformador de aislamiento, un rectificador, filtros, impulsor y capacitores de entrada/salida [24].

## **2.1 Energía solar y sistemas fotovoltaicos**

Teniendo al sol como principal fuente de energía de nuestro planeta, que dicha energía se utiliza por la naturaleza en todos sus procesos, es lógico se apliquen soluciones con la colocación de los paneles solares constituidos por celdas fotovoltaicas, para de manera eficiente transformar la radiación solar en energía electricidad [26].

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse de muchas maneras, por ejemplo, en base a la necesidad y ubicación geográfica se pueden dividir en dos grupos, aislados o de interconexión a la red [26].

En ambos casos se basan en la implementación de paneles solares que permiten transformar la energía solar en energía eléctrica esta a su vez es almacenada en un banco de baterías [26].

Se considera a un sistema aislado cuando la transformación y utilización la energía es totalmente autónoma y gracias a su almacenamiento de energía, puedes utilizarla tanto en el

las noches como en días de poca irradiancia, la aplicación de este tipo de sistemas de energía se la realiza en las zonas marginadas donde el abastecimiento de energía es de difícil [25] [26].

Los sistemas interconectados a la red eléctrica se pueden considerar más viables económicamente, ya que al no contar con un banco de almacenamiento puede descartarse ese gasto en el sistema, para la implementación de este tipo de sistema se necesita por lo general realizar un acuerdo con una determinada compañía de electricidad local, para que se lleve a cabo la regulación e interconexión, regida por un medidor bidireccional que cuantifica la energía entregada y hace un balance respecto a la demandada [25] [26].

En la Figura 1 podemos observar la configuración típica de un sistema fotovoltaico de tipo aislado.

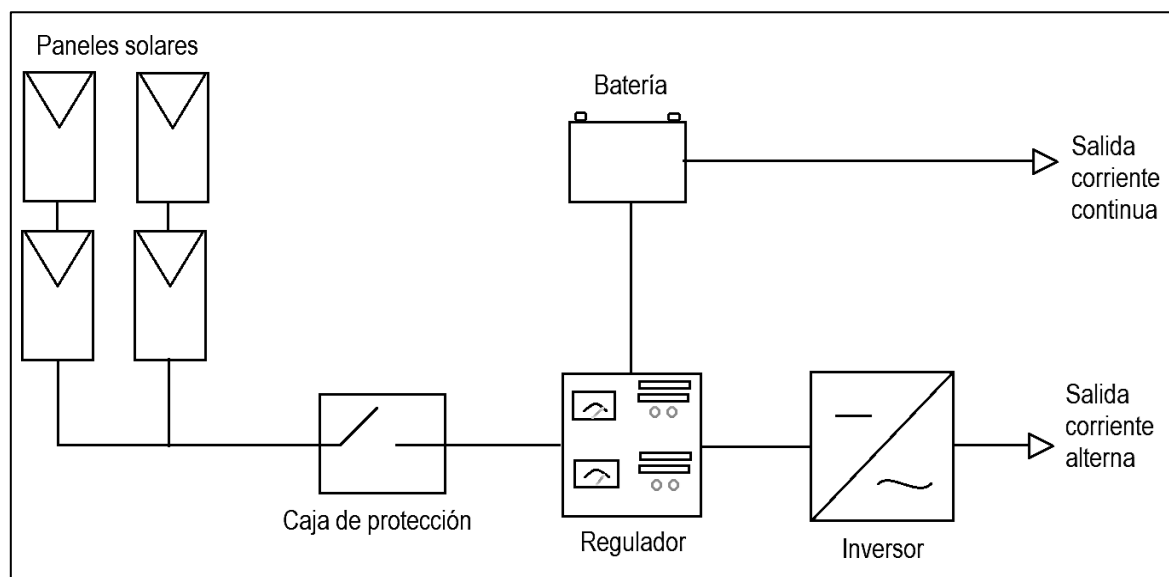


Figura 1 Sistema de energía fotovoltaica aislada

En la Figura 2 se puede encontrar un diagrama convencional de los elementos que componen un sistema interconectado a la red.

En el cual se puede apreciar el sistema bidireccional, normalmente constituido por un inversor/rectificador.

En este tipo de sistemas se suelen agregar elementos de energías renovables, pero esto conlleva a agregar un convertidor de C.D.-C.D. que a su vez requiere un controlador de voltaje.

Adicionalmente, un convertidor bidireccional es necesario para controlar el flujo de potencia cuando se agregan sistemas de almacenamiento de energía.

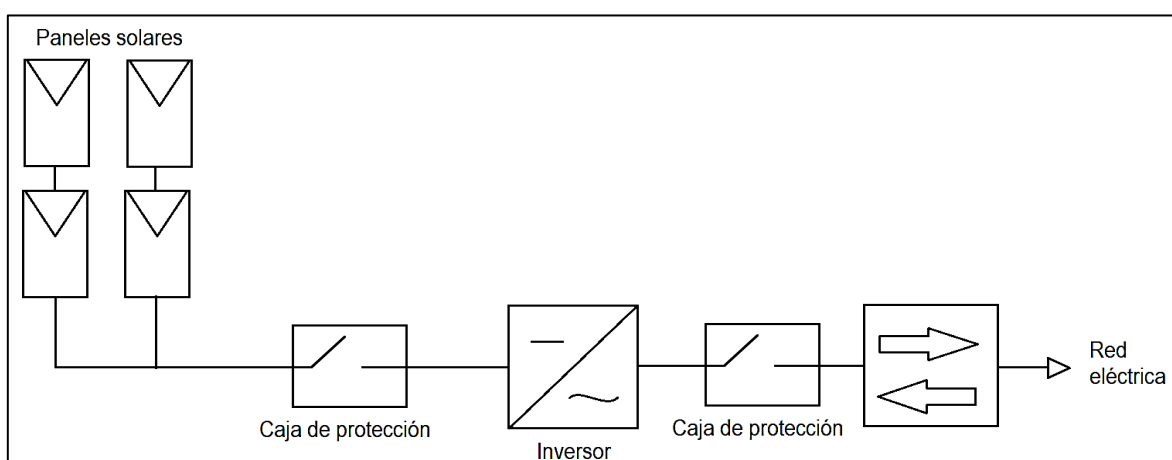


Figura 2 Sistema aislado de energía fotovoltaica interconectada a la red

## 2.2 Microrredes aisladas con fuentes fotovoltaicas

Las microrredes de C.D. han tomado gran relevancia en los últimos años como una alternativa que permite mejorar la eficiencia del sistema eléctrico. Particularmente, las microrredes de C.D. pueden incrementar el nivel de penetración de las fuentes de energía renovable debido a que la mayoría de ellas, generan energía eléctrica en la forma de C.D. [27].

Entre las soluciones probables para mitigar pérdidas y brindar robustez a las instalaciones fotovoltaicas consiste en la implementación de un arreglo de baterías con la capacidad de gestionar la energía en situaciones de irradiación deficiente, por ejemplo, en días nublados o condiciones de sombreado parcial e incluso en niveles nulos como durante la noche[27].

Operando básicamente en dos modos que se pueden definir de la siguiente manera: Durante el día la energía producida por los paneles alimentaría la carga y el excedente se canalizaría al sistema de almacenamiento de baterías, dando lugar a la etapa de carga y el segundo modo se da durante la noche o en momentos de nula o poca irradiancia, en los que el sistema no puede suministrar la demanda y la batería debe actuar como fuente de energía, presentándose la descarga del sistema de almacenamiento [28].

### **2.3 Convertidores de potencia**

La electrónica de potencia se puede definir como la rama de la electrónica encargada del estudio de dispositivos de estado sólido y sistemas para el control y conversión de la energía eléctrica [23].

Debido a los avances tecnológicos en los dispositivos semiconductores y a la tecnología de los microprocesadores, esta rama ha evolucionado a un campo interdisciplinario que combina electrónica, teoría de control y circuitos digitales para el control y conversión de energía eléctrica [29].

Para el control de la potencia eléctrica o del acondicionamiento de la misma, es necesario poder convertirla de una forma a otra. Esta acción se logra gracias a los convertidores de potencia, un convertidor es un módulo básico (bloque componente) de los sistemas de electrónica de potencia. El convertidor usa dispositivos de semiconductores de potencia controlados por señales electrónicas (circuitos integrados) y quizás elementos de almacenamiento de energía, como inductores y capacitores [30].

## 2.4 Convertidor de doble puente activo

El DAB, por sus siglas en inglés, o convertidor de doble puente activo en su topología básica, está constituido por un transformador de alta frecuencia [30], dos puentes completos formados por 8 semiconductores, un inductor y capacitores de acoplamiento, como se puede observar en la Figura 3.

Gracias a la simetría de su topología, es capaz de controlar un flujo en ambas direcciones, ya que emplear configuraciones idénticas en los puentes conectados a cada lado del transformador.

El control de potencia sustancialmente permanece igual, existe un ángulo de fase relativo entre ambas señales cuadradas que define la proporción y sentido del flujo de energía en cada instante de tiempo. El inductor del transformador en este momento juega un papel primordial debido a que es el encargado de la transmisión de potencia.

Es importante destacar que la potencia fluye desde las ondas cuadradas adelantadas a las retrasadas, esto es, si la potencia necesita fluir de un nivel bajo de tensión (bus de la batería) a otro de tensión mayor (el bus CD), la onda cuadrada obtenida en el lado de baja tensión deberá estar adelantada con respecto al lado de alta del puente [31].

El convertidor doble puente activo es en esencia es un convertidor de corriente directa a corriente directa que utiliza dos circuitos de puente completo para transferir energía mediante acoplamiento magnético [14], con grandes beneficios como su alta densidad de potencia y eficiencia, aislamiento galvánico y capacidades de conmutación suave [14].

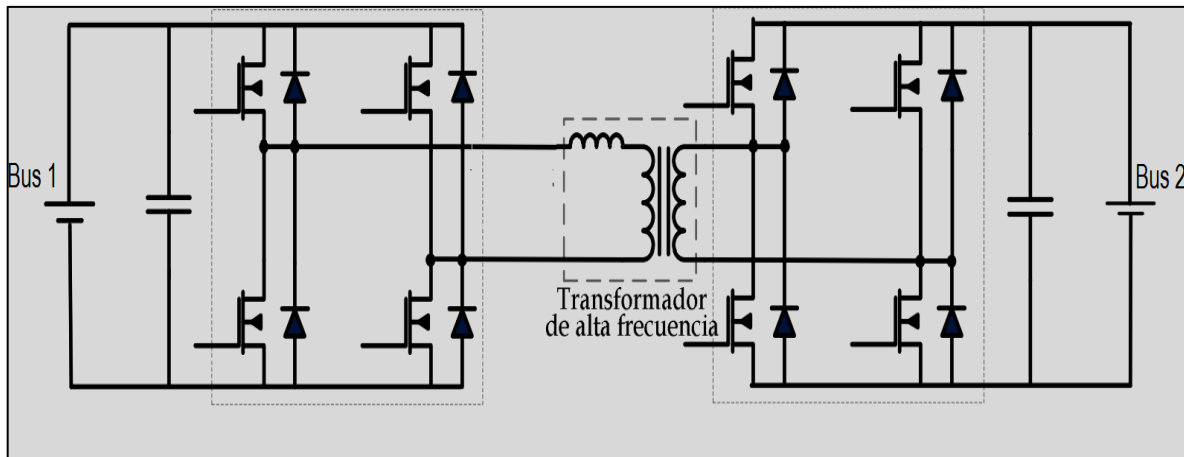


Figura 3 Topología básica del convertidor de doble puente activo.

## 2.5 Control del convertidor DAB DC-DC.

Si se necesita regular el voltaje de salida de un convertidor de potencia y las perturbaciones en la fuente y la carga requieren ser compensadas, lo que se necesita es un control en lazo cerrado [32].

Este concepto utiliza la inexactitud entre la salida real de voltaje y la interferencia para eliminar el error o minimizarlo, existe un método de control convencional para convertidores de potencia, primeramente se desarrolla un modelo de una señal pequeña alrededor del punto de operación en estado estable, después se necesita encontrar donde toma lugar la función de transferencia entre el control y la salida en el convertidor, a continuación se especifica la ganancia esperada del lazo dependiendo en las especificaciones del diseño y finalmente la función de transferencia del convertidor es diseñada para que coincida con la ganancia deseada del lazo [33].

El control más utilizado en los convertidores de potencia es el método de integral proporcional (PI), cuando una señal DC es la referencia la cual requiere un error de estado estacionario cero. Para los convertidores de potencia el compensador principal es otra de las variables de control de potencia el cual incrementa en un margen de la fase la ganancia del

lazo. La única desventaja del control PI y el compensador es el hecho de que solo alcanzan una ganancia infinita en DC, esto es lo que hace difícil alcanzar el error de estado estacionario cero cuando las perturbaciones o las referencias son señales AC de baja frecuencia [33].

Los tipos de control mencionados anteriormente fueron diseñados principalmente para un punto de operación, el margen de ganancia y el amplio margen de fase son esenciales para asegurar la estabilidad en la respuesta dinámica cuando hay una derivación en algún punto de operación [33].

De igual manera no existe una garantía del desempeño dinámico cuando existe una amplia derivación en el punto de operación causada por alguna perturbación, uno de los métodos para la mejora de esto puede ser la programación de un control para la ganancia en el lazo [34], los métodos mencionados son utilizados para seleccionar un colección de controles para varios puntos de operación un control de supervisión mejora el desempeño a lo largo de un amplio rango de operación, mediante la conmutación entre los parámetros dependiendo de la información proveniente de la realimentación [34].

El control adaptivo es una alternativa más amplia en la programación de control de la ganancia, los parámetros de control son ajustables dinámicamente por un controlador adaptivo. El ajuste en parámetros en línea permite un mejor desempeño en la programación de control de la ganancia comparado al ajuste fuera de línea [34].

El control adaptivo este mejor situado para sistemas con una estructura conocida mientras que los parámetros en el sistema son desconocidos o varían, por ejemplo, la carga resistiva es un parámetro desconocido y una mejor regulación del voltaje de salida se obtiene con la ayuda de un controlador PI adaptivo. Esto también ha sido utilizado en rectificadores activos, sistemas de potencia de celdas de combustible e inversores [34].

Existen muchos otros métodos no lineales, aparte de los métodos de control basados en modelos lineales de una señal pequeña, para el uso de modelos de señales más grandes para el modelado de controladores [35].

Uno de estos métodos es el control back-stepping basado en Lyapunov [35] , esta es una función de energía definida positiva que es definida en las bases de un convertidor de señal más grande que la del modelo promedio.

El diseño del control se consigue en el caso de que la entrada del control haga la derivada con respecto al tiempo la negativa de la función Lyapunov [36].

La lógica difusa es un ejemplo del paradigma de la inteligencia computacional que es aplicada a los convertidores de potencia. Esta facilita la implementación y su resistencia a las perturbaciones, ha sido útil en los inversores solares interconectados a la red eléctrica y en la gestión adaptiva de la energía eléctrica en los vehículos [32].

La probabilidad de la inestabilidad del voltaje existe cuando los convertidores están conectados, hay una impedancia negativa cuando la carga del convertidor es estrechamente regulada con un rápido control en lazo, esta impedancia negativa hace difícil construir un punto de operación estable, algunas investigaciones apuntan que la desestabilización provocada por la impedancia negativa puede ser contrarrestada mediante la adición de amortiguadores activos, suposiciones más simples con controladores PI son mejor implementadas en los modelos de convertidores más modernos [32].

## **2.6 Modelo ideal del convertidor DAB DC-DC**

Como se observa en la Figura 4 los dos puentes H en el convertidor DAB están compuestos de dispositivos de compuerta de conmutación controlada, ambos puentes activos producen voltajes de onda cuadrada, VHF1 y VHF2 en las terminales del enlace de alta frecuencia.

El voltaje VHF1 es generado por la entrada del puente H y aparece entre los nodos A y B tiene una amplitud igual a la del voltaje del bus de entrada entonces  $VHF1 = VDC1$ . El voltaje VHF2 es generado por la salida del puente y aparece entre los nodos P y Q, este voltaje tiene la misma amplitud que el voltaje de salida del puente entonces  $VHF2 = VDC2$  [37].

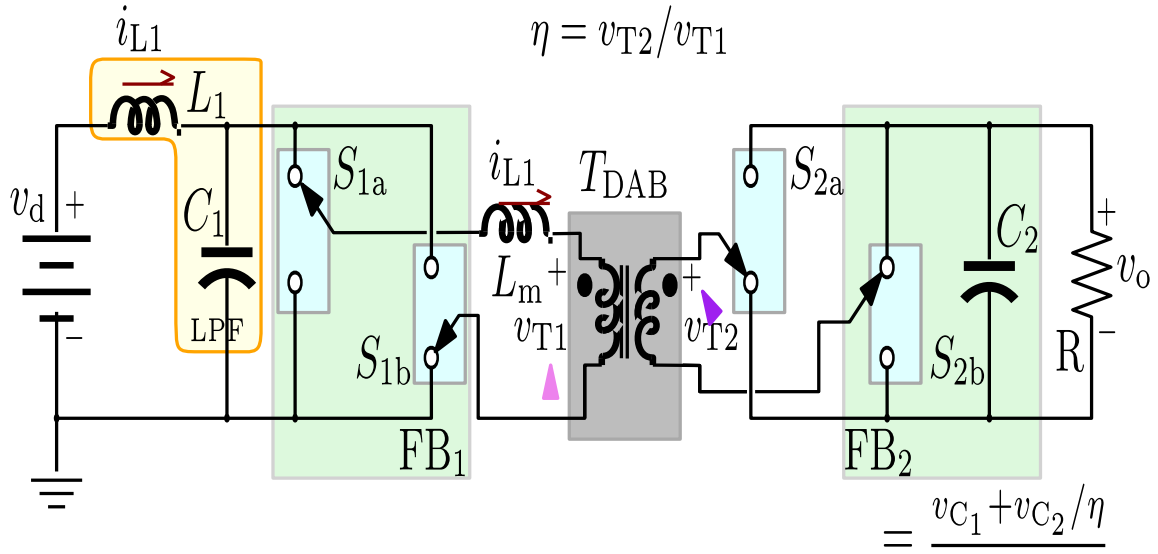


Figura 4 Esquema del modelo convertidor bidireccional DAB

Generalmente para simplificar el análisis se asume que la duración de la transición resonante es menor que el periodo de las ondas cuadradas, dejando que se reemplacen los voltajes provenientes de la entrada y la salida de los circuitos del puente completo por fuentes de voltaje ideales [38] [39].

En el caso ideal, se asume una inductancia de magnetización infinita en el transformador y las resistencias de los devanados en el transformador igual a cero  $R_{tr1} = R_{tr2} = 0 \Omega$ , y se asumen cero pérdidas en el núcleo  $R_M = \infty$ , el transformador de enlace en alta frecuencia puede ser representado como una serie de inductancias  $L$  referido a cualquiera de los dos lados del transformador [38] [39].

Usando el modelo de circuito equivalente acorde a la Figura 4 y refiriendo el modelo del transformador a la parte primaria el valor de la inductancia equivalente  $L$  es [38] [39]:

$$L = L_{tr1} + \left(\frac{n^1}{n^2}\right)^2 * L_{tr2}$$

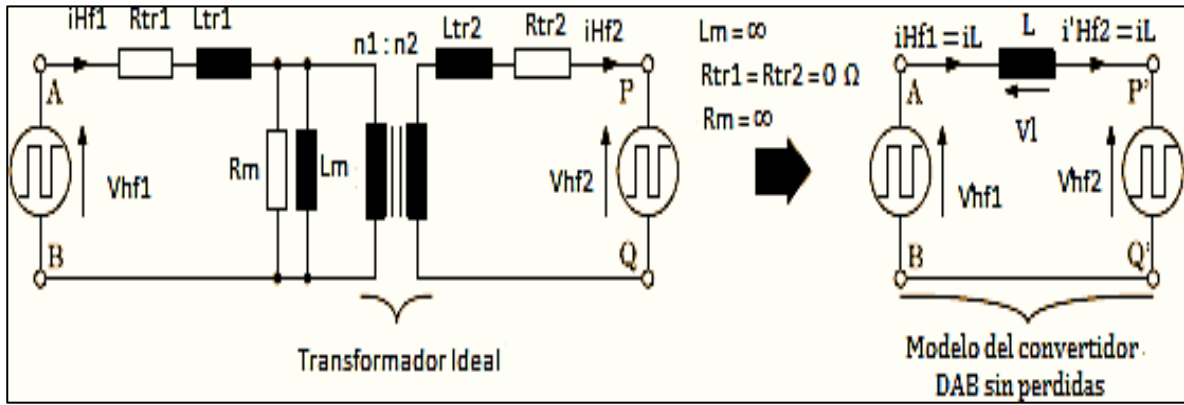


Figura 5 Derivación del convertidor DAB sin perdidas con respecto a modulación por cambio de fase.

En donde Ltr1 y Ltr2 son correspondientes a los lados primario y secundario de las fugas de inductancia del transformador, a pesar de su forma simple, despreciando todas las pérdidas y elementos parasitos como las capacitancias de acoplamiento del transformador y asumiendo transiciones de conmutación instantáneas [33], el convertidor DAB puede ser representado por dos fuentes voltajes ideales VHF1 y VHF2 interconectados por una serie de inductancias equivalentes L, donde VHF2 es el lado secundario de la terminal de voltaje enlace CA referido al lado primario del transformador, entonces VHF2 se obtiene mediante la siguiente ecuación [33]:

$$v_{HF2(t)} = \frac{n^1}{n^2} \cdot v_{HF_2(t)}$$

El modelo ideal y sin perdidas resultante es mostrado en la figura 5, el cual muestra dos ejemplos de los voltajes VHF1 y V'HF2 los cuales son aplicados a L.

Voltajes en la terminal del transformador enlace ac referidas al lado primario y corrientes del inductor para la modulación de cambio de fase [33]..

(a) modo 1+ flujo de potencia positiva  $\phi \geq 0$ ,

(b) modo 1- flujo de potencia negativa  $\phi \leq 0$ .

## 2.7 Modulación por cambio de fase

La técnica de modulación más utilizada en los convertidores DAB es la modulación por cambio de fase, esta ópera al convertidor con una frecuencia de conmutación constante  $f_s$  y ciclos de trabajo máximos para los dispositivos de conmutación del convertidor de 0.5 ( $r_1 = r_2 = \pi \text{ rad}$  figura 6), la potencia transferida y la dirección del flujo de corriente son solamente controlados por el cambio de fase  $\phi$ . Como resultado el voltaje  $v_{HF1}(t)$  varía entre los dos niveles de voltaje  $v_{HF1} = (V_{dc1}) - v_{HF1} = (-V_{dc1})$  en los cuales en un periodo de conmutación  $T_s$  son aplicados durante un medio periodo ininterrumpido  $T_s/2$ , cuando se definen los estados de las etapas de entrada del puente como [33], como se aprecia en la Figura 6.

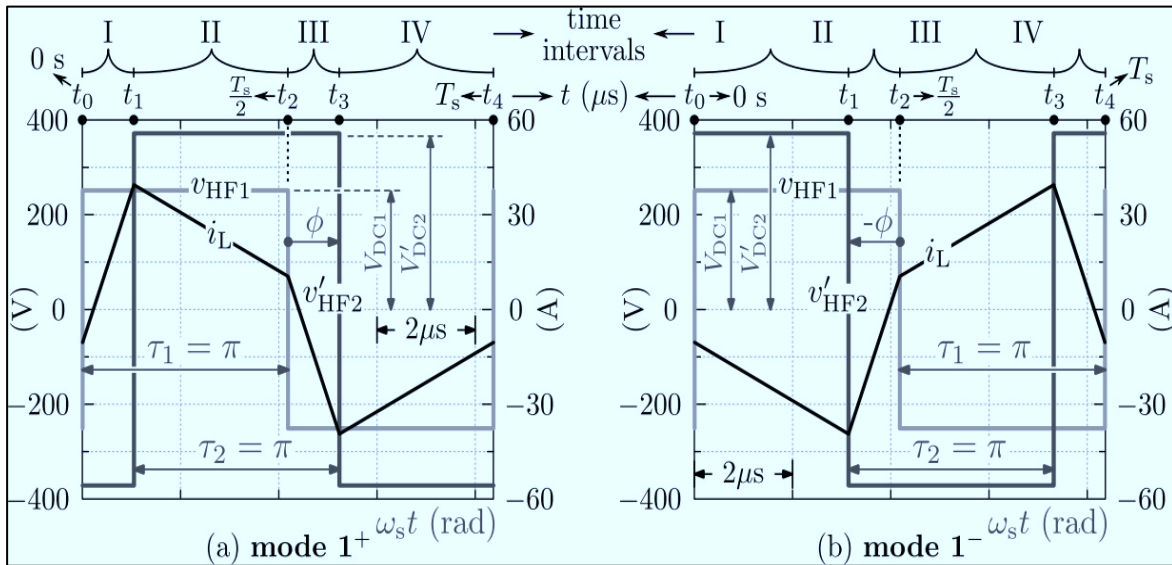


Figura 6 Voltajes en la terminal del transformador.

Nótese que cuando un interruptor  $S_{xx}$  se encuentra encendido, ya sea su transistor  $T_{xx}$  o su diodo  $D_{xx}$  están conduciendo o se encuentran en estado de conducción y cuando un interruptor  $S_{xx}$  se encuentra apagado ni su transistor ni su diodo se encuentran en estado de conducción por lo tanto se encuentran en un estado de bloqueo [33].

De forma similar, el voltaje VHF2(t) varía entre dos niveles de voltaje:

$\hat{v}_{HF2} (= V_{dc2})$  y  $-\hat{v}_{HF2} (= -V_{dc2})$  en un periodo  $T_s$  donde:

$$\begin{aligned} V_{HF2}(t) = & +V_{DC2} \text{ para } st_{leg21} = 1, st_{leg22} = 0 \\ & -V_{DC2} \text{ para } st_{leg21} = 0, st_{leg22} = 1 \end{aligned}$$

Con estados de las etapas de entrada del puente definidos como:

$$\begin{aligned} st_{leg21} = & \{1 : S_{21} \text{ on}, S_{22} \text{ off} \\ & \{0 : S_{21} \text{ off}, S_{22} \text{ on} \end{aligned} \quad \begin{aligned} st_{leg23} = & \{1 : S_{23} \text{ on}, S_{24} \text{ off} \\ & \{0 : S_{23} \text{ off}, S_{24} \text{ on} \end{aligned}$$

Por consecuencia los patrones de voltaje resultantes de dos niveles en un ciclo de trabajo del 50%  $V_{HF1}(t)$ ,  $V_{HF2}(t)$ ,  $V'_{HF2}(t)$  están determinados por:

$$V_{HF1}(t) = v_{DC1} * (st_{leg11} - st_{leg12})$$

$$V_{HF2}(t) = v_{DC2} * (st_{leg21} - st_{leg22})$$

$$v_{HF2}(t) = \frac{n^1}{n^2} \cdot v_{HF2}(t)$$

La señal aplicada al ángulo del cambio de fase determina las secuencias en tiempo de los picos y caídas de  $V_{HF1}(t)$  y  $V'_{HF2}(t)$  además de eso determina el modo de conmutación del convertidor DAB [33].

Los ejemplos corresponden con los dos modos posibles de conmutación con PSM, siendo un modo para el flujo de potencia positivo y un modo para el flujo de potencia negativo las condiciones de frontera para los modos son [33]:

- *modo 1<sup>+</sup> (flujo de potencia positivo, dir = 1):  $0 \leq \phi \leq \pi$*
- *modo 1<sup>-</sup> (flujo de potencia negativo, dir = -1):  $-\pi \leq \phi \leq 0$*

En donde la dirección de los flujos de potencia definidos como:

$$dir = \begin{cases} 1 & \text{si } p > 0 : \text{lado prim} \rightarrow \text{lado sec (flujo de potencia positivo)} \\ -1 & \text{si } p < 0 : \text{lado sec} \rightarrow \text{lado prim (flujo de potencia negativo)} \end{cases}$$

| t     | $t_i$ para el modo1+              | $t_i$ para el modo 1-             |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $t_0$ | 0                                 | 0                                 |
| $t_1$ | $\frac{\theta}{W_s}$              | $\frac{\pi + \theta}{W_s}$        |
| $t_2$ | $\frac{\pi}{W_s} = \frac{T_s}{2}$ | $\frac{\pi}{W_s} = \frac{T_s}{2}$ |
| $t_3$ | $t_1 + \frac{T_s}{2}$             | $t_1 + \frac{T_s}{2}$             |
| $t_4$ | $t_2 + \frac{T_s}{2} = T_s$       | $t_1 + \frac{T_s}{2} = T_s$       |

Instantes de conmutación de **t0** a **t4** para los modos **1+** y **1-** escogiendo el pico de voltaje de

**V<sub>HF1</sub>(t)** con un tiempo de referencia de **t0** (=0s)

## 2.8 Sistema de almacenamiento de energía de baterías

La bidireccionalidad de flujo de energía es posible gracias a las baterías ya que pueden actuar como fuente y carga según la configuración, por ello los dispositivos de almacenamiento de energía implementados deben ser de alta eficiencia con rangos de carga y descarga que cumplan los criterios para su implementación en sistemas fotovoltaicos [28].

Las baterías utilizadas en microrredes son las llamadas secundarias que permiten recargarse a partir de energía eléctrica revirtiendo el proceso electroquímico [28].

El principio de funcionamiento de una batería es la reacción electroquímica entre dos electrodos separados por un electrolito, las reacciones químicas en los componentes producen una corriente de iones en el electrolito que a su vez producen una corriente eléctrica en los electrodos [28].

Para seleccionar la batería correcta es necesario conocer rangos de voltaje, corriente, potencia y la relación de consumo de energía en W/h que manejará el arreglo, para tener un control del sistema y minimizar inconvenientes, entre los problemas más comunes para utilizar bancos de respaldo de energía, figuran la temperatura de las baterías, el ciclo de vida útil, rangos de operación e incluso el tipo de configuración en el que serán conectadas, el sobrecalentamiento de las celdas de las baterías, por ejemplo, propicia que se liberen gases que conforman el electrolito reduciendo su vida útil [6].

Existen diversos estilos de modelos de simulación que sirven para determinar aspectos importantes en una batería. En [40] lo definen en los siguientes grupos:

Empíricos: En este grupo se representan con una ecuación matemática dependiente del estado de carga de la batería y de la corriente, también entran modelos electroquímicos, pero con una consideración más simplificada [40].

Esto, para que las características no lineales de la batería que son de vital importancia, puedan ser representadas. Computacionalmente se considera eficiente, pero tiene una capacidad limitada para describir el voltaje terminal de la batería [40].

Circuito Equivalente: Estos modelos son de mayor utilidad al momento de comprender las características eléctricas de la batería, sin embargo, la ubicación de las características es un proceso de mayor complejidad [40].

Estos modelos consisten básicamente en una fuente de voltaje asociada con el estado de carga, una resistencia interna y elementos RC, con lo cual basta para replicar y describir la conexión eléctrica entre las entradas y el voltaje de salida entre los terminales [40].

Electro-químicos: Este tipo de grupos contiene patrones que están constituidos con el fin de explicar las reacciones particulares interna de una batería. Estos modelos se relacionan directamente con una serie de leyes físicas como la primera ley de Faraday, ley de Ohm, ley de difusión de Fick, y la ecuación de Butler-Volmer [40].

Este modelo requiere de más tiempo de análisis, que es compensado con la ventaja de ser más preciso y completo. Estos modelos son representados con ecuaciones diferenciales parciales que son reducidas a expresiones de ecuaciones diferenciales ordinarias que posteriormente pueden ser discretizadas implementando métodos numéricos [40].

Basados en datos: En este rubro entran modelos desarrollados a partir de técnicas de aprendizaje y datos de medición histórica de las baterías. Esto permite establecer la relación entre las variables de la batería sin mayor conocimiento previo[40].

Representa una muy buena aproximación del modelo electro-químico, pero presenta un largo proceso de recolección de datos [40].

## 2.9 Seguimiento del Punto de máxima potencia MPPT

El punto de máxima potencia es un único punto de operación bajo el cual la fuente PV entrega la máxima energía a la carga. Este punto cambia constantemente debido a las condiciones de radiación solar y temperatura [41].

Por esta razón, la conexión directa de la fuente PV a una carga resistiva resulta ineficiente, ya que la intersección entre las características de la resistencia y la curva I-V de la fuente PV no ocurre siempre en el MPP, y la carga recibe una potencia menor a la máxima del generador [41].

El funcionamiento óptimo de un sistema fotovoltaico es importante debido a la baja eficiencia de los paneles solares. La característica de salida de un sistema fotovoltaico no es lineal y varía con la temperatura ambiente y los niveles de radiación solar [42].

Generalmente las estrategias de control de MPPT dependen de los parámetros característicos de los paneles fotovoltaicos en tiempo real, algunos como el control de la variación del ciclo de trabajo y la implementación de una tabla de consulta [42]. Las técnicas del seguimiento del punto de máxima potencia se pueden dividir por lo habitual en cuatro tipos [43]:

Algoritmo de perturbación y observación o P&O, como su nombre lo dice se basa en hacer perturbaciones en puntos de operación fotovoltaica de un panel PV para obligar el sentido de seguimiento hacia un punto de máxima potencia y después observar la reacción del seguimiento [43].

Algoritmo de escalada de colina, en este, se produce directamente una alteración en el ciclo de trabajo de un convertidor estático de potencia CD-CD [43]. Algoritmo de conductancia incremental a diferencia del P&O se detiene cuando llega al punto óptimo, se realiza comprobando periódicamente la pendiente de la curva fotovoltaica de un panel PV. Si la pendiente tiende a un valor pequeño establecido o es igual a cero, la perturbación se detiene y el panel fotovoltaico se ve forzado a funcionar en este punto de operación [44].

Algoritmo de tensión constante, este se basa en establecer y mantener la relación entre el voltaje fotovoltaico a máxima potencia ( $V_{mp}$  por sus siglas en inglés) y el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$  por sus siglas en inglés) como un valor constante [45], en este procedimiento se desprecian los cambios en la variación de irradiancia.

## 2.10 Convertidor CD-CD en sistemas fotovoltaicos

Para garantizar que la fuente PV trabaje siempre en el MPP (Punto máximo de potencia por sus siglas en inglés) se conecta la carga a través de un convertidor corriente directa-corriente directa (CD-CD) tal como se muestra en la figura 5. En un convertidor CD-CD la relación de tensión entre la entrada y la salida se controla a partir de un modulador de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), que depende del ciclo de trabajo ( $D$ ) [41].

Los convertidores estáticos de potencia se ubican entre la fuente de energía eléctrica y la carga, intentando obtener el mayor aprovechamiento posible de la fuente de energía. Los convertidores actúan normalmente modificando las características de la energía eléctrica, variando su forma de presentación [46].

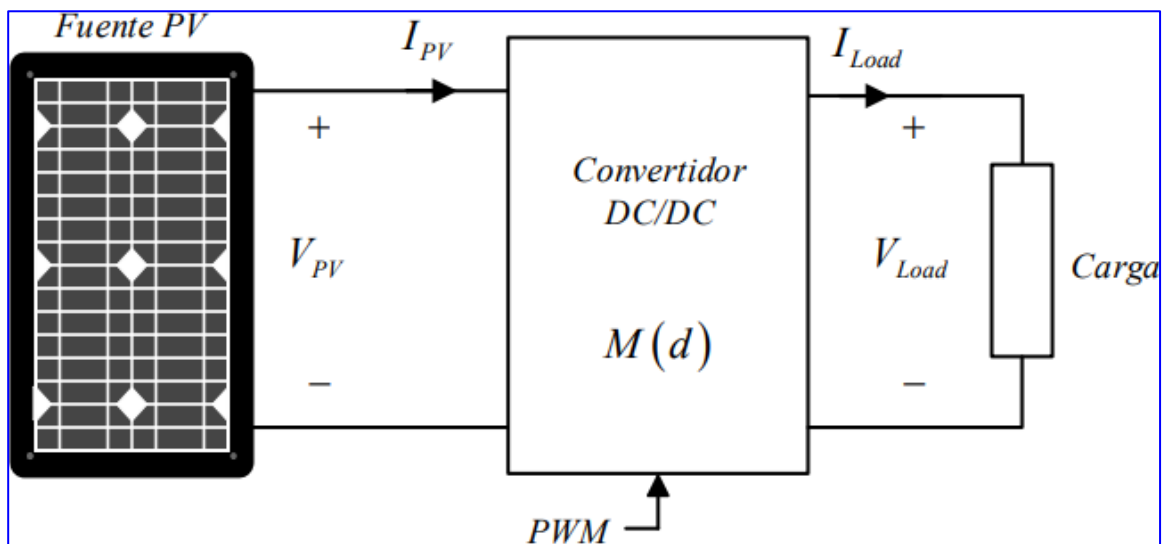


Figura 7 Fuente PV conectada a una carga a través de un convertidor de potencia.

## 2.11 Configuraciones fotovoltaicas

Existen configuraciones de conexión en los paneles pv que permiten mejorar los parámetros de corriente, voltaje y potencia, los más conocidos son serie, paralelo y mixto[21].

La conexión en serie permite disponer de un voltaje mayor ya que los voltajes individuales se adicionan, este método se suele utilizar para paneles solares de gran tamaño/potencia, generalmente están dispuestos en series de 2 o 3 paneles porque tienen que ir conectados a un regulador de tipo MPPT[21].

La conexión en paralelo por el contrario de la conexión en serie permite aumentar la corriente, adicionando el amperaje de cada panel mejorando con esto la potencia, sin embargo, el voltaje permanece siendo el mismo[21].

Al implementar solo la configuración en serie o en paralelo, no es posible aumentar el rango de voltaje y corriente simultáneamente, por ello en este proyecto se usará una conexión mixta, es decir una combinación serie-paralelo para mejorar los rangos en general del sistema, voltaje, corriente y potencia, obteniendo además ventajas de menor costo y pérdidas eléctricas junto con la confiabilidad de la configuración [21]

---

## 3 Antecedentes

En la literatura se encuentran aportaciones recientes consideradas para este trabajo que se desglosaran en 3 frentes a revisar, el primero atacando los estudios más actuales de convertidores bidireccionales, siguiendo con análisis y estudios significativos en el ámbito de sistemas de almacenamiento de energía y por último, pero no menos importante algunos de los algoritmos implementados para el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT por sus siglas en inglés) [15].

Uno de los principales requerimientos para los sistemas de conversión a bordo de los vehículos es que puedan manejar la mayor potencia posible para un espacio y peso reducidos, para así no perjudicar demasiado la densidad energética y de potencia de la solución[15].

Muchos convertidores han sido propuestos como una alternativa para administrar flujo bidireccional de potencia en aplicaciones CD-CD. Un convertidor CD-CD bidireccional basado en buck-boost es presentado en [9], este convertidor de potencia muestra una eficiencia de 97,6 % y 97,48 % para modos de operación boost y buck respectivamente a una frecuencia de conmutación de 30 kHz [15].

En [10], un convertidor bidireccional boost dual es presentado. Este convertidor muestra una eficiencia del 97 % en ambos modos de operación (boost y buck) a una frecuencia de conmutación de 30 kHz. Un convertidor CD-CD bidireccional full-bridge es presentado en [11].

Este convertidor de potencia tiene una eficiencia de 96,8 % y opera a una frecuencia de conmutación de 10,5 kHz. Diversos estudios se han realizado para evaluar el grado de factibilidad para reducir la utilización de transmisión de energía de la red de distribución usando sistemas fotovoltaicos con el dimensionamiento adecuado y el impacto que se obtendría al utilizar un sistema de almacenamiento de energía de baterías. En un estudio reciente [12], Koskela y colaboradores llevaron a cabo un análisis demostrativo equiparando las ventajas de la generación de energía eléctrica mediante energía solar fotovoltaica dentro de una zona residencial en Finlandia [12].

En sus resultados obtuvieron que la capacidad instalada del sistema fotovoltaico podría aumentar su eficiencia mediante el uso de almacenamiento de energía eléctrica con baterías de iones de litio y una cuantificación y distribución adecuada de la electricidad [12].

Además, es posible que cuando se tienen en cuenta todos los incentivos, el almacenamiento de energía eléctrica en combinación con la generación de energía fotovoltaica sería más rentable que la generación de energía fotovoltaica sola [15].

También en [13] Weidlich y colaborador informaron en su análisis dos modelos de comunidades localizadas en Alemania y Japón.

Sus resultados revelan que, para los sistemas fotovoltaicos de tamaño mediano sin sistemas de almacenamiento de baterías, el decrecimiento de transmisión se puede vislumbrar en el sitio del modelo japonés, pero no en Alemania. Sin embargo, al incluir un almacenamiento de baterías se observó la reducción del suministro eléctrico de la red en ambos lugares [13].

Así mismo, Wang, Z., y Li, H. detallaron en sus resultados [14], el uso de un emulador fotovoltaico con una batería de fosfato de magnesio, hierro y litio como elemento de respaldo de energía implementando un convertidor de doble puente activo intercalado trifásico de tres

puertos para ser utilizado como bus de distribución de corriente directa. Además, demostraron las ventajas del flujo de energía bidireccional para gestionar eficientemente el estado de carga de la batería. Validando con pruebas experimentales y simulación la factibilidad del diseño propuesto [14].

De manera conjunta se revisaron topologías para el control de bancos de baterías con una fuente de energía PV una de las más destacadas durante los últimos años es el convertidor de doble puente activo o DAB.

En [15] Chowdhury, D. y colaboradores investigaron una topología que comprende varias unidades de administración de energía. Estas suministran energía a los sistemas de almacenamiento de baterías para el diseño de microrredes de CD.

Las unidades se modelan como convertidores de puente doble activo y el diseño se prueba para determinar la eficiencia energética del sistema. A partir de simulaciones, se encuentra que la eficiencia es superior al 97% para diferentes irradiaciones solares, lo que valida su confiabilidad [15].

En otros estudios [16], Xing, W. et al propusieron un control de caída adaptativo para baterías de iones de litio. Las simulaciones se realizan en la microrred con convertidores doble puente activo.

Los resultados indican que el método de control de caída adaptable puede asignar energía de acuerdo con las características de energía de las baterías de forma adaptativa en diversas condiciones, sin la intervención del controlador central o el sistema de gestión de energía, y logra el control descentralizado en los sistemas de energía distribuida [16].

Existen un punto específico de potencia máxima en las particularidades de un módulo fotovoltaico para una condición de operación específica. Es deseable que el panel opere lo más cercano a este punto para tener la mayor eficiencia, pero esto no puede ocurrir por sí solo [17]. Ante la necesidad de métodos de control que permitan seguirlo de manera óptima, surgen diversos algoritmos de MPPT, que debemos conocer y revisar para la etapa de control del proyecto.

Por ejemplo, en [18] Tina y colaboradores implementaron un esquema matemático que tomaba en cuenta factores eléctricos y térmicos de un panel solar fotovoltaico con respecto a factores medioambientales como la temperatura, la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y el punto de funcionamiento eléctrico analizando la corrientes y voltaje.

En el trabajo de Káiser y colaboradores. [19] desarrollaron una propuesta de control del seguimiento de punto máximo de potencia implementando redes neuronales artificiales o ANN por sus siglas en inglés, esta operada fuera de línea con un algoritmo entrenado usando retro propagación con impulso de aumento o decremento de gradiente, usado para la generación en línea de un voltaje de referencia.

En este trabajo el algoritmo MPPT ajusta el ciclo de trabajo de un convertidor elevador que se asegura que el voltaje de salida de un panel fotovoltaico siga un voltaje de referencia en cualquier radiación solar y condiciones de carga. Demostrando con resultados experimentales y en simulación que el sistema de control propuesto era altamente eficiente [19].

Por otro lado, [20] Lee et. al. en su trabajo crearon un método de control propuesto similar a la estrategia de escalada de colinas, y al implementar este método, el voltaje sigue un voltaje de referencia variable y la potencia extraída de un panel fotovoltaico, el desarrollo del nuevo algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia fue basado en un controlador de corriente variando la corriente de referencia en cada tiempo de muestreo, su propuesta aumento la potencia extraída alrededor del 9%. Además, las ventajas del método MPPT fueron un diseño de control simple y una alta eficiencia [20].

---

## 4 Metodología

Para la implementación de sistemas de generación a partir de energía fotovoltaica, se debe seguir a grandes rasgos una metodología (Figura 8) basada en analizar la topología existente o según los requerimientos particulares, se puede implementar una nueva topología de convertidor aprovechando las áreas de oportunidad.

La siguiente etapa es el modelado matemático para la obtención de las ecuaciones características del convertidor que permitirán un análisis más detallado.

Después viene la parte de simulación en la que mediante un software se evalúan los datos numéricos del diseño de del sistema antes de llevarlo a la última etapa que es la validación experimental. En esta etapa, se presentan diversos escenarios de operación con el fin de corroborar el buen funcionamiento del convertidor.

Este proyecto fue pensado en un inicio para llevarlo a hasta su etapa experimental, pero debido a factores de tiempo e insumos, se reajusto para culminar con la evaluación y análisis del convertidor mediante simulaciones en Matlab-Simulink.

Esta metodología se describirá más detalladamente a continuación en las siguientes etapas:

- **Enriquecimiento del estado del arte** Como primer paso se realizará una revisión del estado del arte abarcando dos vertientes primordiales: convertidores con flujo de potencia bidireccional y sistemas de almacenamiento de energía de batería, ambas aplicadas a sistemas con fuentes bidireccional.
- En el primer tópico se explorarán las topologías existentes de convertidores bidireccionales, de manera específica la topología del convertidor de doble puente activo identificando las áreas de oportunidad que se puedan mejorar y adoptar las características que mejor se adecuen a nuestro proyecto.
- En el segundo rubro se analizarán las tecnologías y configuraciones existentes en sistemas de almacenamiento de energía, para seleccionar la mejor opción para el dimensionamiento del banco de baterías y con ello el tamaño final de la red.
- **Modelado matemático**

Siguiendo con la planeación una vez identificada la posible topología se continuará con el análisis formal, realizando el modelo matemático del convertidor a fin de obtener un diseño con la calidad deseada de voltaje y corriente extraída de la fuente, que brinde seguridad en el control de carga y descarga del sistema de almacenamiento de banco de baterías.

El análisis será por modelado en espacio de estados, ya que permite visualizar los parámetros que repercuten en los requisitos preestablecidos, lo que permitirá una evaluación más completa con la encontrada en el estado del arte.

- Validación numérica y simulaciones
- De manera complementaria se realizará una evaluación numérica mediante simulaciones en Simulink-Matlab para validar los datos teóricos obtenidos, lo que nos permitirá ver un panorama del comportamiento del sistema en diferentes situaciones de operación.
- Antes de proceder con la fase experimental se evaluará la integración entre los diversos elementos que conforman la microrred aislada y la interacción entre éstos. En esta etapa se verá el diseño del convertidor bidireccional de doble puente activo.
- Recopilación de datos y resultados
- Finalmente, se procederá con la recolección y análisis de los datos obtenidos para formular las conclusiones pertinentes, mismos resultados que serán plasmados en el documento de tesis.

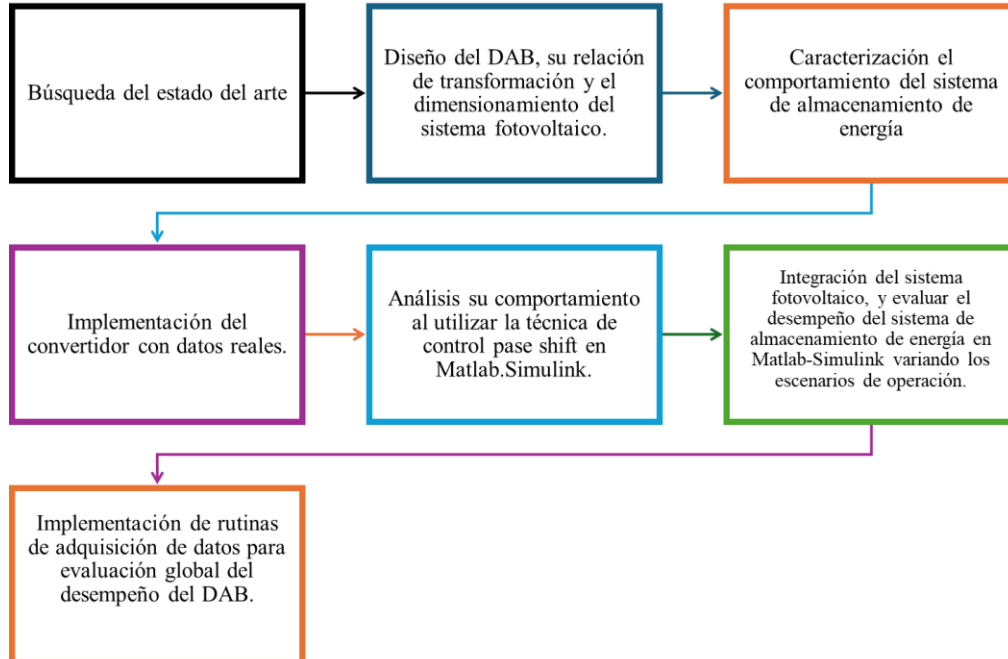


Figura 8 Esquema general de metodología.

## 4.1 Operación del convertidor doble puente activo

Se analizó el estado del arte de los convertidores bidireccionales estudiando su comportamiento, se seleccionó el DAB por su conmutación suave y fácil manejo en su estrategia de control, mediante el software Matlab-Simulink se diseñó una topología con datos arbitrarios para visualizar los tiempos de switcheo y respuesta del mismo.

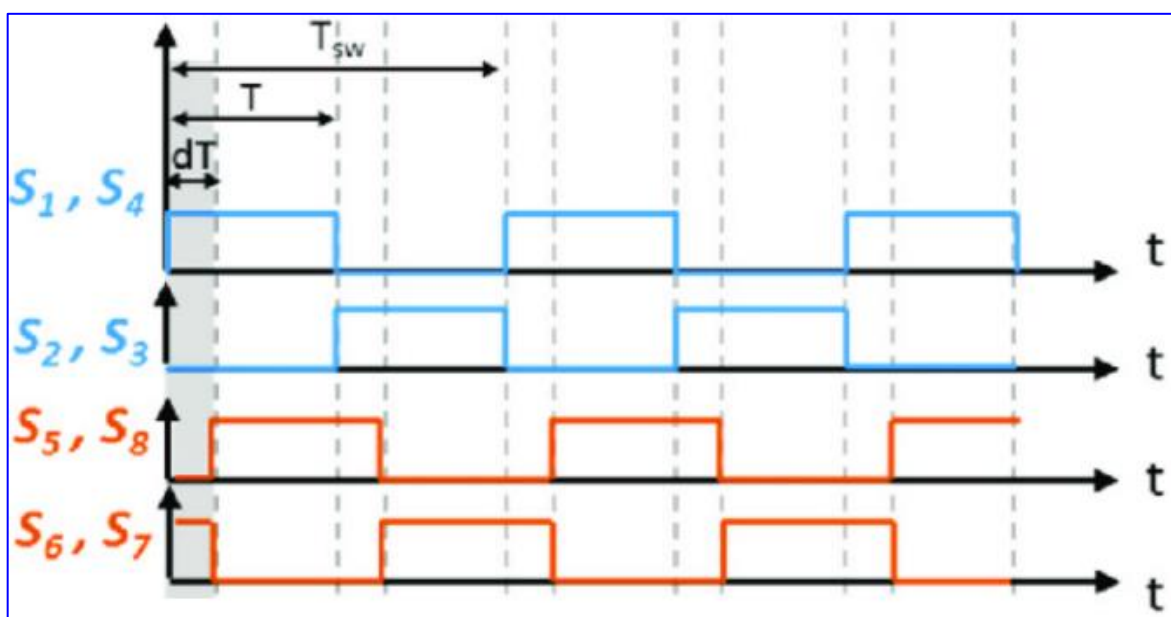


Figura 9 Conmutación del DAB.

En cada conmutación permanecen encendidos un par de mosfets en el primario y secundario respectivamente, alternando entre encendido y apagado (Figura 9).

Esta información resulta fundamental en la operación de un convertidor de doble puente activo, como es la conmutación y periodos de switcheo, gracias es esto, es posible la transferencia de energía de un puente al otro.

## 4.2 Procedimiento de Simulación

Se empleo el software de simulación MATLAB/SIMULINK, para llevar a cabo la simulación detallada de un DAB básico, especialmente diseñado para su integración en sistemas fotovoltaicos.

Para replicar fielmente el comportamiento del panel fotovoltaico, se utilizó la implementación de un bloque de fuente de voltaje de DC para monitorear los tiempos de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento de energía y vislumbrar la autonomía del sistema.

Posteriormente, ya con un panorama más amplio se realizó la simulación mediante un bloque de panel fotovoltaico y se ingresaron los datos de un panel real para aumentar la precisión de su respuesta eléctrica bajo distintas condiciones.

Durante la simulación, se analizaron minuciosamente las señales de control del DAB, así como los voltajes del primario y secundario del convertidor, el voltaje de salida y la corriente del inductor, con el objetivo de realizar un análisis exhaustivo del rendimiento y respuesta del sistema en la conversión de la energía fotovoltaica, la gestión de esta y su respaldo en dispositivos de almacenamiento.

Este enfoque integral proporcionará información detallada sobre el comportamiento del DAB en el contexto específico de los sistemas fotovoltaicos, permitiendo identificar áreas de mejora y optimización para futuras implementaciones.

---

## 5 Resultados

La simulación del DAB básico para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos demuestra su eficacia para gestionar la energía generada por paneles solares.

Los resultados resaltan la importancia del DAB como una opción viable para la conversión eficiente de energía en sistemas fotovoltaicos, lo que contribuye a maximizar la utilización de energía renovable. Además, se destaca la importancia de la técnica de control por cambio de fase, que permite optimizar el rendimiento del DAB y garantizar un funcionamiento estable y eficiente del sistema fotovoltaico.

En este proyecto se estudió el convertidor de doble puente activo, técnicas de control y operación del mismo, además de su interacción con dispositivos de almacenamiento de energía y una fuente fotovoltaica con lo cual logramos ver el sentido del flujo.

Se pudo observar que en el flujo directo el puente asociado a la fuente anticipa en fase al puente asociado a la carga, mientras que en el flujo inverso el puente asociado a la carga está atrasado en fase respecto del puente asociado a la fuente.

En base a los resultados obtenidos en graficas de comportamiento tanto del convertidor en forma aislada, como del sistema de almacenamiento y de la fuente fotovoltaica, se resalta la importancia de implementar técnicas de control adecuadas según requiera de manera específica el sistema diseñado, ya que sin esta etapa no puede existir una gestión de la potencia eficiente ni controlada.

Las gráficas obtenidas en simulaciones iniciales fueron de mucha ayuda ya que, si bien no se obtuvieron resultados tan favorables o de alguna manera tan semejantes a los de la literatura, nos permitieron comprender desde las bases el funcionamiento del convertidor, ya que con la realización de más y más simulaciones, en cada una de ellas se encontró algo nuevo y útil al proyecto, desde las etapas de conmutación de los transistores o la relación de transformación, hasta el control de este.

El uso de un controlador PI que pueda compensar las variaciones de voltaje o un algoritmo de control que pueda decidir en base a los rangos de voltajes y corrientes, se debe entrar la energía desde la batería o desde la Microred o viceversa.

Los resultados obtenidos de la simulación muestran que las señales de control del DAB permiten un control preciso de la transferencia de energía (Figura 9), lo que se refleja en los voltajes del primario y secundario del convertidor (Figura 10).

El voltaje que se obtuvo a la salida se mantiene estable y dentro de los rangos deseados (Figura 11 y 12), esto nos demuestra una eficiente conversión de energía.

Otro indicador de su buen desempeño es la corriente del inductor que se mantiene en niveles adecuados, por tanto, el convertidor de doble puente activo está en estado estable.

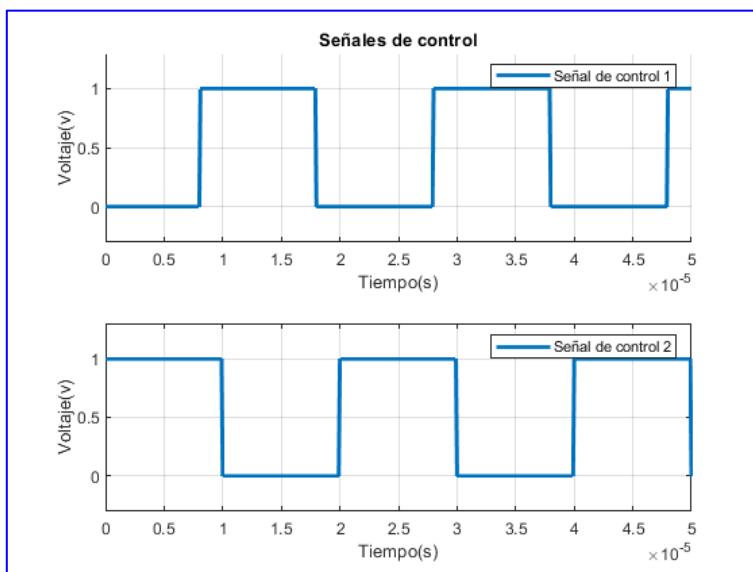


Figura 10 Señales de control del convertidor

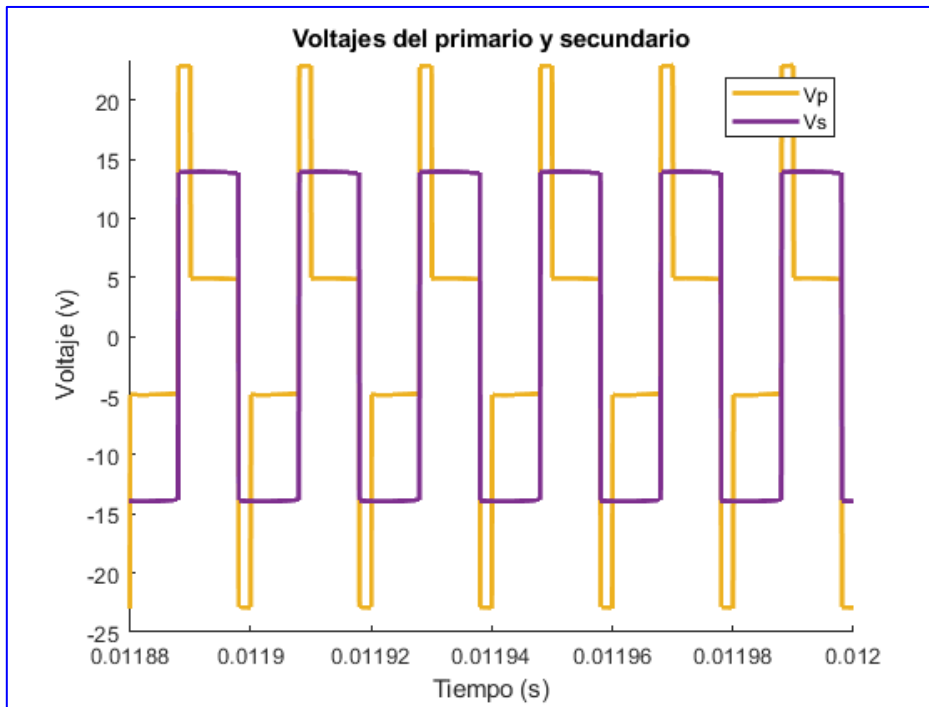


Figura 11 Señales de voltaje del primario ( $V_p$ ) y secundario ( $V_s$ ) del convertidor.

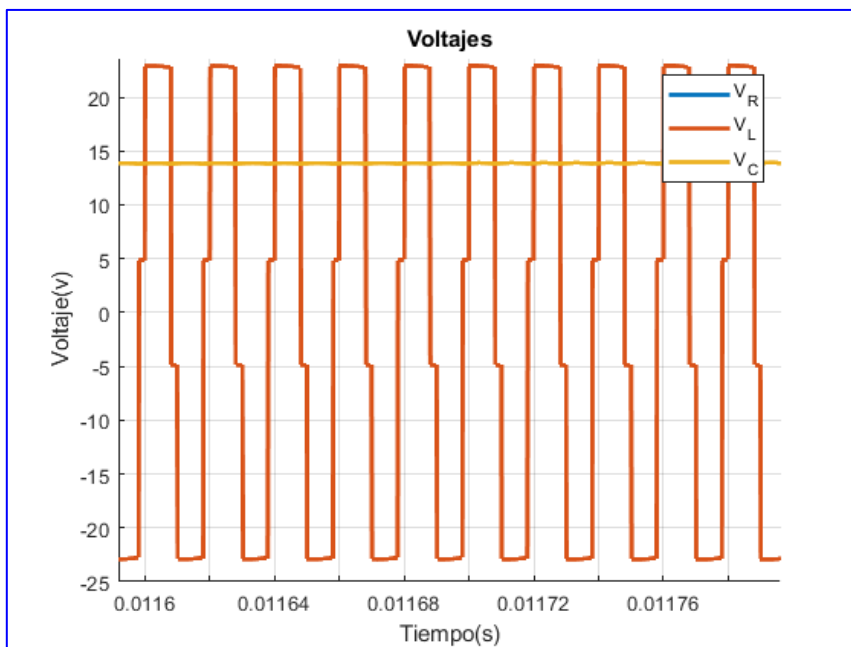


Figura 12 Voltajes de la resistencia , inductor y capacitor del convertidor.

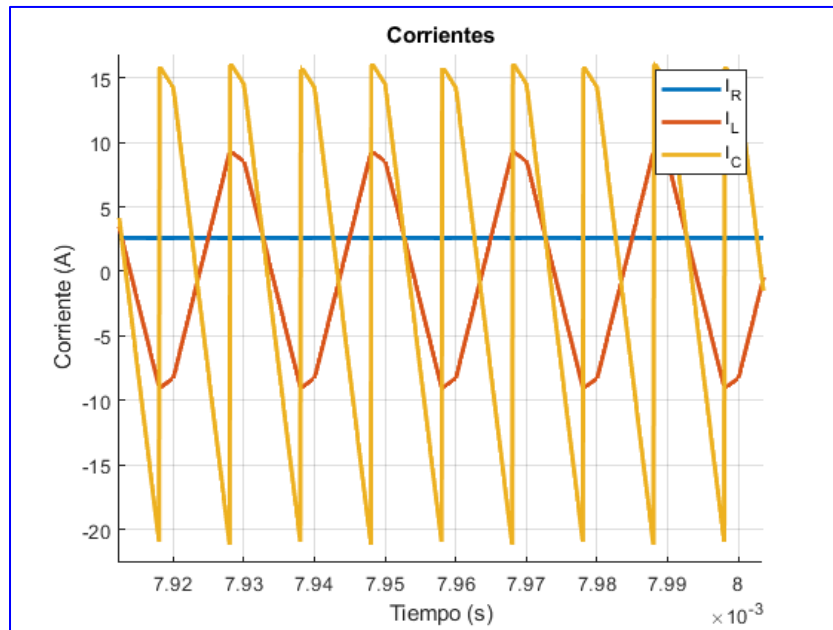


Figura 13 Corrientes de la resistencia , inductor y capacitor del convertidor.

La respuesta obtenida en el convertidor (Figuras 11,12 y 13) tuvo una tendencia idéntica a las gráficas mencionadas en la literatura, con lo cual también podemos corroborar el buen comportamiento de las señales en el lado primario y secundario del convertidor .

Como se espera que el sistema opere en modo isla, se consideran variaciones en el bus de tensión, ya sea por cambios en la carga o por fluctuaciones en la potencia entregada de la fuente fotovoltaica, mismas que no debería afectar a la carga de la batería.

En este caso de análisis se comprueba la modulación del convertidor y autonomía para mantenerse operando en caso de alteraciones en el bus DC, resulta útil hacer mención que durante esta situación el sistema mantuvo la batería en modo de carga gestionando eficientemente la potencia.

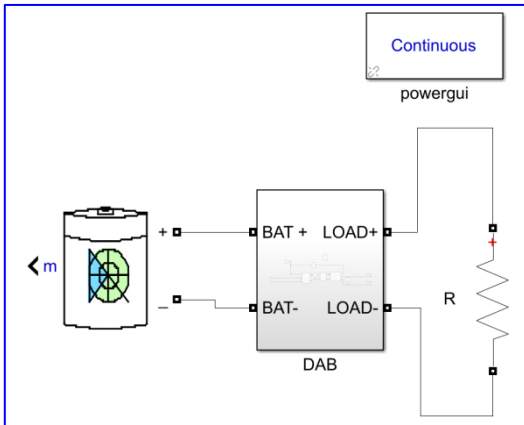


Figura 14 Simulación utilizando una batería de litio como fuente.

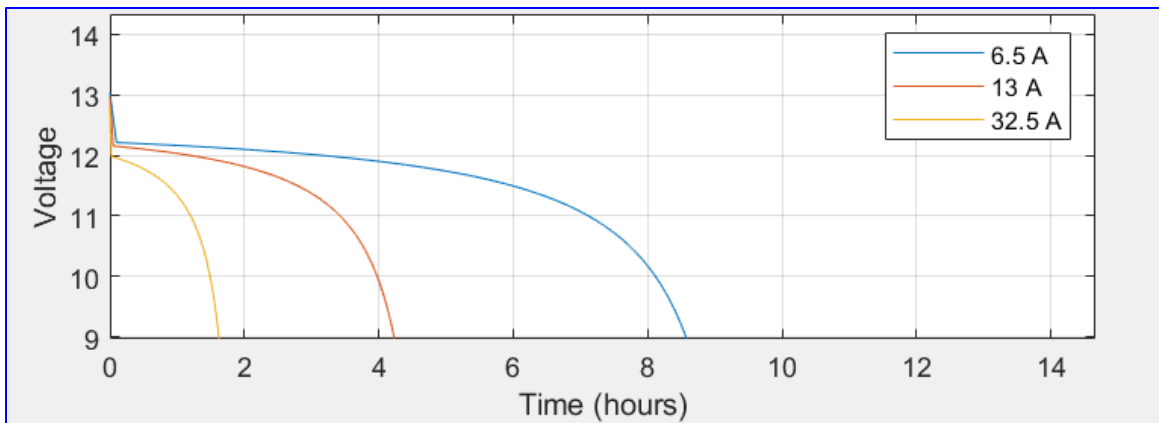


Figura 15 Gráficas obtenidas de los tiempos de descarga a 2,4 y 8 horas.

En (Figura 14 y 15 ) son los resultados obtenidos al simular el sistema preliminar en operación, se conectó una resistencia a la salida del convertidor para representar la carga, esto nos permitió visualizar los tiempos de descarga a diferentes amperajes de demanda, gracias a esta fase se logró un panorama más aterrizado de la autonomía de mismo.

Los parámetros base de este análisis fueron el voltaje y corriente de cada componente del convertidor en ambos lados, primario y secundario, con ley de ohm calculamos la potencia para corroborar que la gestión de la energía suministrada por la fuente fotovoltaica efectivamente podía ser controlada en un sentido u otro (Figura 16).

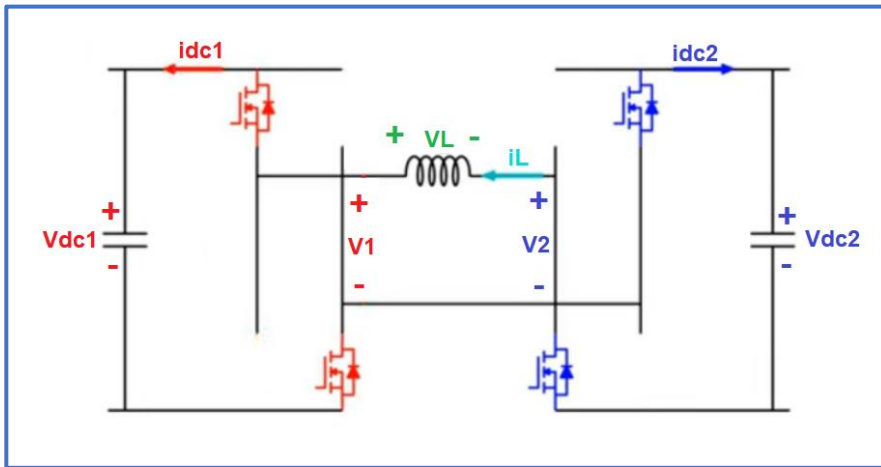


Figura 16 Voltajes y corrientes del DAB

Mediante la estrategia de control Phase Shift se variaron los ángulos de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  (Figura 17,18,19,20,21), donde podemos observar la potencia modulada por el convertidor y como se dirige hacia la carga o ala fuente del sistema, según se requiera. Se observa el flujo de energía en modo directo e inverso en diferentes ángulos de fase, lo que nos confirma nuevamente que el desempeño y eficiencia del convertidor es la adecuada.

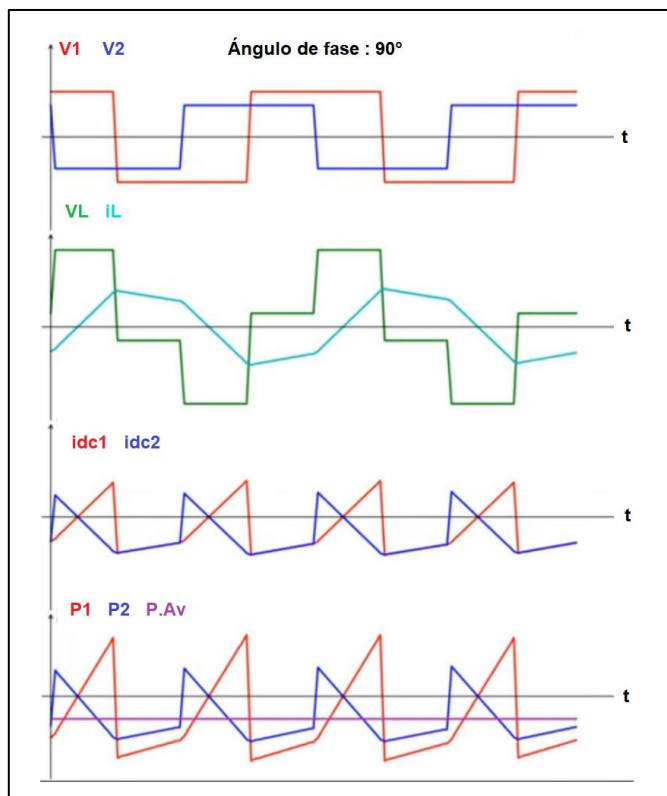


Figura 17 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de  $+90^\circ$

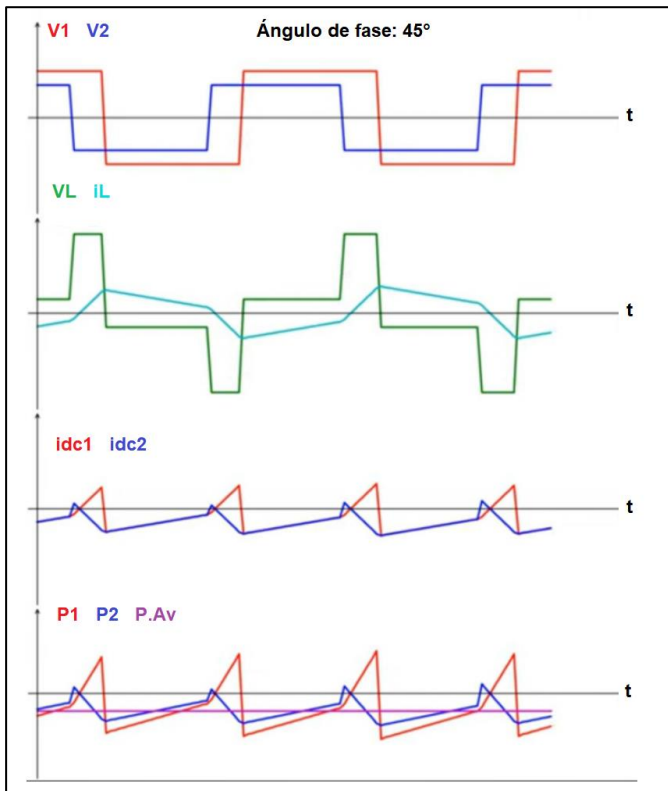


Figura 18 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de  $+45^\circ$

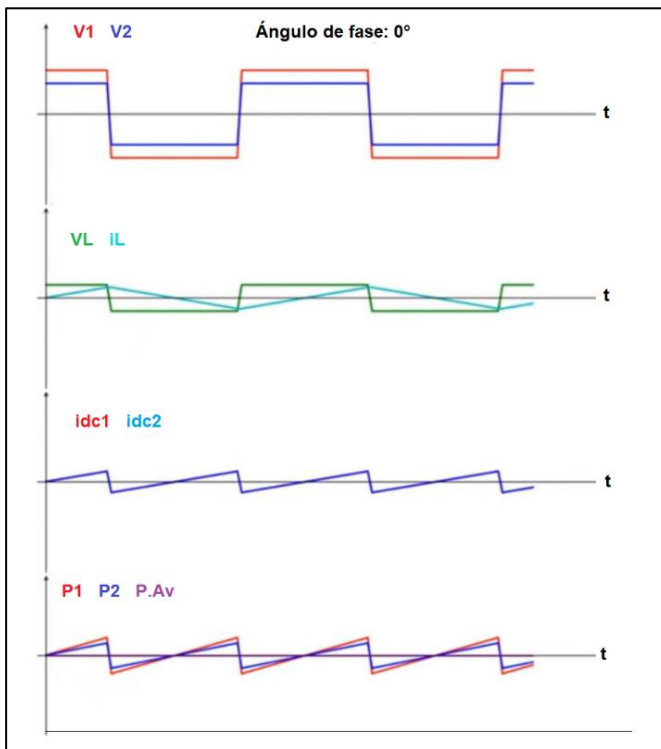


Figura 19 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de  $0^\circ$

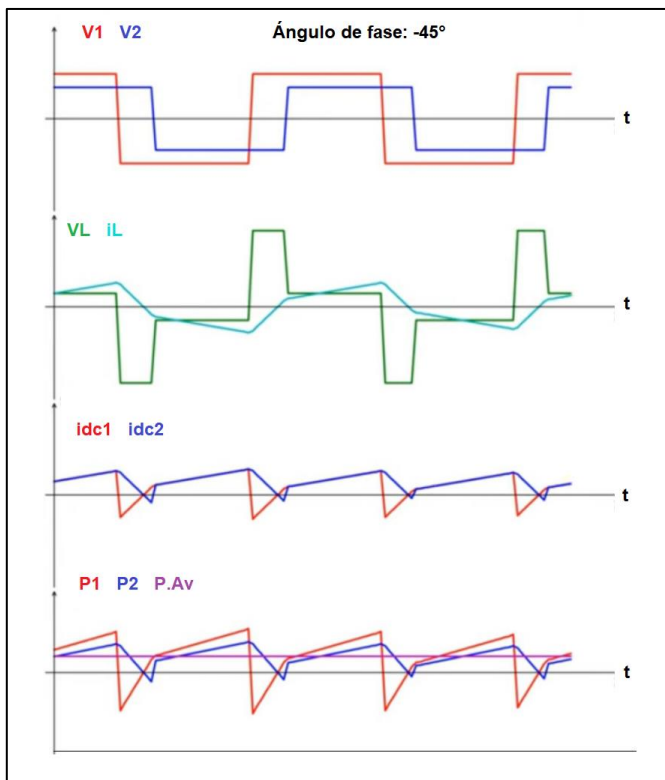


Figura 20 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de  $-45^\circ$

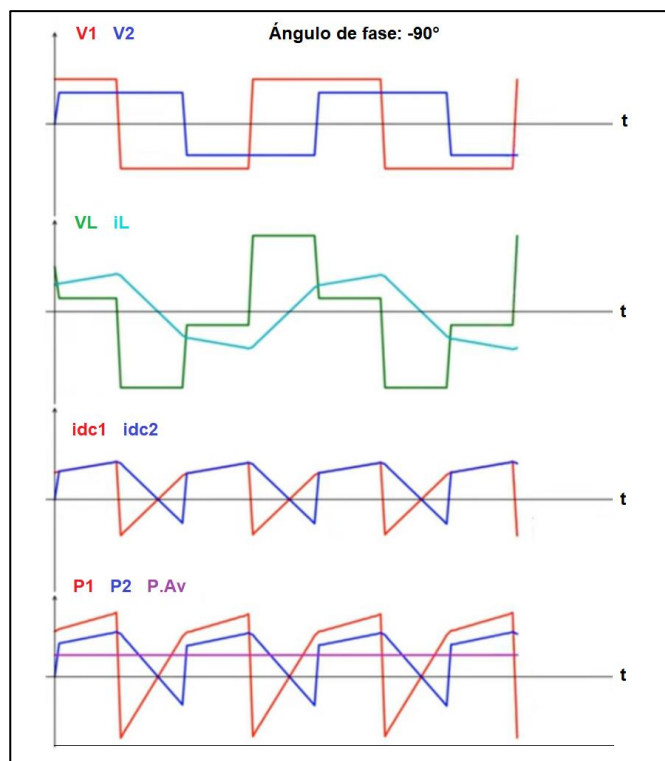


Figura 21 Respuesta del convertidor en un ángulo de fase de  $-90^\circ$

---

## 6 Conclusiones

La bidireccionalidad de flujo de energía es posible gracias a las baterías ya que pueden actuar como fuente y carga según la configuración, por ello los dispositivos de almacenamiento de energía implementados deben ser de alta eficiencia con rangos de carga y descarga que cumplan los criterios para su implementación en sistemas fotovoltaicos.

La conmutación en el DAB es crucial dado que involucra el control de los interruptores semiconductores para regular el flujo de energía y mantener un rendimiento óptimo del sistema. Durante la conmutación, el controlador del DAB ajusta las señales de control de los interruptores para controlar la forma de onda de salida y la transferencia de potencia.

El DAB puede operar en varios modos de conmutación. En el modo de conmutación duro, los interruptores se encienden y apagan de manera abrupta, lo que puede generar transitorios de voltaje y corriente. En el modo de conmutación suave, se utilizan técnicas de control avanzadas, como la modulación de frecuencia de resonancia, para reducir las pérdidas de conmutación y mejorar la calidad de la señal de salida.

Es crucial sincronizar la conmutación de los interruptores en ambos lados del DAB para minimizar los transitorios de voltaje y corriente con el fin de garantizar una transferencia de potencia eficiente y estable

Al modificar el ángulo de fase entre las señales de conmutación de los puentes del primario y el secundario del transformador, se puede controlar la cantidad de potencia transferida y optimizar la eficiencia y estabilidad del sistema. El controlador del DAB debe monitorear

continuamente las condiciones de carga y ajustar el ángulo de fase para mantener un rendimiento óptimo del sistema.

En conclusión, en este proyecto se obtuvieron resultados muy favorables que serán un punto de partida para futuras investigaciones y permitirán un alcance mayor para el desarrollo de nuevas tecnologías, se augura que el convertidor de doble puente activo emerja como una opción potente, respaldada por su rendimiento eficiente y aplicaciones versátiles se espera un crecimiento significativo y una contribución sustancial a los sistemas de energía avanzados.

## 7 Bibliografía

- [1] S. S. (PROMÉXICO) Rodríguez *et al.*, *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México* 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.promexico.mx/documentos/biblioteca/industria-solar.pdf>.
- [2] M. B. Hayat, D. Ali, K. C. Monyake, L. Alagha, y N. Ahmed, “Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future”, *International Journal of Energy Research*, vol. 43, núm. 3. John Wiley and Sons Ltd, pp. 1049–1067, el 10 de marzo de 2019. doi: 10.1002/er.4252.
- [3] A. L. Llamas, F. R. Rubio, y C. V. Venegas, “Optimización de carga de vehículos eléctricos con asistencia solar fotovoltaica y almacenamiento de energía”.
- [4] J. Everts, “ARENBERG DOCTORAL SCHOOL FACULTY OF ENGINEERING SCIENCE Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge AC-DC Converter Topologies”, 2014.
- [5] E. E. Henao-Bravo, C. A. Ramos-Paja, A. J. Saavedra-Montes, D. González-Montoya, y J. Sierra- Pérez, “Design method of dual active bridge converters for photovoltaic systems with high voltage gain”, *Energies (Basel)*, vol. 13, núm. 7, 2020, doi: 10.3390/en13071711.
- [6] D. Akinyele, J. Belikov, y Y. Levron, “Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems”, *Energies*, vol. 10, núm. 11. MDPI, el 1 de noviembre de 2017. doi: 10.3390/en10111760.

- [7] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, K. Chaaban, P. Bartholomeüs, y P. Le Moigne, “Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm- Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm”, *Electric Power Systems Research*, vol. 131, pp. 195–204, feb. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.10.018.
  
- [8] “El T-MEC y los estímulos de EU impulsarán a la industria de baterías de litio”, *Asociacion de Agentes Aduanales del Puerto de Veracruz*. [http://www.aaaver.org.mx/boletin\\_completo.php?ver=1802](http://www.aaaver.org.mx/boletin_completo.php?ver=1802) , el 22 de diciembre de 2022.
  
- [9] S. W. P. Y. H. K. Y. C. J. y C. Y. W. J. G. Kim, “Highefficiency bidirectional soft switching DC-DC converter”, 2010. doi: doi: 10.1109/IPEC.2010.5543498.
  
- [10] C.-M. Young, Y.-S. Cheng, B.-R. Peng, S.-H. Chi, y Z.-Z. Yang, “Design and Implementation of a High-efficiency Bidirectional DC-DC Converter”.
  
- [11] K. K. K. T. y F. K. S. Ikeda, *Efficiency Improvement of Isolated Bidirectional Boost Full Bridge DC-DC Converter*, vol. 7, IEEE. 2018.
  
- [12] J. Koskela, A. Rautiainen, y P. Järventausta, “Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization”, *Appl Energy*, vol. 239, pp. 1175–1189, abr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.021.

- [13] S. Sato y A. Weidlich, “Analysis of Avoided Transmission through Decentralized Photovoltaic and Battery Storage Systems”, *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, núm. 3, pp. 1922–1929, jul. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2946446.
- [14] Z. Wang, H. Li, y S. Member, “An Integrated Three-port Bidirectional DC-DC Converter for PV Application on DC Distribution System”, 2011.
- [15] D. Chowdhury, A. S. M. K. Hasan, y M. Z. R. Khan, “Islanded DC Microgrid Architecture with Dual Active Bridge Converter-Based Power Management Units and Time Slot-Based Control Interface”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, núm. 6, pp. 863–871, jun. 2020, doi: 10.1002/tee.23128.
- [16] W. Xing, H. Wang, L. Lu, S. Wang, y M. Ouyang, “An adaptive droop control for distributed battery energy storage systems in microgrids with DAB converters”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 130, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106944.
- [17] K. Sundareswaran, S. Peddapati, y S. Palani, “MPPT of PV systems under partial shaded conditions through a colony of flashing fireflies”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, núm. 2, pp. 463–472, 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2298237.
- [18] G.M. Tina and S. Scrofani, *Electrical and thermal model for PV module temperature evaluation*. I E E E, 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618498>.

- [19] M. Shamim Kaiser, S. Kumar Aditya, y R. Karim Mazumder, “PERFORMANCE EVALUATION OF A MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) FOR SOLAR ELECTRIC VEHICLE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK”, 2006.
- [20] J. H. Lee, H. Bae, y B. H. Cho, “Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size”.
- [21] W. Bladimir Cevallos Cevallos, R. Llangarí Dennys Franklin, D. Ruiz Luis Eduardo, C. Manya Brandon Alexis, Y. Juiña Mishell Esthefanny, y C. Manya Brandon Alexis Yerovi Juiña Mishell Esthefanny, ““LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA””, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://eumed.net/ce/2019/1/energia-fotovoltaica.html>.
- [22] M. I. Rigel y G. Leal, “Las microrredes energéticas en México, su impacto en el Sistema Eléctrico Nacional y perspectivas de uso UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA”.
- [23] M. H. Rashid y D. Ph., “Power Electronics Handbook”.
- [24] F. Chan-puc, H. Calleja G, V. Sánchez H, R. Acosta O, y E. Torres M, “Tendencias Actuales en el Diseño de Convertidores de Potencia para Aplicaciones en Fuentes de Energía Renovables”, *REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN*, vol. 7, núm. 2, pp. 1–7, 2009.
- [25] Y. U. Lopez Castrillon y F. A. Gaviria Cataño, “Metodología y evaluación de recursos energéticos renovables: implementación de microrredes aisladas”,

*Visión electrónica*, vol. 12, núm. 2, pp. 162–172, dic. 2018, doi: 10.14483/22484728.14260.

- [26] Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables, “Tipos de Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica”, el 17 de octubre de 2019.
- [27] S. M. Amrr, M. S. Alam, M. S. J. Asghar, y F. Ahmad, “Low cost residential microgrid system based home to grid (H2G) back up power management”, *Sustain Cities Soc*, vol. 36, pp. 204–214, ene. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.10.016.
- [28] J. A. Guacaneme, D. Velasco, y C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes”, *Informacion Tecnologica*, vol. 25, núm. 2. Centro de Informacion Tecnologica, pp. 175–188, 2014. doi: 10.4067/S0718- 07642014000200020.
- [29] IEEE Staff, *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2017.
- [30] Ned mohan, Tore M. Undeland, y William P. Robbins, “Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño”, *McGrawHill*, vol. 3a, 2009.
- [31] A. Velázquez Ibáñez, J. Ramón, y R. Rodríguez, “Modelado e Implementación a Escala de un Convertidor de Doble Puente Activo Operando en Lazo Cerrado para Múltiples Aplicaciones P R E S E N T A UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA”.

- [32] C. F. Hsu, I. F. Chung, C. M. Lin, y C. Y. Hsu, “Self-regulating fuzzy control for forward DC-DC converters using an 8-bit microcontroller”, *IET Power Electronics*, vol. 2, núm. 1, pp. 1–13, 2009, doi: 10.1049/iet-pel:20070179.
- [33] J. Everts, “Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge AC-DC Converter Topologies”, 2014.
- [34] Z. Jiang, L. Gao, y R. A. Dougal, “Adaptive control strategy for active power sharing in hybrid fuel cell/ battery power sources”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, núm. 2, pp. 507– 515, jun. 2007, doi: 10.1109/TEC.2005.853747.
- [35] H. Akagi y R. Kitada, “Control and design of a modular multilevel cascade BTB system using bidirectional isolated dc/dc converters”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, núm. 9, pp. 2457– 2464, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2107752.
- [36] by Dinesh Sekhar Segaran BEng, G. Holmes Associate Supervisor, y B. McGrath, “Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bidirectional DC-DC Converters for Smart Grid Applications”, 2006.
- [37] F. Krismer y D. Ing, “Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter Topologies”.
- [38] H. Qin, “Dual active bridge converters in solid state transformers”, 2012. [En línea]. Disponible en: [https://scholarsmine.mst.edu/doctoral\\_dissertations/1914](https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/1914).

- [39] IEEE Power & Energy Society y B. C. IEEE Power and Energy Society (PES) General Meeting 2013.07.21-25 Vancouver, *Solid State Transformer in the Future Smart Electrical System*.
- [40] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, y R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, núm. 5. MDPI AG, el 25 de abril de 2018. doi: 10.3390/app8050659.
- [41] J. A. Ruiz Tobon, “Análisis y control de convertidores electrónicos de potencia para sistemas de generación fotovoltaica”, 2017.
- [42] Kenji Amei Yukichi 'Igkayasu Takahisa Ohji Masaaki Sakui, *A Maximum Power Control of Wmd Generator System Using a Permanent Magnet Synchronous Generator and a Boost Chopper Circuit*. IEEE, 2002.
- [43] A. J. Mahdi, W. H. Tang, y Q. H. Wu, “Improvement of a MPPT algorithm for PV systems and its experimental validation”, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, núm. 8, pp. 611– 616, abr. 2010, doi: 10.24084/repqj08.419.
- [44] Y. K. Y. Z. and S. D. Fangrui Liu, *Comparison of P&O and Hill Climbing MPPT Methods for Grid- Connected PV Converter*. 2008.
- [45] D. P. Hohm y M. E. Ropp, “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed”.
- [46] F. J. Gimeno Sales, S. Seguí Chilet, y S. Orts Grau, *Convertidores electrónicos : energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*