



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE  
ESTADO SÓLIDO PARA INTEGRACIÓN DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR**

**I.E. CÉSAR ENRIQUE XOOL RAMIREZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCION ENERGIAS RENOVABLES**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2018**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

# **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico proporcionado desde el inicio de los estudios de Maestría hasta la obtención del grado académico.

# Resumen

Este documento presenta el diseño de un transformador de estado sólido para la integración a red de sistemas de generación de energía de módulos fotovoltaicos. El transformador está comprendido de dos etapas, la conversión DC-DC (Dual Active Bridge) e Inversor, alimentados por un arreglo de módulos fotovoltaicos. El principal objetivo de esta investigación es poder extraer la máxima potencia del arreglo, utilizando un control proporcional integral y una red neuronal capaz de determinar el voltaje de máxima potencia necesario para transferir la potencia cosechada a la etapa de conversión DC-DC.

# **Abstract**

This document presents the design of a solid-state transformer for photovoltaic modules generations systems grid integration. The transformer is composed of two stages, DC-DC conversion via a dual active bridge and an inverter, feed from a photovoltaic module array. The main objective of this research is to extract the maximum power from the array, using a proportional-integral control and a neural network able to estimate the maximum power point voltage required to transfer the harvested power into the DC-DC conversion stage.

# Índice General

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
Índice de Tablas.....	<b>VII</b>
Índice de figuras.....	<b>VIII</b>
Introducción.....	<b>11</b>
Objetivo General.....	12
Objetivos Especificos .....	12
Planteamiento del problema.....	12
Metodología.....	13
<b>1. Estado del Arte.....</b>	<b>14</b>
1.1 Revisión de la literatura .....	14
<b>2. Marco Teórico.....</b>	<b>22</b>
2.1 Transformador de Estado Sólido .....	22
2.1.1 Modelo Matemático.....	22
2.1.2 Topologías.....	24
2.2 Modelo matemático de un módulo fotovoltaico.....	26
2.3 Seguidor de Punto de Máxima Potencia (MPPT) .....	28
2.3.1 Características eléctricas de las celdas PV.....	28
2.3.2 Técnicas MPPT .....	29
2.3.2 Diferentes configuraciones para interfaces en sistemas Fotovoltaicos.....	32
2.4 Redes Neuronales.....	33
2.4.1 Ventaja de las redes neuronales artificiales.....	37
2.4.2 Algoritmos de aprendizaje.....	38
2.4.2.1 Corrección de error.....	38

2.4.2.2 Regla de Hebb.....	38
2.4.2.3 Aprendizaje competitivo.....	38
2.4.2.4 Aprendizaje tipo Boltzman .....	38
2.5 Dual Active Bridge (DAB) .....	40
2.5.1 Métodos de control de cambio de fase .....	42
2.5.1.1 Control de cambio de fase simple (SPS).....	438
2.5.1.2 Control de cambio de paso extendido (EPS).....	44
2.5.1.3 Control de cambio de fase dual (DPS).....	47
2.6 Transformador de Alta Frecuencia .....	50
2.6.1 Características de amplitud y fase.....	52
2.6.2 Calculo de parámetros.....	52
2.7 Inversor.....	54
<b>3. Descripción del sistema .....</b>	<b>56</b>
3.1 Arreglo módulos Fotovoltaicos .....	56
3.2 Seguimiento del Punto de máxima potencia.....	57
3.3 Dual Active Bridge .....	59
3.4 Diseño de controlador.....	60
3.5 Análisis de operación del inversor .....	61
3.6 Diagrama del SST .....	62
<b>4. Resultados .....</b>	<b>64</b>
4.1 Caso 1.....	64
4.2 Caso 2.....	74
4.3 Discusión de resultados.....	75
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>77</b>
Referencias.....	79

## Índice de Tablas

2.1 Comparativa de métodos MPPT de acuerdo a su estrategia de control y complejidad.....	30
2.2 Comparativa de métodos MPPT de acuerdo a su eficiencia y velocidad.....	31
2.3 Estado de los interruptores cuando el flujo de potencia es $V1 > V2$ (SPS).....	44
2.4 Estado de los interruptores cuando el flujo de potencia es $V1 > V2$ (EPS).....	46
2.5 Estado de los interruptores para el control DPS cuando $V1 > V2$ .....	47
3.1 Características módulo Fotovoltaico .....	56

# Índice de Figuras

Figura 1.1: Transformador tradicional y transformador de estado sólido .....	14
Figura 1.2: Sistema de control con MPPT.....	15
Figura 1.3: Esquema transformador de estado sólido.....	16
Figura 1.4: Diagrama de bloques de sistema de control.....	16
Figura 1.5: Diagrama de Bloques del sistema propuesto.....	17
Figura 1.6: Diagrama de Bloques estrategia de control propuesta usando ANN .....	18
Figura 1.7: Estructura típica PV con MPPT y convertidor DC/DC.....	18
Figura 1.8: Topología propuesta en [9] .....	19
Figura 1.9: Diagrama de circuito del convertidor propuesto en [9].....	20
Figura 1.10 Diagrama de la simulación.....	20
Figura 1.11: Diagrama de control propuesto para el convertidor. ....	21
Figura 2.1: Operación Básica de un Transformador de Estado Sólido. ....	22
Figura 2.2: Esquemático del SST.....	23
Figura 2.3: Transformador tipo A .....	24
Figura 2.4: Transformador tipo B .....	25
Figura 2.5: Transformador tipo C .....	25
Figura 2.6: Transformador tipo D .....	26
Figura 2.7: Circuito equivalente de un módulo fotovoltaico.....	26
Figura 2.8: Curva I-V y P-V .....	28
Figura 2.9: Principio del MPPT.....	29
Figura 2.10: Configuración de una etapa .....	32
Figura 2.11: Configuración de etapa doble .....	33

Figura 2.12: Una neurona simple.....	<b>34</b>
Figura 2.13: Neurona artificial básica.....	<b>35</b>
Figura 2.14: Convertidor Dual Active Bridge (DAB) .....	<b>40</b>
Figura 2.15: Principio de operación del convertidor DAB.....	<b>41</b>
Figura 2.16: SPS Flujo de potencia de <b>V1</b> a <b>V2</b> .....	<b>43</b>
Figura 2.17: SPS Flujo de potencia de de <b>V2</b> a <b>V1</b> .....	<b>44</b>
Figura 2.18: Control EPS, flujo de potencia de <b>V1</b> a <b>V2</b> .....	<b>45</b>
Figura 2.19: Control EPS, flujo de potencia de <b>V2</b> a <b>V1</b> .....	<b>46</b>
Figura 2.20: Control DPS, flujo de potencia de <b>V1</b> a <b>V2</b> .....	<b>48</b>
Figura 2.21: Control EPS, flujo de potencia de <b>V2</b> a <b>V1</b> .....	<b>49</b>
Figura 2.22: Circuito Equivalente Transformador Alta Frecuencia .....	<b>51</b>
Figura 2.23: Configuración del núcleo del transformador.....	<b>53</b>
Figura 2.24: Circuito simple de un inversor .....	<b>55</b>
Figura 3.1: Bloque que representa la parte del Arreglo fotovoltaico.....	<b>57</b>
Figura 3.2: Esquema Red Neuronal.....	<b>58</b>
Figura 3.3: Esquema usado en la simulación para el Dual Active Bridge .....	<b>59</b>
Figura 3.4: Circuito equivalente aproximado del transformador .....	<b>60</b>
Figura 3.5: Esquema de control. ....	<b>61</b>
Figura 3.6: Diagrama de Bloques del Control .....	<b>61</b>
Figura 3.7: Inversor .....	<b>61</b>
Figura 3.8: Generación de pulsos para interruptores .....	<b>62</b>
Figura 3.9: Diagrama del transformador de estado sólido .....	<b>63</b>
Figura 4.3: Referencia generada a través de la red neuronal. ....	<b>65</b>
Figura 4.4 Potencia, voltaje y corrientes en el arreglo fotovoltaico .....	<b>66</b>

Figura 4.5 Irradiancia y temperatura durante simulación .....	67
Figura 4.6: Voltaje de salida y entrada en el DAB.....	67
Figura 4.7: Pulsos en puente primario y secundario .....	68
Figura 4.8: Voltajes y corrientes en el DAB.....	69
Figura 4.9: Voltaje de máxima potencia generado por la red neuronal.....	69
Figura 4.10: salida inversor.....	70
Figura 4.11: Voltaje de referencia caso 2.....	71
Figura 4.12: Desempeño en arreglo fotovoltaico.....	71
Figura 4.13: Valores de Irradiancia y temperatura utilizadas en caso 2.....	72
Figura 4.14: Salida en el DAB vs $V_{pv}$ .....	73
Figura 4.15: Pulsos en el DAB .....	73
Figura 4.16: Voltaje y corrientes en el DAB .....	74
Figura 4.17: $V_{pv}$ vs Referencia .....	74
Figura 4.18: Salida en el inversor.....	75

# Introducción

Los transformadores convencionales (LFT) han sido ampliamente usados en diferentes áreas, siendo sus principales funciones la conversión de voltaje, aislamiento, aseguramiento en la estabilidad en el voltaje y transferencia de energía. Los transformadores tradicionales (cobre y hierros convencionales) son altamente confiables, relativamente baratos y bastante efectivos, pero tienen algunos inconvenientes tales como gran tamaño, grandes cantidades de cobre o hierro en los devanados, caída de voltaje bajo carga, sensibilidad a los armónicos, pobre desempeño bajo desbalance en la carga, así como problemas ambientales derivado del uso de aceites minerales.

Como alternativa al transformador LFT, las topologías del transformador de estado sólido (SST) han sido investigadas recientemente debido a las ventajas que presente con respecto al transformador convencional. Adicionalmente, el transformador de estado sólido puede incorporar esquemas de control inteligente los cuales no son posibles con los transformadores actuales, tales como regulación de voltaje, compensación de potencia reactiva, flujo de potencia bidireccional, etc.

La operación básica del SST es cambiar el voltaje AC (Corriente alterna) 50/60 Hz a alta frecuencia. Esta salida AC es transmitida a través de un transformador de alta frecuencia el cual realiza la operación necesaria de conversión de voltaje mientras provee aislamiento galvánico entre la entrada y el lado de carga. La salida AC en alta frecuencia del secundario del transformador se regresa a 50/60 Hz para alimentar la carga o la red de distribución.

La literatura actual propone el convertidor de puente activo dual (DAB) como el convertidor DC-DC (Corriente directa) más adecuado para ser utilizado en la configuración de un transformador de estado sólido [1]. El DAB es un concepto propuesto en la época de los 90', su implementación fue restringida por las limitaciones

en los dispositivos de potencia para aplicaciones de alta potencia. Hoy en día, los dispositivos de potencia que ha surgido (SiC y GaN) y novedosos materiales magnéticos, hacen del concepto del DAB mas factible en su implementación.

## **Objetivo General**

Diseñar un sistema para controlar automáticamente la potencia energética compartida para una micro-red híbrida DC/AC con transformador de estado sólido, con capacidad de extraer la máxima potencia de un arreglo fotovoltaico.

## **Objetivos Específicos**

- Identificar las diferentes etapas utilizadas en los transformadores de estado sólido.
- Diseñar un arreglo fotovoltaico.
- Obtener salidas de voltaje DC y AC en el transformador.
- Simular el control de modo que se permita extraer la máxima potencia del arreglo fotovoltaico.

## **Planteamiento del problema**

En este trabajo, se diseña un sistema de control para micro red híbrida (compuesta por un arreglo fotovoltaico, un seguidor de máxima potencia, así como de un inversor) AC-DC basada en transformador de estado sólido. El transformador de estado sólido está tomando más realce debido al potencial que tiene en cuanto a la operación de la red eléctrica, en comparación con los transformadores actuales que son pasivos y no cuentan con ningún tipo de control.

Con el auge que tienen en la actualidad las energías renovables, se busca desarrollar dispositivos para optimizar, mejorar y potencializar el recurso renovable, ya que con el pasar de los años se espera que su utilización sea mas extendida, para lo que se requiere más y mejor tecnología para su máximo aprovechamiento.

## **Metodología**

Se realizará el análisis del estado del arte para definir las especificaciones y los elementos que conformaran el diseño. Adicionalmente, se realizarán simulaciones de cada etapa del sistema: electrónica de potencia, análisis del algorítmico y del arreglo fotovoltaico en la plataforma MATLAB / SIMULINK.

Se desea que la máxima potencia disponible sea cosechada desde el arreglo fotovoltaico, mediante la utilización de un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). Se realizarán simulaciones donde los valores requeridos para operar sean variantes en el tiempo, para observar el comportamiento general del sistema, distinguir las salidas y generar las conclusiones pertinentes.

# Capítulo 1

## Estado del Arte

### 1.1 Revisión de la literatura

El transformador de estado sólido (SST) es un elemento primordial dentro de la red, este es capaz de solventar los problemas de calidad de la energía, además ofrece puertos para integrar fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento de energía.

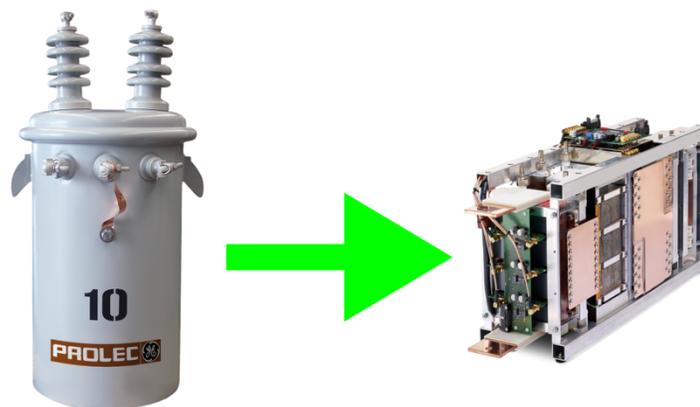


Figura 1.1: Transformador tradicional (izquierda) y transformador de estado sólido (derecha)

En [3] se propone la configuración de un sistema con micro red DC. Diferentes micro redes DC están conectadas a una línea transmisión trifásica a través de un rectificador centralizado bidireccional AC/DC. El rectificador convierte tres fases de 120/208 V a 400 V DC, el cual provee al voltaje de bus de toda la micro red zonal DC. Un módulo fotovoltaico es conectado al bus DC a través de un convertidor DC/DC con MPPT. Un

arreglo de baterías es el responsable de proveer almacenamiento de energía y balance de potencia usando un convertidor bidireccional DC/DC.

La generación fotovoltaica siempre trabaja en el modo de máxima potencia de salida, lo cual indica su máximo aprovechamiento. El convertidor DC/DC es usado en esta configuración como una interface entre el arreglo PV y el bus de DC, así como una función MPPT. El sistema de control puede apreciarse en la figura 1.2 donde la corriente y el voltaje del módulo fotovoltaico son medidas. Usando un método de conductancia incremental, el punto de máxima potencia puede ser rastreado.

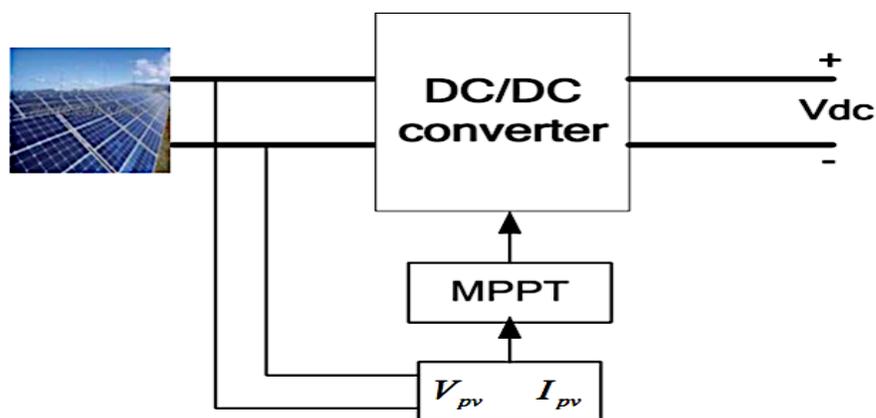


Figura 1.2: Sistema de control con MPPT

En [4] se propone un nuevo método para el rastreo del punto máximo de potencia (MPPT) a través de un inversor de una fase con control de desplazamiento. El transformador de estado sólido propuesto (figura 1.3) usa tres convertidores con un transformador de alta frecuencia para transferir potencia del arreglo fotovoltaico a la red. La etapa del inversor MPPT convierte la potencia DC del arreglo PV a una salida de alta frecuencia AC incluyendo el control del MPPT y una salida AC presente hacia el transformador de alta frecuencia. El voltaje en el secundario es rectificado y sirve como enlace del voltaje DC para el inversor del lado de la red. Este último, con la adecuada sincronización transfiere la potencia disponible del arreglo fotovoltaico a la red.

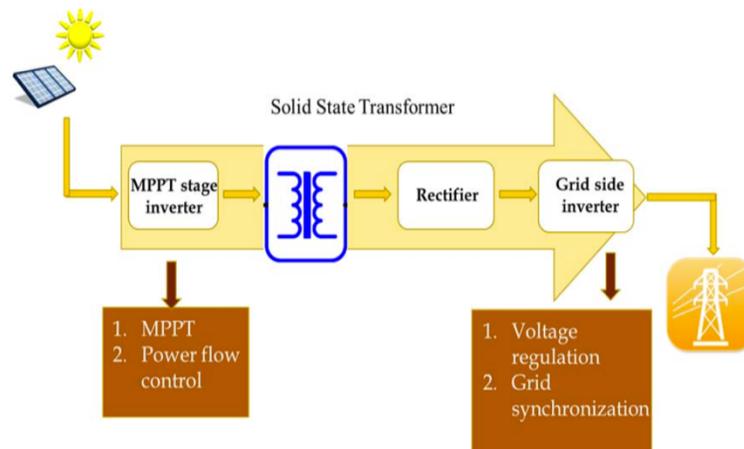


Figura 1.3: Esquema transformador de estado sólido

En [5] el sistema fotovoltaico con transformador de estado sólido consiste en dos etapas de potencia. Un DHB (Dual Half Bridge) y un inversor conectado a la red. El convertidor DHB constituye la primera etapa de potencia, que tiene como objetivo lograr las funciones de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT). Un inversor conectado a la red es usado para estabilizar el bus de voltaje DC y hacer la corriente de salida sinusoidal.

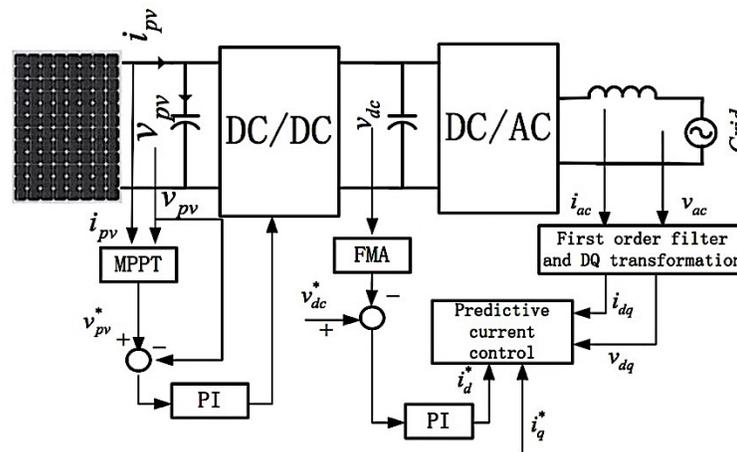


Figura 1.4: Diagrama de bloques de sistema de control

En [6] se presenta un sistema de interfaz para los arreglos fotovoltaicos conectados a la red. La propuesta está basada en el convertidor Dual Active Bridge (DAB) el cual es conectado a el enlace DC del inversor conectado a la red. El esquema perturbar & observar es utilizado para obtener el voltaje terminal del arreglo fotovoltaico que resulta en el seguimiento del punto de máxima potencia. Este voltaje es regulado usando un controlador PI que ajusta el ángulo de fase del convertidor DAB. Además, el inversor es controlado para regular el enlace DC el cual resulta en la entrega de la máxima potencia cosechada a la red.

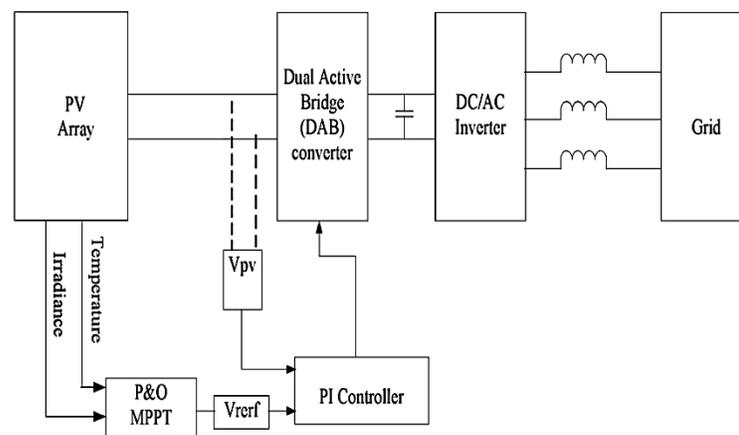


Figura 1.5: Diagrama de Bloques del sistema propuesto

En [7] se presenta un sistema basado en el convertidor Dual Active Bridge (DAB) para arreglos fotovoltaicos. Dos estrategias de control son propuestas para el convertidor DAB para alcanzar la máxima potencia que pueda proporcionar el arreglo fotovoltaico. La primera estrategia se basa en un controlador PI simple para regular el voltaje terminal PV a través de un cambio de ángulo de fase del convertidor DAB utilizando el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con la técnica de perturbar y observar para fijar el voltaje terminal PV. La segunda estrategia presentada es emplear una red neuronal artificial (ANN) para establecer directamente el ángulo de cambio de fase del convertidor DAB que resulta en la máxima potencia que el módulo fotovoltaico puede proporcionar.

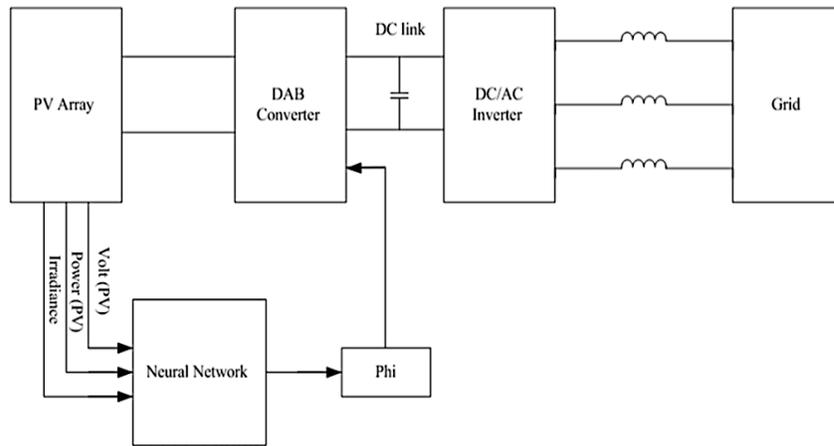


Figura 1.6: Diagrama de bloques de la estrategia de control propuesta usando ANN

En [8] se hace notar que en las últimas décadas los convertidores de potencia DC/DC han sido sujeto de gran interés debido a un incremento en su utilización para diferentes aplicaciones. Los sistemas fotovoltaicos (PV) generalmente sufren de pobre conversión con inestabilidad y características intermitentes. Por lo tanto, el convertidor DC/DC con seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT) es esencial para asegurar la máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico.

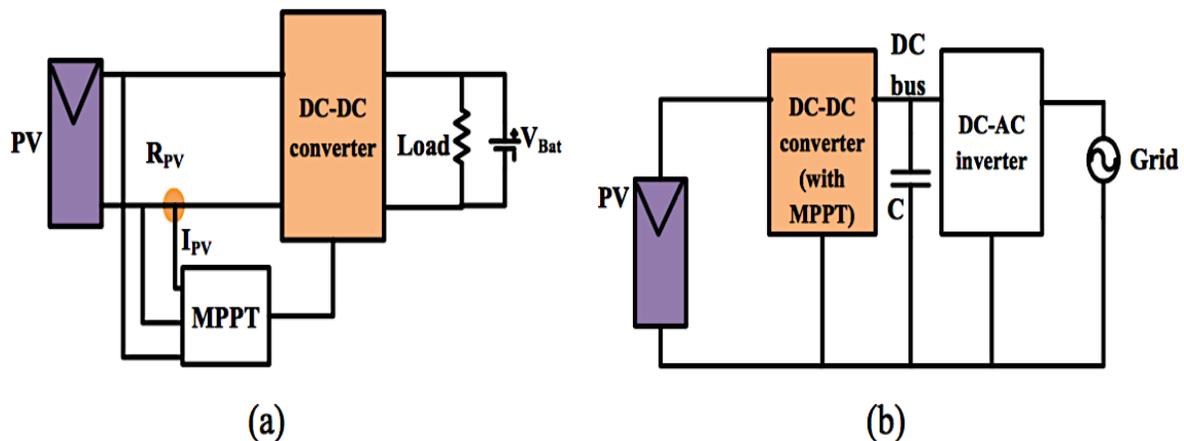


Figura 1.7: Estructura típica PV con MPPT y convertidor DC/DC (a) Sistema aislado  
(b) Sistema conectado a la red.

En [9] se menciona que muchas de las plantas de generación de energía PV (granjas solares) están basadas en inversores centrales, en los cuales los módulos PV están

concentrados en pocos seguidores del punto de máxima potencia y conectados a la red a través de inversores trifásicos. A pesar de que esta tipología típicamente tiene alta eficiencia, su desempeño es limitado en términos de capturar toda la energía disponible desde los módulos PV. El artículo propone un convertidor multinivel en cascada basado en la tecnología de transformador de estado sólido (SST), en la cual múltiples transformadores de alta frecuencia reemplazan la función frecuencia de línea de voltaje medio voluminosa. La propuesta (figura 1.8) consiste en inversores con puente H conectados en serie suministrados por módulos PV independientes a través de transformadores de estado sólido (figura 1.9). Entre las ventajas se encuentran la utilización de múltiples seguidores MPP, reducir peso y volumen, mejorar la confiabilidad, la eficiencia de conversión y fácil mantenimiento.

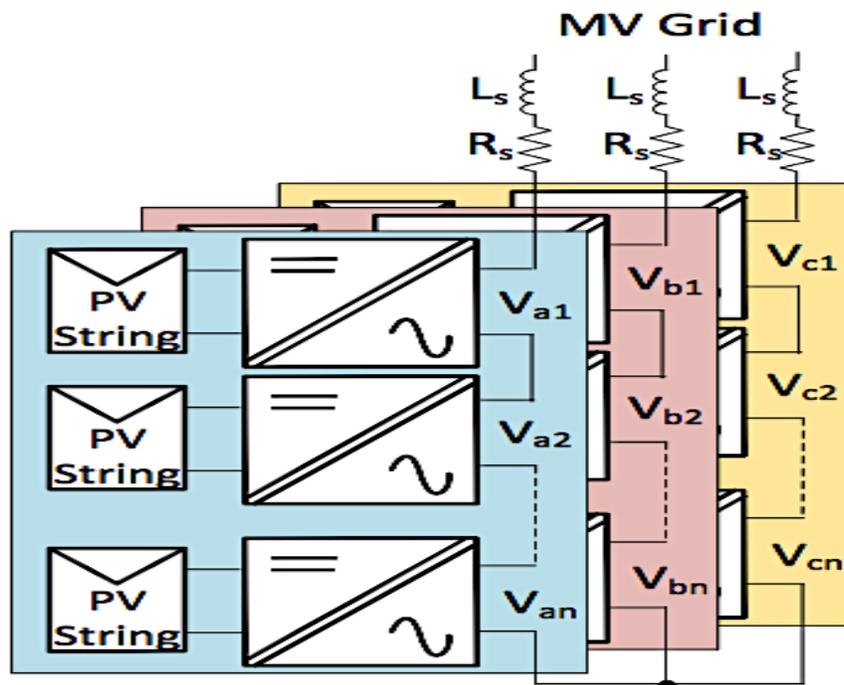
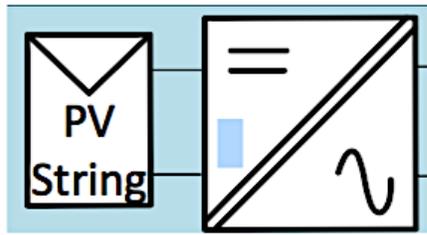


Figura 1.8: Topología propuesta en [9]



(a) Converter module

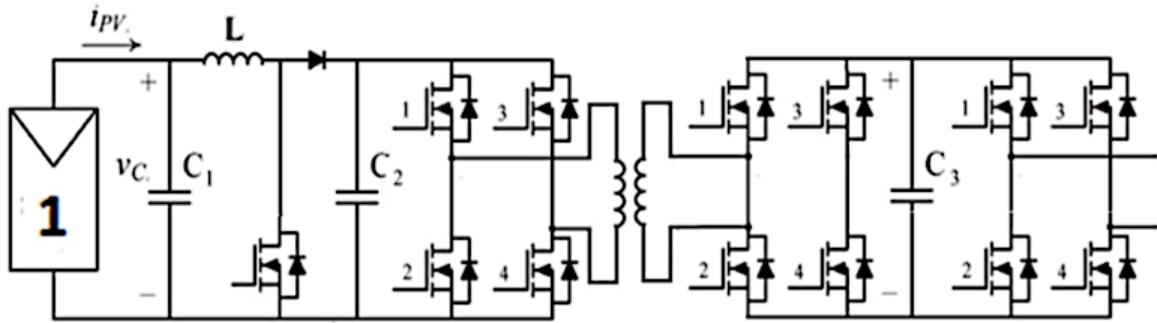


Figura 1.9: Diagrama de circuito del convertidor propuesto en [9]

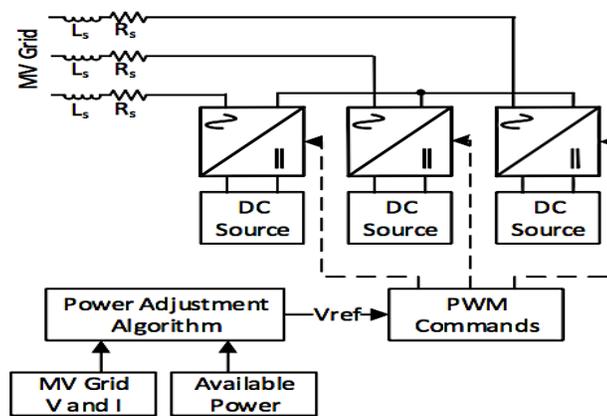


Figura 1.10 Diagrama de la simulación

En [16] se propone un sistema fotovoltaico consistente en un convertidor DAB alimentado por corriente (CF\_DAB, Current-Fed Dual Active Bridge) con un inversor multi-cascada. El convertidor propuesto permite un capacitor pequeño en el enlace DC en un sistema trifásico conectado en estrella, además, la confiabilidad del sistema puede mejorarse reemplazando los capacitores electrolíticos por capacitores Film.

El seguidor de máxima frecuencia (MPPT) de baja frecuencia y libre de rizo, también se realiza en el convertidor propuesto. En primer lugar, para minimizar la influencia que resulta de la capacitancia reducida, se desarrolla un control de sincronización de tensión de enlace de DC. Entonces, un diseño detallado de control de mitigación de potencia basado en el modelo dinámico CF-DAB se presenta para prevenir que la variación de voltaje de baja frecuencia se propague desde el enlace DC al lado PV.

Finalmente, se propone un novedoso algoritmo MPPT de paso variable para asegurar no solo la alta eficiencia del MPPT, sino también una extracción de la máxima potencia bajo un cambio de irradiancia.

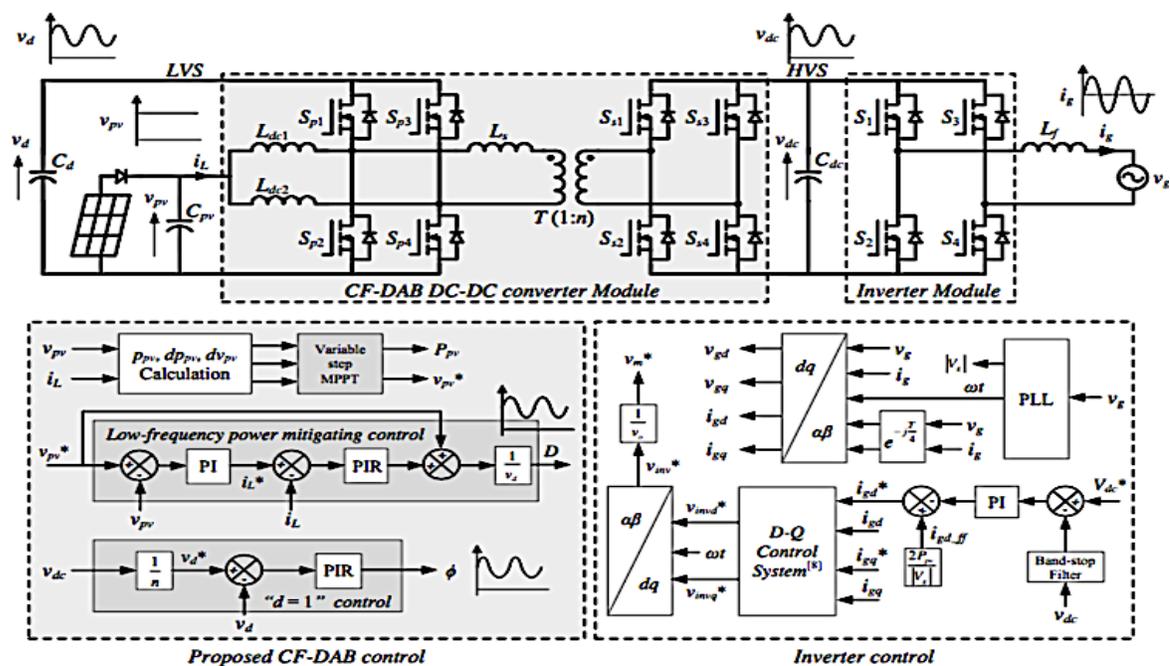


Figura 1.11: Diagrama de control propuesto para el convertidor.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1 Transformador de Estado Sólido

#### 2.1.1 Modelo Matemático

La generación, transmisión y distribución son las tres principales partes de los sistemas modernos de energía, en donde la transformación juega un rol crítico. El transformador tradicional es totalmente pasivo y el volumen y el peso del mismo es un punto importante a considerar.

La operación básica del Transformador de Estado sólido (Desde ahora SST) se presenta en la figura 2.1. Primeramente, el voltaje AC 50/60 Hz se convierte a uno de alta frecuencia (normalmente en un rango que va desde algunos kHz hasta cientos), se intensifica/ reduce por un transformador de alta frecuencia, y finalmente se convierte a 50/60 Hz para alimentar la carga. [1]

Un diagrama de bloques general se muestra en la figura 2.1, la cual comprende las 3 etapas del SST. La conversión AC - DC con rectificador, conversión DC - DC usando DAB (Dual Active Bridge) y conversión DC - AC usando un inversor.



Figura 2.1: Operación Básica de un Transformador de Estado Sólido.

El principal objetivo del modelo DAB es elevar el voltaje AC a un bus de voltaje DC usando el rectificador. Entonces, el DAB puede convertir el alto voltaje en DC a un bajo voltaje en DC. El bajo Voltaje DC provee oportunidad para integrar energías renovables en el sistema.

Las ecuaciones dinámicas que gobiernan el modelo DAB están dadas por (1) a (6) las cuales se derivan aplicando las leyes de Kirchhoff en el circuito. [10]

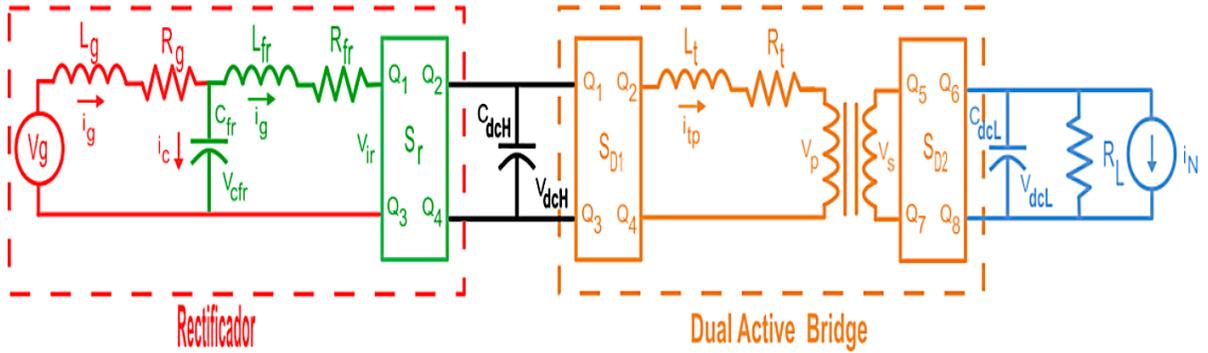


Figura 2.2: Esquemático del SST

$$L_g \frac{di_g}{dt} = V_g - V_{cfr} - R_g i_g \quad (1)$$

$$L_{fr} \frac{di_{fr}}{dt} = V_{cfr} - S V_i - R_{fr} i_{fr} \quad (2)$$

$$C_{fr} \frac{dv_{cfr}}{dt} = i_g - i_{fr} \quad (3)$$

$$C_{dcH} \frac{dv_{dcH}}{dt} = S i_{fr} - S_1 i_{tp} \quad (4)$$

$$L_t \frac{di_{tp}}{dt} = S_1 V_{dcH} - R_t i_{tp} - S_2 V_{dcL} \quad (5)$$

$$C_{dcL} \frac{dv_{dcL}}{dt} = S_2 i_{tp} - i_N \quad (6)$$

donde:  $V_G$  Voltaje de red,  $L_G$  Inductancia de la red,  $R_G$  resistencia de la red,  $C_{fr}$  capacitancia del filtro rectificador,  $L_{fr}$  inductancia en el filtro rectificador,  $R_{fr}$  resistencia en el filtro rectificador,  $i_g$  corriente de la red,  $i_c$  corriente de capacitor en el filtro,  $V_{dcH}$  voltaje de entrada del DAB,  $L_t$  inductancia referida a primario del transformador,  $R_t$  resistencia referida al primario del transformador,  $i_{tp}$  corriente del primario del transformador,  $i_{ts}$  corriente del secundario del transformador,  $V_p$  voltaje primario transformador,  $V_s$  voltaje del secundario del transformador,  $C_{dcL}$  capacitancia del lado bajo voltaje,  $R_i$  resistencia,  $V_{dcL}$  voltaje,  $i_N$  corriente de salida a través de la resistencia de carga  $R_L$ ,  $S, S_1, S_2$  funciones de interrupción.

## 2.1.2 Topologías

Hay una gran cantidad de topologías de los transformadores de potencia que pueden ser clasificados en 4 configuraciones básicas, se les dan los nombres de tipo A, B, C y D, estos tipos se detallan a continuación. Cabe mencionar que estas topologías son direccionales.

### Tipo A

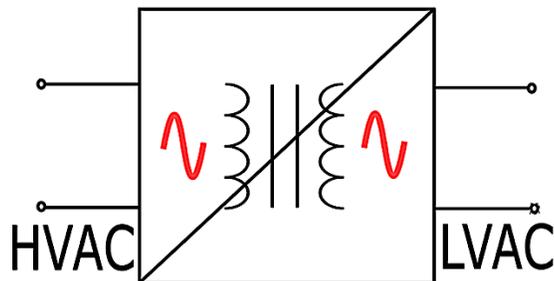


Figura 2.3: Transformador tipo A

Se da un cambio directo de alta tensión (HVAC) a baja tensión (LVAC) en corriente alterna. Estas topologías son de bajo costo y peso debido a su configuración simple, tal como se muestra en la figura 2.3 Es inadecuada para aplicaciones donde se requiera compensación de potencia reactiva, ya que se necesita el bus de DC para

poder realizarla. Las perturbaciones que suceden de un lado afectan al otro, que es un problema que se tiene con los transformadores actuales.

## Tipo B

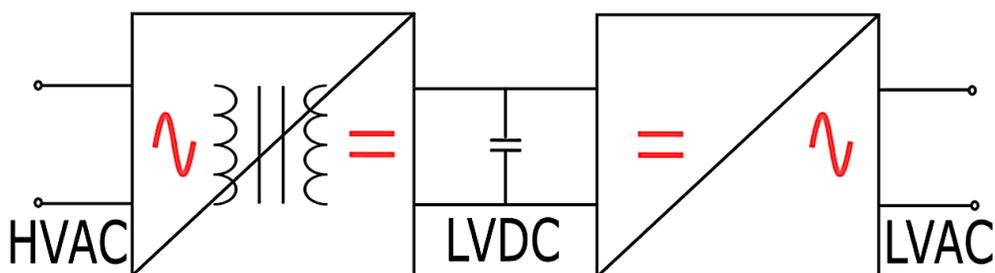


Figura 2.4: Transformador tipo B

La configuración tipo B tiene un aislamiento en la conversión AC/DC que proporciona la baja tensión, seguido por el inversor, tal como se muestra en la figura 2.4. En esta configuración igual que para la C, la compensación de potencia es posible.

## Tipo C

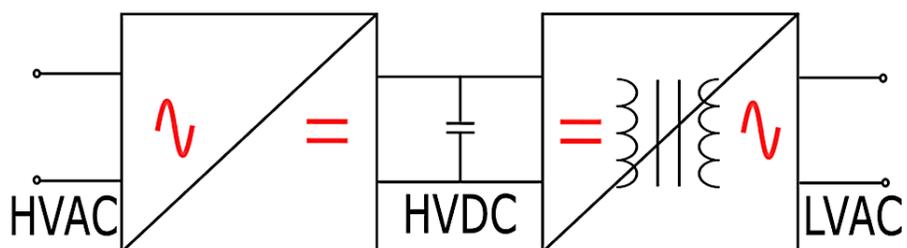


Figura 2.5: Transformador tipo C

En la configuración tipo C, de manera similar al tipo B, se tienen dos etapas de conversión, tal y como se muestra en la figura 2.5. El aislamiento galvánico está del lado de baja tensión.

## Tipo D

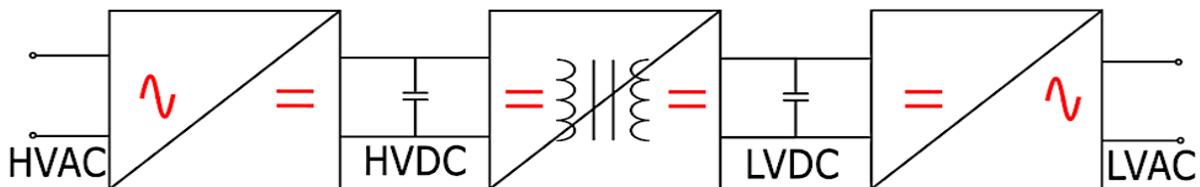


Figura 2.6: Transformador tipo D

Para la configuración tipo D se tienen 3 etapas en la conversión de la energía, primero se pasa de corriente alterna a directa en alta tensión, luego con ayuda de un transformador de alta frecuencia se aísla galvánicamente la carga de la fuente mientras se baja la tensión mediante un convertidor DC/DC, tal como se muestra en la figura 2.6. Por último, se transforma la tensión directa a alterna en baja tensión. [4] [14]

## 2.2 Modelo matemático de un módulo fotovoltaico

El diagrama esquemático de una fuente de corriente en el módulo fotovoltaico se muestra en la figura 2.7, la cual modela un circuito en un arreglo de  $N_s$  celdas en series y  $N_p$  celdas en paralelo

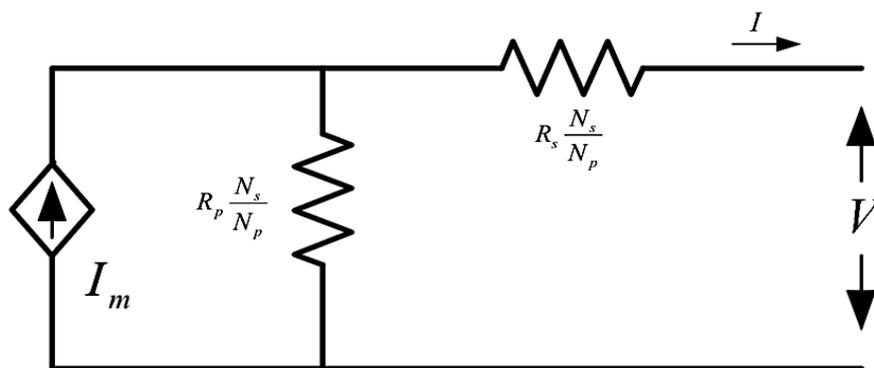


Figura 2.7: Circuito equivalente de un módulo fotovoltaico

Las resistencias en serie y paralelo de un módulo fotovoltaico simple son indicadas por  $R_P$  y  $R_S$ , respectivamente. La salida de voltaje y corriente del módulo PV están denotadas por  $V$  e  $I$ , respectivamente. El módulo de corriente  $I_m$  puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$I_m = I_{PV}N_P - I_0N_P \left[ \exp\left(\frac{V+R_S\left(\frac{N_S}{N_P}\right)I}{V_t a N_S}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

Donde  $N_S$  y  $N_P$  representan el número de módulos en serie y paralelo del arreglo en el módulo fotovoltaico, respectivamente,  $a$  es la constante de idealidad en el diodo, y  $V_t$  es el voltaje térmico del módulo fotovoltaico y se obtiene de la ecuación:

$$V_t = \frac{N_{cs}kT}{q} \quad (8)$$

Donde,  $q$  es la carga del electrón,  $k$  es la constante de Boltzman,  $N_{cs}$  es el número de celdas en serie en el módulo PV, y  $T$  es la temperatura en Kelvins, de la unión P-N.

La corriente fotovoltaica  $I_{PV}$  se obtiene de:

$$I_{PV} = (I_{pvn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (9)$$

Donde,  $I_{PV}$  es la corriente nominal producida en condiciones nominales (25°C y 1000 W/m<sup>2</sup>),  $K_i$  es el coeficiente de temperatura,  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura nominal y ambiente,  $G$  y  $G_n$  son la irradiancia y la irradiancia en condiciones nominales, respectivamente. La corriente de fuga inversa  $I_0$  del diodo se obtiene de:

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{ocn} + K_v \Delta T}{a V_t}\right) - 1} \quad (10)$$

Donde,  $K_v$  es el coeficiente de temperatura en corriente,  $I_{scn}$  es la corriente de corto circuito en condiciones nominales, y  $V_{ocn}$  es el voltaje en circuito abierto en condiciones nominales. [6]

Todas las hojas de datos de los arreglos PV muestran el voltaje de circuito abierto nominal ( $V_{oc}$ ), la corriente de corto circuito nominal ( $I_{sc}$ ), el voltaje en el máximo punto de potencia ( $V_{mpp}$ ), la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), el voltaje de circuito abierto / coeficiente de temperatura ( $K_v$ ), la corriente de corto circuito / coeficiente de temperatura ( $K_I$ ), y la potencia de salida pico máxima experimental ( $P_{Imax}$ ). Esta información siempre es otorgada con referencia a la condición nominal o condiciones de prueba estándar (STC) de temperatura e irradiancia solar. [11]

## 2.3 Seguidor de Punto de Máxima Potencia (MPPT)

### 2.3.1 Características eléctricas de las celdas PV

La figura 2.8 representa la curva de corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). La salida de potencia incrementa cuando incrementa el voltaje en el módulo.

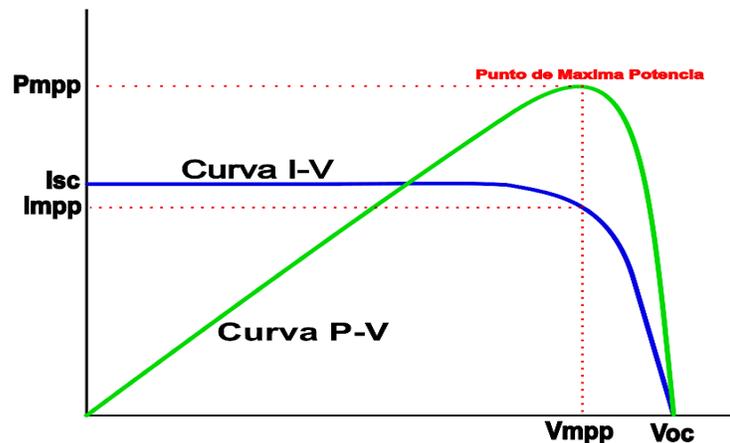


Figura 2.8: Curva I-V y P-V

La eficiencia de la celda solar depende principalmente de la resistencia en serie, irradiancia, temperatura, características de la luz solar y partículas de polvo. [13]

En la curva P-V, existe el denominado máximo punto de potencia (MPP) al cual le corresponden valores de corriente en el punto de máxima potencia  $I_{mpp}$  y de voltaje en el punto de máxima potencia  $V_{mpp}$ , dicho punto es único para cada celda solar y varía conforme cambia la irradiancia solar.

Esta variación plantea la necesidad de realizar un algoritmo capaz de modificar  $V_{pv}$  de manera tal que la energía aprovechada sea la máxima. [12]

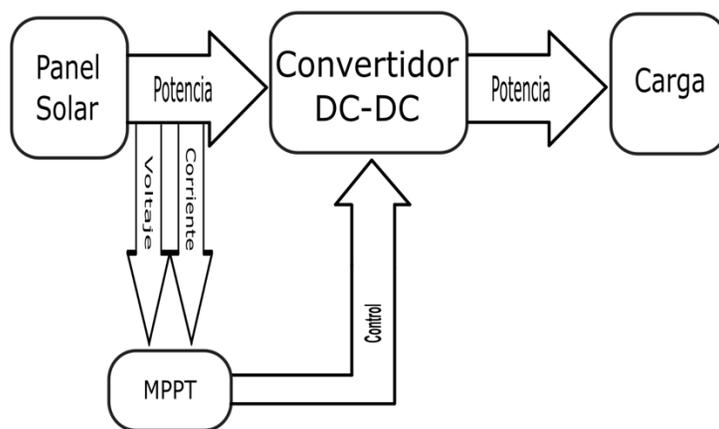


Figura 2.9: Principio del MPPT

### 2.3.2 Técnicas MPPT

En las últimas décadas muchos métodos para buscar el MPPT han sido desarrollados. Éstos difieren en muchos aspectos tales como sensores, complejidad, costo, rango de efectividad, velocidad de convergencia, seguimiento correcto cuando la irradiancia y/o la temperatura cambian, necesidades de hardware para la implementación o popularidad, entre otros. En las tablas 2.1 y 2.2 se muestra un comparativo de técnicas de MPPT [6].

Tabla 2.1 Comparativa de métodos MPPT de acuerdo a su estrategia de control y complejidad

<b>MPPT</b>	<b>Estrategia de Control</b>	<b>Complejidad</b>
Fractional Short Circuit Current	Indirecta	Media
Fractional open circuit voltage	Indirecta	Simple
Perturbation and observation		
Method /hill climbing method	Muestreo	Simple
Incremental conductance method	Muestreo	Media
Computational/look up table	Indirecta	Media
Switching ripple correlation control	Modulación	Complejo
Fuzzy logic	Probabilística	Complejo
Neural Network	Probabilística	Complejo
Sweep MPPT method	Modulación	Complejo
Droop control	Modulación	Simple
PSO based MPPT	Probabilística	Media
ASO based MPPT	Probabilística	Complejo
Genetic algorithm based MPPT	Probabilística	Complejo
CFA based MPPT	Probabilística	Media
Array reconfiguration	Indirecta	Compleja

Tabla 2.2 Comparativa de métodos MPPT de acuerdo a su eficiencia y velocidad.

<b>MPPT</b>	<b>Precisión/Eficiencia</b>	<b>Velocidad</b>
Fractional Short Circuit Current	Baja	Media
Fractional open circuit voltage	Baja	Media
Perturbation and observation		
Method /hill climbing method	Media	Variable
Incremental conductance method	Media	Variable
Computational/look up table	Variable	Rápida
Switching ripple correlation control	Alta	Rápida
Fuzzy logic	Muy alta	Rápida
Neural Network	Muy alta	Rápida
Sweep MPPT method	Alta	Lenta
Droop control	Media	Media
PSO based MPPT	Alta	Rápida
ASO based MPPT	Alta	Rápida
Genetic algorithm based MPPT	Alta	Rápida
CFA based MPPT	Alta	Rápida
Array reconfiguration	Variable	Lenta

### 2.3.2 Diferentes configuraciones para interfaces en sistemas Fotovoltaicos

El seguimiento del punto de máxima potencia en un arreglo PV puede ser alcanzado usando una interface de una o doble etapa. En la configuración de una etapa, un inversor es utilizado para la interfaz entre la red y el arreglo PV.

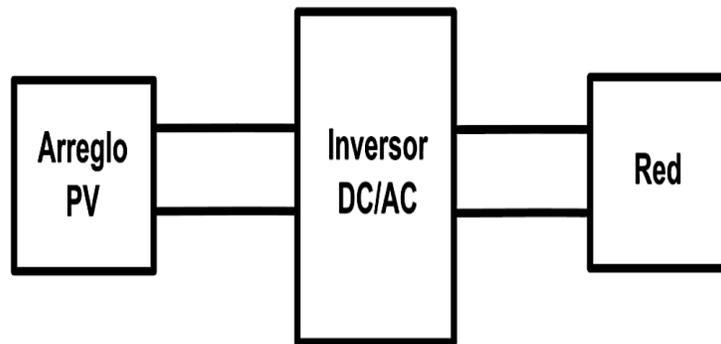


Figura 2.10: Configuración de una etapa

El algoritmo MPPT es implementado para regular la corriente del inversor que resulta en una máxima potencia obtenida del módulo PV. La desventaja de esta configuración es que todo el arreglo PV está operando a un voltaje, mientras el punto de máxima potencia de cada módulo dentro del arreglo puede ser diferente.

En la configuración de etapa doble, el arreglo PV está conectado a un enlace DC del inversor conectado a la red a través de un convertidor DC/DC como se muestra en la figura 2.11. El convertidor DC/DC puede ser un Buck, Boost o de cualquier otro tipo. El convertidor DC/DC está controlado para obtener la máxima potencia del arreglo PV y alimentar el voltaje constante en el enlace DC. El inversor es controlado para regular el enlace DC a un valor constante el cual resulta en una transferencia de la potencia obtenida del módulo PV a la red.

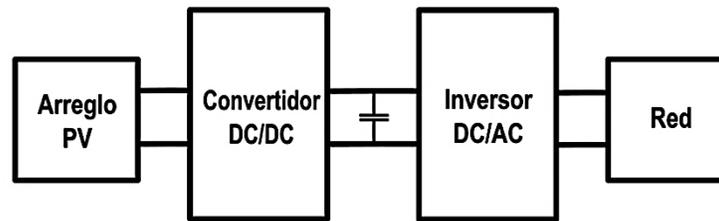


Figura 2.11: Configuración de etapa doble

## 2.4 Redes Neuronales

El cerebro humano es la inspiración principal para el desarrollo de redes neuronales artificiales. Esto no significa que las redes neuronales artificiales son simulaciones exactas de las redes neuronales biológicas que están dentro del cerebro porque el funcionamiento actual del cerebro humano es aún un misterio. La red neuronal es una aproximación matemática que es diseñada para modelar la forma en la cual una neurona biológica responde a un estímulo en particular. La red es implementada usando componentes electrónicos o simulaciones en software. Las redes neuronales usualmente realizan cálculos a través de procesos de aprendizaje. [11]

La red neuronal es un procesador distribuido masivamente en paralelo compuestas de unidades de procesamiento simples las cuales tienen una propiedad natural de almacenar conocimiento experimental y haciéndola disponible para su uso. Se asemeja al cerebro en dos aspectos:

- El conocimiento es adquirido por la red desde su entorno a través procesos de aprendizaje.
- Los pesos sinápticos son usados para almacenar el conocimiento adquirido.
- 

La característica principal de la red neuronal es la habilidad de la red para aprender de su entorno y mejorar su desempeño a través de aprendizaje. Aprende sobre su entorno a través de un proceso interactivo de ajustes aplicados a los pesos sinápticos y bias.

La red se vuelve más experta sobre su entorno después de cada iteración del proceso de aprendizaje. La definición del proceso de aprendizaje implica esta secuencia de eventos:

- La red neuronal es estimulada por su entorno.
- La red neuronal sufre cambios en sus parámetros.
- La red neuronal responde de una forma nueva el entorno porque los cambios han ocurrido en su estructura interna.

El elemento de procesamiento fundamental de una red neuronal es la neurona. Este bloque de construcción de la conciencia humana abarca algunas capacidades generales. Básicamente, una neurona biológica recibe entradas desde otras fuentes, combinándolas de alguna manera, realizando una operación no lineal en el resultado, y entonces muestra el resultado final. La figura 2.12 muestra la relación entre estas cuatro partes de la neurona biológica.

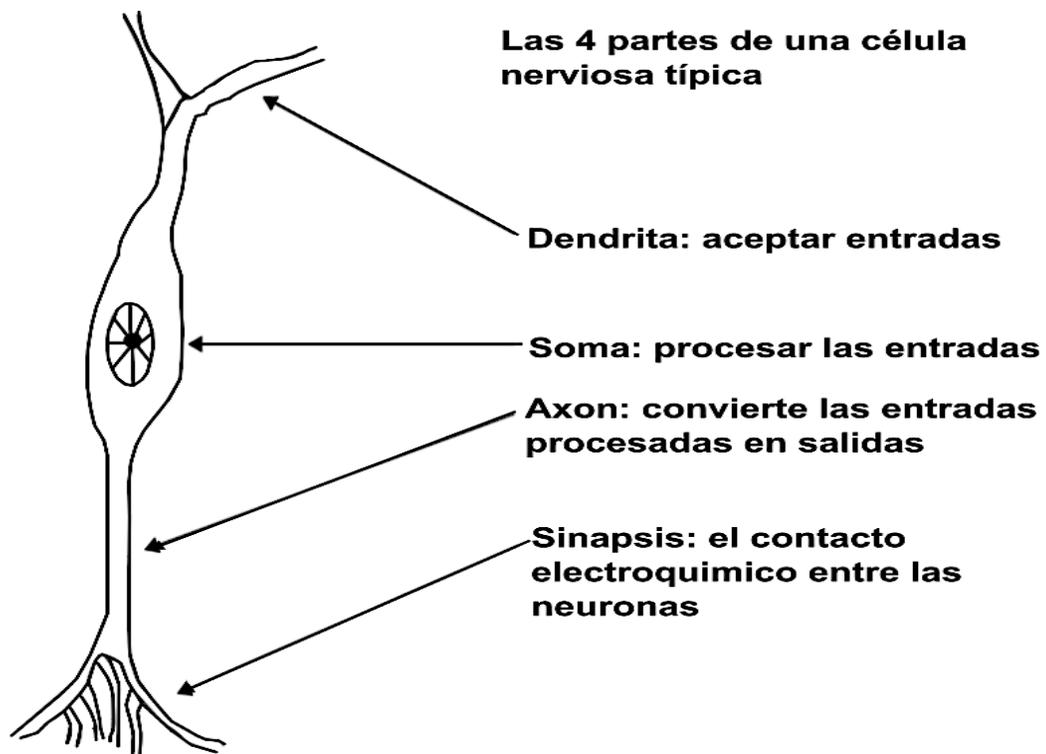


Figura 2.12: Una neurona simple.

Dentro del ser humano hay algunas variaciones en este tipo básico de neurona, complicando aún más los intentos del hombre de replicar eléctricamente el proceso de pensar. Aun así, todas las neuronas naturales tienen los cuatro componentes básicos. Estos componentes son conocidos por sus nombres biológicos – Dendritas, soma, axón y sinapsis. Las dendritas son como extensiones tipo cabello del soma, la cuales actúan como canales de entrada. Estos canales de entrada reciben la señal a través de las sinapsis de otras neuronas. El soma procesa estas señales entrantes a través del tiempo. El soma entonces convierte el valor procesado en una entrada. La cual es enviada a otras neuronas a través del axón y la sinapsis.

Actualmente, el objetivo de las redes neuronales no es la recreación del cerebro. Por el contrario, los investigadores de las redes neuronales están buscando un entendimiento de las capacidades de la naturaleza con las cuales las personas puedan diseñar soluciones para problemas que no pueden ser resueltos por computación tradicional. Para hacer esto, la unidad básica de la red neuronal, la neurona artificial, simula las cuatro funciones básicas de la neurona natural. La figura 2.13 muestra la representación fundamental de la neurona artificial.

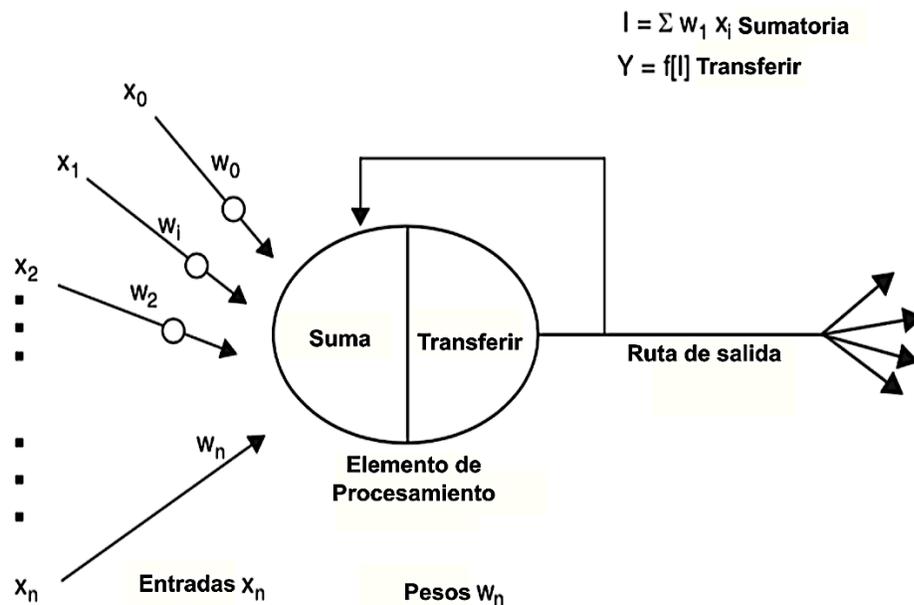


Figura 2.13 Neurona artificial básica

Varias entradas a la red son representadas matemáticamente con el símbolo  $x(n)$ . Cada una de estas entradas son multiplicadas por un peso de conexión. Estos pesos son representados por  $w(n)$ . En el caso más simple, estos productos son sumados simplemente, alimentados a través de una función de transferencia para generar un resultado, y entonces la salida. Este proceso se presta a la implementación física a gran escala en un empaque pequeño. Esta implementación electrónica es aún posible con otras estructuras de redes, las cuales utilizan diferentes funciones de suma, así como funciones de transferencias.

Las redes neuronales pueden dividirse en redes unidireccionales (feedforward) y redes recurrentes, en función de cómo estén realizadas las conexiones entre neuronas: en las redes unidireccionales las neuronas están conectadas siguiendo el sentido de entrada hacia salida, mientras que las redes recurrentes tienen conexiones en ambos sentidos.

La estructura de una red neuronal viene determinada por la disposición de las neuronas y de sus funciones de activación. Las neuronas se agrupan en capas, considerándose como “ocultas” aquellas que no corresponden a la capa de entrada (las neuronas que actúan como entrada de señales o valores externos) y la capa de salida (las neuronas que suministran su salida al exterior)

La principal característica de las redes neuronales es su capacidad de aprendizaje. Esto consiste en el ajuste de los pesos de las conexiones entre neuronas de una forma iterativa para conseguir un efecto deseado, el de “aprender” las relaciones existentes entre pares de valores de vectores de entradas-salidas que se le suministran, o encontrar un patrón común en datos de entrada para poder clasificar de acuerdo a los distintos patrones. Se pueden distinguir tres tipos de aprendizaje:

1. **Aprendizaje supervisado:** se suministran a la red neuronal tanto el valor del vector de entradas, como el valor del vector de salidas (valor del vector de salidas esperado correspondiente a cada valor del vector de entradas). Durante el proceso de aprendizaje, la red neuronal ajusta sucesivamente el peso de las conexiones de forma que se minimiza el error entre los valores del vector de salidas de la red neuronal y los valores del vector de salidas esperado. Este tipo

de aprendizaje es usual en aproximación de funciones no lineales con redes neuronales.

2. **Aprendizaje no supervisado:** la red neuronal no recibe ningún valor esperado del vector de salidas (de ahí lo de aprendizaje no supervisado), pero busca en los valores del vector de entradas alguna propiedad o correlación que los permita clasificar de acuerdo a la misma.
3. **Aprendizaje reforzado:** es un caso especial de aprendizaje supervisado en el que el valor del vector de salidas esperado no es suministrado, sino que únicamente se suministra a la red neuronal la información precisa de si el valor del vector de salidas es igual o no al esperado, en una especie de retroalimentación de ajuste.

Las neuronas están conectadas en diferentes capas con valores de pesos sinápticos. El algoritmo de aprendizaje intenta mapear la relación de entrada y salida actualizando los valores de pesos sinápticos. La salida generada por la red se compara con la salida deseada y luego se calcula el error. Por lo tanto, los valores de pesos y sesgos de la red se actualizan en base al error. La función de activación se aplica a la entrada ponderada para la salida de la red. Este ciclo continuará hasta que se logre la salida deseada.

### 2.4.1 Ventaja de las redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales ofrecen ventajas como [24]:

**No linealidad.** El procesador neuronal es básicamente no lineal y, por consecuencia, la red neuronal también.

**Transformación entrada-salida.** El proceso de aprendizaje consiste básicamente en representar a la red un ejemplo y modificar sus pesos sinápticos de acuerdo con su respuesta. Aprende, por lo tanto, una transformación entrada/salida.

**Adaptabilidad.** La red tiene la capacidad de adaptar sus parámetros, aun en tiempo real.

**Tolerancia a fallas.** Debido a la interconexión masiva, la falla de un procesador no altera seriamente la operación.

**Uniformidad en el análisis y diseño.** Esto permite garantizar características precisas.

**Analogía con las redes biológicas.** Esto permite la utilización mutua del conocimiento de las dos áreas.

## 2.4.2 Algoritmos de aprendizaje

### 2.4.2.1 Corrección de error

Considérese la  $n$ -ésima neurona en la iteración  $k$ ;  $d_n(k)$  es la respuesta deseada para la neurona  $n$ ;  $y_n$  es la respuesta de la neurona;  $x(k)$  es el vector estímulo del ambiente, y  $\{x(k), d_n(k)\}$  es el par de entrenamiento.

La presencia de un ambiente estocástico implica la necesidad de utilizar una descripción probabilística. Considérese la siguiente señal de error:

$$e_n(k) = d_n(k) - y_n(k) \quad (11)$$

El objetivo es minimizar una función de costo (criterio), que considera este error. Una vez seleccionado el criterio, el problema de aprendizaje por corrección de error se convierte en uno de optimización.

### 2.4.2.2 Regla de Hebb

Es un mecanismo variante en el tiempo, local y altamente interactivo, para incrementar la eficiencia de la sinapsis como una función de la correlación entre las actividades pre y postsinápticas.

*Variante en el tiempo.* Depende del tiempo exacto en que ocurran las actividades pre y postsinápticas.

*Local.* La sinapsis está definida en el espacio y en el tiempo. Esto es usado en la regla de Hebb para producir una modificación local.

*Interactiva.* Depende los niveles de activación pre y postsináptico.

*Correlación.* Depende de la presencia conjunta de los dos niveles de activación (conjuncional).

Se pueden interpretar en términos estadísticos como correlación (o correlacional). Correlación positiva implica incremento. No correlación o correlación negativa implica decremento. Existen dos variantes de la regla de Hebb, la Anti-Hebb (-Hebb) y la no Hebb; cabe destacar que existe evidencia biológica para las tres variantes.

### **2.4.2.3 Aprendizaje competitivo**

En este tipo de aprendizaje las neuronas de la capa de salida (conectadas a la salida) compiten entre sí, para ser la única ganadora (activa o disparada). Una sola neurona se dispara a cada iteración de  $k$ . Este esquema resulta particularmente ventajoso para describir características importantes en el reconocimiento de patrones (agrupamientos, grupos o “clusters”).

Existen tres componentes básicos de la regla de aprendizaje competitivo:

- *Conjunto de neuronas*, con la misma función de activación, pero con pesos diferentes distribuidos aleatoriamente.
- *Un límite en la suma de los pesos de cada neurona*(*strength*)
- *Un mecanismo* para que cada neurona compita por responder

La neurona que gana se denomina ganadora toma todo (“*winner take it all*”). Cada neurona se especializa en detectar una característica particular.

### **2.4.2.4 Aprendizaje tipo Boltzman**

Se llama así en honor de L. Boltzman. Constituye un aprendizaje estocástico (descripción probabilística) basado en la teoría de la información y consideraciones termodinámicas. La red neuronal con este tipo de regla de aprendizaje posee una estructura recurrente de operación binaria.

Neurona  $j$  disparada  $\rightarrow s_j = 1$

Neurona  $j$  apagada  $\rightarrow s_j = -1$

Esta caracterizada por la siguiente función de energía:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m w_{ji} s_j s_i \quad (12)$$

Con  $i \neq j$ ; es decir no hay autorrealimentación.

## 2.5 Dual Active Bridge (DAB)

El convertidor DAB consiste de dos puentes H los cuales están interconectados a través de un transformador de alta frecuencia como se ilustra en la figura 2.14

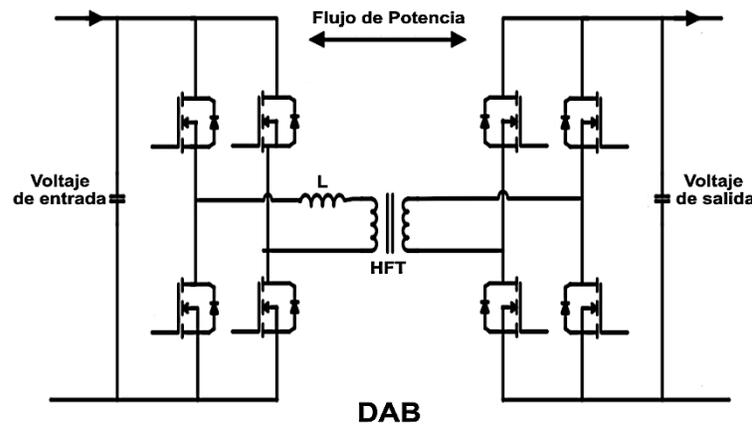


Figura 2.14: Convertidor Dual Active Bridge (DAB)

Cada puente es controlado de tal manera que, genera un voltaje de onda cuadrada en alta frecuencia en las terminales del transformador. Los voltajes generados de los dos puentes H tienen la misma frecuencia con un ciclo de trabajo fijo del 50%. Las dos ondas cuadradas están desplazadas en fase con respecto una de la otra para controlar el flujo de potencia a través del transformador. El convertidor DAB puede transferir

potencia de  $V_1$  a  $V_2$  y viceversa dependiendo en cual puente se genere la onda cuadrada. Cuando  $V_1$  conduce  $V_2$ , la potencia fluye del suministro conectado en la terminal  $V_1$  a la terminal  $V_2$ . [15]

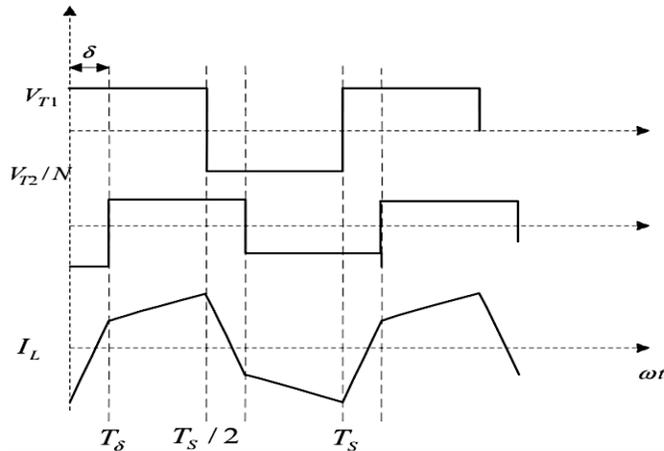


Figura 2.15: Principio de operación del convertidor DAB

La figura 2.15 representa la forma de onda de la operación típica del DAB, donde  $\delta$  es el cambio de fase de la señal PWM voltajes entre el lado primario y secundario generados en los dos convertidores puente H. El voltaje  $V_1$  es más grande que el  $V_2$  en este caso. La forma de onda de la corriente fluyendo en el inductor se muestra como:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{T1}(t) - V_{T2}(t)/N}{L_S} \quad (13)$$

Resolviendo la ecuación anterior para cada periodo de tiempo del ciclo anterior da las siguientes ecuaciones

Para  $0 < \theta < \delta$

$$i_L(\theta) = \left( \frac{V_{T1} + \frac{V_{T2}}{N}}{\omega L_S} \right) \theta + i_L(0) \quad (14)$$

Para  $\delta < \theta < \pi$

$$i_L = \left( \frac{V_{T1}(t) - \frac{V_{T2}(t)}{N}}{\omega L_S} \right) (\theta - \pi) + i_L(\delta) \quad (15)$$

Usando el principio de que el valor promedio de la corriente en un inductor sobre un ciclo debe ser cero, se puede obtener la expresión para la corriente en el tiempo cero de las ecuaciones (12) y (13)

$$i_L(0) = - \left( \frac{2 \left( \frac{V_{T2}}{N} \right) \delta + V_{T1} \pi - \left( \frac{V_{T2}}{N} \right) \pi}{2 \omega L_S} \right) \quad (16)$$

A partir de la ecuación de la corriente en diferentes intervalos y los voltajes que se tienen la ecuación para la potencia nominal de un DAB sobre un ciclo de operación queda de la siguiente forma:

$$P_0 = \int_0^{T_s} V_{T1}(\theta) i_L(\theta) d\theta \quad (17)$$

Resolviendo la ecuación anterior queda la expresión que define la transferencia de potencia en el DAB.

$$P_0 = \frac{V_{in} V_2 \delta (\pi - \delta)}{\omega L_S \pi N} \quad (18)$$

Donde,  $V_{in}$  y  $V_2$  son los voltajes en las terminales del lado DC de los dos puentes,  $N$  es la relación de vueltas en el transformador  $L_S$  es la inductancia total en serie, y  $\omega = 2\pi f$  donde  $f$  es la frecuencia de operación del convertidor. [23]

### 2.5.1 Métodos de control de cambio de fase

En años recientes, una cantidad de tópicos han sido investigados por diversos investigadores buscando mejorar la eficiencia de los sistemas basados en

convertidores DC-DC bidireccionales (BDC) y estos estudios son generalmente acerca de los métodos de control de cambio de fase y sus diferentes variaciones.

El método de control mas utilizado en la literatura es el cambio de fase simple (SPS). Además, existen otros métodos como Cambio de fase Extendido (EPS) y cambio de fase Dual (DPS). Los BDC aislados usualmente usando el método simple con topología de puente completo. Por lo tanto, estos métodos de control de cambio de fase basados en PI son aplicados a la fase simple, con puente completo y transformador de aislamiento.

### 2.5.1.1 Control de cambio de fase simple (SPS)

El control por cambio de fase simple es el método de control convencional y el más extensamente usado en las investigaciones, porque teórica y experimentalmente son mas sencillos de analizar. Las señales de activación se definen al crear  $\delta$  entre la etapa A (interruptores S1-S4) y etapa B (interruptores S1b-S4b). La figura 2.16 y 2.17 muestran el ángulo de cambio de fase entre los voltajes nominales contra la corriente del inductor, donde el periodo  $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6$ . La tabla 2.3 muestra los estados en los interruptores (condiciones de encendido) en el control SPS. [19]

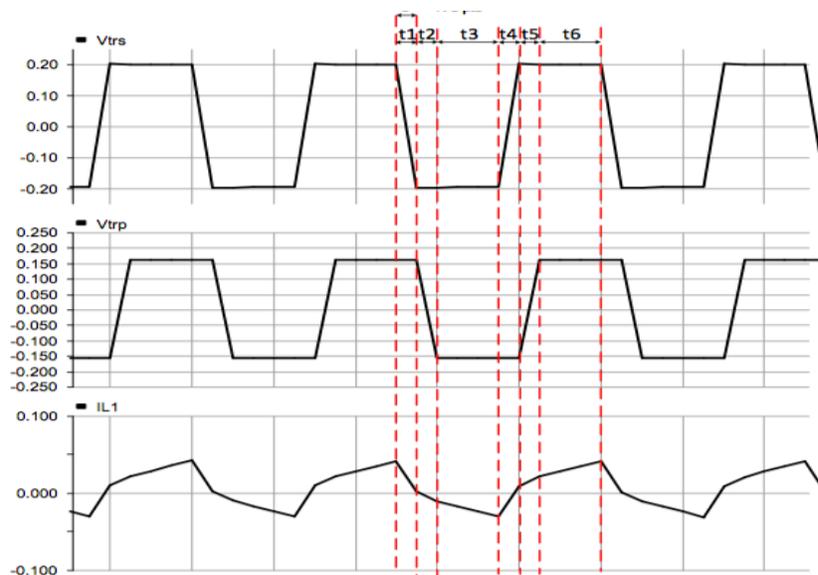


Figura 2.16: SPS Flujo de potencia de  $V_1$  a  $V_2$

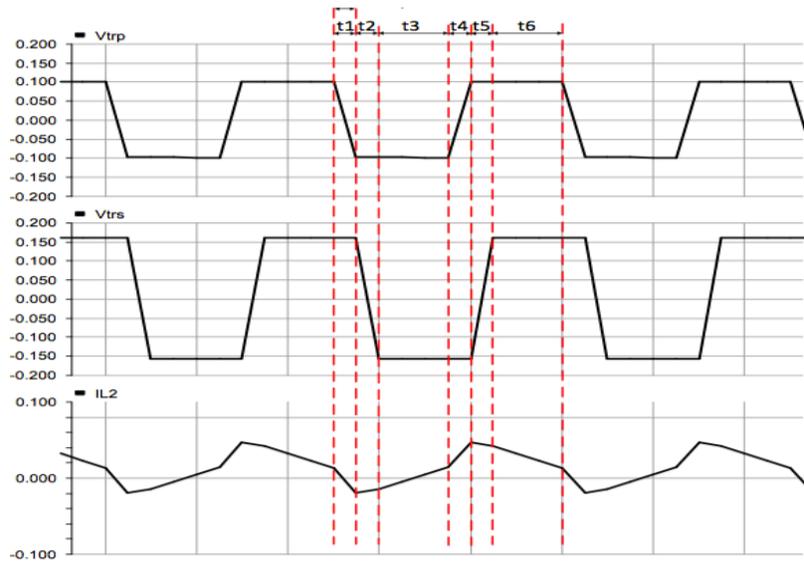


Figura 2.17: SPS Flujo de potencia de de  $V_2$  a  $V_1$   
a  $V_1$

Tabla 2.3 Estado de los interruptores cuando el flujo de potencia es  $V_1$  a  $V_2$  (SPS)

$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
$D_3, D_2$	$S_3, S_2$	$S_3, S_2$	$D_1, D_4$	$S_1, S_4$	$S_1, S_2$
$D_{1b}, D_{4b}$	$S_{1b}, S_{4b}$	$D_{2b}, D_{3b}$	$D_{2b}, D_{3b}$	$S_{2b}, S_{3b}$	$D_{1b}, D_{4b}$

### 2.5.1.2 Control de cambio de paso extendido (EPS)

Comparado con el método SPS, el EPS puede mejorar la eficiencia en buena medida. Reduce los cambios bruscos en la corriente y el flujo inverso de potencia considerablemente. Además, da buenos resultados aun cuando trabaja con rangos amplios de voltaje de entrada y salida bajo cargas ligeras y medianas. Su implementación es mas compleja que el método SPS.

En el control EPS los interruptores  $S_1$ - $S_2$ ,  $S_3$ - $S_4$ ,  $S_{1b}$ - $S_{2b}$ - $S_{3b}$ - $S_{4b}$  tienen diferentes ángulos de fase. La figura 2.18 y figura 2.19 muestran las formas de onda de los voltajes nominales y las corrientes en el inductor; y la tabla 2.4 muestra los estados de interrupción (condiciones de encendido) del método EPS.

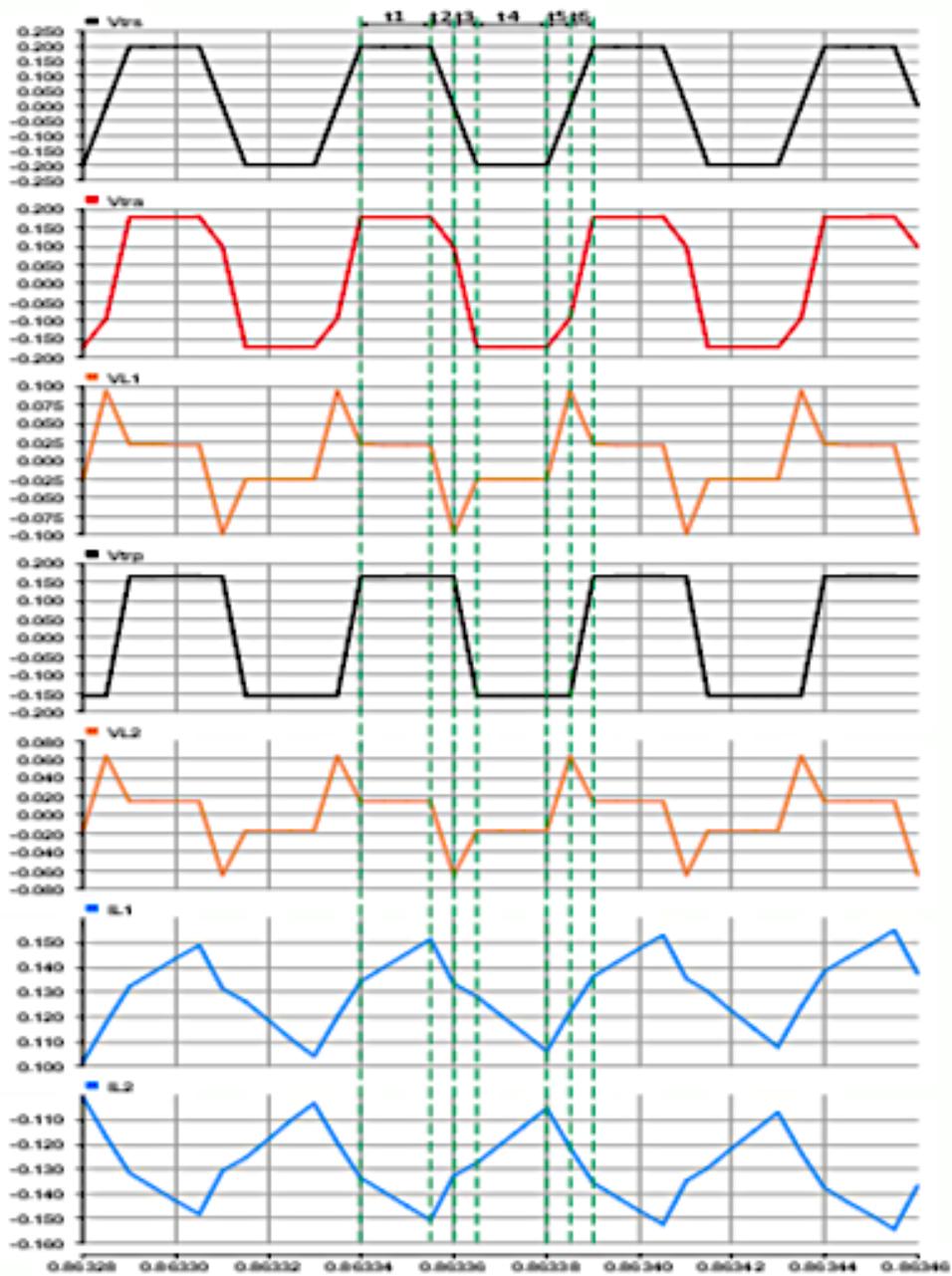


Figura 2.18: Control EPS, flujo de potencia de  $V_1$  a  $V_2$

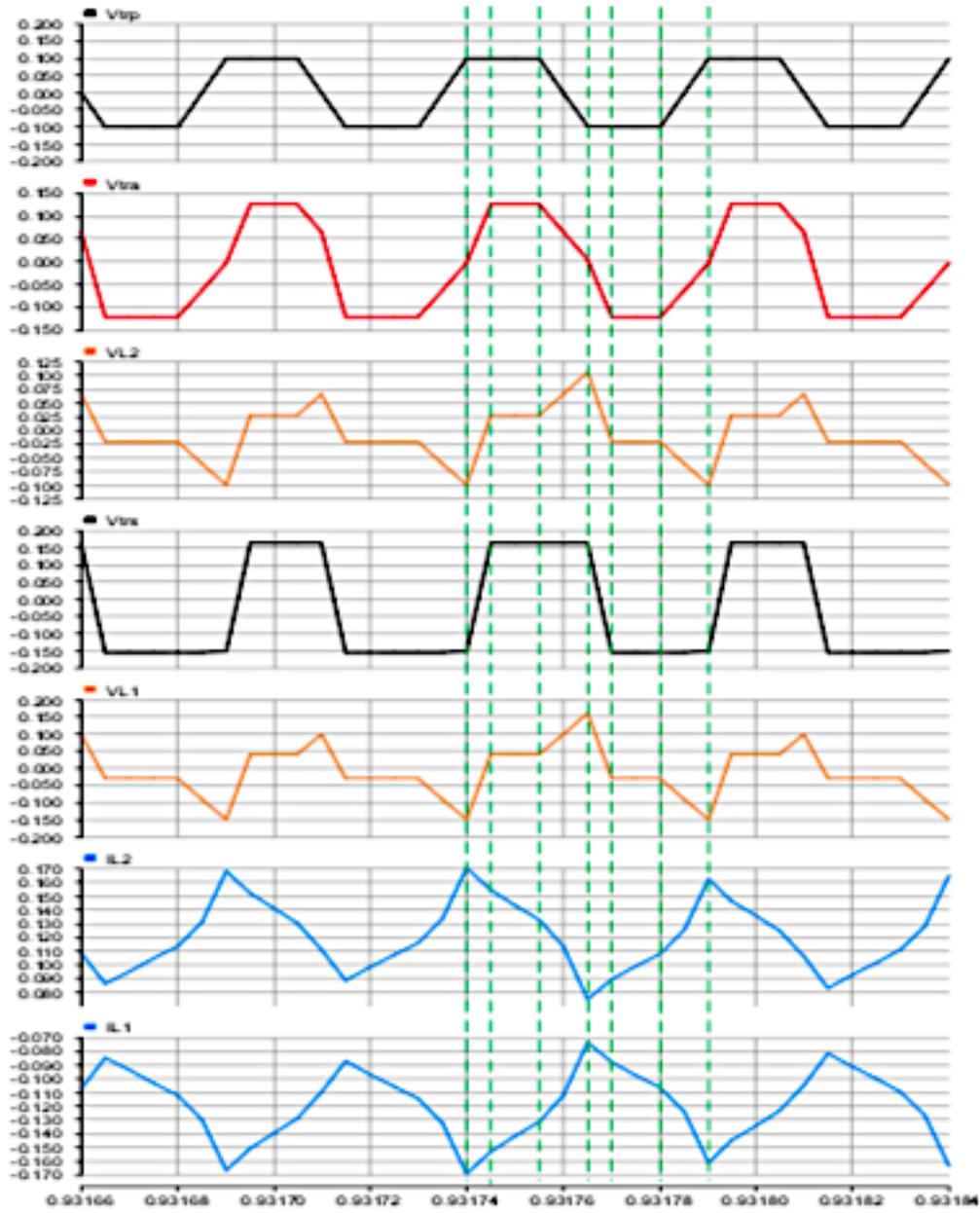


Figura 2.19: Control EPS, flujo de potencia de  $V_2$  a  $V_1$ .

Tabla 2.4 Estado de los interruptores cuando el flujo de potencia es  $V_1$  a  $V_2$  (EPS)

$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
$D_2, S_4$	$S_2, D_4$	$S_2, S_3$	$D_1, S_3$	$S_1, D_3$	$S_1, S_4$
$D_{1b}, D_{4b}$	$S_{1b}, S_{4b}$	$D_{2b}, D_{3b}$	$D_{2b}, D_{3b}$	$S_{2b}, S_{3b}$	$D_{1b}, D_{4b}$

### 2.5.1.3 Control de cambio de fase dual (DPS)

Cuando el rango de voltaje de los dos lados del transformador se incrementa, los cambios bruscos en la corriente alcanzan valores elevados. Esta condición da a lugar a usar componentes con requerimientos de volt-amperes muy elevados. Para minimizar el peso y volumen, la frecuencia de interrupción debe incrementarse. Bajo esta condición, incrementar los cambios bruscos en la corriente ocasiona pérdidas en las interrupciones y gran reducción en la eficiencia. Por lo tanto, para alcanzar un mejor desempeño, el método de control DSP debe ser usado en vez de incrementar la frecuencia de interrupción.

El control DSP tiene cálculos complejos y su modelado es mas difícil comparado con SPS y EPS. Si se toman en cuenta los efectos de la banda muerta en consideración, la complejidad del control DPS podría incrementarse. Todos los interruptores tienen diferentes ángulos de fase en DPS. En otras palabras, los interruptores S1-S2, S3-S4, S1b-S2b, S3b-S4b tienen diferentes ángulos entre si. Figuras 2.20 y figuras 2.21 también presentan los voltajes nominales contra las corrientes en el inductor. La tabla 2.5 proporciona los estados de interrupción (Encendido – Apagado) del control DPS.

**Tabla 2.5 Estado de los interruptores para el control DPS cuando  $V_1 > V_2$**

<b>Tiempo</b>	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$
<b>ON</b>	$S_3$	$S_2$	$S_{3b}$	$S_{2b}$	$S_4$	$S_1$	$S_{4b}$	$S_{1b}$
<b>OFF</b>	$S_{2b}$	$S_1$	$S_{4b}$	$S_{1b}$	$S_3$	$S_2$	$S_{3b}$	$S_{2b}$

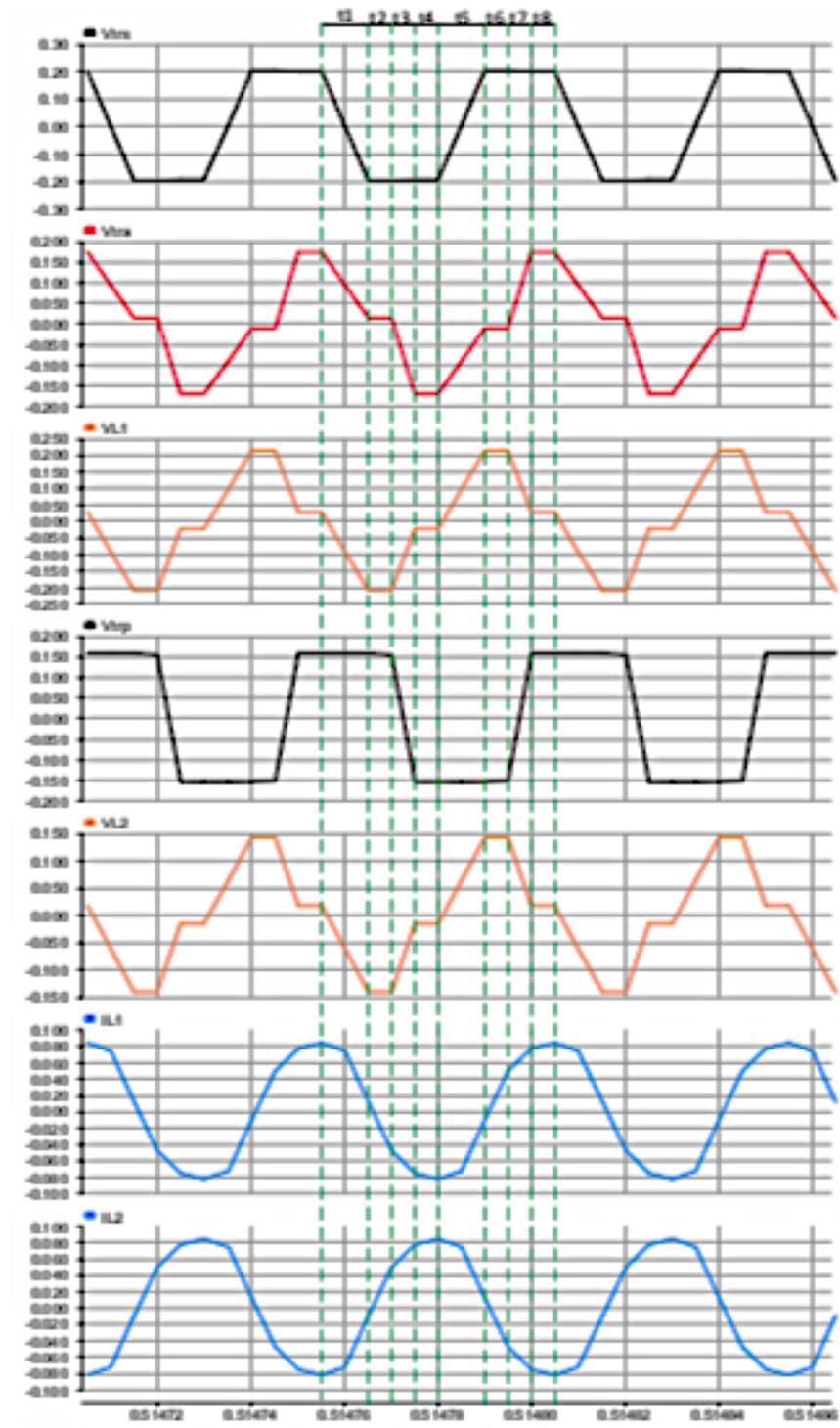


Figura 2.20: Control DPS, flujo de potencia de  $V_1$  a  $V_2$

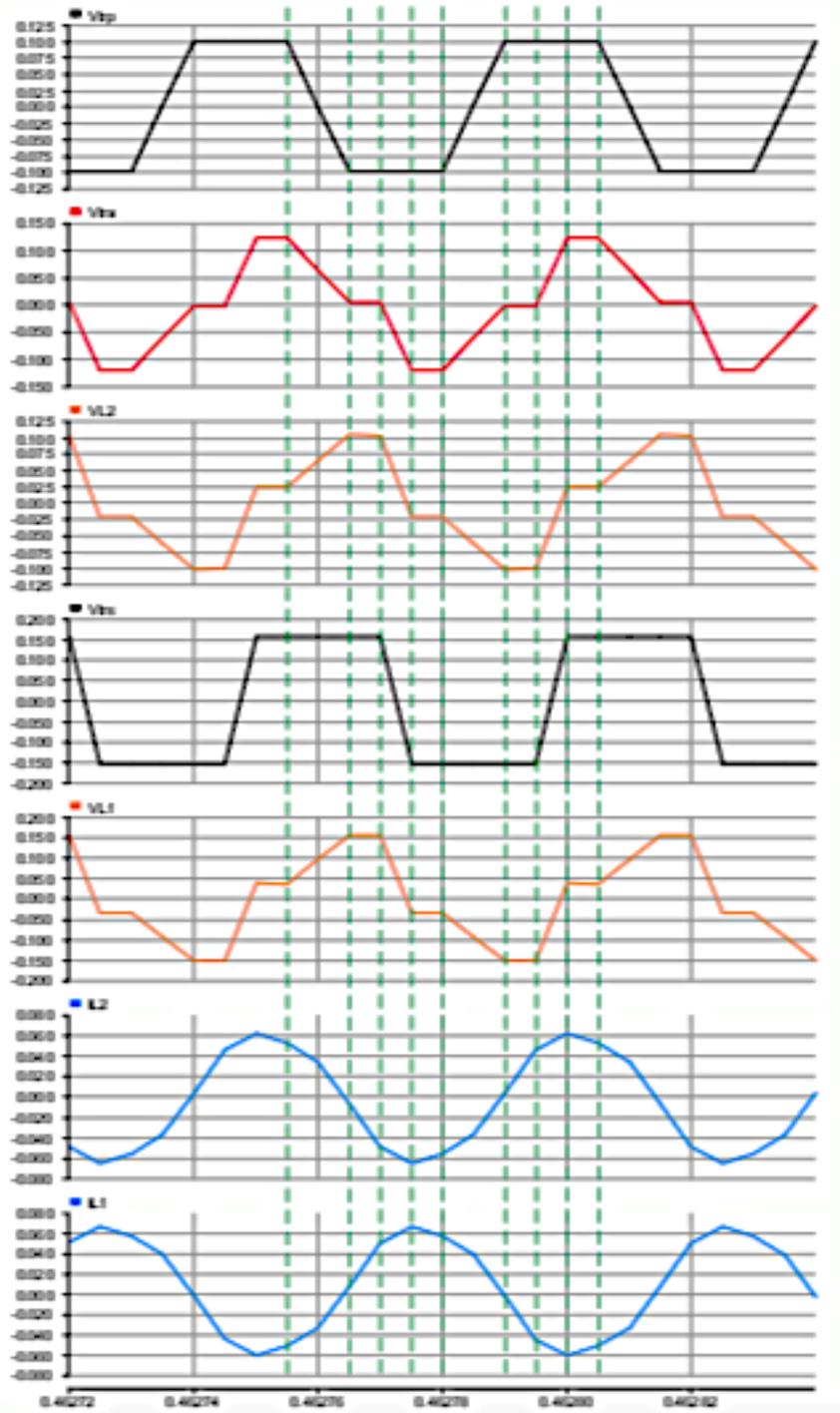


Figura 2.21: Control EPS, flujo de potencia de  $V_2$  a  $V_1$

## 2.6 Transformador de Alta Frecuencia

Los transformadores utilizados en sistemas de potencia (50-60 Hz), suelen funcionar a tensión y frecuencia relativamente constante, y las características eléctricas suelen ser: gran rendimiento, poca regulación de tensión y corriente de excitación débil. Sin embargo, en muchas aplicaciones importantes de los transformadores, la tensión y la frecuencia varían entre amplios límites.

Por ejemplo, cabe mencionar los sistemas utilizados en la transmisión de sonido, en los cuales los transformadores deben funcionar en toda la banda de frecuencias audibles. Otras aplicaciones importantes de los transformadores se dan en circuitos de mando, medida y comunicaciones: para cambiar la tensión de un generador, para cambiar la impedancia aparente de una carga, para aislar la corriente continua entre circuitos, para permitir puestas a tierra independientes de los circuitos primario y secundario, o para invertir la fase de una tensión.

Es importante resaltar que aun siendo un dispositivo de diseño relativamente sencillo (carece de partes móviles), su desarrollo en procesos que requieren trabajar a alta frecuencia, puede ser compleja debido al comportamiento no lineal de algunos de sus parámetros y a la dependencia de la frecuencia de otros. Además, durante su funcionamiento a estas frecuencias, se llevan a cabo procesos físicos relevantes a gran velocidad.

Como sea que las características internas del transformador también dependen de la frecuencia, su comportamiento no será el mismo para las distintas ondas senoidales del espectro. En definitiva, en la transformación se originarán distorsiones de mayor o menor consideración. En el trazado del circuito equivalente del transformador de AF, intervienen de forma determinante las capacidades entre espiras y entre devanados.

En primer lugar, recordar que una bobina real puede representarse de acuerdo al esquema de la Figura 2.20 (a) donde se muestran las capacidades entre espiras de forma simplificada. Además, el conductor que conforma la bobina  $L$  tiene una resistencia  $R$ , lo cual lleva a considerar el esquema de la Figura 2.20 (b) la base de

características localizadas meramente aproximado; si se analiza, se advierten imperfecciones:

- La bobina puede poseer núcleo ferromagnético, lo cual conlleva pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas. - Incluso sin material ferromagnético, la presencia de masas conductoras provoca pérdidas por corrientes parásitas.
- La existencia de materiales ferromagnéticos puede ser causa de que  $L$  no sea lineal.
  - Con frecuencias elevadas se acusa el “efecto piel” (la variabilidad de la resistencia  $R$ ).

De acuerdo a estas premisas, y aún siendo resultado de simplificaciones conceptuales, es posible trazar un equivalente para el transformador alta frecuencia apropiado, mostrado en la figura 2.22

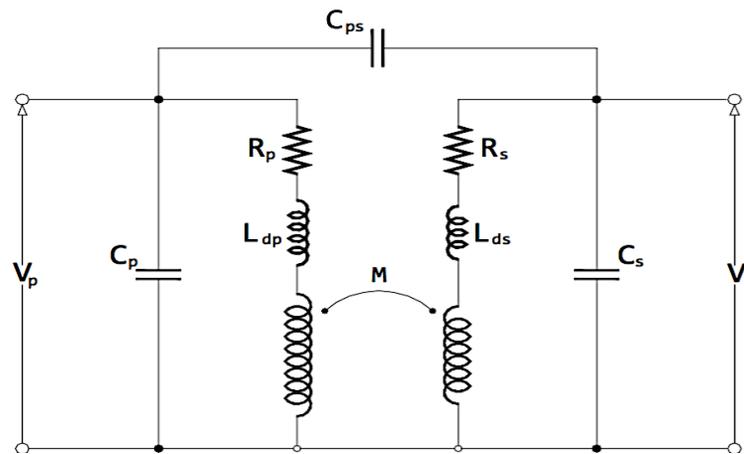


Figura 2.22: Circuito Equivalente Transformador Alta Frecuencia

Donde  $R_p$  y  $R_s$ , son las resistencias de los devanados primario y secundario, respectivamente.  $L_{dp}$  y  $L_{ds}$ , son las reactancias de dispersión de los devanados primario y secundario.  $M$ , es la inductancia mutua entre el devanado primario y secundario.  $C_p$  y  $C_s$  son las capacitancias en paralelo de los devanados primario y secundario.  $C_{ps}$ , es la capacitancia entre el devanado primario y el secundario.

El circuito equivalente de la figura 2.22, podría ser más complicado si se quisiera representar las pérdidas en el núcleo del transformador. Se prescinde de ellas en atención a lo reducidas que suelen ser a frecuencias elevadas.

### 2.6.1 Características de amplitud y fase

En un gran número de aplicaciones de los transformadores a la técnica de las comunicaciones, es fundamental que no exista distorsión entre las señales de entrada y salida, es decir, que las funciones que las representan sean lo más semejantes posible.

En la transformación de tensión de una onda sinusoidal se suele dar:

- La relación entre amplitudes  $V_p / V_s$ ,
- El desfase  $\varphi_{ps}$ , entre los vectores  $V_p$  y  $V_s$ .

Es evidente la dependencia de la frecuencia, tanto del cociente de las tensiones de entrada y salida, como del ángulo de desfase entre ambas.

A la característica  $V_p / V_s$  función de la frecuencia, se la denomina de amplitud-frecuencia, también respuesta a la frecuencia y, más impropia, característica de frecuencia (lo ideal es que esta característica sea plana o muy aplanada).

La característica anterior, por si sola, no evita la distorsión. Al ser el desfase  $\varphi_{ps}$ , función de la frecuencia, unas componentes frecuenciales sufrirán corrimiento de fase respecto a otras. La función de  $\varphi_{ps}$  constituye la característica desfase-frecuencia o, brevemente, característica de fase. [17]

### 2.6.2 Calculo de parámetros

Obtener un modelo de transformador en Simulink con el cual se pueda trabajar en alta frecuencia es llevado a cabo mediante el re-diseño de los parámetros del modelo del

transformador. El rediseño se ejecuta para la configuración del núcleo del transformador mostrado en la figura 2.23 usando las ecuaciones fundamentales de diseño de transformador expresadas como:

$$R_c = \frac{I_{oc}}{V_p} \quad (19)$$

$$L_m = \frac{\left(\frac{V_p}{I_{om}}\right)}{2\pi f} \quad (20)$$

$$L_p = \frac{4\pi(MTL)N_p^2}{a} \left(c + \frac{b_1+b_2}{3}\right) \quad (21)$$

$$L_s = \frac{4\pi(MTL)N_s^2}{a} \left(c + \frac{b_1+b_2}{3}\right) \quad (22)$$

Donde  $R_c$  Corresponde a pérdidas en el núcleo,  $L_m$  Componente de reactancia magnética,  $V_p$  Voltaje en el primario,  $N_p$  Número de vueltas en el primario,  $N_s$  Número de vueltas en el secundario,  $L_p, L_s$  Representan las inductancias de fuga. Además, la corriente sin carga en el transformador es la adición del vector de la corriente por pérdidas en el núcleo ( $I_{oc}$ ) y la corriente de magnetización ( $I_{om}$ ). [4]

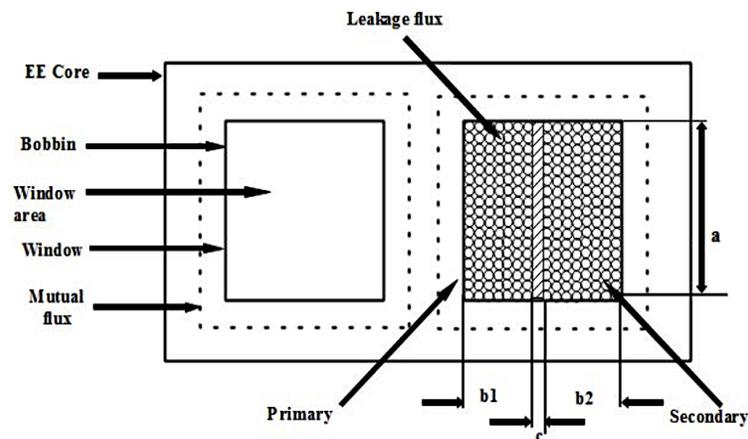


Figura 2.23: Configuración del núcleo del transformador.

## 2.7 Inversor

Son usados para convertir corriente DC en corriente AC en sistemas PV, donde diferentes tipos de inversores producen una diferente “calidad” de electricidad. Así, el usuario debe emparejar la calidad de la energía requerida de acuerdo a sus cargas con la calidad de la energía producida por el inversor. Discrepancias importantes existen entre la generación de potencia con módulos PV y los requerimientos de la red pública. El trabajo del inversor es conectar los sistemas y alimentar con energía solar a la red procurando la mayor eficiencia posible.

El inversor puede ser obtenido con un circuito similar al mostrado en la figura 2.24. Los interruptores ideales en el circuito pueden ser seleccionados dependiendo de la potencia y el voltaje requerido.

Una estrategia simple de control para obtener una salida en el inversor es apagar y encender los interruptores a la frecuencia AC requerida para obtener una onda de voltaje cuadrada, pero con altas armónicas en voltaje y corriente. Se puede reducir usando técnicas de modulación de ancho de pulso en alta frecuencia para disminuir la distorsión armónica y proveer control de voltaje en la carga.

El contenido armónico puede causar sobrecalentamiento en el caso de cargas con motor debido a elevadas pérdidas en el cobre, así como campos magnéticos desiguales que pueden afectar la operación. Cargas electrónicas sensibles pueden también mostrar operaciones erráticas.

Esquemas de control avanzados y topologías creativas permiten crear una señal AC con baja distorsión armónica; un diseño trifásico es posible incorporando interruptores adicionales.

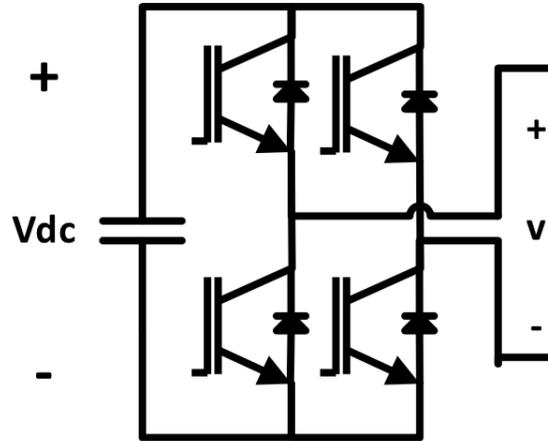


Figura 2.24: Circuito simple de un inversor

La eficiencia indica el porcentaje de energía solar disponible la cual se convierte y alimenta la red. Los inversores modernos consumen entre el 4 y 8% de la energía en el proceso de conversión, lo cual corresponde a una eficiencia en general del 92-94%. Reducir este bajo consumo de energía es un desafío técnico mayor, y uno el cual solo puede ser alcanzado con nuevos diseños innovadores. [11]

## Capítulo 3

### Descripción del sistema

#### 3.1 Arreglo módulos Fotovoltaicos

Se utilizará MATLAB/SIMULINK para llevar a cabo la simulación del sistema. Dicho software cuenta con un bloque con el cual es posible simular el arreglo fotovoltaico, (Figura 3.1) ingresando los valores incluidos en la hoja de datos del modelo seleccionado, cuyos valores se anexan a continuación.

Tabla 3.1 Características módulo Fotovoltaico

Marca	Modelo	Módulos
Solartec	S60PC-260	14 (2x7)

Descripción	Unidades	
Voltaje Circuito Abierto (Voc)	36.64	V
Voltaje punto maximo potencia (Vmpp)	30.84	V
Corriente de corto circuito (Isc)	7.13	A
Corriente Punto maximo de potencia (Impp)	6.75	A
Potencia máxima	208	W
Eficiencia	16.01	%
<b>Coefficientes de temperatura</b>		
de Isc	0.01	%/C
de Voc	-0.31	%/C

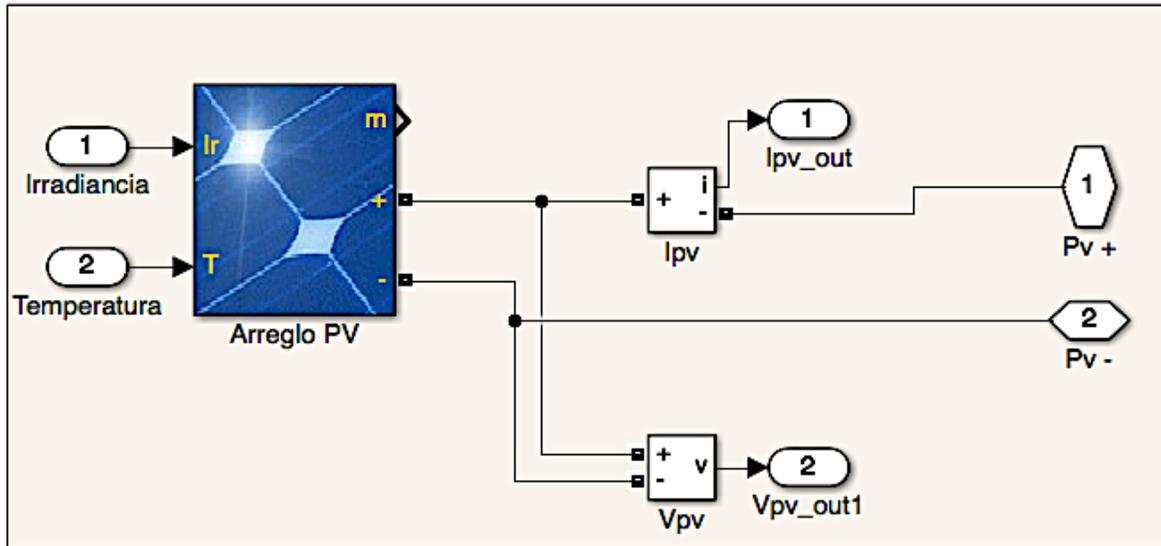


Figura 3.1: Bloque que representa la parte del Arreglo fotovoltaico.

### 3.2 Seguimiento del Punto de máxima potencia

La red neuronal propuesta consta de tres capas; capa de entrada, capa oculta y capa de salida como se muestra en la figura 3.2 La ANN tiene 2 entradas, irradiancia y temperatura, y una salida, que corresponde al voltaje de en el punto de máxima potencia (Voltaje de referencia). La capa oculta tiene 20 neuronas.

El primer paso para diseñar una ANN es recolectar los datos sobre el problema que se está resolviendo usando la red. En el caso del MPPT basado en un sistema PV y DAB, estos consisten en los valores de irradiancia, temperatura y el voltaje en el punto de máxima potencia los cuales son requeridos para entrenar la red.

Los datos para entrenamiento se obtienen del modelo PV bajo MATLAB/SIMULINK para enseñar a la red como actuar en diferentes condiciones. Alrededor de 120 puntos de entrenamiento son extraídos del modelo en MATLAB/SIMULINK. El toolbox de MATLAB/ANN es usado para entrenar a la red. Algunos de los datos se mantendrán como puntos de prueba. La función de los puntos de prueba es probar el desempeño de la ANN diseñada después de que el entrenamiento ha terminado.

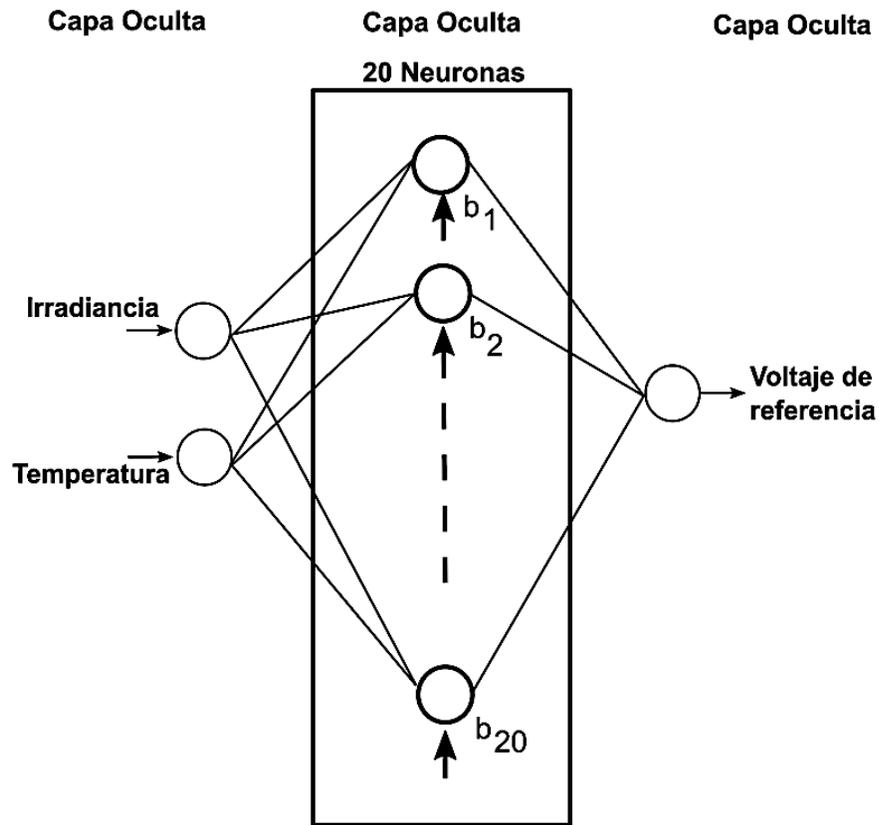


Figura 3.2: Red Neuronal Propuesta.

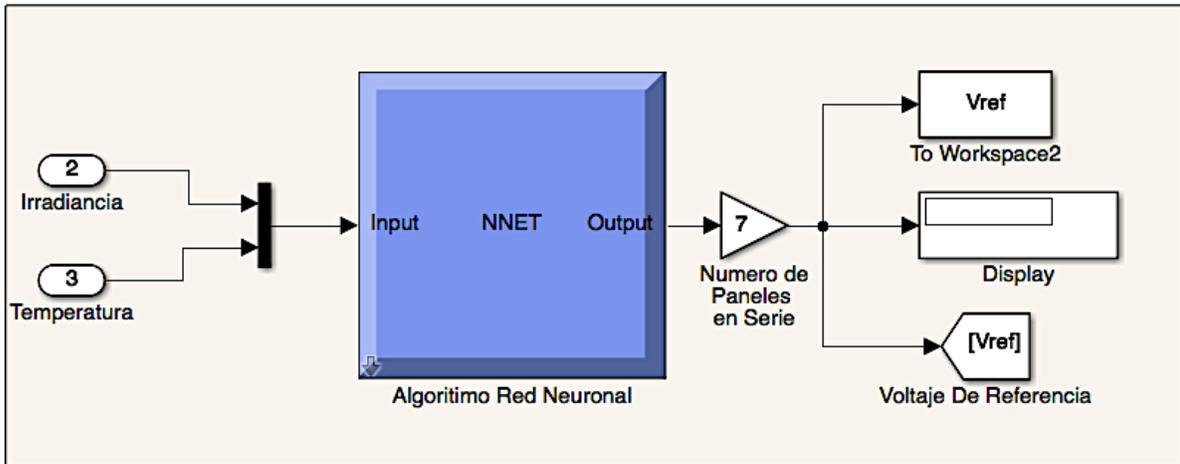


Figura 3.2: Esquema Red Neuronal

Como puede observarse en la figura 3.2, la red neuronal obtiene el dato de irradiancia y temperatura para generar el voltaje de referencia correspondiente. Hay que destacar

que el algoritmo únicamente proporciona el valor de un solo módulo fotovoltaico, de modo que hay que aplicar una ganancia en su salida, en función de la cantidad de los módulos utilizados en serie.

### 3.3 Dual Active Bridge

El circuito a implementar para la etapa de conversión DC-DC se anexa a continuación. Se utilizarán 8 interruptores, por cada puente se utilizarán 4 interruptores. El transformador de alta frecuencia que funge como etapa de aislamiento, estará trabajando a una frecuencia de 20 kHz. El método de control de fase empleado, será el método SPS (Single Phase Shift).

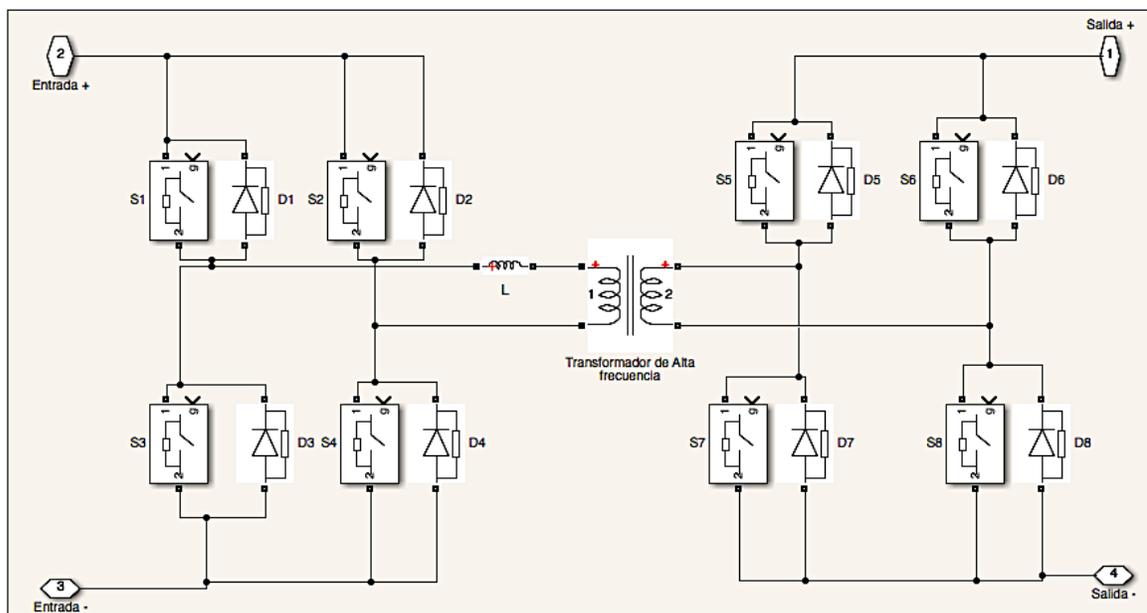


Figura 3.3: Esquema usado en la simulación para el Dual Active Bridge

Para fines de simulación, las pérdidas en el transformador son omitidas, así como los valores de resistencia en el núcleo y la inductancia de magnetización.

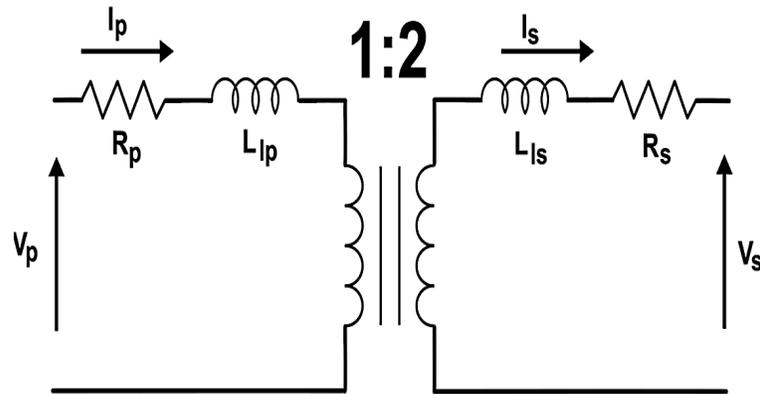


Figura 3.4: Circuito equivalente aproximado del transformador

Tabla 3.1 Características del transformador de alta frecuencia

Frecuencia	20 kHz
Resistencia devanado primario, $R_p$	0.075 $\Omega$
Inductancia devanado primario, $L_{lp}$	1.25 $\mu\text{H}$
Resistencia devanado secundario, $R_s$	1.2 $\Omega$
Inductancia devanado secundario, $L_{ls}$	20 $\mu\text{H}$
Relación, N	1:2

### 3.4 Diseño de controlador

El diagrama que representa el control utilizado se muestra en la figura 3.5. El punto de máxima potencia es alcanzado controlando el ángulo de cambio de fase  $\varphi$ . La red neuronal propuesta es la encargada de determinar el voltaje de referencia, el cual es comparado con el voltaje actual de los módulos fotovoltaicos y el error es procesado por un PI con los siguientes parámetros: Proporcional = -7, Integral = -0.007. Un delimitador se coloca en  $\varphi$  para prevenir operación inestable.

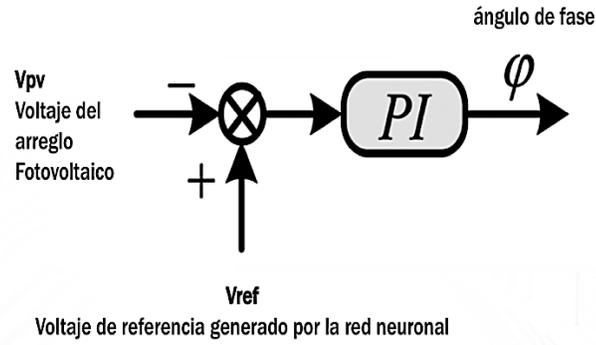


Figura 3.5: Esquema de control.

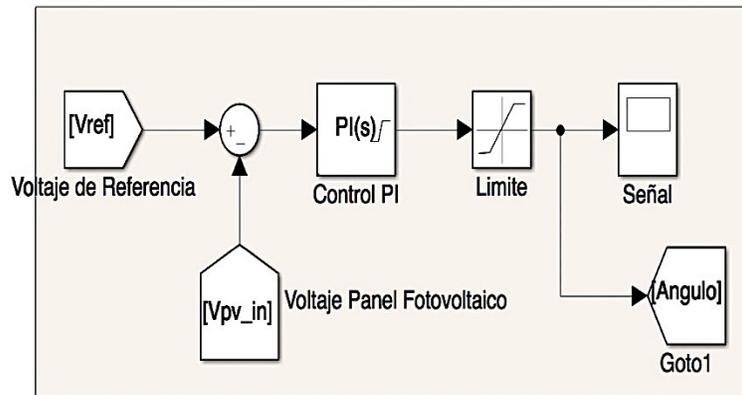


Figura 3.6: Diagrama de Bloques del Control

### 3.5 Análisis de operación del inversor

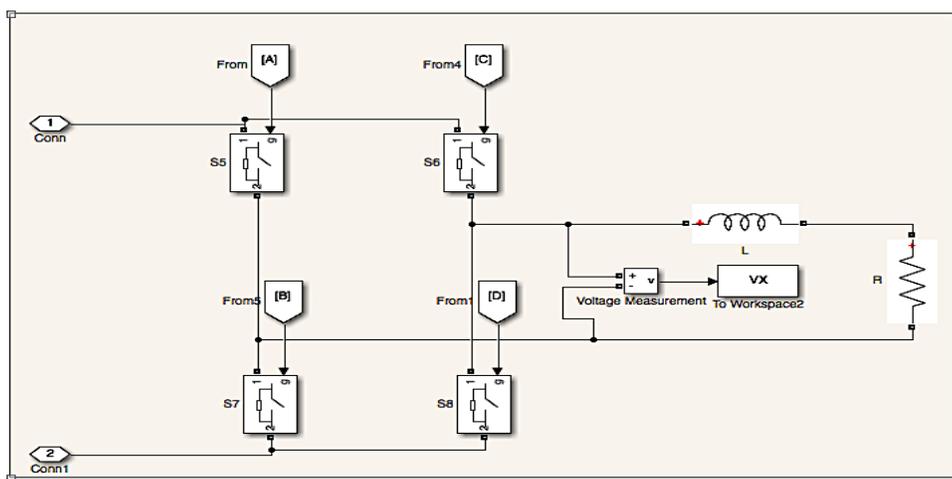


Figura 3.7: Inversor

En la figura 3.7 se puede apreciar el esquema del inversor utilizado, que en este caso es de 3 niveles. El inversor está constituido por 4 interruptores, y el filtro correspondiente a la salida formado por una inductancia y resistencia en serie, con valores de 0.01 Henrios y 10 Ohms, respectivamente. A la entrada se tendrá el voltaje que el dual active bridge está entregando al sistema, para realizar la conversión DC-AC. Cabe aclarar que, para efectos de la simulación, el citado inversor está funcionando en modo aislado, es decir, sin conexión a la red eléctrica.

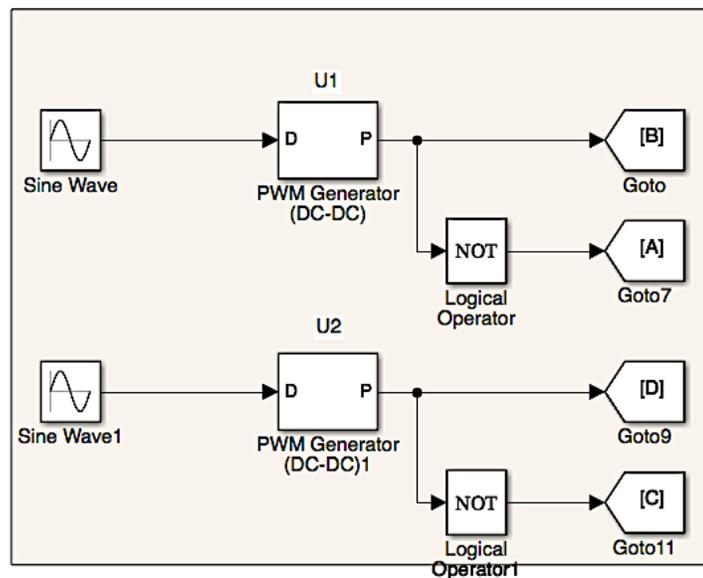


Figura 3.8: Generación de pulsos para interruptores

En la figura 3.8 se muestra la operación de los interruptores, donde se genera una señal portadora de 1 Vpp que va a un PWM, trabajando a 6 kHz. La segunda señal portadora trabaja con otro PWM a la misma frecuencia, únicamente que se encuentra desfasada con respecto a la primera.

### 3.6 Diagrama del SST

Se anexa el diagrama del transformador de estado sólido tal y como se realizará en la simulación, donde pueden observarse los elementos anteriormente descritos en este documento.

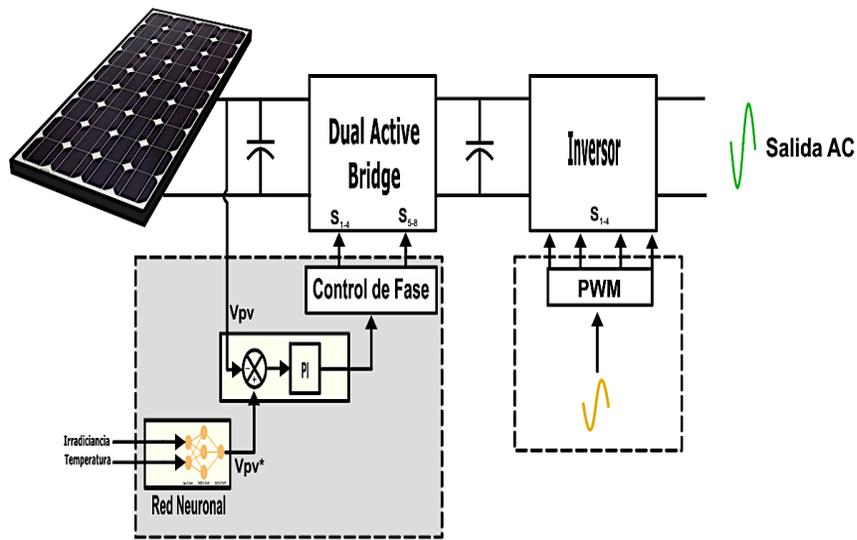


Figura 3.9 Diagrama del transformador de estado sólido

El esquema presentado en este capítulo servirá para validar el controlador diseñado, así como funcionamiento de la red neuronal, comprobar el funcionamiento del transformador de alta frecuencia a partir de los parámetros presentados, el tiempo de respuesta de la red neuronal para obtener la referencia de voltaje y constatar que el puente activo dual se comporte de acuerdo a lo esperado, a través de las graficas de corriente y voltaje.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Caso 1

En el presente capítulo se presentan las gráficas generadas por los diferentes elementos que conforman el transformador de estado sólido, así como los elementos que se usaron para realizar la simulación.

La arquitectura de red se muestra a continuación en la Figura 4.1

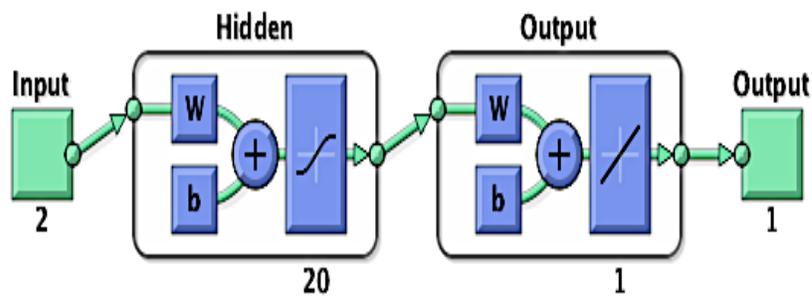


Figura 4.1 Estructura de la red neuronal.

La red neuronal artificial (ANN) propuesta consta de tres capas; capa de entrada, capa oculta y capa de salida. La ANN tiene 2 entradas, irradiancia y temperatura, una salida, que corresponde al voltaje en el punto de máxima potencia (Voltaje de referencia). Para obtener los datos de entrenamiento, se utilizó un simulador de módulo fotovoltaico (en Matlab/Simulink) con los cuales se generaron 120 curvas de potencia que serán utilizados para entrenar la red neuronal. La capa oculta tiene 20 neuronas con la función de activación *tansig* y la capa de salida tiene una sola neurona con la función *purelin*. El entrenamiento utilizado fue el algoritmo Levenberg–Marquardt.

Una vez diseñada la arquitectura de red, se tiene la fase de entrenamiento y resultados. Para este primer caso, se tienen los siguientes resultados en la Figura 4.2, son expresados mediante el coeficiente de error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de correlación de Pearson (R). El desempeño adecuado se tiene con un MSE cercano a cero y R cercano a 1.

Results			
	 Samples	 MSE	 R
 Training:	84	3.77420e-2	9.90957e-1
 Validation:	18	5.53678e-2	9.89454e-1
 Testing:	18	4.90606e-2	9.88191e-1

#### 4.2 Resultados de entrenamiento

La ANN determina la referencia de voltaje requerido, equiparable al voltaje en el punto de máxima potencia en el mismo instante que la irradiancia y la temperatura cambian. Dicho comportamiento se puede observar en la figura 4.3, donde es posible evidenciar el cambio del voltaje de referencia durante el tiempo de simulación.

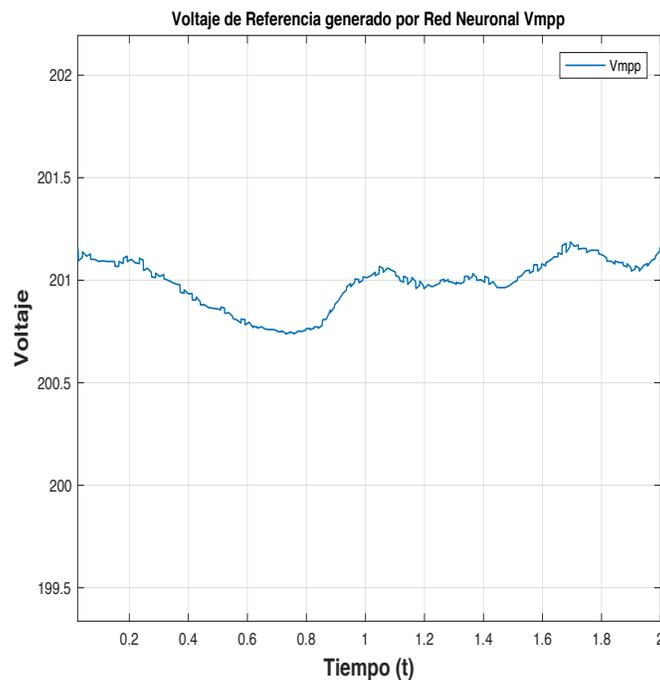


Figura 4.3: Referencia generada a través de la red neuronal.

La figura 4.4 muestra la potencia, voltaje y corriente entregados por el arreglo fotovoltaico conforme la temperatura e irradiancia van cambiando con respecto al

tiempo. Estos cambios son para evaluar el desempeño dinámico del sistema propuesto.

Se puede ver con claridad que el sistema entrega la máxima potencia desde el arreglo fotovoltaico aun en condiciones dinámicas. Como es de esperarse, la máxima potencia va cambiando conforme la irradiancia y la temperatura también lo hacen.

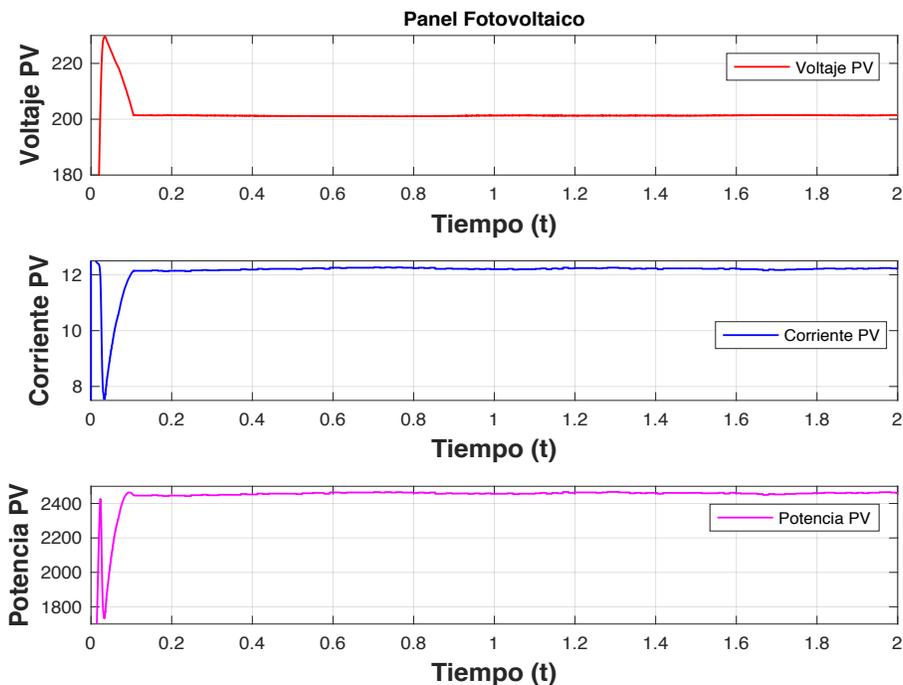


Figura 4.4 Potencia, voltaje y corrientes en el arreglo fotovoltaico

Se puede observar el tiempo de respuesta de la red neuronal, la cual tarda alrededor de 0.1 segundos, alcanzando aproximadamente 2.4 kW.

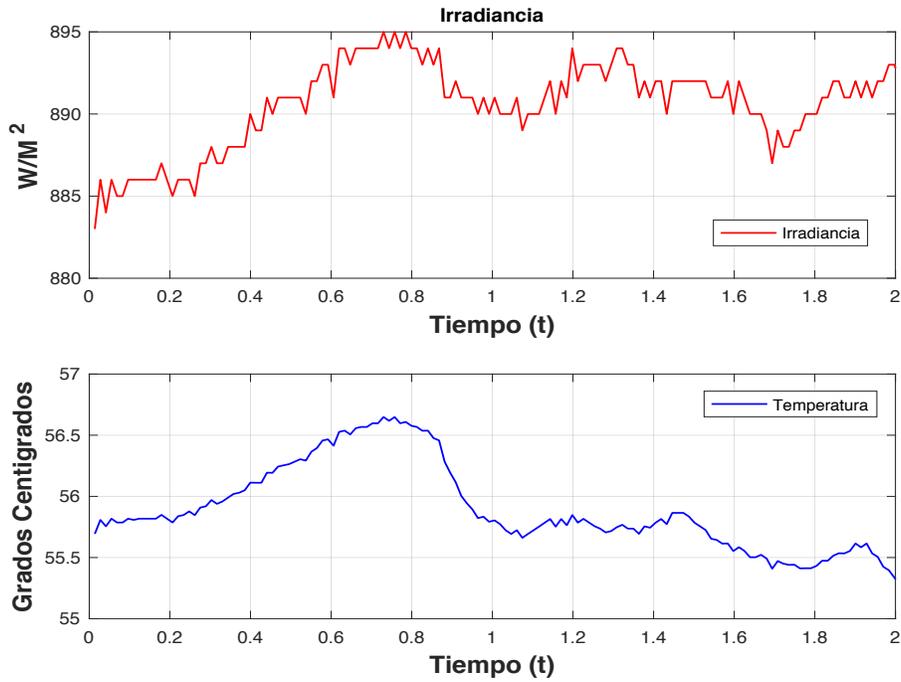


Figura 4.5 Irradiancia y temperatura durante simulación

El voltaje a la entrada y a la salida del DAB son graficados en la figura 4.6, donde es posible apreciar el como el voltaje a la salida se ha elevado debido a la relación de transformación. De igual forma, el voltaje del arreglo fotovoltaico tiende a mantenerse cerca del valor de referencia.

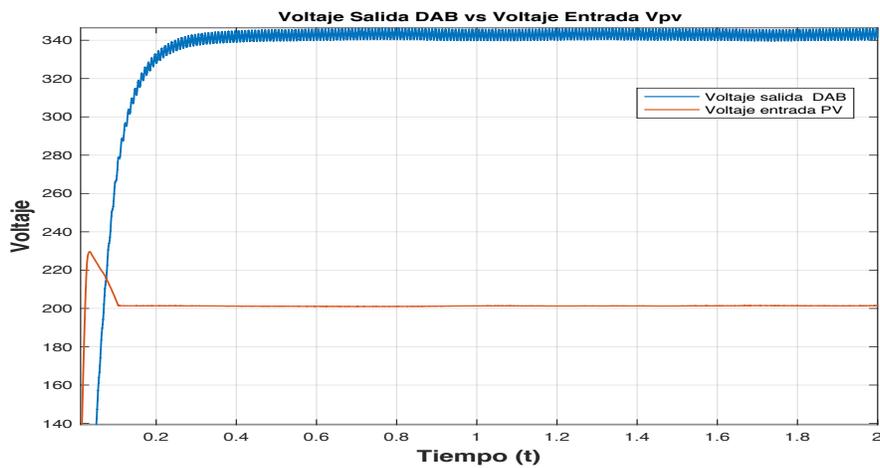


Figura 4.6: Voltaje de salida y entrada en el DAB

La figura 4.7 muestra los pulsos en los interruptores para cada puente en el convertidor DAB. Los pulsos para el puente del lado primario son mostrados en la figura 4.7 (a) y los interruptores en el lado secundario, en la figura 4.7 (b). Se puede observar que los pulsos en el lado secundario están desfasados con respecto a los del lado primario, lo cual evidencia el cambio de fase.

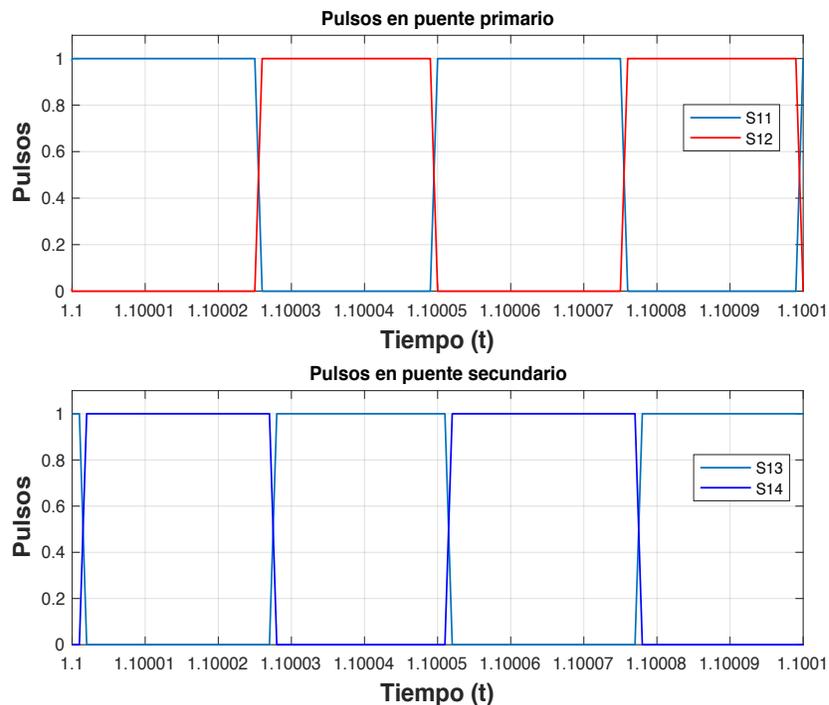


Figura 4.7: (a) Pulsos en puente primario (b) pulsos en el puente secundario

Los voltajes en el devanado primario y secundario del transformador de alta frecuencia son mostrados en la figura 4.8. Se puede apreciar con la gráfica el cambio de fase y la relación de transformación del transformador se hacen evidente en este resultado. De igual manera, la forma de la corriente se comporta de la manera esperada, tal y como se encuentran en los trabajos similares encontrados en la literatura. Para obtener mejores resultados es crítico que el transformador de alta frecuencia este calculado y configurado adecuadamente. Por el contrario, el no tener un diseño adecuado, puede generar resultados no deseados.

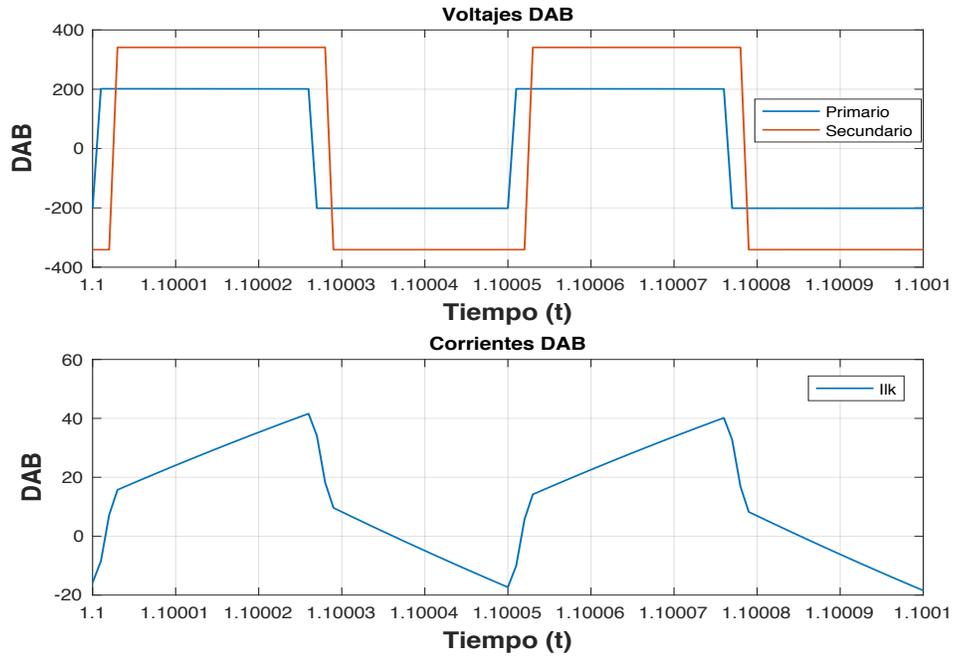


Figura 4.8: Voltajes y corrientes en el DAB.

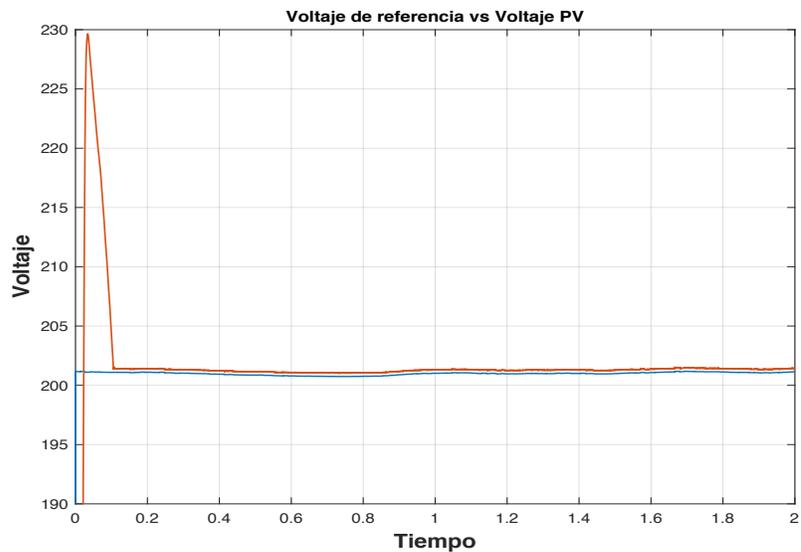


Figura 4.9: Voltaje de máxima potencia generado por la red neuronal

La imagen 4.9 denota como el control proporcional integral está regulando estrechamente el voltaje en el arreglo fotovoltaico a la referencia generada por la red

neuronal artificial. El tiempo de respuesta de la referencia es rápido, así como el voltaje que se generara en el arreglo fotovoltaico, con lo cual el sistema responde a los cambios de igual manera conforme se van presentando.

La figura 4.10 muestra el voltaje y corriente AC a la salida del inversor. La frecuencia a la salida es de 60 Hz, con un voltaje pico de aproximadamente 187 Volts. Cabe señalar que, en este caso, el inversor está trabajando en modo aislado, es decir, se simulo sin tener en cuenta la conexión a la red eléctrica.

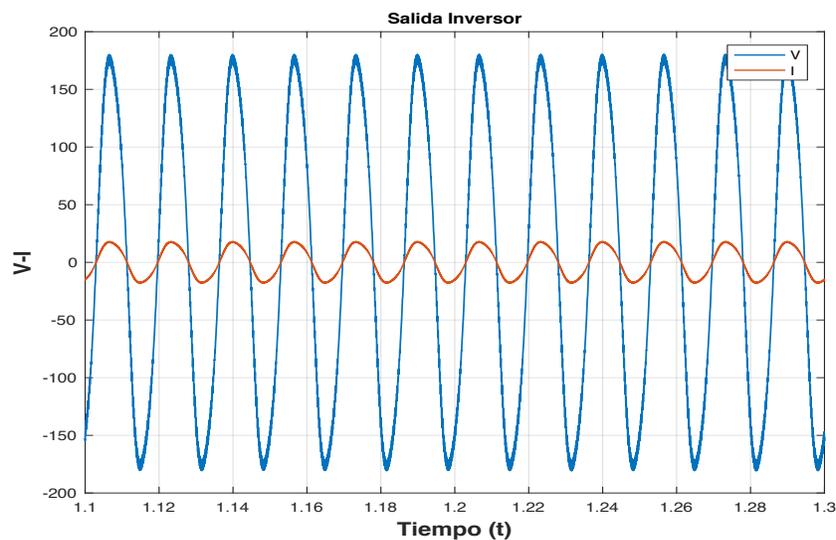


Figura 4.10 salida inversor

## 4.2 Caso 2

En el caso 1 se presentó la configuración y características de la red neuronal utilizada para las simulaciones que, para este caso, se mantienen con los mismos parámetros, así como el sistema, que únicamente tendrá una modificación en la irradiancia y temperatura de entrada para evaluar el desempeño del transformador de estado sólido. De primera instancia se puede observar en la figura 4.11 el comportamiento de la mencionada red neuronal a través del voltaje de referencia generado, el rango de valores entre los que se está operando se mantienen entre los 200 y 210 Volts aproximadamente. De igual forma, en la figura 4.12 es posible apreciar el comportamiento del arreglo fotovoltaico donde son evidentes los cambios a los que está siendo sujeto el sistema.

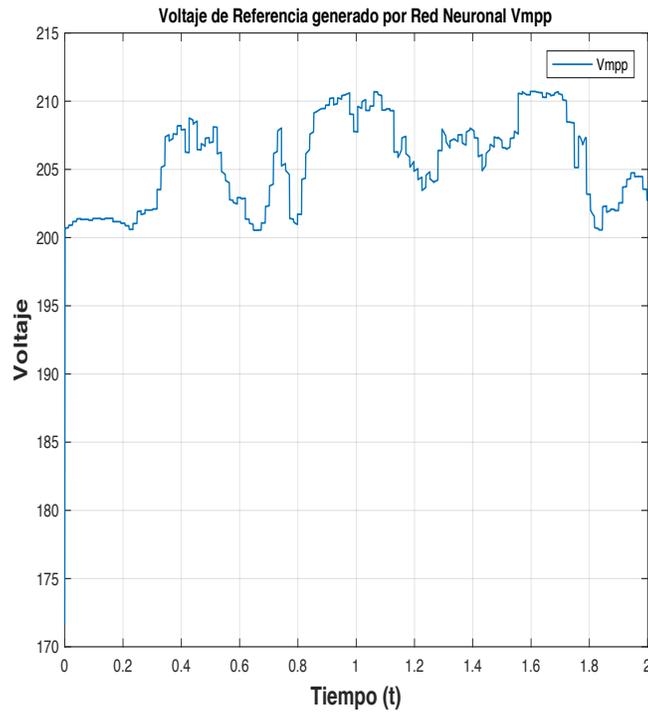


Figura 4.11 Voltaje de referencia caso 2.

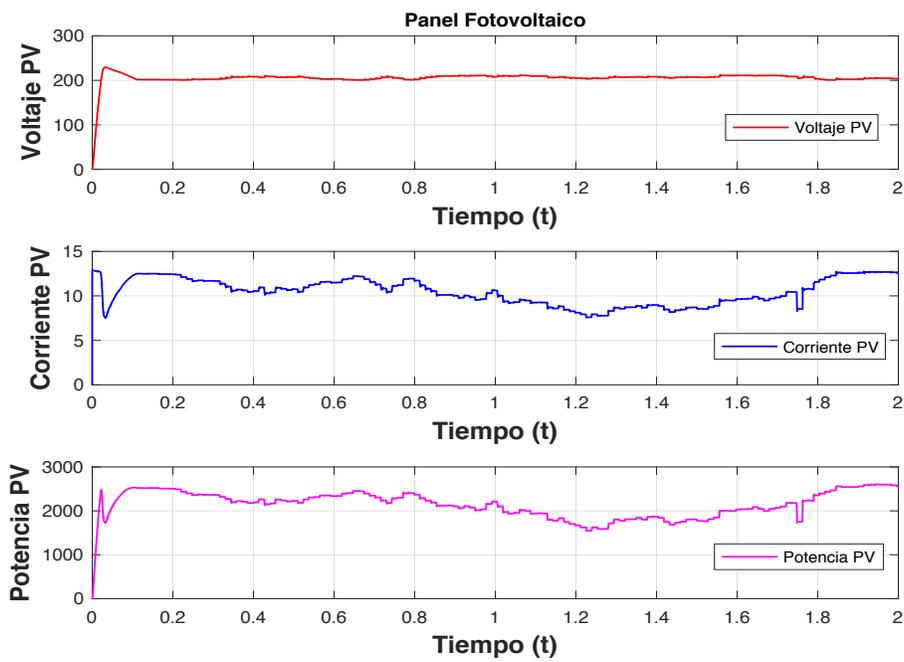


Figura 4.12 Desempeño en arreglo fotovoltaico.

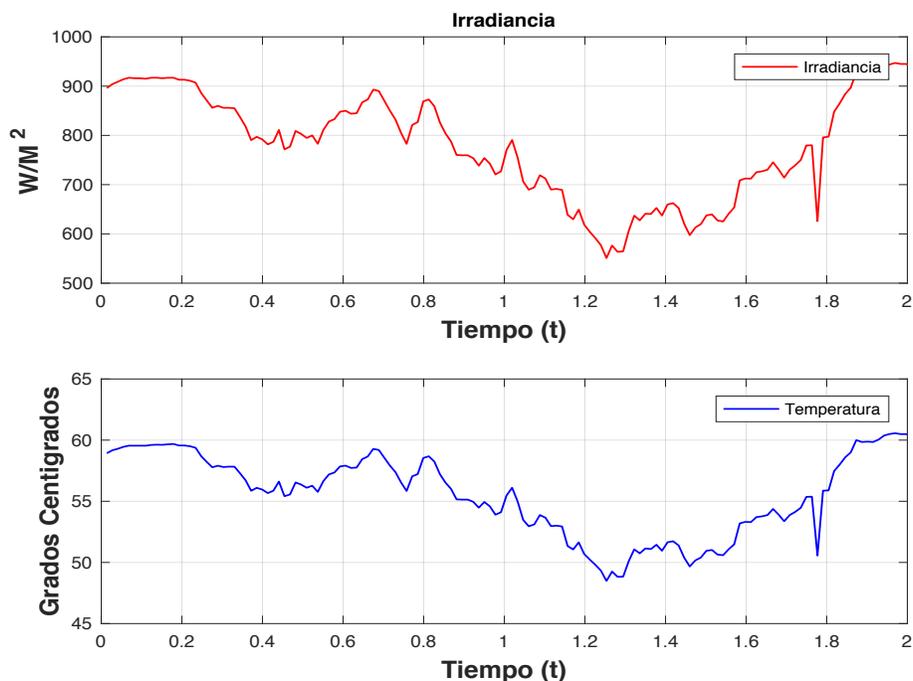


Figura 4.13 Valores de Irradiancia y temperatura utilizadas en caso 2.

La figura 4.13 presenta las entradas de irradiancia y temperatura, en este caso los valores se van presentando de manera mas dispar, ya que estos cambian en rangos mas amplios, en comparación con el caso 1, cuyas variaciones se presentaban en proporción menor. Sin embargo, la potencia obtenida en el arreglo fotovoltaico se mantiene por arriba de los 2000 W, alcanzando por momentos valores similares al caso 1 (Alrededor de 2400 W). De igual forma se puede ver que cuando la irradiancia y temperatura decaen hasta aproximadamente los 600 W/M<sup>2</sup> la potencia cae por debajo de los 2000 W, pero tal y como se observo en el caso 1, a pesar de tener cambios muy drásticos el sistema responde de manera rápida a estos.

En la figura 4.14 se compara el voltaje a la salida del DAB contra el voltaje entregado a este a través del arreglo fotovoltaico. Como se esperaba, el voltaje a la salida del DAB es incrementado por la acción del transformador de alta frecuencia, mas sin embargo si es notorio como esta relación de transformación se ve afectada cuando la irradiancia empieza a decaer, no así el voltaje en el arreglo, que se mantiene cercano a los 200 V aun con sus variaciones.

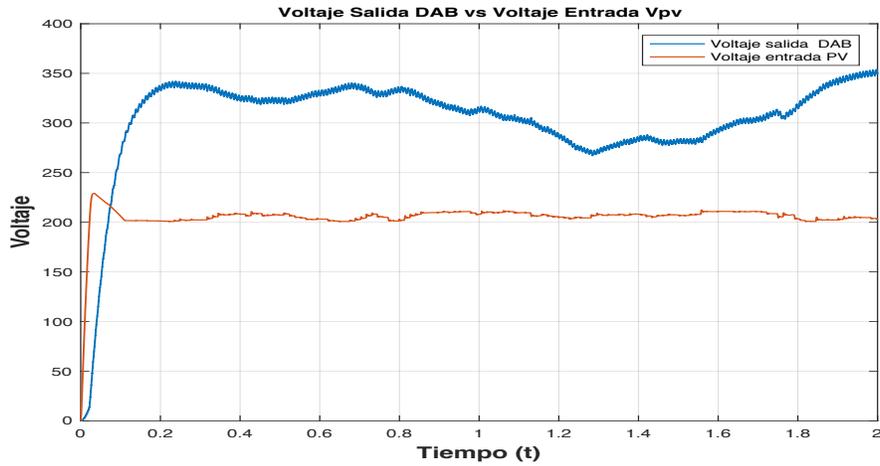


Figura 4.14 Salida en el DAB vs  $V_{pv}$

Tal y como sucedió en el caso 1, los pulsos en los interruptores se presentan con desfase tanto en el lado secundario del DAB, tal como se observa en la figura 4.15. Asimismo, en la figura 4.16 se la forma de la corriente y el voltaje en el DAB se comportan de manera similar a la del caso 1, presentando el desfase requerido para la transmisión de potencia en dicho componente.

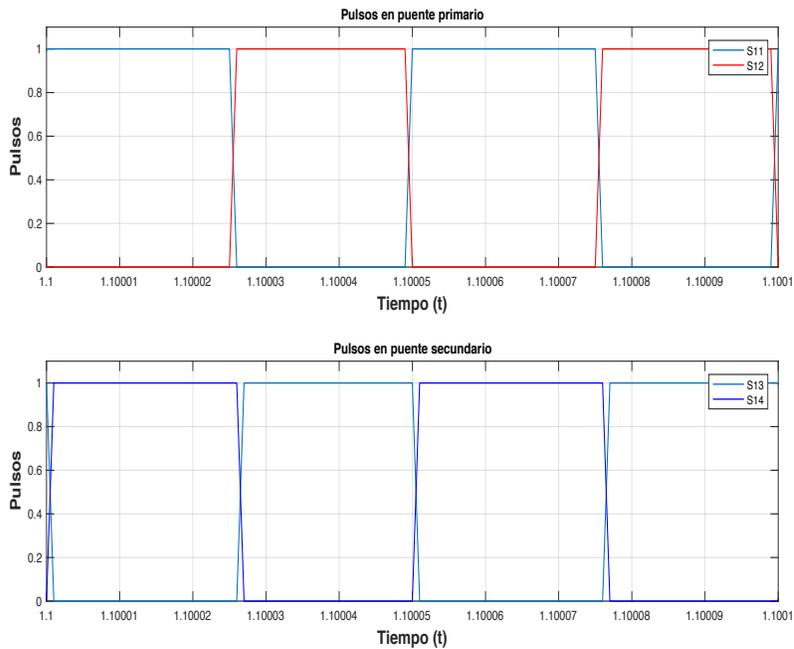


Figura 4.15 Pulsos en el DAB

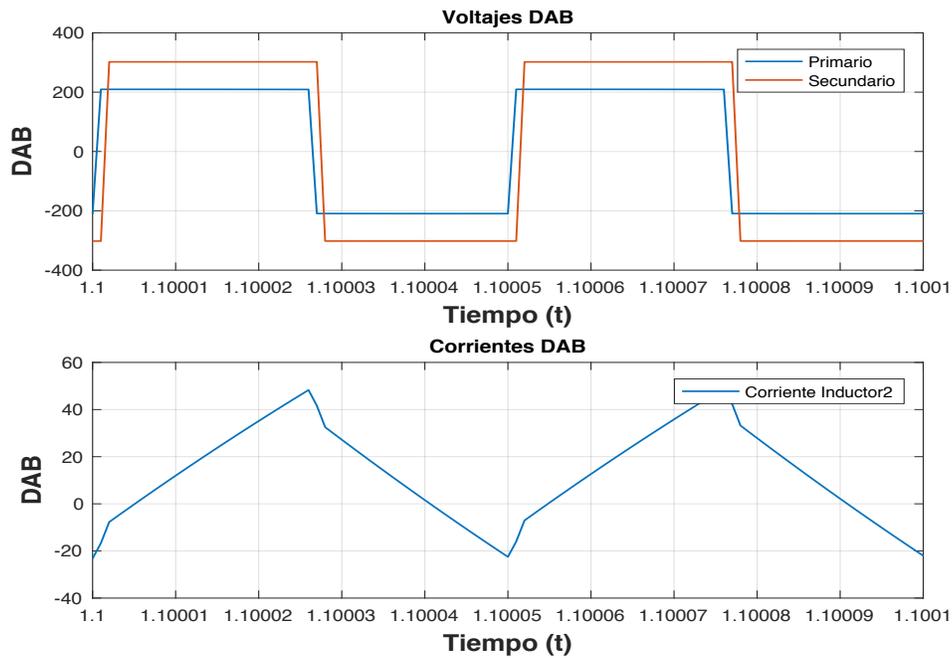


Figura 4.16 Voltaje y corrientes en el DAB

En las siguientes figuras, se puede apreciar como el voltaje de en el arreglo fotovoltaico se va aproximando al voltaje de referencia, para procurar estar siempre cercano al valor de máxima potencia. Sin embargo, en la salida del inversor, es posible observar que el voltaje a la salida del inversor si va cambiando, debido esto a las variaciones en la irradiancia y temperatura, ya comentados en puntos anteriores.

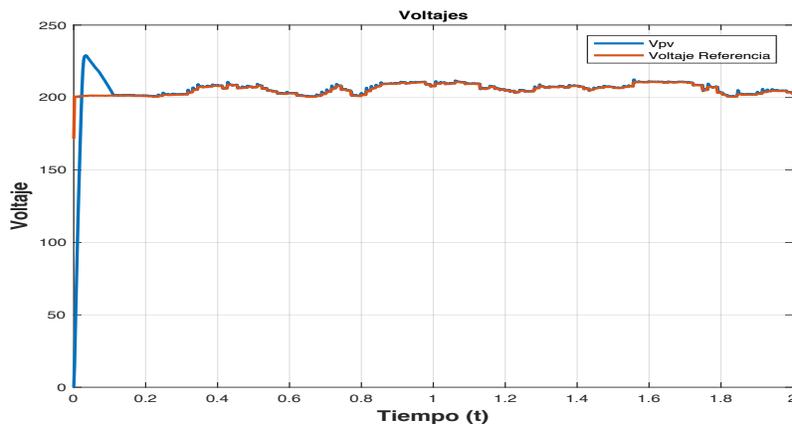


Figura 4.17  $V_{pv}$  vs Referencia

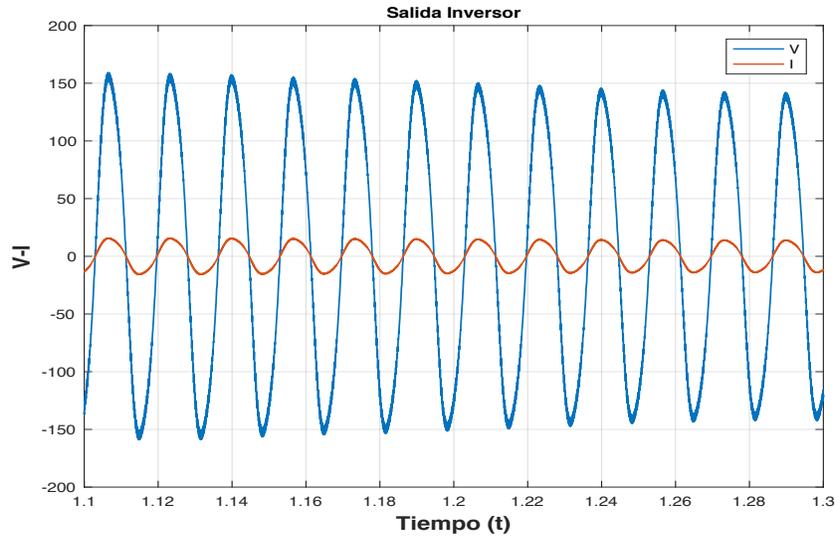


Figura 4.18 Salida en el inversor.

### 4.3 Discusión de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se ve reflejado el comportamiento de las diferentes partes que conforman el transformador de estado sólido. Se puede apuntar que su diseño emplea etapas las cuales deben estar en sincronía para poder trabajar de manera apropiada. Cabe resaltar que el método de control propuesto no es el único, ya que, por ejemplo, utilizar un control de fase diferente al plasmado en este trabajo conlleva a estrategias diferentes las cuales mejoran el desempeño del dispositivo en cuestión. Sin embargo, emplear otros métodos conlleva mejores resultados, pero en configuraciones más complejas. Es de resaltar lo crítico que resulta el diseño y parámetros del transformador de alta frecuencia, para el buen funcionamiento del sistema, tomando en cuenta que dicha configuración se implemente físicamente. Con las diferentes simulaciones realizadas, se pudo observar que un diseño no apropiado para el transformador de alta frecuencia puede generar resultados no deseados. De igual forma, se hace mención que el inversor en este caso está trabajando de manera aislada, lo cual conlleva a que, en futuros trabajos, se podría utilizar diferentes estrategias, dirigidas a mejorar el factor de potencia, disminución de armónicos etc. De hecho, es deseable que el transformador de estado sólido pudiera tener una interface web, para así poder controlarlo y aprovechar al máximo sus capacidades. Una de las

bondades de esta tecnología, es la capacidad de diseñarla de acuerdo a las necesidades del usuario, lo cual como puede verse, va a llevar a mejorar la transformación de la energía, así como su interacción con las energías renovables.

## Capítulo 5

### Conclusiones

A lo largo de este trabajo se presenta una descripción de las partes que conforman un transformador de estado sólido teniendo como elemento principal el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico interactuando con el puente activo dual utilizando una red neuronal artificial. El puente activo dual es controlado para regular el voltaje PV al valor que proporciona la máxima potencia por medio de un controlador PI simple que es utilizado para generar el cambio de fase apropiado en el puente activo dual. El sistema propuesto es modelado y simulado en MATLAB/SIMULINK. Los resultados obtenidos muestran que el sistema fotovoltaico mantiene el punto de máxima potencia con una precisión aceptable y una respuesta rápida a los cambios en las condiciones empleadas en la simulación. De igual manera, las graficas muestran que el valor de referencia generado a través de la red neuronal artificial se mantiene en valores de máxima potencia, aun cuando los cambios en la irradiancia y/o temperatura son muy dinámicos, obteniendo una respuesta de características similares en el voltaje que se genera en el arreglo fotovoltaico, siempre buscando que ambos valores se mantengan cercanos al punto de máxima potencia. Es de notar que en la literatura actual se pueden encontrar muchísimas líneas de investigación que incluyen el transformador de estado sólido interactuando con la red de media tensión (con valores de voltaje en el orden de los kV en AC). En estos sistemas, el voltaje de media tensión es introducido a un rectificador, el cual genera un voltaje DC del orden de los kV, el cual luego es introducido al ya mencionado puente activo dual. Sin embargo, la interacción de un sistema fotovoltaico con un transformador de estado sólido es un tema en el cual no se cuentan con tantas referencias y que en los últimos años ha estado tomado mas fuerza. Además, la utilización de un seguidor del punto de máxima potencia con red neuronal interactuando con los elementos que conforman un transformador de estado sólido es un tópico que no es tan común encontrar en la literatura actualmente, pero como se observar en los resultados obtenidos, es una línea de investigación que puede arrojar

mas y mejores resultados en aras de mejorar el desempeño en general de un sistema el cual utilice transformadores de estado sólido y sistemas fotovoltaicos. Actualmente en México, la red eléctrica no está preparada en su totalidad para interactuar con sistemas fotovoltaicos (Y de energías renovables en general), ya que únicamente se encuentran Wathhorímetros bidireccionales de estado solido que son capaces de medir la energía entregada por la red y la entregada por un sistema que genera energía renovable. De ahí en fuera, los transformadores que actualmente se utilizan, no pueden medir, ni mucho menos cuantificar cuanta energía de tipo renovable se está generando por parte de los productores de pequeña escala (de tipo doméstico). De hecho, el conteo que realiza la Comisión Federal de Electricidad es de tipo manual, es decir, cuando requieren cuantificar la cantidad de energía total generada por los productores a pequeña escala, deben acudir a cada predio y/o servicio, registrar la energía entregada, y luego sumarla de manera manual con todos los demás registros y así determinar la energía entregada por estos productores. De igual manera, introducir el concepto de transformador de estado sólido podría generar mucho interés en servicios de media y alta tensión, de modo que una combinación de un transformador de estado sólido y generación de tipo renovable pueda resultar económicamente atractiva para que se pueda extender su utilización, situación que actualmente no sucede, debido a que la inversión de este tipo de tecnología es muy elevada y la recuperación muy reducida.

## Referencias

- [1] She X., Huang A. (2013). Solid State Transformer in the future Smart Electrical System "IEEE Power & Energy Society General Meeting", 1-2
- [2] Ma X., Yang X., Zhang F., Huang L., Song Z. (2017). A control scheme of three phase solid state transformer for PV generation base on improved Voltage-Tracking Method of DC Links "IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)" 474 - 476
- [3] She X., Lukic S., Huang A. (2010). DC zonal micro-grid architecture and control "IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society", 2988-2990.
- [4] Ankita V., Vijayakumari A. (2016). A Reduced converter count solid state transformer for grid connected photovoltaic applications "2016 International Conference on Emerging Technological Trends [ICETT]", 1-4.
- [5] Liu B., Zha Y., Zhang T. Chen S. (2016). Solid State Transformer Application to grid connected Photovoltaic Inverters "International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies", 248-251.
- [6] Marei M., Helw H., Al-Hasheem M. (2015). A Grid Connected PV interface System Based on the DAB-Converter "IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) ", 1-5.
- [7] Marei M., Helw H., Al-Hasheem M. (2016). Control Strategies for the DAB based PV interface "PLoS ONE", 1-15.

- [8] Hossain M., Rahim N., Selvaraj J. (2018). Recent progress and development of power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review "Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier)", 218-222.
- [9] Foureaux N.C, Cardoso Filho B.j., Brito J.A.S. (2015). Cascaded Multinivel SST Medium Voltage Converter for Solar Applications. "9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia", 801-804.
- [10] S. Khade, A. Gaonkar, S. Weakey, R. Chavan, R. Meshram. (2016). Stability enhancement of Rectifier and DAB stages of SST model using Dynamic Phasor based PI controller "IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)",1-3.
- [11] Sumathi S., Ashok Kumar L., Surekha P. (2015). Solar PV and Wind energy Conversion Systems Editorial 1ª edición, Springer,115-117,103-104,152-156
- [12] Ruiz C., Beristáin J., Sosa T., Hernández L. (2010). Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia Perturbar y observar. "Revista de Ingeniería eléctrica, electrónica y computación Vol. 8 No. 1", 17-23.
- [13] Nayak B., Shaw A. (2017). Design of MPPT controllers and PV cells using MATLAB Simulink and their analysis "International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field" ,1-6.
- [14] She X., Burgos R., Wang G., Wang F., Huang A. (2012) Review of solid-state transformer in the distribution system: from components to field application "Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE", 4081-4082
- [15] She X. (2013). Control and Design of a High Voltage Solid State Transformer and its Integration with Renewable Energy Resources and Microgrid System. UMI Number: 3586206 North Carolina State University,127-128

[16] Shi Y., Li R., Li H., Xue Y.(2016 ) High-Frequency-Link Based Grid-tied PV System with Small DC-link Capacitor and Low-frequency Ripple-free Maximum Power Point Tracking “IEEE Transactions on Power Electronics Volume 31”, 1-11.

[17] Capellán C. (2012) Aportaciones al modelado del transformador en alta frecuencia Tesis de doctorado, Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, España. CII98 - CII102

[18] Aslam M., Tariq A., Hameed S., Arif M.S.B., Jain Abhinandan. (2017). Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems “Green energy & Environment Volume 2, Issue 1 science direct”,10-11

[19] Kayaalp R., Demirdelen T., Koroglu T., Cuma M., Bayandir K., Tumay M. (2015). Comparison of Different Phase-Shift Control Methods at Isolated Bidirectional DC-DC Converter “International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers”, 68-70

[20] Janani V., Karthikeyan G., Gowtham S., Kaliamoorthy M., Sakthivel A. (2017) Cascaded H bridge Multilevel inverter for photovoltaic applications. “Journal of Energy and Environmental Sustainability”, 20-24.

[21] Ramanarayanan V. (2011). Improved utilization of an HF transformer in DC-AC application “IET Power Electronics”, 508-514.

[22] Iraizoz I. (2011) Análisis de la potencia disipada y temperatura que alcanza una celula fotovoltaica sombreada. Universidad pública de Navarra. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4135/577569.pdf>.

Recuperado el 5 de mayo de 2018.

[23] Syed I., Xiao W. (2012). Modeling and control of a DAB applied in a pv based DC microgrid “IEEE International Conference of power electronics, drivers and energy systems”, 1-6.

[24] Sanchez E., Alanís A. (2006). Redes Neuronales, conceptos fundamentales y aplicaciones a control automático. Editorial Pearson – Prentice Hall, 1 - 40