



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de las diferentes regiones de
operación de un convertidor de doble
puente activo evaluando la continuidad
de corrientes en sus puertos de CD**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Jaime Serret Esparza

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES REGIONES DE OPERACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE DOBLE PUENTE ACTIVO EVALUANDO LA CONTINUIDAD DE CORRIENTES EN SUS PUERTOS DE CD que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.


Jaime Serret Esparza
JAIME SERRET ESPARZA
Número de cuenta: 313646214

Dedicatoria

A la Facultad de Ingeniería, mi alma mater, por ser el lugar donde crecí y viví tantas experiencias, como estudiante y como persona, pero sobre todo, por ser mi hogar.

Al Laboratorio de Instrumentación Electrónica de Sistemas Espaciales (LIESE) y al Laboratorio de Electrónica de Potencia, así como a todos sus miembros, quienes se convirtieron en una gran familia para mí.

A mis padres, por ser mi ejemplo a seguir, por las oportunidades que me han brindado, por su apoyo constante, por su gran amor y cariño, siempre incondicionales, y porque sin ustedes no sería quien soy.

A mi hermano, por ser mi mejor amigo, compañero, y un distinguido cazador de dinosaurios.

A mi familia, a mis abuelos, a mis tíos, a mis primos y sobrinos, por su inmenso amor, y por acompañarme en cada etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros, por haber sido mis hermanos, y por llenar mi vida con alegría, entusiasmo, aventuras, e incontables anécdotas.

A mis profesores, por su compromiso, su apoyo, su dedicación, así como por todas las enseñanzas que me brindaron, tanto en el ámbito académico como en el humano.

A mis mentores, por estar a mi lado cuando más los necesite, y porque sin su guía, respaldo y acompañamiento, no habría encontrado mi camino.

A Laika y Principe, por ser mis hermanos pequeños, por su cariño y amor inquebrantables, y por estar conmigo durante tantos años. Donde quiera que estén, sepan que siempre están en mis pensamientos, los quiero mucho, y los extraño a diario.

En memoria de Martha Colín Cortés, por ser una extraordinaria maestra, y por siempre impartir sus clases con mucho entusiasmo, un gran compromiso a su labor, y una sonrisa en el rostro, haciendo que cada clase fuera siempre una gran experiencia, aun en los días difíciles.

Se dice que para tener un hijo se necesitan tan sólo dos personas, pero para criarlo se necesita de todo el pueblo, para que alcance su máximo potencial. Agradezco a todos por ser parte fundamental en mi vida, porque soy el resultado de lo que ustedes han aportado, y porque sin ustedes nada de esto sería posible.

Agradecimientos

Quiero agradecer a las personas que forman parte de mi vida, así como de mi formación.

A mi madre, María de los Ángeles Esparza García, por ser la persona más fuerte, íntegra y humana que conozco; quien me enseñó a tener metas, a luchar por mis sueños, a vivir con valores y a ser una persona de bien. Gracias por enseñarme a jamás rendirme ante la adversidad y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles. Muchas gracias, mamá, por tus enseñanzas, por tu esfuerzo y sacrificio, por tu cariño y amor incondicional, y por ser mi mayor apoyo y ejemplo a seguir.

A mi padre, Jaime Aurelio Serret Álvarez, por ser un hombre estudioso, dedicado, perseverante y trabajador. Por ser un ejemplo de emprendimiento, optimismo, carisma y generosidad, cualidades que admiro profundamente y que inspiran mi camino a lo largo de mi vida. Muchas gracias papá, por darme las herramientas para poder convertirme en un profesionista, por tu apoyo, amor y cariño, y por estar conmigo, contra todo pronóstico.

A mi familia —mis abuelos, mis tíos, mis primos y sobrinos —, por levantarme en los días difíciles, por motivarme y creer siempre en mí, por su apoyo y amor incondicionales, por su presencia constante, por enseñarme la importancia de la alegría en las pequeñas cosas, por celebrar conmigo cada logro y acompañarme en cada desafío, y por ser siempre un refugio y un pilar esencial en cada momento de mi vida.

A mis mentores: al Mtro. Alfonso Luciano Mendoza López, al Mtro. Andrés Álvarez Cid, al Mtro. Héctor Hernández López, al Dr. Saúl de la Rosa Nieves, a la M.I. María del Socorro Guevara Rodríguez y al Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez, por su acompañamiento, por tenderme la mano en los momentos de duda y animarme a ir más lejos de lo que creía posible, por sembrar en mí la curiosidad y el deseo de aprender, por compartir su experiencia, sabiduría y su pasión por el conocimiento, por mostrarme el camino y brindarme su apoyo, guía, consejo y orientación, así como por ser un ejemplo de la clase de profesionista en la que aspiro a convertirme.

A mis profesores, la Dra. Barragán Martínez, la M.I. Gloria Mata Hernández, la Dra. Flor Lizeth Torres Ortiz, la Dra. Anahí Flores Pérez, el Dr. Jorge Rodríguez Cuevas, el Dr. Larry Hipólito Escobar Salguero, la Dra. Elia Inés Luna Ceballos, el Ing. Miguel Ángel López Carrillo, la Prof. Martha Colín Cortés, así como a todos los docentes que contribuyeron a mi formación, tanto profesional como personal, por todo su apoyo, por compartir sus conocimientos y su tiempo, por sus enseñanzas, su gran compromiso, dedicación y paciencia, por demostrar, con humanidad y generosidad, una verdadera vocación y devoción hacia su labor y, sobre todo, por ir más allá de lo que dicta el deber.

A mis Amigos y compañeros, Beca, Aldair, Isra Pérez, Bady, Eduardo Martínez, Joshua, Ciro, Memo Saint, Ocaña, Derian, David Zavala, Rubio, Ricardo Space Boy, Benny, El Especialista Andrés, Audry, Emilio (LIESE), Cristian Alejandro, Ares, Farid, Cruz, Iván, Carapia, Gerardo, Heriberto, Luis Rojas, Ximena, Cesar, Edgar, Nicole Vázquez, Mickey Moreno, Sharon, Kevin, Emilio Rojas, Andrik, Silvia, María Fernanda Aguilar, Gipsy, Isra Piña, Susy Salinas, Abraham Sanvicente, Oscar Iván Jiménez, Shigue, Adolfin, Aby, Marissa Macías, Andrés Anaya, Rubén, Francisco Eslava, Nicole Karime, Andyly, Kovan, Bruce, Quique, Robertito, Karla León, Vicente Sánchez, entre muchos más, que dejaron una huella imborrable en mi vida; por ser mi familia, por

su compañía durante todos estos años, por los momentos que compartimos, por su alegría y entusiasmo, por los aprendizajes que tuvimos, por caminar a mi lado y afrontar juntos las adversidades, y por permanecer hombro con hombro durante todo este recorrido.

A la Facultad de ingeniería y a la UNAM, por brindarme una educación y una formación de calidad, y por otorgarme la oportunidad de convertirme en profesionista. Por ser una comunidad que impulsa no solo el conocimiento técnico y la investigación, sino también el pensamiento crítico, una cultura de valores y un profundo sentido de responsabilidad social. Por un espacio que me permitió crecer y aprender como ingeniero, y en donde encontré maestros que me inspiraron, amigos que se convirtieron en familia y experiencias que marcaron profundamente mi vida personal y académica, y que siempre llevaré conmigo. Es un gran honor y un privilegio formar parte de esta institución, y siempre estaré orgulloso de ello.

Muchas gracias a todos por ser parte de este camino.
Este logro también es suyo.

Resumen

En la actualidad, existen diversas técnicas de control y modulación que buscan mejorar la eficiencia, el rango operativo y la densidad de potencia de los convertidores DAB, y aunque todas ellas procuran mantener un ZVS en un amplio rango de potencia, reducir corrientes circulantes y minimizar el estrés en los semiconductores, es evidente que todas ellas tienen diferentes comportamientos considerando el nivel pico de corriente, a pesar de tener la capacidad de transferir los mismos niveles de potencia a los dispositivos semiconductores.

En el presente trabajo se busca analizar los diferentes modos de operación de un convertidor DAB, haciendo combinaciones entre los grados de libertad de cada variable de modulación, considerando diferentes niveles de tensión entre los puertos de CD, con la finalidad de obtener los parámetros óptimos de ancho de pulso y desplazamiento de fase, para generar la mejor continuidad de corrientes en los puertos de CD de un DAB a partir de una potencia dada, mientras se observa el comportamiento de las variables de corriente activa, reactiva, aparente y el nivel de discontinuidad.

Abstract

Currently, there are various control and modulation techniques that seek to improve the efficiency, operating range and power density of DAB converters, and although they all try to maintain a ZVS in a wide power range, reduce circulating currents and minimize stress on semiconductors, it is evident that they all have different behaviors considering the peak current level, despite having the ability to transfer the same power levels to the semiconductor devices.

In this work, we seek to analyze the different operating modes of a DAB converter, making combinations between the degrees of freedom of each modulation variable, considering different voltage levels between the DC ports, in order to obtain the optimal parameters of pulse width and phase shift, to generate the best continuity of currents in the DC ports of a DAB from a given power, while observing the behavior of the active, reactive, apparent current variables and the level of discontinuity.

Índice General

Índice de Figuras	VIII
-------------------------	------

Índice de Tablas	X
------------------------	---

Acrónimos	XI
-----------------	----

1. Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	5
1.2. Objetivo	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Propuesta	6
1.5. Justificación	6
1.6. Metodología	7
1.7. Organización de la Tesina	8
 2. Capítulo 2: Estado del arte	 9
 3. Capítulo 3: Simulación Numérica y Obtención de Curvas de Operación	 14
3.1. Operación del Convertidor DAB	14
3.1.1 Modelo del DAB y operación general	14
3.1.2 Trayectorias de Operación para SPSC, DPSC y PVM	18
3.2. Descripción de la Simulación	21
3.3. Análisis Paramétrico para diferentes ciclos de servicio y relaciones de voltaje	24
 4. Capítulo 4: Conclusiones y Trabajo a Futuro	 32
4.1. Conclusiones	32
4.2. Trabajos Futuros	33

Referencias	34
--------------------------	-----------

Anexos.....	41
--------------------	-----------

Índice de Figuras

Fig. 1.-	Red convencional y red del futuro empleando electrónica de potencia [1]	1
Fig. 2.-	Topología del Convertidor Dual Active Bridge [10].....	2
Fig. 3.-	Principales Formas de Onda de los puntos de Operación Estáticos: a) SPSC, b) DPSC, c) PVM [10].....	3
Fig. 4.-	Comparación en PU de las Formas de Onda de I_{DC1} para distintas Técnicas de modulación [10]	4
Fig. 5.-	Caracterización de la potencia de transmisión del DAB-IBDC con control SPS [29]	9
Fig. 6.-	Caracterización de la potencia de transmisión del DAB-IBDC con control DPS [29].....	10
Fig. 7.-	Cambio conceptual de voltaje-segundo del Transformador con Trayectoria II [35]	10
Fig. 8.-	Control de la estrategia de conmutación optimizada para la tensión de corriente: a) Modelo, b) Algoritmo [38].....	11
Fig. 9.-	Formas de onda en estado estacionario de V_1 (rojo), V_2 (azul) e I_L (verde) Utilizando el método de diferencias finitas propuesto para $M = 0,625$ a 70 W [46].....	13
Fig. 10.-	Circuito equivalente del convertidor DAB [10].....	16
Fig. 11.-	Estados Topológicos para V_L [10].....	16
Fig. 12.-	Áreas de operación DAB: a) Trayectorias de I_A para $0 < \mu < 50\%$ y $0 < \varphi < \pi$; b) Trayectorias de I_Q para $0 < \mu < 50\%$ y $0 < \varphi < \pi$; c) Formas de onda principales para PS_{SPSC} ; d) Formas de onda principales para PS_{DPSC} ; e) Formas de onda principales para SP_{PVM} [10].....	19
Fig. 13.-	Modelo de simulink del DAB para realización de pruebas.....	22
Fig. 14.-	Resultado de la simulación del caso base, con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V, $\mu_1 = \mu_2 = 50\%$; a) Forma de I_{DC} ; b) Forma de I_Q	24
Fig. 15.-	Resultado de la simulación del caso nominal, con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V y $\mu_2 = 50\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%; a) Forma de I_{DC} ;	

	b) Forma de I_Q	25
Fig. 16.-	Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 50\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%; a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;.....	26
Fig. 17.-	Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 30\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%; a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;.....	27
Fig. 18.-	Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 10\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%; a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;.....	27
Fig. 19.-	Niveles de discontinuidad para las diversas modulaciones de la simulación con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100V$ y $\mu_2 = 50\%$; a) Niveles de discontinuidad completos; b) Niveles de discontinuidad en las áreas donde $I_Q = 0$	28
Fig. 20.-	Niveles de discontinuidad en las áreas donde $I_Q = 0$, para diversas modulaciones y valores de voltaje	29
Fig. 21.-	Puntos de ruptura de I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$, cuando $\mu_2 = 50$; a) Generación de puntos de ruptura para cada rango de corriente de I_{DC} ; b) Interpolación de los puntos de ruptura generados.....	30
Fig. 22.-	Gráficos de comparación de las interpolaciones de los puntos de ruptura obtenidos; a) Cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) Cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) Cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$	31

Índice de Tablas

Tabla 1.-	Características para las distintas modulaciones de un Convertidor DAB.....	4
Tabla 2.-	Funciones de conmutación para el control del Puente H [9][10].....	14
Tabla 3.-	Ecuaciones de comportamiento, I_A y I_Q divididos por áreas operativas [10]	18
Tabla 4.-	Simulaciones realizadas para observar I_{DC} cuando $I_Q = 0$	25
Tabla 5.-	Gráficos de comparación de las diversas interpolaciones de los puntos de ruptura obtenidos.	31

Acrónimos

BESS	Sistema de almacenamiento de Energía en Baterías (por sus siglas en inglés: Battery Energy Storage System)
BMS	Sistema de Gestión de Baterías (por sus siglas en inglés: Battery Management System)
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CD	Corriente Directa
DAB	Convertidor de Puente Dual Activo (por sus siglas en inglés: Dual Active Bridge)
DPSC	Control de Desfasamiento Dual de Fase (por sus siglas en inglés: Dual Phase Shift-Control)
EMI	Interferencia Electromagnética (por sus siglas en Inglés: Electromagnetic Interference)
HFT	Transformador de Alta Frecuencia (por sus siglas en inglés: High Frequency Transformer)
IBDC	Convertidor DC-DC Bidireccional Aislado (por sus siglas en inglés: Isolated Bidirectional DC-DC Converter)
PI	Control Proporcional Integral (Por sus siglas en inglés: Proportional Integral Controller)
PVM	Modulación de Valores Proporcionales (por sus siglas en inglés: Proportional Value Modulation)
SOC	Estado de Carga (por sus siglas en inglés: State of Charge)
SOH	Estado de Salud (por sus siglas en inglés: State of Health)
SPSC	Control de Desfasamiento Único de Fase (por sus siglas en inglés: Single-Phase Shift-Control)
THD	Distorsión Armónica Total (por sus siglas en inglés: Total Harmonic Distortion)
ZVS	Conmutación de Voltaje Cero (por sus siglas en inglés: Zero Voltage Switching)

VARIABLES

I_A	Corriente Aparente
I_{DC1}	Corriente en la terminal de entrada en el primer puente H del DAB
I_{DC2}	Corriente en la terminal de entrada en el segundo puente H del DAB
I_{LD}	Corriente entre los devanados del HFT
I_Q	Corriente reactiva, No activa, o de retorno
L_D	Inductancia de fuga del HFT
m_1	Señal de modulación del primer puente H del DAB
m_2	Señal de modulación del segundo puente H del DAB
N_P	Número de Vueltas en el devanado primario del HFT
N_S	Número de Vueltas en el devanado secundario del HFT
NvD	Nivel de discontinuidad
SP_{SPSC}	Punto de Operación Estático para SPSC
SP_{DPSC}	Punto de Operación Estático para DPSC
SP_{PVM}	Punto de Operación Estático para PVM
V_{DC1}	Voltaje de DC en la terminal de entrada en el primer puente H del DAB
V_{DC2}	Voltaje de DC en la terminal de entrada en el segundo puente H del DAB
V_L	Voltaje entre los devanados del HFT
V_P	Voltaje de AC del Devanado primario del HFT
V_S	Voltaje de AC del Devanado primario del HFT
α	Coeficiente de Relación de Transformación del Transformador
μ	Ciclo de trabajo
φ	Portadora de desplazamiento de fase entre las señales de modulación

Capítulo 1: Introducción

Actualmente existe una tendencia hacia la incorporación masiva de sistemas energéticos no convencionales que hacen uso de fuentes naturales como como la energía solar o eólica, el almacenamiento de energía mediante baterías (BESS), además de la tendencia en la electrificación del transporte y una participación más activa por parte del usuario [1-3].

Ante esto, las redes eléctricas pretenden migrar de un sistema convencional hacia una red que integra convertidores electrónicos en todos los niveles de tensión como se aprecia en la *Fig. 1*, representando una evolución de la infraestructura eléctrica hacia sistemas más eficientes, flexibles y resilientes integrando tecnologías de comunicación, automatización y control avanzado para gestionar la generación, distribución y consumo de energía de manera dinámica, conformando una red eléctrica inteligente [4].

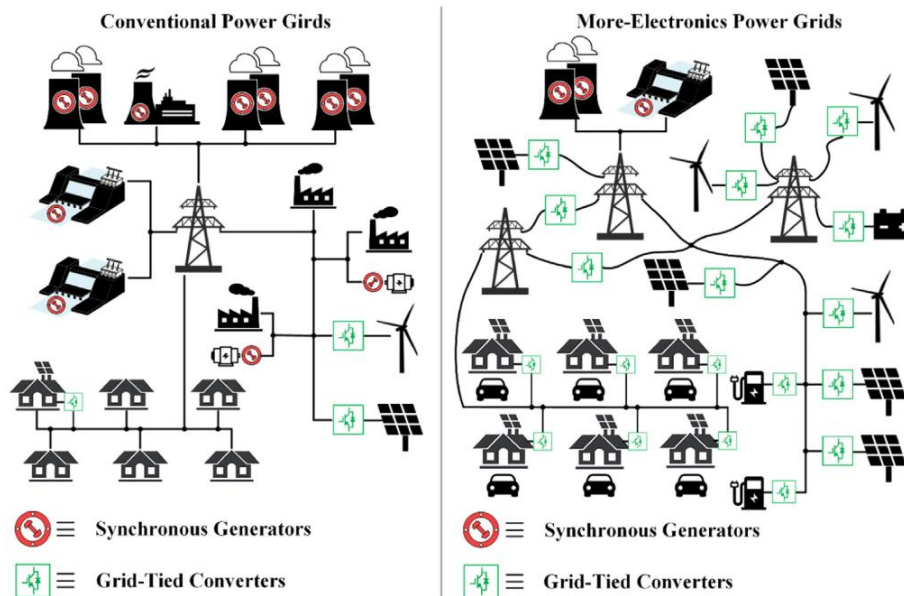


Fig. 1.- Red convencional y red del futuro empleando electrónica de potencia [1]

En este contexto, la digitalización y el análisis de datos en tiempo real han surgido como elementos clave para optimizar el uso de energía, minimizando pérdidas y prevenir fallas de los equipos que conforman las nuevas redes eléctricas [5, 6].

Un ejemplo de los nuevos equipos es el convertidor Dual Active Bridge (DAB), siendo un convertidor en Corriente Directa (CD) tiene como características: i) ser bidireccional, ii) eficiencia superior al 90 %, iii) alta densidad de potencia y iv) poder contar con aislamiento galvánico, estas características le confieren una transferencia de energía confiable, eficiente y con capacidad de respuesta rápida ante cambios de demanda [7, 8].

Este se compone de dos puentes H conectados mediante un transformador de alta frecuencia, permitiendo adaptar niveles de voltaje en sus extremos de CD, como se observa en la *Fig. 2* [9].

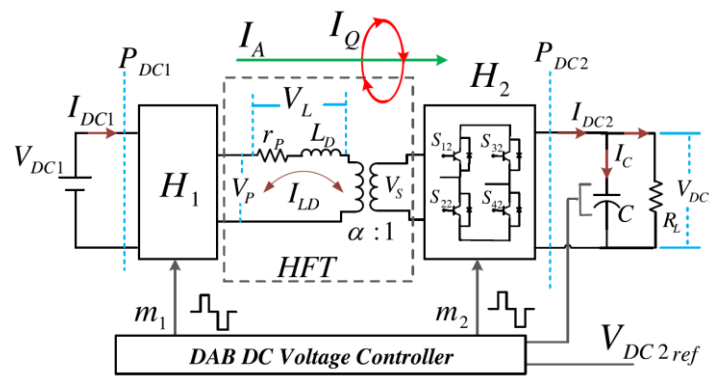


Fig. 2.- Topología del Convertidor Dual Active Bridge [10]

Tendencias actuales de investigación centradas en este convertidor buscan ampliar el rango de potencia, reducir corrientes circulantes y minimizar el estrés en los semiconductores [11,12]. Otro punto de investigación surge en el garantizar un flujo de corriente continua (CC) en los ciclos de carga y descarga, que se ha presentado como crucial para preservar el rendimiento, seguridad y vida útil de los BESS, ya que reducen pérdidas por efecto Joule, evitando calentamientos innecesarios y mejorando la eficiencia energética [13-15].

Estas características son de especial relevancia dado que variaciones bruscas en la corriente, dañan los electrodos de los BESS acelerando su degradación y aumentando la resistencia interna lo que reduce la capacidad de carga y el número de ciclos de vida [16]. Además, una CC facilita el control preciso del estado de carga (SOC, State of Charge) y del estado de salud (SOH, State of Health), ambos fundamentales para una gestión óptima del

Sistema de Gestión de las Baterías (BMS, Battery Management System) minimizando el estrés en los componentes asociados, mejorando la confiabilidad del sistema [17].

La corriente que fluye por el convertidor DAB es controlada por técnicas de desplazamiento que ajustan dinámicamente el ángulo de fase de la señal de control que existe entre los puentes H, modificando la señal de disparo de los transistores que lo conforman [18]. Entre estas existe el control de desplazamiento de fase único (SPSC), el desplazamiento de fase dual (DPSC) y el control por valores proporcionales (PVM), en la Fig. 3 se aprecian las formas de onda de la tensión en los extremos de CD, la tensión y corriente que se presenta en la inductancia de acoplamiento y la corriente en CD que fluye por el convertidor [8] [10].

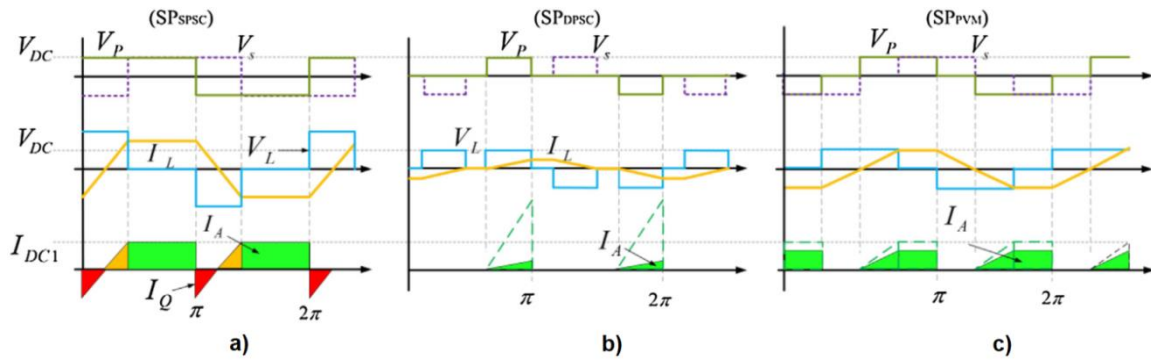


Fig. 3.- Principales Formas de Onda de los modos de operación del DAB: a) SPSC, b) DPSC, c) PVM [10]

En la Fig. 4 se muestran las formas de onda de corriente generadas en los puertos de CD de un DAB al utilizar las técnicas de modulación SPSC, DPSC y PVM, en esta se observa cómo, si bien todas las estrategias analizadas permiten alcanzar el mismo nivel de transferencia de potencia promedio, se observan diferencias relevantes en sus características eléctricas, particularmente en los valores pico de corriente que deben ser soportados por los dispositivos semiconductores [19–27], así como en los requerimientos de diseño del filtro de salida, cuyo dimensionamiento está directamente relacionado con la atenuación de los picos de corriente positiva y negativa para aproximar una corriente de CD [28].

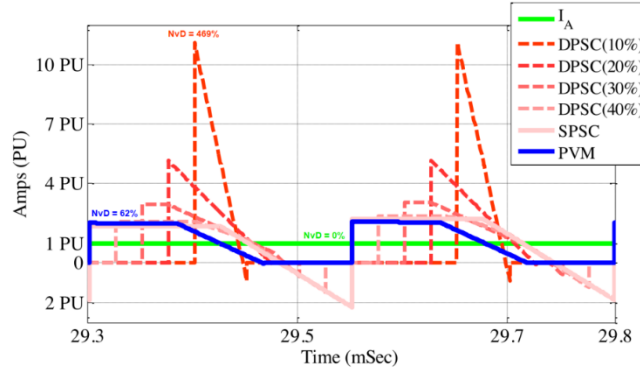


Fig. 4.- Comparación en PU de las Formas de Onda de I_{DCI} para distintas técnicas de modulación [10]

En este contexto, la *Tabla 1* sintetiza y compara las principales características de cada técnica de modulación, considerando en todos los casos una transferencia de potencia promedio normalizada de 1 PU.

Tabla 1.- Características para las distintas modulaciones de un convertidor DAB

Técnica de Modulación	Nivel de Discontinuidad [%]	Valor Pico [PU]	Corriente Reactiva [%]
PVM	62	2	0.1
SPSC (50%)	151.7	2	25
DPSC (40%)	93.4	2	10
DPSC (30%)	94	3	5
DPSC (20%)	192	5.5	0.1
DPSC (10%)	469.8	12	0.1

Dadas las tendencias de investigación del convertidor DAB y las necesidades de las redes eléctricas de hacer que los convertidores entreguen las mejores cualidades en la potencia entregada, en este trabajo se busca analizar las diferentes formas de operación haciendo combinaciones entre los grados de libertad de cada variable de modulación considerando diferentes niveles de tensión entre los puertos de CD.

1.1 Planteamiento del Problema

A pesar de los avances reportados en la literatura sobre las técnicas de modulación aplicadas al convertidor Dual Active Bridge (DAB), la mayoría de los estudios se han centrado en el análisis del desempeño del convertidor mediante la variación de uno o dos grados de libertad en sus variables de control, tales como el desplazamiento de fase o el ancho de pulso. No obstante, estos enfoques han privilegiado principalmente criterios como la capacidad de transferencia de potencia, la eficiencia o la reducción de pérdidas, dejando en segundo plano el análisis sistemático de la discontinuidad de corriente en los puertos de corriente directa (CD). En particular, no se ha abordado de manera integral la obtención de los valores óptimos y simultáneos de ancho de pulso y desplazamiento de fase que permitan minimizar dichas discontinuidades de corriente para un nivel de potencia dado. Esta limitación resulta crítica, ya que las discontinuidades y picos de corriente afectan directamente la calidad de la potencia transferida, incrementan el esfuerzo eléctrico en los dispositivos semiconductores y condicionan el diseño y dimensionamiento de los filtros de CD. En este contexto, se identifica la necesidad de desarrollar un estudio orientado a la optimización conjunta de los parámetros de modulación del DAB, con el objetivo de mejorar las cualidades de la potencia que fluye a través del convertidor, garantizando una operación más eficiente, robusta y favorable desde el punto de vista del diseño electromagnético y térmico de sus componentes.

1.2 Objetivo

Obtener los parámetros óptimos de ancho de pulso y desplazamiento de fase que garanticen las mejores características de continuidad de corriente en los puertos de CD de un convertidor DAB.

1.3 Hipótesis

A partir de una serie de simulaciones en el software especializado MATLAB / Simulink que abarquen un barrido del ancho de pulso y desplazamiento de fase aplicados al convertidor DAB, será posible obtener los puntos de menor discontinuidad de corriente para diferentes combinaciones de potencia y relaciones de voltaje en sus puertos de CD.

1.4 Propuesta

Mediante simulaciones detalladas en un entorno especializado, se realizará un barrido sistemático de los parámetros de modulación del convertidor Dual Active Bridge (DAB), específicamente del ancho de pulso y el desplazamiento de fase, considerando distintos niveles de potencia transferida y variaciones de tensión en las terminales del convertidor. A partir de los conjuntos de valores obtenidos, se llevará a cabo un análisis cualitativo y comparativo de las formas de onda de corriente en los puertos de corriente directa, con el objetivo de identificar la combinación óptima de parámetros de modulación que permita maximizar la continuidad de corriente y minimizar las discontinuidades y picos asociados. Este enfoque permitirá establecer criterios de operación que contribuyan a mejorar la calidad de la potencia transferida, reducir el esfuerzo eléctrico sobre los dispositivos semiconductores y facilitar el diseño de los elementos de filtrado en las terminales de CD.

1.5 Justificación

Mantener la continuidad de corriente en baterías y celdas fotovoltaicas maximiza la eficiencia del sistema y minimiza las pérdidas de energía. Esto se logra al reducir el estrés térmico y eléctrico, lo que además permite disminuir el tamaño físico de los filtros de corriente directa (CD), previniendo daños en los materiales y dispositivos semiconductores asociados.

En este contexto, también existen otras variables o modificación de algunos elementos asociados al objetivo de reducción de su nivel de discontinuidad, como los que se mencionan a continuación [10]:

- ***Inductancia de Dispersión L_D***

La reducción de las corrientes pico y la eliminación de corrientes de retorno, a fin de mejorar la continuidad de corriente de CA, puede conllevar a reducir el valor de la inductancia de dispersión en el transformador de alta frecuencia del convertidor DAB, con lo cual puede ser posible la reducción del tamaño físico de disco transformador.

- ***Eliminación de Corriente Reactiva***

Desde la perspectiva de varios autores, una forma de reducción de filtros y valores pico de corriente se logra con la reducción de corrientes de retorno, y cabe aclarar que dicha reducción también está asociada a mejorar el nivel de continuidad de las corrientes de CD.

- ***Reducción del Valor de Pico a Pico***

Como se ha visto en las formas de onda anteriores (*Fig. 4*), la mejora en la continuidad de las corrientes de CD está ligada a la reducción de los grandes picos de corriente en los puertos de CD, deduciendo así, que el estrés de corriente de los elementos semiconductores tiende a reducirse drásticamente, así como las pérdidas de eficiencia por conducción.

- ***Reducción del Tamaño del Capacitor de Salida***

Siguiendo el objetivo anterior, la reducción de picos de corriente en los puertos de CD, así como la eliminación de las corrientes de retorno, con el objetivo de mejorar la continuidad de corriente en CD, sin duda hace que se requieran menores valores de elemento de filtrado, reduciendo así el tamaño físico de los capacitores de salida en los puertos de CD.

1.6 Metodología:

1. Recolección de información y fuentes bibliográficas.

Se comenzará con recolectar la información necesaria, utilizando para la investigación artículos científicos, libros, videos, sitios web, temarios de materias vistas a lo largo de la carrera, esto para conocer a detalle el funcionamiento de cada una de las etapas del sistema y tipos de modulaciones DAB.

2. Análisis por etapa del sistema.

Consistirá en estudiar por partes las etapas del modelo detallado, con la ayuda de Simulink de MATLAB; el objetivo será obtener y entender el comportamiento de todo el sistema a fin de conocer las estructuras básicas que lo componen, sus formas de onda, operación, y características generales.

3. Modelos de simulación por etapas.

Se unirán todos los modelos que conforman el sistema en su totalidad, se diseñará un código para el control de toda la simulación, y una vez unido el modelo y la programación, el proceso será estudiado a detalle, observando el comportamiento en conjunto y realizando mejoras en cada subsistema para tener una mejor respuesta del procedimiento en conjunto.

4. Simulación y Realización de Pruebas del convertidor.

Se realizarán diversas pruebas de simulación y se obtendrán curvas de comportamiento de cada etapa, observando las variables esenciales. Finalmente, se analizará su operación implementando diferentes casos de estudio.

5. Análisis de datos obtenidos y conclusiones.

Con las observaciones y resultados de la etapa anterior, se obtendrán las conclusiones finales, y el impacto en el entorno que podrá tener este proyecto de tesina.

1.7 Organización de la Tesina

Capítulo 2: Estado del Arte

En este capítulo se presentará el marco teórico que sustenta este trabajo. Asimismo, se analizarán las diferentes técnicas de modulación encontradas en la literatura científica que se utilizan en los convertidores DAB, así como sus ventajas y desventajas en cuanto a eficiencia energética.

Capítulo 3: Simulación numérica y obtención de curvas de operación

En este capítulo se estudiará el modelo de operación básico de un convertidor DAB, el cual dará paso a la obtención de la simulación propuesta en esta tesina, que posteriormente se implementará para la realización de pruebas con diferentes ciclos de servicio y parámetros de voltaje, para la adquisición de diversas curvas de comportamiento, para su consecutivo análisis.

Capítulo 4: Discusión, Conclusiones y Trabajo a Futuro

En este capítulo se obtendrán las conclusiones, y se hablará sobre el impacto que este proyecto llegará a tener en el ahorro energético de los convertidores y los sistemas de generación de energías limpias., así como del trabajo a futuro.

Capítulo 2: Estado del Arte

El Control de Desplazamiento Único de Fase (SPSC) es la técnica de modulación más simple para convertidores DAB, en la cual ambos puentes H operan con un ciclo de trabajo máximo del 50 % y se emplea un único lazo de control para el desplazamiento de fase; no obstante, esta simplicidad implica la presencia inherente de una corriente reactiva I_Q distinta de cero para cualquier nivel de corriente activa I_A [29].

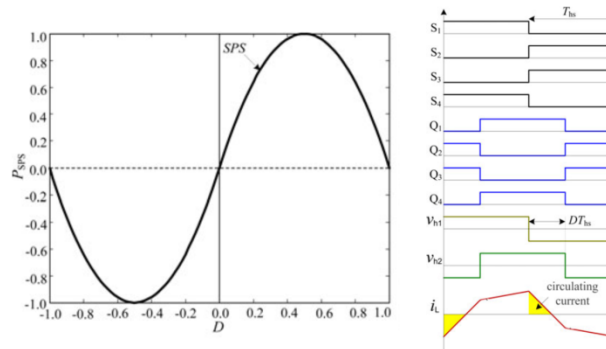


Fig. 5.- Caracterización de la potencia de Transmisión del DAB-IBDC con control SPS [29].

El Control de Desfasamiento Dual de Fase (DPSC) pretende reducir la componente I_Q [30]. Esta técnica utiliza dos lazos de control PI para lograr una modulación dinámica doble, denominada fase externa (para φ) y fase interna (para μ). Estas variables tienen un amplio rango de valores para diferentes niveles de potencia. Sin embargo, esta implementación tiene complejidades colaterales como tener varias soluciones para φ y μ .

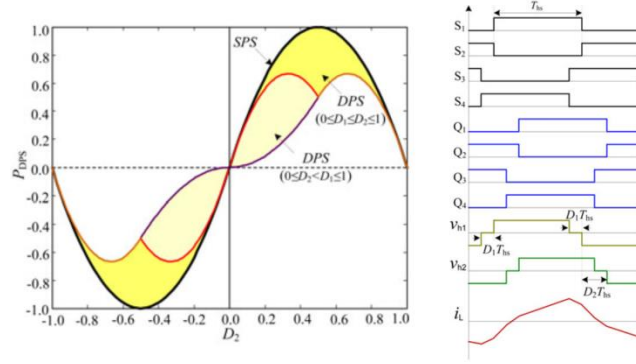


Fig. 6.- Caracterización de la potencia de Transmisión del DAB-IBDC con control DPS [29].

En [12], [31] y [32] se presentan una serie de caracterizaciones, análisis matemáticos y resultados experimentales para comparar entre SPSC y DPSC, pero sin proponer alternativas para $I_Q = 0$.

Respecto a los modelos DAB, en [33] y [34] presentan modelos promediados considerando la modulación básica SPSC. Por otro lado, en [35] demuestran mejoras en el comportamiento transitorio del convertidor utilizando la técnica “Superficie de conmutación natural”. Aunque se consiguen algunas mejoras, utiliza modulación SPSC, lo que se considera una desventaja.

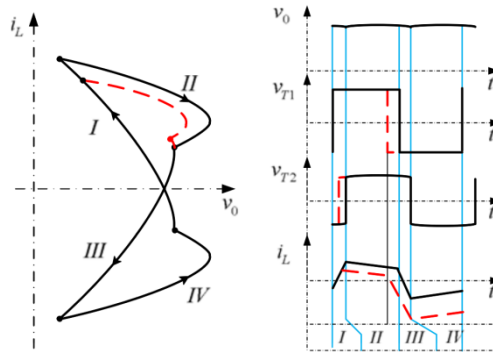
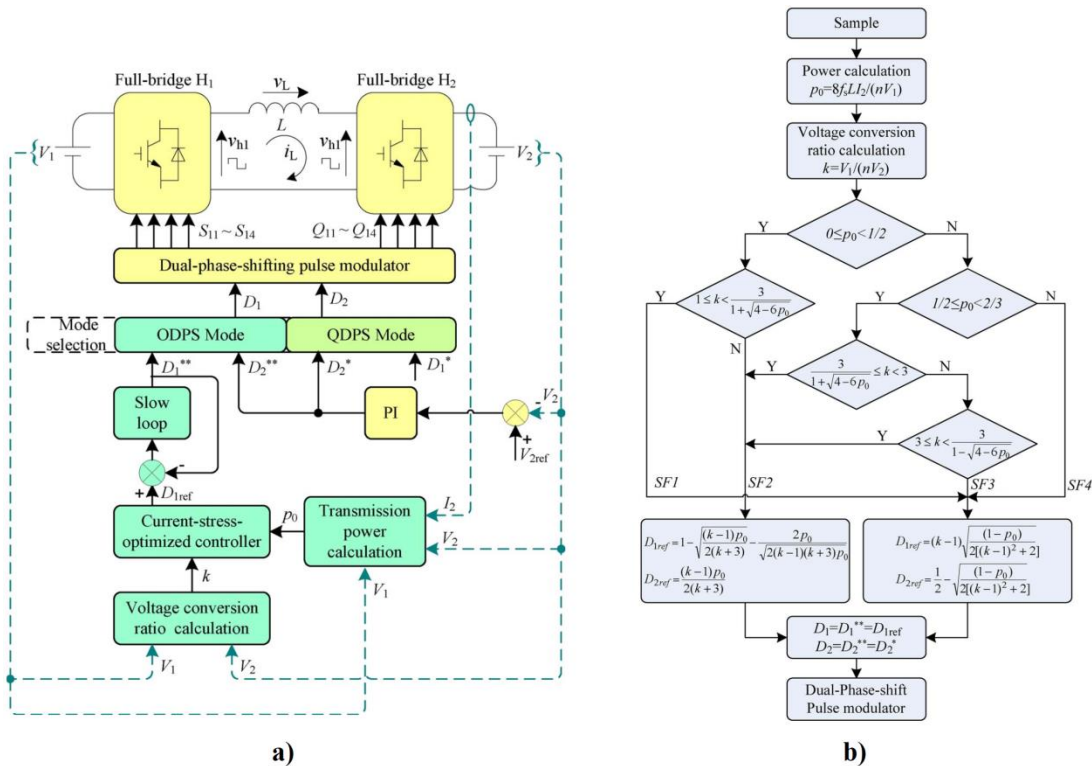


Fig. 7.- Cambio conceptual de voltaje-segundo del Transformador con Trayectoria II [35].

Asimismo, en [36] proponen la técnica de control de desplazamiento triple de fase, que mejora la estabilidad de un puente Dual bidireccional CD/CD no lineal, pero deja de lado la eliminación de I_Q .



Otras soluciones más complejas para minimizar I_Q a cero se basan en técnicas que se han vuelto poco viables en su implementación dado que se basan en modificaciones dinámicas de los parámetros del transformador de alta frecuencia (HFT). Por ejemplo, [39] requiere ajustes en tiempo real de la inductancia de dispersión, L_D . De igual manera, [40] propone cambios dinámicos de la relación de transformación del HFT.

Desde otro punto de vista, [41] proponen el método de estrategia fundamental-óptima, que opera con base en la caracterización de armónicos de voltaje y corriente. Como el espectro de I_A contiene varios armónicos específicos, se deben eliminar algunos armónicos no deseados. Bajo este criterio, existe un número infinito de soluciones simultáneamente, por lo que para resolver este problema los autores proponen la aplicación de un modelo promediado. En este caso, I_Q disminuye pero esta corriente no es cero ni está cerca de cero. Además, esta técnica necesita monitorización de corrientes, dos lazos PI y una plataforma computacional lo suficientemente potente como para calcular ecuaciones trigonométricas rápidamente.

De manera similar, [42] propone un algoritmo de 5 pasos que selecciona diferentes modos de operación y rangos de potencia, pero a pesar de estas características la solución propuesta es similar en costo computacional y complejidad a [41]. Entre las últimas propuestas sobre cómo aumentar la eficiencia del DAB, varias técnicas de conmutación con voltaje cero (ZVS) [43–46] han atraído gran atención de los diseñadores. Desde el lado positivo, estas técnicas han demostrado su capacidad para mejorar la eficiencia, pero en general, las técnicas ZVS tienen una serie de desventajas. Algunos ejemplos de esto son: (i) los algoritmos son complejos y necesitan grandes recursos computacionales; (ii) siempre se requiere monitorear corrientes y voltajes de CA y CD, y (iii) el I_{LD} tiene un THD alto.

En particular, [43] utiliza un algoritmo de optimización difícil de implementar que también necesita monitorear las corrientes. La técnica de Desfasamiento Dual de Fase extendido se obtiene al promediar tres zonas de operación analizadas [44]. El autor enfatiza que el promedio reduce la complejidad del algoritmo. Si bien esta propuesta tiene un punto de vista interesante, es importante notar que bajo este concepto I_Q opera en diferentes rangos de operación y niveles de potencia. Con el fin de ampliar el rango de operación utilizando ZVS, [45] afirma que el análisis del aumento o reducción de la tensión de entrada/salida del DAB mediante modulación es innecesario porque controlando la relación de transformación del transformador de alta frecuencia es posible controlar la ganancia de tensión (ganancia limitada por la inductancia parásita). Bajo este supuesto, se desarrolla una nueva técnica ZVS para ampliar el rango operativo del DAB. Aunque esto último se logra, esta propuesta mantiene las desventajas generales de las técnicas ZVS. Una técnica ZVS sin

sensor de corriente se muestra en [46] proporcionando mejores resultados en comparación con otras técnicas, en esta el autor analiza el tiempo de cómputo en detalle haciendo comparaciones. Es importante notar que todas las propuestas aumentan el THD en el HFT lo que está asociado a niveles más altos de EMI.

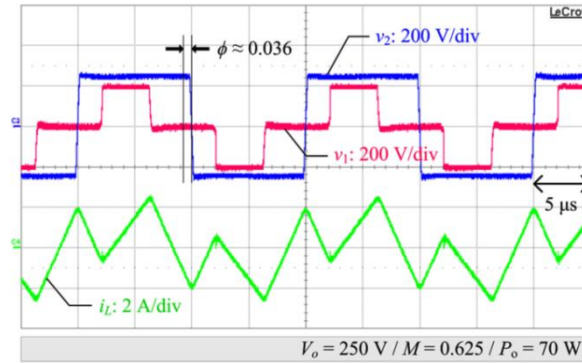


Fig. 9.- Formas de onda en estado estacionario de V_1 (rojo), V_2 (azul) e I_L (verde) Utilizando el método de diferencias finitas propuesto para $M = 0,625$ a 70 W [46].

La complejidad de los esquemas de control DAB propuestos puede retrasar su aplicación. Para aplicaciones industriales, se prefieren esquemas de control menos complejos y fáciles de implementar. Además, un menor número de variables monitoreadas es una mejor opción. Otras características de interés para los controles DAB son: (a) la capacidad de eliminar el I_Q ; (b) la mejora de la eficiencia; (c) el aumento de la densidad de potencia, y (d) operar sin la necesidad de modificaciones dinámicas de los parámetros del HFT.

Varias aplicaciones DAB utilizan niveles de CD constantes en sus puertos V_{DC1} y V_{DC2} [47-53] y la ganancia de voltaje del convertidor depende únicamente de la relación de voltaje del HFT. Las investigaciones actuales señalan que lograr la elevación o reducción de voltaje mediante modulación tiende a ser innecesario. Las aplicaciones DAB seguirán creciendo en el futuro próximo [29], [54] y se esperan propuestas novedosas, creativas e innovadoras.

Capítulo 3: Simulación numérica y obtención de curvas de operación

3.1 Operación del convertidor DAB

De manera similar a [45], se analizará al DAB considerando valores de CD constantes en ambos puertos de CD, con el coeficiente de relación de transformación α dependiendo del número de vueltas en el primario y secundario (N_p y N_s) del HTF igual a la relación de voltaje de CD entre V_{DC1} y V_{DC2} , como se describe en (1):

$$\alpha = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{DC1}}{V_{DC2}} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta (1), el funcionamiento de la técnica PVM se diseña con base en el análisis de los estados topológicos de la corriente reactiva del inductor, I_{LD} . Para que el I_Q sea 0, el PVM se atiene a una regla básica: Igualar los volts/s de carga que fluyen a través de I_{LD} con los volts/s descargados.

3.1.1 Modelo del DAB y operación general

Considerando tres niveles de voltaje para las formas de onda V_p y V_s , las funciones de conmutación $S_{1,i}$ y $S_{2,i}$ para cada módulo de puente H se definen en la *Tabla 2*, donde $S \in \{0,1\}$ para el estado de conmutación e $i \in \{1,2\}$ para el número de puentes H [9][10].

Tabla 2.- Funciones de conmutación para el control del Puente H [9][10]

$S_{1,i}$	$S_{3,i}$	V_P	I_{DC1}
1	0	V_{DC1}	I_{LD}
1	1	0	0
0	0	0	0
0	1	$-V_{DC1}$	$-I_{LD}$

Donde los pulsos complementarios de los interruptores se pueden definir por $S_{2i} = \overline{S_{1i}}$ y $S_{4i} = \overline{S_{3i}}$

De la *Tabla 2*, la relación de V_P y V_S son:

$$V_P = (S_{1,1} - S_{3,1}) * V_{DC1} \cong m_1 * V_{DC1} \quad (2)$$

$$V_S = (S_{1,2} - S_{3,2}) * V_{DC2} \cong m_2 * V_{DC2} \quad (3)$$

La corriente I_{LD} en el circuito de malla formado V_P , V_S y la inductancia L_D , se define como:

$$I_{LD} = \frac{1}{T_C * L_D} \int_0^\varphi V_L * d\varphi + I_{LD}^\circ \quad (4)$$

Donde I_{LD}° es la condición inicial de I_{LD} y φ es la portadora de desplazamiento de fase considerando (1) V_L se define como:

$$V_L = V_P - \alpha * V_S \quad (5)$$

Las corrientes que fluyen por los terminales de CD de los puentes H son:

$$I_{DC1} = m_1 * I_{LD} \quad (6)$$

$$I_{DC2} = m_2 * I_{LD} \quad (7)$$

La *Fig. 10* muestra el circuito equivalente obtenido del convertidor DAB sin pérdidas en HFT ($r_p = 0$) basado en fuentes dependientes y utilizando la inductancia de dispersión L_D .

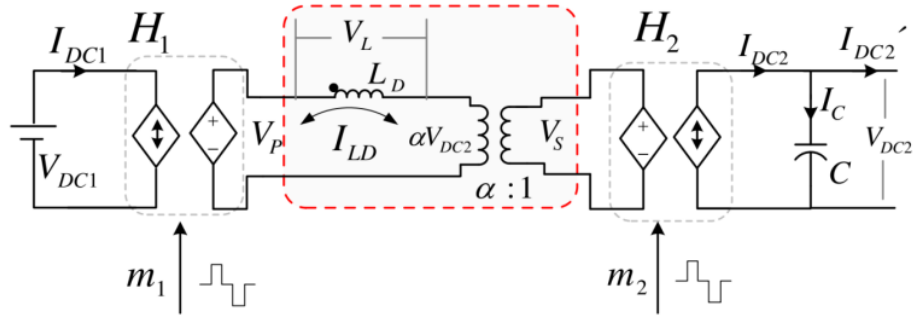


Fig. 10.- Circuito equivalente del convertidor DAB [10].

Considerando la sección media del modelo promedio del DAB, el I_{LD} puede analizarse utilizando V_{DC1} y V_{DC2} . En este caso, se forman diferentes estados topológicos, como se muestra en la Fig. 11.

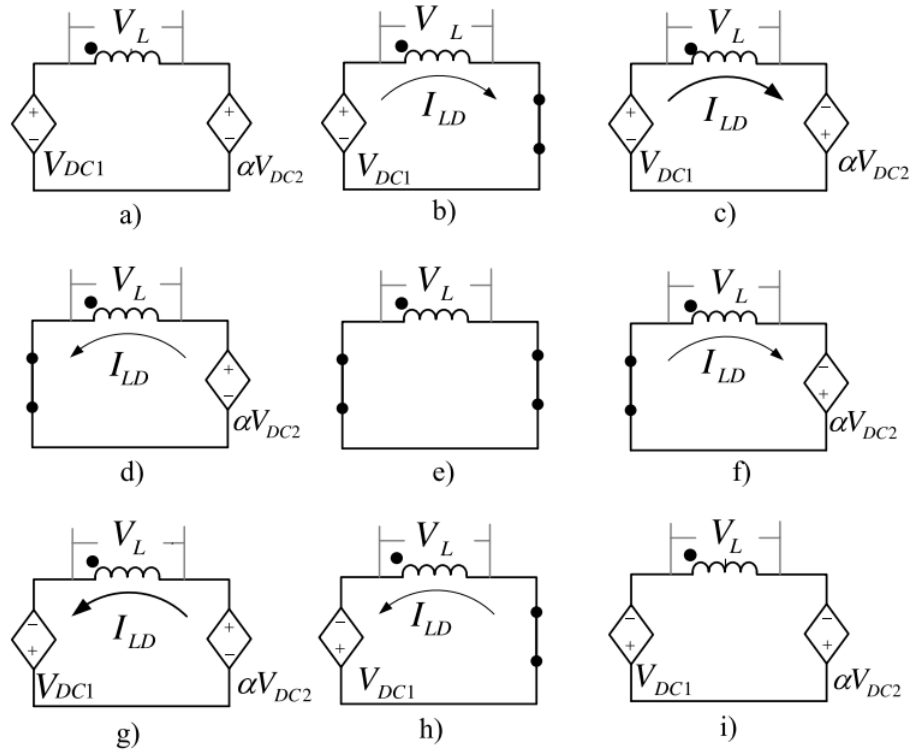


Fig. 11.- Estados Topológicos para V_L [10].

Con base en (1), y considerando $V_{DC1} \approx \alpha * V_{DC2}$, la función de estados topológicos de un voltaje V_L puede describirse solo en términos de V_{DC1} .

$$\hat{V}_L = \begin{cases} 2V_{DC1} & c) & state \\ V_{DC1} & b) \& f) & state \\ 0_0 & a) \& i) & state \\ 0_1 & e) & state \\ -V_{DC2} & d) \& h) & state \\ -2V_{DC1} & g) & state \end{cases} \quad (8)$$

De acuerdo con (8), L_D tiene diferentes valores de voltaje V_L para los diferentes estados y se establecen diferentes pendientes de carga y descarga para I_{LD} de acuerdo con (4). Los cambios sincronizados entre todos los estados topológicos ($V_L = \pm 2V_{DC1}$; $V_L = \pm V_{DC1}$ y $V_L = 0$) producen la transferencia de potencia en el convertidor. Esta transferencia de potencia está controlada por combinaciones de valores φ y μ . Estas combinaciones tienen diferentes trayectorias de operación de I_A e I_Q .

La corriente de retorno, o corriente reactiva, I_Q , se produce cuando la energía almacenada (volts/s) en el L_D , cargado en un estado topológico de carga dado, no se descarga completamente en el siguiente estado de descarga. Esto se puede deducir una vez completado el análisis de los estados topológicos. En el caso que se muestra en la *Fig. 11*, I_Q se establece implementando los estados $V_L = \pm 2V_{DC1}$. Una ventaja de la técnica PVM propuesta es que su funcionamiento no requiere los estados topológicos $V_L = \pm 2V_{DC1}$. De esta forma el DAB funciona en estados de carga y descarga sin establecer un exceso de energía almacenada. Es decir, la energía total almacenada en L_D en el estado de carga $V_L = \pm V_{DC1}$ se encuentra completamente descargada en el siguiente estado de descarga $V_L = \pm V_{DC1}$. Utilizando la técnica PVM el DAB consigue un $I_Q = 0$. Esta es una primera contribución de este trabajo de investigación. Con el fin de resaltar las ventajas y particularidades de la técnica PVM sobre los esquemas SPSC y DPSC, se comparan exhaustivamente las trayectorias de I_A e I_Q (con respecto a φ y μ) obtenidas con cada una de esas técnicas. Además, se muestran una serie de puntos de funcionamiento estáticos, con respecto al tiempo, para cada uno de los tres esquemas de modulación analizados.

3.1.2 Trayectorias de Operación para SPSC, DPSC y PVM

Las trayectorias de I_A , obtenidas con SPSC ($\mu = 50\%$) y DPSC ($0\% < \mu < 50\%$) se muestran (verde) en la Fig. 12 a). En todos los casos, la portadora de desplazamiento de fase varía en el rango $0 < \varphi < \pi$. Esta figura también muestra, en azul, la trayectoria actual lograda con el esquema PVM. Como era de esperar, μ aumenta proporcionalmente a φ . Además de esto, la Fig. 12 b) muestra, en rojo, las trayectorias de I_Q , obtenidas con SPSC y DPSC, y, en azul, la trayectoria obtenida con PVM. Este último siempre está cerca de cero. Las ecuaciones I_A e I_Q , para todos los casos, se presentan en la Tabla 3. La I_A máxima se encuentra en $\varphi = \pi/2$ para las técnicas SPSC y DPSC pero no para PVM cuyo I_A máximo se encuentra en $\varphi = \pi/3$. El máximo se encuentra utilizando la prueba derivativa $\frac{d^2(I_A(\phi))}{d\phi} = 0$ a las ecuaciones (9)–(18) de la Tabla 3.

Tabla 3.- Ecuaciones de comportamiento, I_A y I_Q divididos por áreas operativas [10].

Método	Rango de “ μ ”	Rango de “ φ ”	I_A	I_Q
SPSC	50%	$0 < \varphi < \pi$	$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} [\pi\varphi - \varphi^2] \quad (9)$	$-\frac{V_{DC12}}{8\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \cdot \varphi^2 \quad (16)$
DPSC	$\mu < \frac{\phi}{\mu} < \frac{1-\phi}{\mu}$	$\phi < \frac{\pi}{2}$	$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \left[\frac{\mu}{50}\right] [\pi\varphi - \varphi^2] \quad (10)$	0
	$\frac{\phi}{\mu} < \mu < \frac{1-\phi}{\mu}$		$\frac{V_{DC12}}{8 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \left[\frac{\mu}{50}\right] \quad (11)$	0
	$\frac{\phi}{\mu} < \frac{1-\phi}{\mu} < \mu$		$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \left[\frac{\mu}{50}\right] [\pi\varphi - \varphi^2] \quad (12)$	$-\frac{V_{DC12}}{8\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \cdot \left[\frac{\mu}{50}\right] \cdot \varphi^2 \quad (17)$
	$\mu < \frac{\phi}{\mu} < \frac{1-\phi}{\mu}$	$\phi > \frac{\pi}{2}$	$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \left[\frac{\mu}{50}\right] [\pi\varphi - \varphi^2] \quad (13)$	0
	$\frac{\phi}{\mu} < \mu < \frac{1-\phi}{\mu}$			$-\frac{V_{DC12}}{8\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \cdot \left[\frac{\mu}{50}\right] \cdot \varphi^2 \quad (18)$
	$\frac{\phi}{\mu} < \frac{1-\phi}{\mu} < \mu$			
PVM	$\frac{\phi}{\pi} < \frac{\pi}{3}$	$\mu = \left \frac{1}{\pi}\right \cdot \Delta\varphi$	$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} \left[\pi\varphi - \frac{3}{4}\varphi^2\right] \quad (14)$	0
	$\frac{\phi}{\pi} > \frac{\pi}{3}$		$\frac{V_{DC12}}{2\pi^2 \cdot F_C \cdot L_{hf}} [\pi\varphi - \varphi^2] \quad (15)$	0

De igual forma, los I_Q máximos se obtienen en el límite $\varphi = \pi$ para modulaciones SPSC y DPSC, mientras que al utilizar PVM no se produce potencia reactiva. La Fig. 12 c)–e) muestra tres puntos de operación estáticos denominados SP_{SPSC} , SP_{DPSC} y SP_{PVM} . También se muestran las formas de onda V_P , V_S , V_L , I_{LD} e I_{DC1} para cada modulación en I_A máximo.

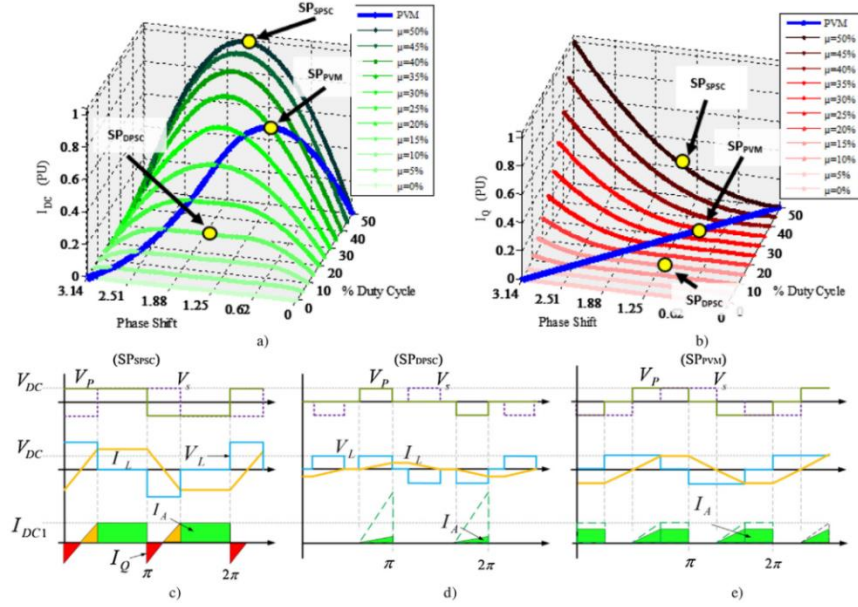


Fig. 12.- Áreas de operación DAB: a) Trayectorias de I_A para $0 < \mu < 50\%$ y $0 < \varphi < \pi$; b) Trayectorias de I_Q para $0 < \mu < 50\%$ y $0 < \varphi < \pi$; c) Formas de onda principales para PS_{SPSC} ; d) Formas de onda principales para PS_{DPSC} ; e) Formas de onda principales para SP_{PVM} [10].

- **Punto de Operación Estático SP_{SPSC} ($\mu = 50\%$ y $\varphi = \pi/2$)**

El punto de operación estático SP_{SPSC} ($\mu = 50\%$ y $\varphi = \pi/2$), Fig. 12 c), representa la condición en la que I_A e I_Q operan en V_L con los siguientes estados topológicos:

$$\hat{V}_L = \begin{cases} 2V_{DC1} & c) & state \\ 0_0 & a) \& i) & state \\ -2V_{DC1} & g) & state \end{cases}$$

Es posible que el exceso de I_{LD} no se descargue en $C - R_L$. Este exceso pone condiciones para establecer la I_Q . Esta corriente se modela como una corriente negativa (área roja en la Fig. 12 c)) que regresa al puerto V_{DC1} . En esta condición, el I_Q promedio se contrarresta con una fracción de la corriente activa I_{A0} (área naranja). Por lo tanto, I_A (área verde) permanece como la única corriente transferida a la carga. De esta condición se puede inferir que al utilizar modulación SPSC, I_{A0} e I_Q circulan internamente al circuito pero no fluyen hacia la carga. En estas circunstancias, el HFT es estresado por una potencia aparente 1,5

veces superior a la que fluye hacia la carga. El esfuerzo de corriente y las pérdidas de conducción resultantes son innecesarias para todos los interruptores semiconductores.

- **Punto de Operación Estático SP_{DPSC} ($\mu = 20\%$ y $\varphi = \pi/2$)**

El punto de operación estático SP_{DPSC}, mostrado en la *Fig. 12 d*), representa la acción de modulación DPSC. Las corrientes I_A e I_Q en la figura se establecen en el voltaje V_L , que se obtiene en los siguientes estados topológicos,

$$\hat{V}_L = \begin{cases} V_{DC1} & b) \& f) & state \\ 0_0 & e) & state \\ -V_{DC1} & d) \& h) & state \end{cases}$$

A diferencia de la técnica SPSC, el uso de DPSC permite eliminar la componente de corriente reactiva I_Q ; sin embargo, esta ventaja se ve contrarrestada por una reducción drástica del valor promedio de la corriente activa I_A . Como consecuencia, la capacidad de transferencia de potencia del convertidor DAB bajo DPSC se reduce aproximadamente a una quinta parte de la alcanzada mediante SPSC. Adicionalmente, la técnica DPSC presenta desventajas asociadas a las discontinuidades de la corriente del inductor I_{LD} en los cruces por cero, así como a un incremento del contenido armónico total (THD) cuando se emplea la condición $V_L = \pm V_{DC1}$ en el estado topológico mostrado en la *Fig. 11 e*). En este escenario, para alcanzar un valor de I_A equivalente al obtenido con SPSC (línea punteada verde), es necesario reducir el valor del inductor L_D en aproximadamente un 70 %. No obstante, dicha reducción conlleva un incremento significativo de las corrientes I_{LD} e I_{DC2} , las cuales alcanzan magnitudes del orden de 2.5 veces las obtenidas con SPSC y hasta cinco veces el valor promedio de I_A . En consecuencia, aun cuando se logra $I_Q = 0$ mediante DPSC, se produce un aumento considerable en la tensión soportada por los interruptores semiconductores, así como en el tamaño requerido del capacitor asociado a V_{DC2} , condiciones que incrementan el esfuerzo eléctrico y aceleran la degradación de los componentes electrónicos del sistema.

- **Punto de operación estático SP_{PVM} ($\mu = 33\%$ y $\varphi = \pi/3$)**

El punto de operación estático SP_{PVM}, mostrado en la *Fig. 12 e*), representa el funcionamiento de la técnica PVM. En este caso, I_A e I_Q se establecen en la tensión V_L con los siguientes estados topológicos:

$$\hat{V}_L = \begin{cases} V_{DC1} & b) \& f) & state \\ 0_0 & a) \& i) & state \\ -V_{DC1} & d) \& h) & state \end{cases}$$

La técnica PVM aporta dos características deseables al funcionamiento de los convertidores DAB; la eliminación de la potencia reactiva junto con la eliminación de los estados topológicos $V_L = \pm 2V_{DC1}$ y la eliminación de las discontinuidades de I_{LD} en el HFT. Para lograr la misma cantidad de I_A transferida que la obtenida con SPSC, es necesario reducir L_D aproximadamente en un 25%. Una vez realizado el ajuste, se obtienen algunas ventajas adicionales. La más relevante de ellas es que la magnitud máxima de I_{LD} e I_{DC2} no aumenta. De esta forma, el tamaño del condensador de salida, C , se reduce aproximadamente un 30% y un 50% respecto al obtenido con SPSC y DPSC respectivamente. En resumen, aplicando la técnica PVM el HFT no está sometido a una potencia mayor que la potencia transferida a la carga.

En la *Tabla 3* se presentan las relaciones matemáticas que definen las corrientes I_Q e I_A promedio obtenidas con diferentes métodos de modulación recién analizados para diferentes áreas de operación del convertidor DAB. A partir de estas comparaciones matemáticas es posible realizar un análisis de los beneficios obtenidos al utilizar la técnica PVM.

3.2 Descripción de la Simulación

Parámetros de la simulación

La simulación realizada en el presente trabajo tomo en cuenta los siguientes parámetros:

- **Frecuencia de conmutación:** 1 KHz. Es la frecuencia con la que van conmutando los interruptores de los puentes H que componen el convertido de doble puente activo. (Definida en el módulo de desplazamiento de fase).
- **Tiempo de Muestreo de Simulación:** 1 μ s. Es tiempo de muestreo de la simulación; se eligió este tiempo para tener mayor fidelidad de los datos.
- **Tiempo de Muestreo de los datos:** 400 μ s. Es el tiempo que pasa entre cada muestra registrada por el programa.
- **Tiempo de simulación:** 4 s. Tiempo en el que se ejecuta la simulación.

Descripción del sistema simulado

En la Fig. 13 se muestra el modelo en Simulink utilizado para las simulaciones y pruebas experimentales; el código correspondiente se presenta en los Anexos.

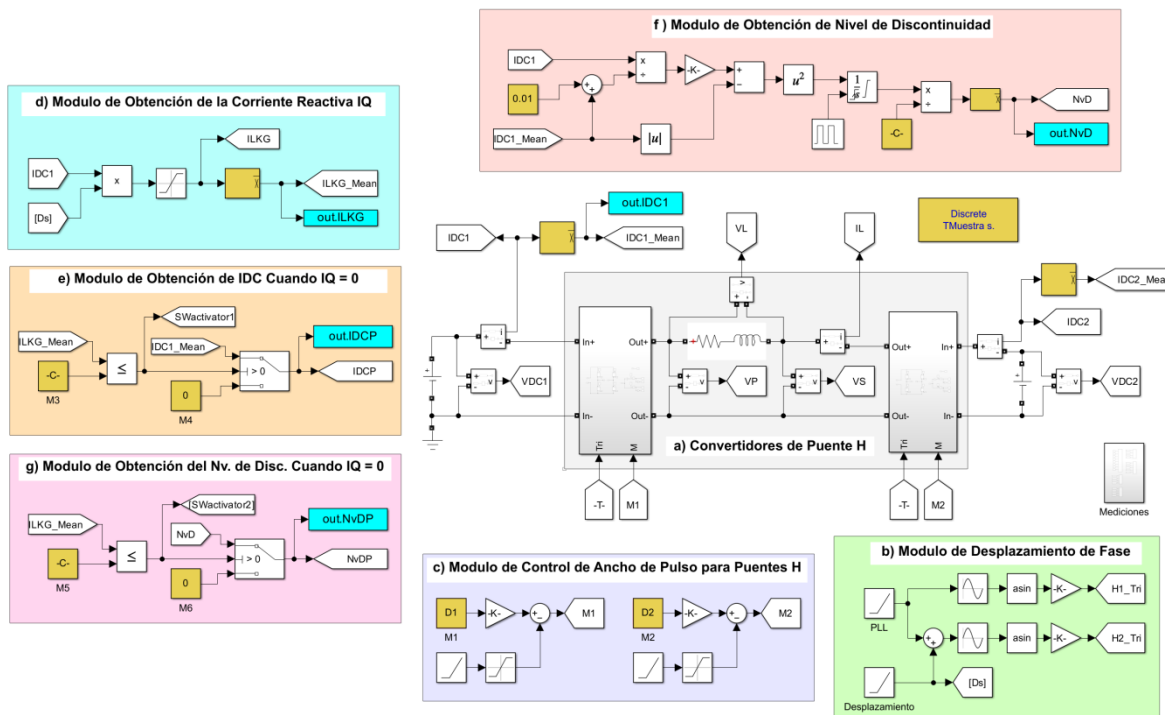


Fig. 13.- Modelo de Simulink del DAB para realización de pruebas.

a) Convertidores de Puente H

Dos convertidores Puente H, cuyos lados de CA están conectados a una inductancia de acoplamiento.

b) Módulo de Desplazamiento de Fase

Mediante el uso de dos señales rampa con distintas pendientes como referencias temporales, se generan dos señales senoidales desfasadas, las cuales, al aplicar la función arco seno, producen señales triangulares de corriente alterna con un desfase controlado por la variable φ ; dichas señales se emplean como disparos para la generación de tres niveles de voltaje en los puentes H del convertidor Dual Active Bridge.

c) Módulo de Control de Ancho de Pulso para Puentes H

Para cada puente H del DAB, se genera el ancho de pulso del ciclo de trabajo.

d) Módulo de Obtención de la corriente Reactiva I_Q

Este módulo se encarga de la obtención de la corriente reactiva del convertidor y posteriormente saca su valor promedio.

e) Módulo de obtención de I_{DC} cuando $I_Q = 0$

Por medio de un interruptor, este módulo sólo permite el paso del promedio de la corriente de I_{DC} , siempre y cuando $I_Q = 0$; en caso contrario, el interruptor permanecerá cerrado, y el valor promedio de I_{DC} será cero.

f) Módulo de obtención de nivel de discontinuidad

Este módulo se encarga de la obtención del nivel de discontinuidad, la cual se obtiene por medio de la normalización de la integral del cuadrado de la diferencia de la corriente instantánea menos el valor medio de la corriente para un ciclo.

$$\frac{\frac{1}{T} \int_0^T (f(\lambda) - |\text{Valor Medio}|)^2 dt}{I_{DC \text{ Base}}} \quad (19)$$

g) Módulo de Obtención del Nivel de Discontinuidad cuando $I_Q = 0$

Por medio de un interruptor, este módulo sólo permite el paso del promedio del nivel de discontinuidad, siempre y cuando $I_Q = 0$; en caso contrario, el interruptor permanecerá cerrado, y el valor promedio del nivel de discontinuidad será cero.

3.3 Análisis Paramétrico para diferentes ciclos de servicio y relaciones de voltajes

1. Caso base

Inicialmente se evaluó un caso base del sistema bajo condiciones nominales, considerando un nivel de 100 V_{DC} en ambas fuentes del convertidor y una modulación del 50 % en cada uno de los puentes H, con el propósito de caracterizar la corriente aparente I_{DC} y la corriente reactiva I_Q , tal como se presenta en la *Fig. 14*. Los resultados obtenidos indican que, aunque se alcanza un valor relevante de I_{DC} , este se ve acompañado por una magnitud significativa de I_Q durante el periodo de la señal, lo que permite establecer que un incremento en la corriente aparente está directamente asociado a un aumento de la corriente reactiva en el convertidor.

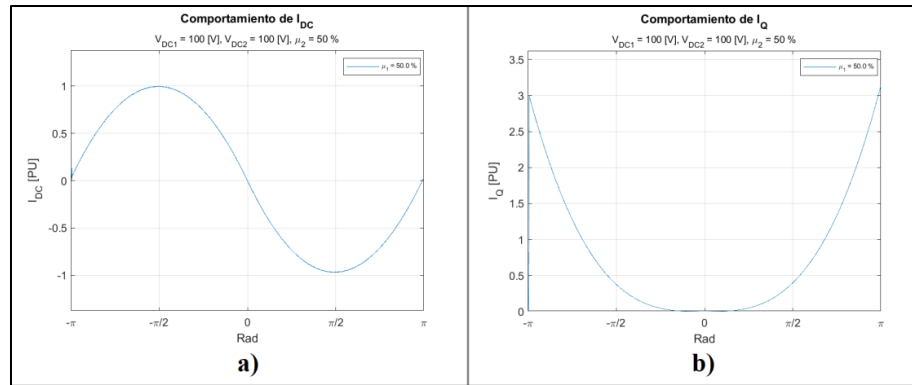


Fig. 14.- Resultado de la simulación del caso base, con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V, $\mu_1 = \mu_2 = 50\%$; a) Forma de I_{DC} ; b) Forma de I_Q .

2. Cambios en ancho de pulso de un puente H

Como se muestra en la *Fig. 15*, se realizó una simulación paramétrica manteniendo fijas ambas fuentes en 100 V_{DC} y la modulación del segundo puente H en 50 %, mientras que la modulación del primer puente H se varió de 0 % a 50 % en incrementos del 5 %; los resultados evidencian que la disminución de dicha modulación reduce tanto la corriente aparente I_{DC} como la corriente reactiva I_Q del convertidor.

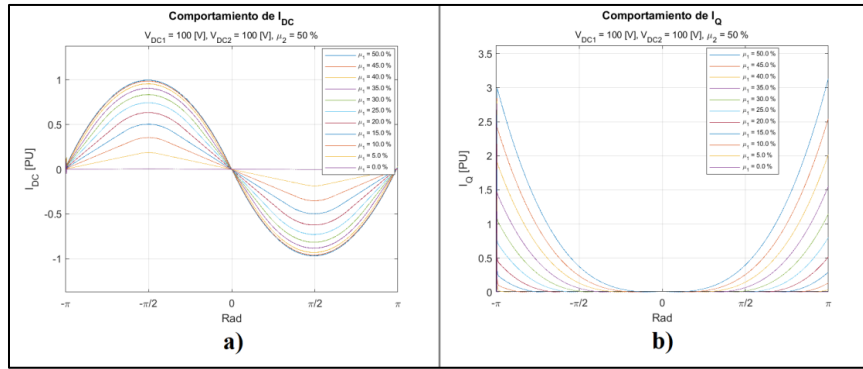


Fig. 15.- Resultado de la simulación del caso nominal, con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V y $\mu_2 = 50\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%; a) Forma de I_{DC} ; b) Forma de I_Q .

3. Cambios de tensión en CD y anchos de pulso de ambos puentes H

Posteriormente, se llevaron a cabo múltiples simulaciones paramétricas, en las cuales se varió el voltaje de ambas fuentes de corriente directa del convertidor en un rango de 100 V a 130 V. De manera simultánea, la modulación del segundo puente H se redujo progresivamente en intervalos del 10 % cada siete simulaciones, abarcando valores desde 50 % hasta 10 %. Para cada condición de operación, se realizaron barridos adicionales de la modulación del primer puente H, variándola desde 0 % hasta 50 % en incrementos de 5 %. En cada caso, se calcularon y graficaron tanto la corriente reactiva I_Q como la corriente en ausencia de componente reactiva (I_{DC} cuando $I_Q = 0$), con el fin de analizar el comportamiento del convertidor bajo diferentes combinaciones de parámetros. El conjunto de simulaciones realizadas se resume en la tabla siguiente.

Tabla 4.- Simulaciones realizadas para observar I_{DC} cuando $I_Q = 0$

	$V_{DC1} = 130$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 120$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 110$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 110$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 120$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 130$
$\mu_2 = 50\%$ $\mu_1 = 5 - 50\%$	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4	Simulación 5	Simulación 6	Simulación 7
$\mu_2 = 40\%$ $\mu_1 = 5 - 50\%$	Simulación 8	Simulación 9	Simulación 10	Simulación 11	Simulación 12	Simulación 13	Simulación 14
$\mu_2 = 30\%$ $\mu_1 = 5 - 50\%$	Simulación 15	Simulación 16	Simulación 17	Simulación 18	Simulación 19	Simulación 20	Simulación 21
$\mu_2 = 20\%$ $\mu_1 = 5 - 50\%$	Simulación 22	Simulación 23	Simulación 24	Simulación 25	Simulación 26	Simulación 27	Simulación 28
$\mu_2 = 10\%$ $\mu_1 = 5 - 50\%$	Simulación 29	Simulación 30	Simulación 31	Simulación 32	Simulación 33	Simulación 34	Simulación 35

En la Fig. 16 a), b) y c) se presenta el comportamiento de la corriente reactiva I_Q para una modulación fija del 50 % en el segundo puente H. En particular, el caso a) corresponde a $V_{DC1} = 130 \text{ V}$ y $V_{DC2} = 100 \text{ V}$ (simulación 1); el caso b) a $V_{DC1} = V_{DC2} = 100 \text{ V}$ (simulación 4); y el caso c) a $V_{DC1} = 100 \text{ V}$ y $V_{DC2} = 130 \text{ V}$ (simulación 7). De manera análoga, en la Fig. 16 d), e) y f) se muestra el comportamiento de la corriente de CD en ausencia de componente reactiva (I_{DC} cuando $I_Q = 0$) para los mismos casos de estudio, donde d) corresponde a a), e) a b) y f) a c). A partir de los resultados, se observa en la Fig. 16 f), correspondiente a la condición $V_{DC1} = 100 \text{ V}$ y $V_{DC2} = 130 \text{ V}$, que se obtiene una mayor magnitud de corriente I_{DC} bajo la condición $I_Q = 0$ en comparación con los casos mostrados en d) y e), lo que evidencia una mejora en la capacidad de transferencia de corriente útil bajo esta relación de voltajes.

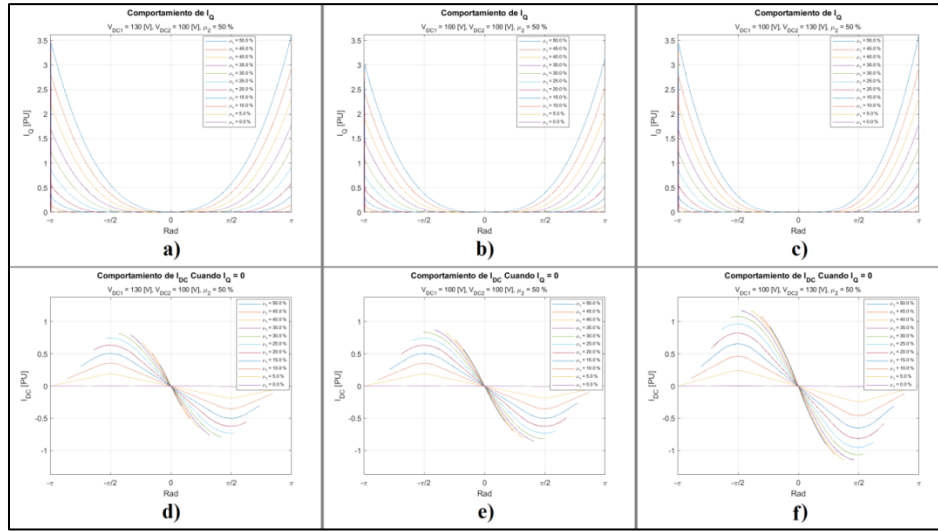


Fig. 16.- Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 50\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%;

- a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;

Las Fig. 17 y Fig. 18 presentan el comportamiento de la corriente reactiva I_Q y de la corriente de CD en ausencia de componente reactiva (I_{DC} cuando $I_Q = 0$) para los mismos casos de voltaje analizados en la Fig. 16. La diferencia radica en que, en estos escenarios, el segundo puente H opera con una modulación fija del 30 % en la Fig. 17 (simulaciones 15,

18 y 21) y con una modulación fija del 10 % en la Fig. 18 (simulaciones 29, 32 y 35), lo que permite evaluar el impacto de la reducción de la modulación sobre el comportamiento de las corrientes del convertidor.

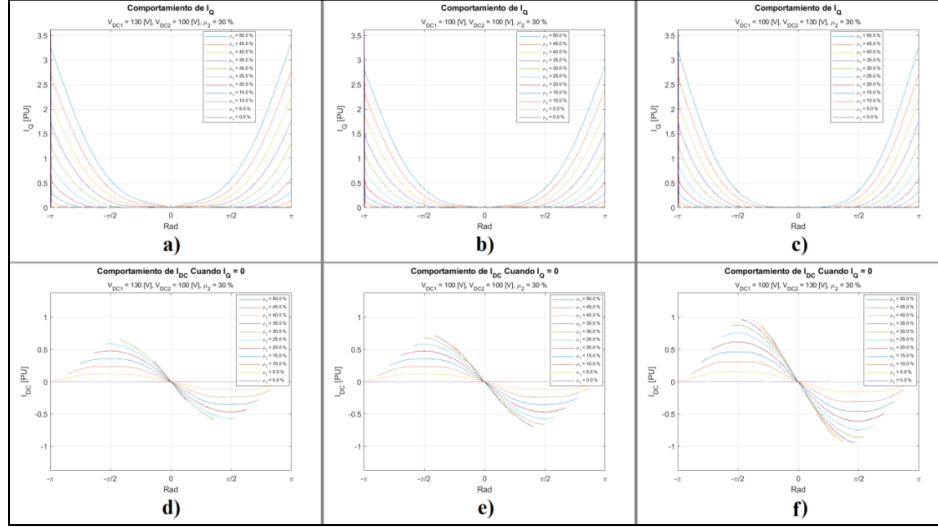


Fig. 17.- Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 30\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%;

a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;

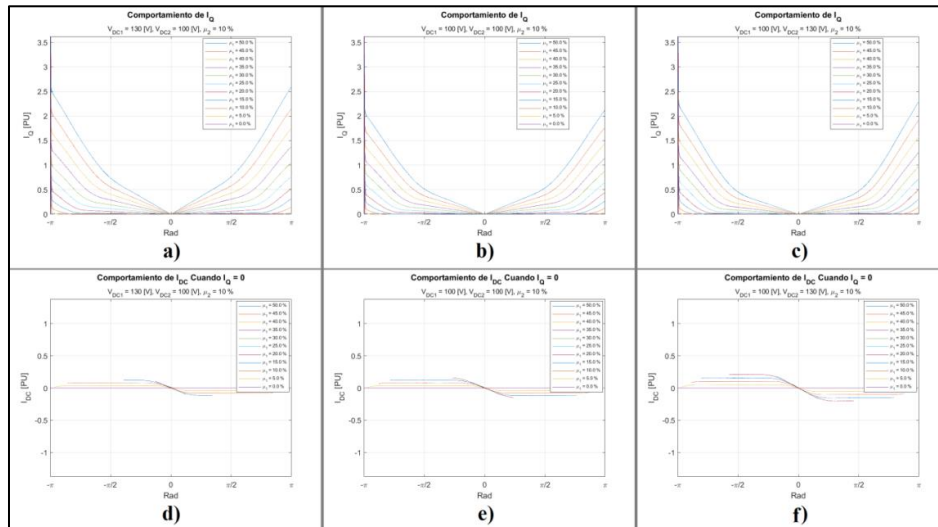


Fig. 18.- Resultados de las simulaciones cuando $\mu_2 = 10\%$, variando los valores de μ_1 de 0% a 50%;

a) I_Q cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) I_Q cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) I_Q cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$; d) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; e) I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; f) I_{DC} cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$;

Del mismo modo que en la *Fig. 16*, la *Fig. 17* y la *Fig. 18* muestran mayor generación de corriente I_{DC} , y una mayor disminución de la corriente reactiva I_Q , cuando el voltaje de V_{DC1} es de 100 V, y V_{DC2} es de 130 V.

4. Obtención del nivel de discontinuidad.

Una vez graficadas las áreas donde existe I_{DC} e $I_Q = 0$, se utilizó la ecuación (19) para obtener los niveles de discontinuidad para las diversas modulaciones de cada simulación (como se muestra en la *Fig. 19 a*). El nivel de discontinuidad servirá para explicarnos que tan discontinuas son las formas de onda de corriente I_{DC} generadas en los puertos del convertidor DAB para las distintas modulaciones aplicadas en cada simulación.

Una vez obtenido los niveles de discontinuidad, se procedió a obtener dichos valores solamente en las áreas donde $I_Q = 0$ (tal y como se muestra en la *Fig 19 b*)).

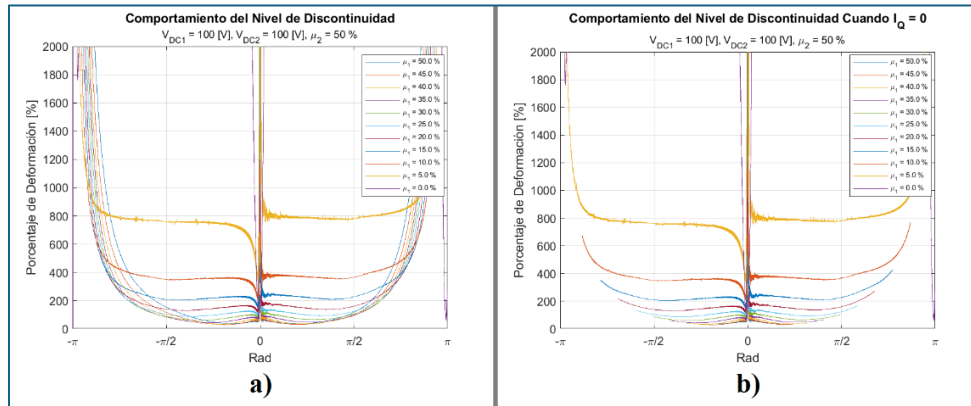


Fig. 19.- Niveles de discontinuidad para las diversas modulaciones de la simulación con $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V y $\mu_2 = 50\%$; a) Niveles de discontinuidad completos; b) Niveles de discontinuidad en las áreas donde $I_Q = 0$.

La *Fig. 20* presenta los niveles de discontinuidad de corriente bajo la condición $I_Q = 0$ para múltiples simulaciones realizadas con distintas combinaciones de modulación y niveles de voltaje. A partir del análisis detallado de estos resultados, se observa de manera consistente que los mínimos valores de discontinuidad se localizan en las regiones de operación donde no existe I_Q , lo que confirma su estrecha relación con el deterioro de la continuidad de corriente en los puertos de CD.

Cabe destacar que, tanto en los gráficos mostrados en la Fig. 19 como en la Fig. 20, los valores del nivel de discontinuidad han sido acotados a un máximo del 2000 %.

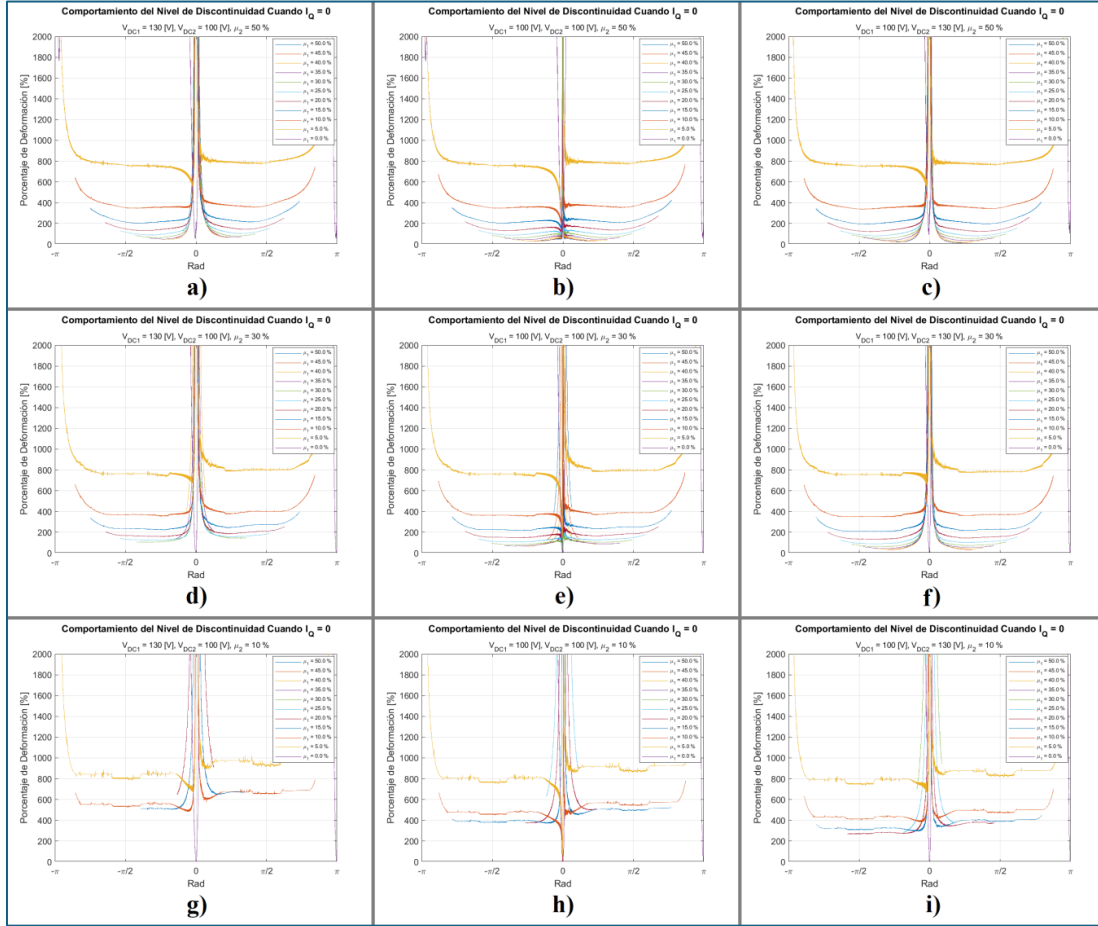


Fig. 20.- Niveles de discontinuidad en las áreas donde $I_Q = 0$, para diversas modulaciones y valores de voltaje

5. Obtención de los puntos de ruptura.

Posteriormente, considerando que en cada simulación se llevó a cabo un barrido de la modulación del primer puente H en un rango de 0 % a 50 %, y que cada variación de dicho parámetro da lugar a la generación de I_{DC} en ausencia de I_Q dentro de intervalos específicos de operación (como se evidencia en las Fig. 16, 17 y 18), se procedió a identificar los puntos de ruptura que delimitan el inicio y el fin de cada rango de generación de I_{DC} . Estos puntos fueron determinados para todas las simulaciones realizadas, lo que permitió una caracterización sistemática de las regiones de operación libres de corriente reactiva.

En este contexto, la Fig. 21 a) muestra I_{DC} obtenida bajo la condición $I_Q = 0$, junto con sus respectivos puntos de ruptura, para el caso en el que ambas fuentes de CD operan a 100 V y el segundo puente H presenta una modulación fija del 50 %. De manera complementaria, la Fig. 21 b) presenta la interpolación de dichos puntos de ruptura, facilitando la identificación y el análisis de las regiones óptimas de operación. A partir del análisis de esta figura, se observa que los puntos de ruptura más cercanos a cero radianes se asocian a valores elevados de modulación del primer puente H, mientras que los puntos de ruptura más alejados corresponden a niveles de modulación más bajos, evidenciando la influencia directa de este parámetro sobre la extensión de los intervalos de operación sin corriente reactiva.

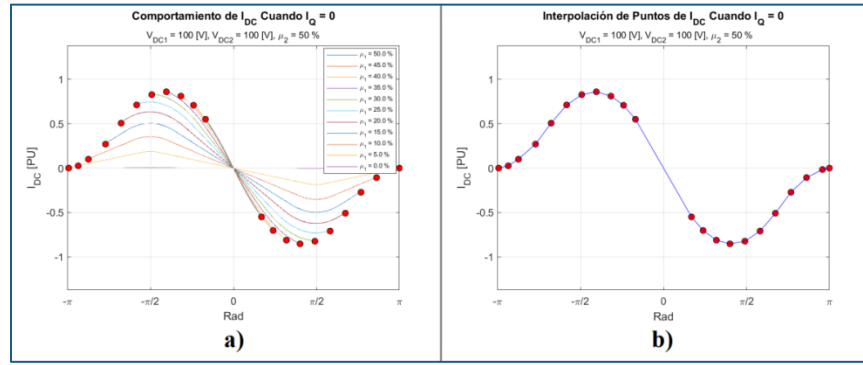


Fig. 21.- Puntos de ruptura de I_{DC} cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$, cuando $\mu_2 = 50$;

a) Generación de puntos de ruptura para cada rango de corriente de I_{DC} ;

b) Interpolación de los puntos de ruptura generados.

6. Interpolaciones de los puntos de ruptura.

Una vez determinados los puntos de ruptura correspondientes a cada simulación, se elaboraron gráficos comparativos que agrupan aquellas simulaciones que comparten los mismos niveles de voltaje en las fuentes de CD. Estos gráficos tienen como propósito comparar las distintas interpolaciones obtenidas ante la variación del porcentaje de modulación del segundo puente H, permitiendo analizar su influencia sobre las regiones de operación libres de corriente reactiva. Los gráficos generados se describen y organizan en la Tabla 5.

Tabla 5.- Gráficos de comparación de las diversas interpolaciones de los puntos de ruptura obtenidos.

Gráfico de Interpolación 1	Gráfico de Interpolación 2	Gráfico de Interpolación 3	Gráfico de Interpolación 4	Gráfico de Interpolación 5	Gráfico de Interpolación 6	Gráfico de Interpolación 7
$V_{DC1} = 130$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 120$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 110$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 100$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 110$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 120$	$V_{DC1} = 100$ $V_{DC2} = 130$
Simulación 1 Simulación 8 Simulación 15 Simulación 22 Simulación 29	Simulación 2 Simulación 9 Simulación 16 Simulación 23 Simulación 30	Simulación 3 Simulación 10 Simulación 17 Simulación 24 Simulación 31	Simulación 4 Simulación 11 Simulación 18 Simulación 25 Simulación 32	Simulación 5 Simulación 12 Simulación 19 Simulación 26 Simulación 33	Simulación 6 Simulación 13 Simulación 20 Simulación 27 Simulación 34	Simulación 7 Simulación 14 Simulación 21 Simulación 28 Simulación 35

La Fig. 22 presenta los gráficos comparativos de las interpolaciones correspondientes a los puntos de ruptura obtenidos. En particular, la Fig. 22 a) muestra el gráfico de la interpolación 1, asociada al caso $V_{DC1} = 130$ V y $V_{DC2} = 100$ V, correspondiente a las simulaciones 1, 8, 15, 22 y 29; la Fig. 22 b) presenta el gráfico de la interpolación 4, para la condición $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$ V, asociada a las simulaciones 4, 11, 18, 25 y 32; y la Fig. 22 c) muestra el gráfico de la interpolación 7, correspondiente al caso $V_{DC1} = 100$ V y $V_{DC2} = 130$ V, que agrupa las simulaciones 7, 14, 21, 28 y 35.

Es posible observar que los puntos de ruptura correspondientes a un voltaje $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$, son los que tienen un valor de corriente más alto, y también son los que más se alejan de 0 radianes.

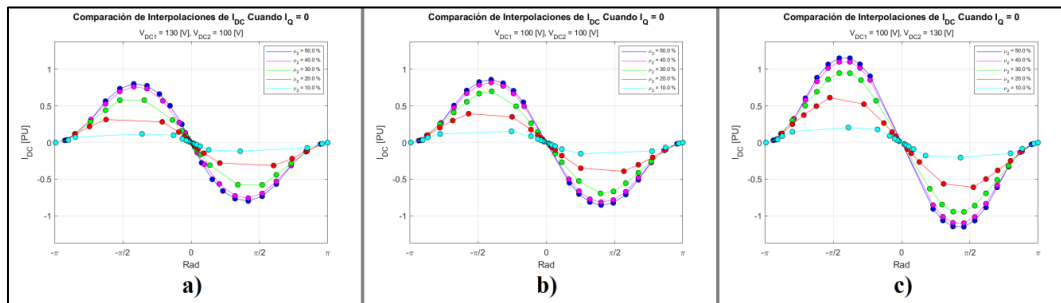


Fig. 22.- Gráficos de comparación de las interpolaciones de los puntos de ruptura obtenidos;

a) Cuando $V_{DC1} = 130$ y $V_{DC2} = 100$; b) Cuando $V_{DC1} = V_{DC2} = 100$; c) Cuando $V_{DC1} = 100$ y $V_{DC2} = 130$.

Capítulo 4: Conclusiones y Trabajo a Futuro

4.1 Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado que el convertidor DAB tiene una gran variedad de formas de operación a partir del uso de sus cuatro grados de libertad, que son relaciones de voltaje, ciclo de servicio 1, ciclo de servicio 2 y desplazamiento de fase. Deduciendo así, que, para un mismo nivel de transferencia de potencia, es posible hacer infinidad de combinaciones, donde las formas de onda de corriente tienden a adoptar diferentes geometrías, diferentes valores de pico, así como diferentes niveles de discontinuidad y potencia reactiva, pero siempre adoptando el mismo nivel de corriente promedio.

Considerando los beneficios que trae para la operación del convertidor trabajar con la menor discontinuidad de corriente, en este estudio se ha logrado exponer los diferentes puntos de operación con menor discontinuidad, considerando la transferencia de energía, la relación de voltaje entre los puertos y el nivel de potencia requerido.

Cabe mencionar que los datos obtenidos son la base para la elaboración de un sistema de reconocimiento de patrones, y finalmente la optimización de las variables de modulación en tiempo real.

Varias son las simulaciones que se deben de tomar en cuenta a fin de obtener los puntos óptimos de modulación, si bien estos pueden ser obtenidos por medio de simulaciones, y pueden ser reconocidos por medio de alguna metodología de aprendizaje automático, es necesario tomar en cuenta los costos computacionales que esto conllevaría.

Si bien, la modulación SPSC es sumamente sencilla de implementar e involucra muy pocos recursos computacionales, esta técnica conlleva desventajas, como la producción de potencia reactiva y la generación de mayores picos de corrientes que circula por los

semiconductores, provocando estrés y mayores pérdidas, así como el uso de filtros de mayor tamaño.

Una técnica de modulación optimizada podría reducir la discontinuidad de corrientes en CD, adjunto a la reducción/eliminación de corrientes de retorno, reducción de picos, y por ende, la reducción del tamaño físico de los filtros en CD; sin embargo, el precio a pagar podría ser el alto costo computacional en el proceso de optimización de los valores de modulación.

Finalmente, los diseñadores de convertidores DAB, deben de considerar las opciones costo beneficio y complejidad para cada aplicación.

4.2 Trabajos futuros

- Diseño de una red neuronal que reconozca los diferentes escenarios de operación y del convertidor y seleccione automáticamente el valor óptimo de las variables de modulación de ciclo de servicio y desplazamiento de fase
- Simulación en tiempo real y medición de los recursos computacionales necesarios para el objetivo mencionado.
- Cuantificación de la reducción del estrés en los semiconductores, pérdidas de conmutación y aumento de eficiencia del convertidor al implementar la optimización propuesta.
- Generar el mismo estudio cuantificando las perdidas en el transformador y las perdidas por conmutación de los interruptores de potencia.
- Armado físico del prototipo.

Referencias

- [1] J. Fang, J. Lui, H. Wu, J. Chen, F. Blaabjerg, *Grid-Forming Converters: Principles, Control, and Applications in Modern Power Systems*, Academic Press, 2024.
- [2] Z. Lv, Y. Xia, J. Chai, M. Yu, W. Wei, *Distributed coordination control based on state-of-charge for bidirectional power converters in a hybrid AC/DC microgrid*, *Energies* 4 (11) (2018) 1011.
- [3] M. Farrokhbabadi, S. König, C. A. Cañizares, K. Bhattacharya and T. Leibfried, *Battery Energy Storage System Models for Microgrid Stability Analysis and Dynamic Simulation*. *IEEE Trans. Power Syst.* 2 (33) (2018) 2301-2312.
- [4] F.E. Abrahamsen, Y. Ai, M. Cheffena. *Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey*. *Sensors*, 21(23) (2021), 8087.
- [5] M. Khalid, *Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges*. *Energy Strateg. Rev.*, 51 (2024), 101299.
- [6] M.A. Hannan, S.B. Wali, P.J. Ker, M.S. Abd Rahman, M. Mansor, V.K. Ramachandaramurthy, K.M. Muttaqi, T.M.I. Mahlia, Z.Y. Dong, *Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues*. *J. Energy Storage*, 42 (2021) 103023.
- [7] A. Kumar, A. H. Bhat, and P. Agarwal, *Review and comparative analysis of dual active bridge isolated DC to DC converter with different control techniques*, *Int. J. Ind. Electron. Drives* 4 (2) (2018) 69–84.
- [8] A. Velázquez Ibáñez, *Modelado e implementación a escala de un convertidor de doble puente activo operando en lazo cerrado para múltiples aplicaciones*, M.S. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2019.

- [9] J. R. Rodriguez-Rodriguez, N. M. Salgado-Herrera, J. Torres-Jimenez, N. Gonzalez-Cabrera, D. Granados-Lieberman and M. Valtierra-Rodriguez, *Small-signal Model for Dual-active-bridge Converter Considering Total Elimination of Reactive Current*. J Mod. Power Syst. Clean Energy, 2(9) (2021) 450-458.
- [10] J. R. Rodriguez-Rodriguez, E. L. Moreno-Goytia, V. Venegas-Rebollar, L. E. Ugalde Caballero, and G. A. Anaya-Ruiz, *The Proportional-Values Modulation (PVM), a technique for improving efficiency and power density of bidirectional DAB converters*, Electr. Power Syst. Res. 144 (2017) 280–289.
- [11] L. Cui, Y. Zhang, X. Wang, D. Zhang, *Symmetric optimization strategy based on triple-phase shift for dual-active bridge converters with low RMS current and full ZVS over ultra-wide voltage and load ranges*. Electronics, 14 (15) (2025), 3031.
- [12] A. K. Jain and R. Ayyanar, *PWM control of dual active bridge: comprehensive analysis and experimental verification*. IEEE Trans. Power Electron. 4 (26) (2011) 1215-1227.
- [13] A. A. Mehrizi, F. Yeganehdoust, A. K. M. Raghunatha Reddy, K. Zaghib, *Challenges and Issues Facing Ultrafast-Charging Lithium-Ion Batteries*. Batteries, 11 (6) (2025), 209.
- [14] A. Velazquez-Ibañez, J. R. Rodriguez, M. R. A. Paternina and G. Carmona, *Elimination of Circulating Currents in PV-Powered Charging Stations Through Dual Active Bridge Modulation*. North American Power Symposium (NAPS), Salt Lake City, UT, USA, 2022, pp. 1-6.
- [15] L. M. Shaker, A. A. Al-Amiery, M. M. Hanoon, W. K. Al-Azzawi, A. A. H. Kadhum, *Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review*. Sustain. Energy Res., 11 (2024), 6.
- [16] J. S. Menye, M.-B. Camara, B. Dakyo, *Lithium Battery Degradation and Failure Mechanisms: A State-of-the-Art Review*. Energies, 18 (2) (2025), 342.

- [17] S. K. Pradhan, B. Chakraborty, *Battery management strategies: An essential review for battery state of health monitoring techniques*. J. Energy Storage, 51 (2022), 104427.
- [18] V. Esteve, J.L. Bellido, J. Jordán, E.J. Dede, *Improving the efficiency of an isolated bidirectional dual active bridge DC–DC converter using variable frequency*, Electronics 2 (13) (2024) 294.
- [19] M. F. Fiaz, S. Calligaro, M. Iurich, R. Petrella, *Analytical Modeling and Control of Dual Active Bridge Converter Considering All Phase-Shifts*. Energies, 15(8) (2022), 2720.
- [20] S. Coelho, T. J. C. Sousa, V. Monteiro, L. Machado, J. L. Afonso, C. Couto, *Comparison and Validation of Five Modulation Strategies for a Dual Active Bridge Converter*; EAI Endor. Trans. Energy Web, 9(6) (2023) e2.
- [21] Y. Yan, Y. Huang, R. Chen, H. Bai, *Building Common-Mode Analytical Model for Dual Active Bridge Incorporating with Different Modulation Strategies*. IEEE Trans. Power Electron. 36(11) (2021), 12608–12619.
- [22] E. O. Arogunjo, J. O. Ojo, *An Insight into the Dynamics of a Dual Active Bridge*, 2023 IEEE Transp. Electrific. Conf. & Expo (ITEC), Detroit, MI, USA, 2023, pp. 1–6.
- [23] O. Kircioğlu, M. Ünlü and S. Çamur, *The Comparison of Different Modulation Methods for Dual-Active-Bridge*. 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4.
- [24] J. He, Y. Chen, J. Lin, J. Chen, L. Cheng and Y. Wang, *Review of Modeling, Modulation, and Control Strategies for the Dual-Active-Bridge DC/DC Converter*. Energies 16(18) (2023) 6646.

- [25] F. J. Arizaga, J. M. Ramírez, J. A. Alcalá, J. C. Rosas-Caro, A. G. Rojas-Hernández, *Comparative Analysis of Efficiency and Harmonic Generation in Multiport Converters: Study of Two Operating Conditions*. World Electr. Veh. J. 16(10), (2025), 566.
- [26] A. Rashwan, A.I.M. Ali & T. Senjyu, *Current stress minimization for isolated dual active bridge DC–DC converter*. Sci. Rep. 12 (2022) 16980.
- [27] F. Feng, J. Fang, U. Manandhar, H. B. Gooi & P. Xie, *Impedance-Based Stability Analysis of DAB Converters With Single-, Double-, or Cooperative Triple-Phase-Shift Modulations and Input LC Filter*. Front. Energy Res., 10 (2022) 874477.
- [28] G. Jean-Pierre, N. Altin, A. E. Shafei, A. Nasiri, *Overall Efficiency Improvement of a Dual Active Bridge Converter Based on Triple Phase-Shift Control*. Energies, 15(19) (2022) 6933.
- [29] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun, *Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC–DC converter for high-frequency-link power-conversion system*, IEEE Trans. Power Electron. 8 (29) (2014) 4091–4106.
- [30] H. Bai, C. Mi, *Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC–DC converters using novel dual-phase-shift control*, IEEE Trans. Power Electron. 11 (23) (2008) 2905–2914.
- [31] H. Bai, Z. Nie, C.C. Mi, *Experimental comparison of traditional phase-shift, dual-phase-shift, and model-based control of isolated bidirectional DC–DC converters*, IEEE Trans. Power Electron. 6 (25) (2010) 1444–1449.
- [32] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, *Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge DC–DC converter with dual-phase-shift control*, IEEE Trans. Power Electron. 9 (27) (2012) 4172–4176.

- [33] Y. Xie, J. Sun, J.S. Freudenberg, *Power flow characterization of a bidirectional galvanically isolated high-power DC–DC converter over a wide operating range*, IEEE Trans. Power Electron. 1 (25) (2010) 54–66.
- [34] H. Qin, J.W. Kimball, *Generalized average modeling of dual active bridge DC–DC converter*, IEEE Trans. Power Electron. 4 (27) (2012) 2078–2084.
- [35] G.G. Oggier, M. Ordonez, J.M. Galvez, F. Luchino, *Fast transient boundary control and steady-state operation of the dual active bridge converter using the natural switching surface*, IEEE Trans. Power Electron. 2 (29) (2014) 946–957.
- [36] K. Wu, C.W. de Silva, W.G. Dunford, *Stability analysis of isolated bidirectional dual active full-bridge DC–DC converter with triple phase-shift control*, IEEE Trans. Power Electron. 4 (27) (2012) 2007–2017.
- [37] G.G. Oggier, G.O. Garcia, A.R. Oliva, *Switching control strategy to minimize dual active bridge converter losses*, IEEE Trans. Power Electron. 7 (24) (2009) 1826–1838.
- [38] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, W. Sun, *Current-stress-optimized switching strategy of isolated bidirectional DC–DC converter with dual-phase-shift control*, IEEE Trans. Ind. Electron. 10 (60) (2013) 4458–4467.
- [39] F. Haifeng, L. Hui, *High-frequency transformer isolated bidirectional dc–dc converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kVA solid-state transformer*, IEEE Trans. Power Electron. 12 (December (26)) (2011) 3599–3608.
- [40] C. Yongbin, W. Shuo, *Bi-directional isolated dc–dc converters with reactive power loss reduction for electric vehicle and grid support applications*, Proc. IEEE ITEC 6 (2012) 1–6.
- [41] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, G. Liu, Y. Zhao, *Universal high-frequency-link characterization and practical fundamental-optimal strategy for dual-active-bridge DC–*

DC converter under PWM plus phase-shift control, IEEE Trans. Power Electron. 12 (30) (2015) 6488–6494.

[42] G. Oggier, G.O. García, A.R. Oliva, *Modulation strategy to operate the dual active bridge DC–DC converter under soft switching in the whole operating range*, IEEE Trans. Power Electron. 4 (26) (2011) 1228–1236.

[43] F. Everts, F. Krismer, J. Van den Keybus, J. Driesen, J.W. Kolar, *Optimal ZVS modulation of single-phase single-stage bidirectional DAB AC–DC converters*, IEEE Trans. Power Electron. 8 (29) (2014) 3954–3970.

[44] H. Wen, W. Xiao, B. Su, *Nonactive power loss minimization in a bidirectional isolated DC–DC converter for distributed power systems*, IEEE Trans. Ind. Electron. 12 (61) (2014) 6822–6831.

[45] A. Rodríguez, A. Vázquez, D.G. Lamar, M.M. Hernando, J. Sebastián, *Different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a dual active bridge with phase-shift control*, IEEE Trans. Power Electron. 2 (30) (2015) 790–804.

[46] W. Choi, K.-M. Rho, B.-H. Cho, *Fundamental duty modulation of dual-active-bridge converter for wide-range operation*, IEEE Trans. Power Electron. 6 (31) (2016) 4048–4064.

[47] X. She, A.Q. Huang, X. Ni, *Current sensorless power balance strategy for DC/DC converters in a cascaded multilevel converter based solid state transformer*, IEEE Trans. Power Electron. 1 (29) (2014) 17–22.

[48] J. Shi, W. Gou, H. Yuan, T. Zhao, A.Q. Huang, *Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer*, IEEE Trans. Power Electron. 4 (26) (2011) 1154–1166.

[49] S.P. Engel, M. Stieneker, N. Soltau, S. Rabiee, H. Stagge, R.W. De Doncker, *Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids*, IEEE Trans. Power Electron. 1 (30) (2015) 124–137.

[50] J. Kan, S. Xie, Y. Tang, Y. Wu, *Voltage-fed dual active bridge bidirectional DC/DC converter with an immittance network*, IEEE Trans. Power Electron. 7 (29) (2014) 3582–3590.

[51] S. Poshtkouhi, O. Trescases, *Flyback mode for improved low-power efficiency in the dual-active-bridge converter for bidirectional PV microinverters with integrated storage*, IEEE Trans. Ind. Appl. 7 (51) (2015) 3316–3324.

[52] Y. Shi, R. Li, Y. Xue, H. Li, *Optimized operation of current-fed dual active bridge DC–DC converter for PV applications*, IEEE Trans. Ind. Electron. 11 (62) (2015) 6986–6995.

[53] R.T. Naayagi, A.J. Forsyth, R. Shuttleworth, *High-power bidirectional DC–DC converter for aerospace applications*, IEEE Trans. Power Electron. 11 (27) (2012) 4366–4379.

[54] S. Inoue, H. Akagi, *A bidirectional isolated DC–DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system*, IEEE Trans. Power Electron. 3 (22) (2007) 535–542.

Anexos

Código para Obtención de Gráficas con Análisis Paramétrico

El siguiente código se diseñó para realizar tres funciones básicas:

- Asignar un barrido de parámetros a las variables de la simulación: desplazamiento de fase ϕ , Voltaje V_{DC1} , Voltaje V_{DC2} , ciclo de trabajo fijo μ_2 , ciclo de trabajo variable μ_1 .
- Obtención de los resultados: Corriente I_{DC} , corriente reactiva I_Q , Nivel de discontinuidad, respecto a los parametros anteriores.
- Graficación de los resultados (para comparar los diferentes comportamientos al tener diferentes parámetros), y guardado en multiples formatos de los datos para análisis posteriores.

```
%*****
%*****      DESCRIPCION DEL PROGRAMA      *****
%*****

%   TestCircuit_Codigo_1.m
%
%   El programa realiza multiples simulaciones del archivo de simulink
%   "TestCircuit.slx", por medio del control de multiples variables
%   asignadas por el usuario, y obtiene los datos de dichas simulaciones
%   para su posterior graficación y analisis.

%*****
%*****      OPCIONES DEL PROGRAMA (EDITABLES POR EL USUARIO)      *****
%*****

%   INSTRUCCIONES:
%   Se le solicita al usuario que observe las opciones de trabajo del
%   programa y elija la que mas le convenga deacuerdo a sus necesidades
%
%   OPCIONES DE UNIDADES DE GRAFICACIÓN EJE X
%   1) MUESTRAS      2) TIEMPO      3) RADIANS
%
%   OPCIONES DE UNIDADES DE GRAFICACION DE CORRIENTE (EJE Y/Z)
%   1) [AMPERS]      2) [PU]

% OPCIONES DE UNIDADES DE GRAFICACION DE LOS EJES
GrafejX = 3;      % Unidades de Graficacion Eje X
GrafejYZ = 2;      % Unidades de Graficacion Eje X

%*****
%*****      PREPARANDO LA SIMULACIÓN      *****
%*****

clc      % Limpia ventana de comandos

open_system('TestCircuit');      % Abre la simulación

Moduls = [50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0];      % Valores del Modulo 1
```

```

M = length(Moduls);      % Tamaño de los datos del Modulo

%*****
%*****      VARIABLES ASIGNADAS POR EL USUARIO      *****
%*****

% CONTROL DE TIEMPOS (EDITABLES POR EL USUARIO)
TSim = 4;                % Tiempo de Simulación (En segundos)
TMuestra = 1e-6;         % Tiempo de Muestreo
TDatos = 4e-4;           % Tiempo de Toma de Datos

% ASIGNACIÓN DE VALORES (EDITABLES POR EL USUARIO)
VinDC1 = 100;            % Voltaje DC 1
VinDC2 = 130;            % Voltaje DC 2
D2 = 40;                 % Modulacion 2

% OTROS VALORES (EDITABLES POR EL USUARIO)
LimILKG = 0.2;           % Limite Aceptable de corriente de fuga
IDC_PU = 12.7125922910889; % Valor de 1 PU en IDC

%*****
%*****      OBTENCIÓN DE DIMENSIONES DE MATRICES      *****
%*****

% NOTIFICACION PARA EL USUARIO
fprintf('Preparando Simulación \n'); % Notifica al Usuario el inicio del proceso

% ASIGNACIÓN DE MODULO
D1 = Moduls(1);          % Asignamos Modulacion 1

% REALIZACIÓN DE SIMULACIÓN
simulacion = sim('TestCircuit.slx'); % Realiza la simulación y Guarda datos

% TAMAÑOS DE VARIABLES
DatoIDC1 = simulacion.IDC1; % Datos de Corriente de DC
C = length(DatoIDC1);      % Tamaño de los datos de Corriente de DC

% CREACION DE MATRICES
MatIDC_PU = zeros(C, M);   % Matriz de Corrientes de DC (en [PU])
MatILKG_PU = zeros(C, M);  % Matriz de Corrientes de Fuga (en [PU])
MatIDCP_PU = zeros(C, M);  % Matriz de Corrientes de DC Cuando IQ = 0 (en [PU])
MatIDC_I = zeros(C, M);    % Matriz de Corrientes de DC (en Ampers)
MatILKG_I = zeros(C, M);   % Matriz de Corrientes de Fuga (en Ampers)
MatIDCP_I = zeros(C, M);   % Matriz de Corrientes de DC Cuando IQ = 0 (en Ampers)
MatNvD = zeros(C, M);      % Matriz de Niveles de Discontinuidad
MatNvDP = zeros(C, M);     % Matriz de Niveles de Discontinuidad Cuando IQ = 0
MatMues = zeros(C, M);     % Matriz de Muestras
MatTime = zeros(C, M);     % Matriz de Tiempos
MatPi = zeros(C, M);       % Matriz de Radianes
MatMod = zeros(C, M);      % Matriz de Modulos

% NOTIFICACION PARA EL USUARIO
fprintf('Matrices creadas, Corriendo simulaciones... \n'); % Notificación para el Usuario

%*****
%*****      ADECUACIÓN PARA OBTENCIÓN DE RADIANES      *****
%*****

% OBTENIENDO LA MITAD DE LAS MUESTRAS
if mod(C, 2) == 0 % Obtiene el residuo de dividir el numero de muestras a la mitad
    Mitad = C/2; % Si el residuo es Par, divide el numero de muestras entre dos
else
    Mitad = (C-1)/2; % Si el residuo es Impar, redondea el numero de muestras, y divide entre dos
end

%*****
%*****      SIMULACIONES Y OBTENCION DE DATOS      *****
%*****

% CALCULO DE NÚMERO DE MUESTRAS
NuMues = TSim/TDatos; % Cálculo del Número de Muestras
AuxM = 0: 1 : NuMues; % Cuenta de Muestras
Muestras = AuxM';     % Adecuando la Información a matriz columna

% CALCULO DE TIEMPO
AuxT = 0: TDatos : TSim; % Cuenta del Tiempo
Tiempo = AuxT';         % Adecuando la Información a matriz columna

% CALCULO DE RADIANES
Aux_pi = -pi: (pi/Mitad) : pi; % Cuenta del Tiempo en Radianes
TiempoPi = Aux_pi';          % Adecuando la Información a matriz columna

% REALIZACION DE LAS SIMULACIONES Y OBTENCION DE DATOS
for i = 1: 1 : M
    % ACTUALIZACIÓN DE MODULOS
    D1 = Moduls(i); % Actualiza Modulación 1

    % REALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN
    simulacion = sim('TestCircuit.slx'); % Realiza la simulación

    % OBTENCION DE VARIABLES
    DatoIDC1 = simulacion.IDC1; % Datos de Corriente de DC
    DatoILKG = simulacion.ILKG; % Datos de Corriente de Fuga
    DatoIDCP = simulacion.IDCP; % Datos de Corriente de DC Idonea
    DatoNvD = simulacion.NvD;   % Datos de Nivel de Discontinuidad

```

```

DatoNvDP = simulacion.NvDP;          % Datos de Nivel de Discontinuidad Cuando IQ = 0

% GUARDANDO DATOS EN MATRICES
MatIDC_PU(:, i) = DatoIDC1(:,1)/IDC_PU; % Datos de Corriente de DC (en [PU])
MatILKG_PU(:, i) = DatoILKG(:,1)/IDC_PU; % Datos de Corriente de Fuga (en [PU])
MatIDCP_PU(:, i) = DatoIDCP(:,1)/IDC_PU; % Datos de Corriente de DC Cuando IQ = 0 (en [PU])
MatIDC_I(:, i) = DatoIDC1(:,1); % Datos de Corriente de DC (en Ampers)
MatILKG_I(:, i) = DatoILKG(:,1); % Datos de Corriente de Fuga (en Ampers)
MatIDCP_I(:, i) = DatoIDCP(:,1); % Datos de Corriente de DC Cuando IQ = 0 (en Ampers)
MatNvD(:, i) = DatoNvD(:,1); % Datos de Nivel de Discontinuidad
MatNvDP(:, i) = DatoNvDP(:,1); % Datos de Nivel de Discontinuidad Cuando IQ = 0
MatMues(:, i) = Muestras(:,1); % Datos de Muestras
MatTime(:, i) = Tiempo(:,1); % Datos de Tiempo
MatPi(:, i) = TiempoPi(:,1); % Datos de Tiempo en Radianes
MatMod(:, i) = Moduls(i); % Datos del Modulo

% NOTIFICACION DE SIMULACIÓN COMPLETADA
fprintf('Simulación %d / %d Completada \n', i, M); % Notifica cual simulación ha sido completada
end

%*****
%***** CONTROL DE GRAFICOS (EDITABLES POR USUARIO) *****
%*****

% CONTROL DE EJES DE GRAFICOS
Mues_Min = 0; % Muestra Mínima
Mues_Max = NuMues; % Muestra Máxima
Time_Min = 0; % Tiempo mínimo
Time_Max = TSim; % Tiempo máximo
Rad_Min = -pi; % Radian Mínimo
Rad_Max = pi; % Radian Maximo
Mod_Min = 0; % MODULACIÓN mínima
Mod_Max = Moduls(1); % MODULACIÓN máxima
IDC_PU_Min = -1.38; % IDC mínima en [PU]
IDC_PU_Max = 1.38; % IDC máxima en [PU]
IDC_I_Min = -17.5; % IDC mínima en [Ampers]
IDC_I_Max = 17.5; % IDC máxima en [Ampers]
ILKG_PU_Min = 0; % ILKG mínima en [PU]
ILKG_PU_Max = 3.62; % ILKG máxima en [PU]
ILKG_I_Min = 0; % ILKG mínima en [Ampers]
ILKG_I_Max = 46; % ILKG máxima en [Ampers]
NvD_Min = 0; % Nivel de Discontinuidad Mínimo
NvD_Max = 2000; % Nivel de Discontinuidad Máximo
NvDP_Min = 0; % Nv. de Disc. cuando IQ = 0 Mínimo
NvDP_Max = 2000; % Nv. de Disc. cuando IQ = 0 Máximo

% CONTROL DE LEYENDAS DE GRAFICO
h_lineas = gobjects(1, M); % Arreglo de gráficos para handles de las lineas interpoladas
Marcas = cell(1, M); % Crea un Arreglo para almacenar los datos de las leyendas
for i = 1: 1: M
    Marcas{i} = sprintf('\mu_{1} = %.1f %%', Moduls(i)); % Llena el arreglo con las leyendas de los modulos
end

% CONTROL DE COLORES DE GRAFICO 3D
ColorL = {'b-', 'r-', 'g-', 'm-', 'c-', 'k-', 'y-', 'b-', 'r-', 'g-', 'm-'};

%*****
%***** APLICANDO LAS OPCIONES DE GRAFICACIÓN *****
%*****

% APLICANDO LAS UNIDADES DE GRAFICACION DEL EJE X
switch GrafEjX
case 1
    % VALORES DE GRAFICA
    MatEjX = MatMues; % Valores en Muestras

    % LIMITES DEL EJE X
    Ej_Xi = Mues_Min; % Limite Inferior de Eje X (Muestras Minima)
    Ej_Xs = Mues_Max; % Limite Superior de Eje X (Muestras Minima)
case 2
    % VALORES DE GRAFICA
    MatEjX = MatTime; % Valores en Tiempo

    % LIMITES DEL EJE X
    Ej_Xi = Time_Min; % Limite Inferior de Eje X (Tiempo Minimo)
    Ej_Xs = Time_Max; % Limite Superior de Eje X (Tiempo Maximo)
case 3
    % VALORES DE GRAFICA
    MatEjX = MatPi; % Valores en Radianes

    % LIMITES DEL EJE X
    Ej_Xi = Rad_Min; % Limite Inferior de Eje X (Radian Minimo)
    Ej_Xs = Rad_Max; % Limite Superior de Eje X (Radian Maximo)
end

% APLICANDO LAS UNIDADES DE GRAFICACION DEL EJE YZ
switch GrafEjYZ
case 1
    % VALORES DE GRAFICA
    MatEj1 = MatIDC_I; % Valores de IDC en [Ampers]
    MatEj2 = MatILKG_I; % Valores de IQ en [Ampers]
    MatEj3 = MatIDCP_I; % Valores de IDC cuando IQ = 0 en [Ampers]

    % LIMITES DE LOS EJES
    Ej_li = IDC_I_Min; % Limite Inferior de Eje (IDC mínima en [Ampers])

```

```

Ej_1s = IDC_I_Max;      % Limite Superior de Eje (IDC maxima en [Amper])
Ej_2i = ILKG_I_Min;     % Limite Inferior de Eje (ILKG minima en [Amper])
Ej_2s = ILKG_I_Max;     % Limite Superior de Eje (ILKG maxima en [Amper])
Ej_3i = IDC_I_Min;      % Limite Inferior de Eje (IDC minima en [Amper])
Ej_3s = IDC_I_Max;      % Limite Superior de Eje (IDC maxima en [Amper])

case 2
% VALORES DE GRAFICA
MatEj1 = MatIDC_PU;      % Valores de IDC en [PU]
MatEj2 = MatILKG_PU;     % Valores de IQ en [PU]
MatEj3 = MatIDCP_PU;     % Valores de IDC cuando IQ = 0 en [PU]

% LIMITES DE LOS EJES
Ej_1i = IDC_PU_Min;      % Limite Inferior de Eje (IDC minima en [PU])
Ej_1s = IDC_PU_Max;      % Limite Superior de Eje (IDC maxima en [PU])
Ej_2i = ILKG_PU_Min;     % Limite Inferior de Eje (ILKG minima en [PU])
Ej_2s = ILKG_PU_Max;     % Limite Superior de Eje (ILKG maxima en [PU])
Ej_3i = IDC_PU_Min;      % Limite Inferior de Eje (IDC minima en [PU])
Ej_3s = IDC_PU_Max;      % Limite Superior de Eje (IDC maxima en [PU])
end

%*****
%***** GRAFICA 2D COMPORTAMIENTO DE IDC *****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1:1:M
    h_lineas(i) = plot(MatEjX(:, i), MatEj1(:, i)); % Realiza Grafica 2D de los datos
    hold on % Conserva grafica para sobreescibirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Ej_1i Ej_1s]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
switch GrafEjYZ % Etiquetas para el Eje Y
case 1
    ylabel('I_{DC} [Amper]'); % Etiqueta eje Y
case 2
    ylabel('I_{DC} [PU]'); % Etiqueta eje Y
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{DC}'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.728, 0.48, 0.17, 0.38]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigIDC_2D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigIDC_2D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%***** GRAFICA 2D COMPORTAMIENTO DE IQ *****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1:1:M
    h_lineas(i) = plot(MatEjX(:, i), MatEj2(:, i)); % Realiza Grafica 2D de los datos
    hold on % Conserva grafica para sobreescibirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Ej_2i Ej_2s]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS

```

```

switch GrafEjX      % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]');    % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]');    % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad');          % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
switch GrafEjYZ     % Etiquetas para el Eje Y
case 1
    ylabel('I_{Q} [Amps]');    % Etiqueta eje Y
case 2
    ylabel('I_{Q} [PU]');      % Etiqueta eje Y
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{Q}');    % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2));    % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9;    % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas);    % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6;    % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.62, 0.48, 0.17, 0.38];    % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on;    % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigILKG_2D.fig');    % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigILKG_2D.png');    % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%*****      GRAFICA 2D COMPORTAMIENTO DE IDC CUANDO IQ = 0      *****
%*****

figure;    % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    % FILTRAR DATOS: SOLO CONSERVAR DONDE IDC ~= 0
    Y = MatEj3(:, i);    % Guarda los datos del Eje Y en un Arreglo
    Y(Y == 0) = NaN;    % Reemplaza ceros por NaN para el eje Y

    % GRAFICAR SOLO LOS DATOS VÁLIDOS
    h_lineas(i) = plot(MatEjX(:, i), Y);    % Realiza Grafica 2D de los datos
    hold on    % Conserva grafica para sobreescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_X1 Ej_Xs Ej_3i Ej_3s]);    % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi])    % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'})    % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX      % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]');    % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]');    % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad');          % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
switch GrafEjYZ     % Etiquetas para el Eje Y
case 1
    ylabel('I_{DC} [Amps]');    % Etiqueta eje Y
case 2
    ylabel('I_{DC} [PU]');      % Etiqueta eje Y
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{DC} Cuando I_{Q} = 0');    % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2));    % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9;    % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas);    % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6;    % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.728, 0.48, 0.17, 0.38];    % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on;    % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigIDCP_2D.fig');    % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigIDCP_2D.png');    % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%*****      GRAFICA 2D COMPORTAMIENTO NIVEL DE DISCONTINUIDAD      *****
%*****

figure;    % Abre una nueva ventana para graficar

```

```

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1 : M
    h_lineas(i) = plot(MatEjX(:, i), MatNvD(:, i)); % Realiza Grafica 2D de los datos
    hold on % Conserva grafica para sobrescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs NvD_Min NvD_Max]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
    case 1
        xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
    case 2
        xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
    case 3
        xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Porcentaje de Deformación [%]'); % Etiqueta eje Y

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento del Nivel de Discontinuidad'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.728, 0.48, 0.17, 0.38]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigNvD_2D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigNvD_2D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%**** GRAFICA 2D COMPORTAMIENTO NIVEL DE DISCONTINUIDAD CUANDO IQ = 0 ****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1 : M
    % FILTRAR DATOS: SOLO CONSERVAR DONDE NVD ~= 0
    Y = MatNvDP(:, i); % Guarda los datos del Eje Y en un Arreglo
    Y(Y == 0) = NaN; % Reemplaza ceros por NaN para el eje Y

    % GRAFICAR SOLO LOS DATOS VÁLIDOS
    h_lineas(i) = plot(MatEjX(:, i), Y); % Realiza Grafica 2D de los datos
    hold on % Conserva grafica para sobrescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs NvDP_Min NvDP_Max]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
    case 1
        xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
    case 2
        xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
    case 3
        xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Porcentaje de Deformación [%]'); % Etiqueta eje Y

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento del Nivel de Discontinuidad Cuando I_{Q} = 0'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.728, 0.48, 0.17, 0.38]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigNvDP_2D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigNvDP_2D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

```

```

%*****
%*****          GRAFICA 3D COMPORTAMIENTO DE IDC          *****
%*****

figure;                % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    h_lineas(i) = plot3(MatEjX(:, i), MatMod(:, i), MatEj1(:, i), ColorL{i}, 'LineWidth', 1.5); % Graficación de Datos
    hold on;        % Conserva grafica para sobreescibirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Mod_Min Mod_Max Ej_1i Ej_1s]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
    case 1
        xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
    case 2
        xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
    case 3
        xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Duty Cycle 1 (\mu_{1}) [%]'); % Etiqueta eje Y
switch GrafEjYZ % Etiquetas para el Eje Z
    case 1
        zlabel('I_{DC} [Amps]'); % Etiqueta eje Z
    case 2
        zlabel('I_{DC} [PU]'); % Etiqueta eje Z
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{DC}'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.8, 0.66, 0.1, 0.1]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigIDC_3D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigIDC_3D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%*****          GRAFICA 3D COMPORTAMIENTO DE IQ          *****
%*****

figure;                % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    h_lineas(i) = plot3(MatEjX(:, i), MatMod(:, i), MatEj2(:, i), ColorL{i}, 'LineWidth', 1.5); % Graficación de Datos
    hold on;        % Conserva grafica para sobreescibirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Mod_Min Mod_Max Ej_2i Ej_2s]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANTES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
    case 1
        xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
    case 2
        xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
    case 3
        xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Duty Cycle 1 (\mu_{1}) [%]'); % Etiqueta eje Y
switch GrafEjYZ % Etiquetas para el Eje Z
    case 1
        zlabel('I_{Q} [Amps]'); % Etiqueta eje Z
    case 2
        zlabel('I_{Q} [PU]'); % Etiqueta eje Z
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{Q}'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico

```

```

Datos.FontSize = 9;          % Tamaño del subtítulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6;             % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.8, 0.66, 0.1, 0.1]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigILK6_3D.fig'); % Guarda la figura como Archivo .fig
saveas(gcf, 'FigILK6_3D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%***** GRAFICA 3D COMPORTAMIENTO DE IDC CUANDO IQ = 0 *****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    % FILTRAR DATOS: SOLO CONSERVAR DONDE IDC ~= 0
    Z = MatEj3(:, i); % Guarda los datos del Eje Z en un Arreglo
    Z(Z == 0) = NaN; % Reemplaza ceros por NaN para el Eje Z

    % GRAFICAR SOLO LOS DATOS VÁLIDOS
    h_lineas(i) = plot3(MatEjX(:, i), MatMod(:, i), Z, ColorL(i), 'LineWidth', 1.5); % Graficación de Datos
    hold on; % Conserva grafica para sobrescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Mod_Min Mod_Max Ej_3i Ej_3s]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Duty Cycle 1 (\mu_{1}) [%]'); % Etiqueta eje Y
switch GrafEjYZ % Etiquetas para el Eje Z
case 1
    zlabel('I_{DC} [Amps]'); % Etiqueta eje Z
case 2
    zlabel('I_{DC} [PU]'); % Etiqueta eje Z
end

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento de I_{DC} Cuando I_{Q} = 0'); % Titulo de Grafico
Datos = sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtítulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.8, 0.66, 0.1, 0.1]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigIDCP_3D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigIDCP_3D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%***** GRAFICA 3D COMPORTAMIENTO NIVEL DE DISCONTINUIDAD *****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    % FILTRAR DATOS: SOLO CONSERVAR DONDE IDC ~= 0
    Z = MatNvd(:, i); % Guarda los datos del Eje Z en un Arreglo
    Z(Z == 0) = NaN; % Reemplaza ceros por NaN para el Eje Z

    % GRAFICAR SOLO LOS DATOS VÁLIDOS
    h_lineas(i) = plot3(MatEjX(:, i), MatMod(:, i), Z, ColorL(i), 'LineWidth', 1.5); % Graficación de Datos
    hold on; % Conserva grafica para sobrescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Mod_Min Mod_Max Nvd_Min Nvd_Max]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANES)
if GrafEjX == 3

```

```

xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Duty Cycle 1 (\mu_{1}) [%]'); % Etiqueta eje Y
zlabel('Porcentaje de Deformación [%]'); % Etiqueta eje Y

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento del Nivel de Discontinuidad'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.8, 0.66, 0.1, 0.1]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigNvD_3D.fig'); % Guarda la figura como Archivo .fig
saveas(gcf, 'FigNvD_3D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%**** GRAFICA 3D COMPORTAMIENTO NIVEL DE DISCONTINUIDAD CUANDO IQ = 0 ****
%*****

figure; % Abre una nueva ventana para graficar

% GRAFICACIÓN DE VALORES
for i = 1: 1 : M
    % FILTRAR DATOS: SOLO CONSERVAR DONDE IDC ~= 0
    Z = MatNvDP(:, i); % Guarda los datos del Eje Z en un Arreglo
    Z(Z == 0) = NaN; % Reemplaza ceros por NaN para el Eje Z

    % GRAFICAR SOLO LOS DATOS VÁLIDOS
    h_lineas(i) = plot3(MatEjX(:, i), MatMod(:, i), Z, ColorL{i}, 'LineWidth', 1.5); % Graficación de Datos
    hold on; % Conserva grafica para sobrescribirla con futuros valores
end

% EJES DE GRAFICO
axis([Ej_Xi Ej_Xs Mod_Min Mod_Max NvDP_Min NvDP_Max]); % Asignando los Ejes al grafico

% DIVISIONES DEL EJE X (SOLO EN RADIANES)
if GrafEjX == 3
    xticks([-pi -pi/2 0 pi/2 pi]) % Define la Posicion de las Divisiones que se asignarán al Eje X
    xticklabels({'-\pi', '-\pi/2', '0', '\pi/2', '\pi'}) % Define las etiquetas correspondientes a las divisiones del Eje X
end

% AÑADIDO DE ETIQUETAS
switch GrafEjX % Etiquetas para el Eje X
case 1
    xlabel('Muestras [# de Muestra]'); % Etiqueta eje X (en Muestras)
case 2
    xlabel('Tiempo [s]'); % Etiqueta eje X (en Tiempo)
case 3
    xlabel('Rad'); % Etiqueta eje X (en Radianes)
end
ylabel('Duty Cycle 1 (\mu_{1}) [%]'); % Etiqueta eje Y
zlabel('Porcentaje de Deformación [%]'); % Etiqueta eje Y

% TITULO Y DATOS DE GRAFICA
title('Comportamiento del Nivel de Discontinuidad Cuando I_{Q} = 0'); % Titulo de Grafico
Datos = subtitle(sprintf('V_{DC1} = %d [V], V_{DC2} = %d [V], \mu_{2} = %d %%', VinDC1, VinDC2, D2)); % Subtitulo de Grafico
Datos.FontSize = 9; % Tamaño del subtitulo

% LEYENDAS DE GRAFICA
lgd = legend(h_lineas, Marcas); % Crea la leyenda en la gráfica, asociando las etiquetas con los datos del Arreglo
lgd.FontSize = 6; % Asigna el Tamaño del Texto de la Leyenda
lgd.Position = [0.8, 0.66, 0.1, 0.1]; % Posiciona la leyenda de la forma [x, y, width, height]

% ACTIVACION DE CUADRICULA
grid on; % Activa la cuadrícula del grafico

% GUARDAR FIGURA EN DIVERSOS FORMATOS
savefig('FigNvDP_3D.fig'); % Guarda la figura como archivo .fig
saveas(gcf, 'FigNvDP_3D.png'); % Guardar la gráfica Actual en Archivo .PNG

%*****
%***** EXPORTAR DATOS A ARCHIVOS *****
%*****

% EXPORTAR DATOS A EXCEL
xlswrite('ArchivoIDC_PU.xlsx', MatIDC_PU); % Exporta Matriz de IDC (en [PU])
xlswrite('ArchivoILKG_PU.xlsx', MatILKG_PU); % Exporta Matriz de Corrientes de Fuga (en [PU])
xlswrite('ArchivoIDCP_PU.xlsx', MatIDCP_PU); % Exporta Matriz de Corrientes Idoneas (en [PU])

```

```

xlswrite('ArchivoIDC_I.xlsx', MatIDC_I); % Exporta Matriz de IDC (en [Ampers])
xlswrite('ArchivoILKG_I.xlsx', MatILKG_I); % Exporta Matriz de Corrientes de Fuga (en [Ampers])
xlswrite('ArchivoIDCP_I.xlsx', MatIDCP_I); % Exporta Matriz de Corrientes Idoneas (en [Ampers])
xlswrite('ArchivoNvD.xlsx', MatNvD); % Exporta Matriz de Niveles de Discontinuidad
xlswrite('ArchivoNvDP.xlsx', MatNvDP); % Exporta Matriz de Niveles de Discontinuidad Cuando IQ = 0
xlswrite('ArchivoMuestras.xlsx', MatMues); % Exporta Matriz de Muestras
xlswrite('ArchivoTimes.xlsx', MatTime); % Exporta Matriz de Tiempos
xlswrite('ArchivoPi.xlsx', MatPi); % Exporta Matriz de Radianes
xlswrite('ArchivoModulo1.xlsx', MatMod); % Exporta Matriz de Modulos

% EXPORTAR DATOS A ARCHIVO .MAT
save('ArchivoResults.mat', 'MatIDC_PU', 'MatILKG_PU', ...
'MatIDCP_PU', 'MatIDC_I', 'MatILKG_I', 'MatIDCP_I', ... % Exporta los Datos de las Matrices
'MatNvD', 'MatNvDP', 'MatMues', 'MatTime', 'MatPi', 'MatMod');

%*****
%***** INFORMACIÓN DE LA SIMULACIÓN *****
%*****

% LIMPIEZA DE LA VENTANA DE COMANDOS
clc % Limpia ventana de comandos

% IMPRESION DE LA INFORMACIÓN DE SIMULACIÓN
fprintf('***** DATOS DE SIMULACIÓN ***** \n\n');
fprintf('La simulación se elaboró tomando en cuenta lo siguiente: \n\n');
fprintf('TIEMPOS Y MUESTREO: \n');
fprintf('\t Tiempo de Simulación = %d [s] \n', TSim);
fprintf('\t Tiempo de Muestreo = %d [s] \n', TMuestra);
fprintf('\t Muestras Tomadas = %d \n', NuMues);
fprintf('VARIABLES DEL CIRCUITO: \n');
fprintf('\t Voltaje DC 1 = %d [V] \n', VinDC1);
fprintf('\t Voltaje DC 2 = %d [V] \n', VinDC2);
fprintf('\t Corriente por cada [PU] = %d [A] \n', IDC_PU);
fprintf('\t Modulación 1 = [%]');
for i = 1:1: M
    fprintf(' %d [%]', Moduls(i));
end
fprintf('\n');
fprintf('\t Modulación 2 = %d [%] \n', D2);
fprintf('CONSIDERACIONES IMPORTANTES: \n');
fprintf('\t Corriente de Fuga para delimitar Corriente Idonea = %d [A] \n', LimILKG);

%*****
%***** LISTA DE ARCHIVOS GENERADOS *****
%*****

% - .fig FigIDC_2D.fig - .fig FigIDC_3D.fig
% - .fig FigILKG_2D.fig - .fig FigILKG_3D.fig
% - .fig FigIDCP_2D.fig - .fig FigIDCP_3D.fig
% - .fig FigNvD_2D.fig - .fig FigNvD_3D.fig
% - .fig FigNvDP_2D.fig - .fig FigNvDP_3D.fig
% - .PNG FigIDC_2D.png - .PNG FigIDC_3D.png
% - .PNG FigILKG_2D.png - .PNG FigILKG_3D.png
% - .PNG FigIDCP_2D.png - .PNG FigIDCP_3D.png
% - .PNG FigNvD_2D.png - .PNG FigNvD_3D.png
% - .PNG FigNvDP_2D.png - .PNG FigNvDP_3D.png
% - EXCEL ArchivoIDC_PU.xlsx - EXCEL ArchivoIDC_I.xlsx
% - EXCEL ArchivoILKG_PU.xlsx - EXCEL ArchivoILKG_I.xlsx
% - EXCEL ArchivoIDCP_PU.xlsx - EXCEL ArchivoIDCP_I.xlsx
% - EXCEL ArchivoNvD.xlsx - EXCEL ArchivoNvDP.xlsx
% - EXCEL ArchivoMuestras.xlsx - EXCEL ArchivoTimes.xlsx
% - EXCEL ArchivoPi.xlsx - EXCEL ArchivoModulo1.xlsx
% - .mat ArchivoResults.mat
%
%
% TOTAL = 33 Archivos

%*****
%***** NOTAS IMPORTANTES *****
%*****

% DESPUES DE CADA SIMULACIÓN, PARA EL BUEN FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA,
% ES RECOMENDABLE:
% - CERRAR TODAS LAS GRAFICAS REALIZADAS
% - PASAR LOS ARCHIVOS GENERADOS A OTRA CARPETA DIFERENTE A LA DEL PROYECTO

```