

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de un convertidor puente activo dual con control predictivo para almacenamiento solar en un laboratorio de FIEC

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Gustavo Alejandro Chacón Cárdenas

Bryan Paul Ortiz Valarezo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

Dedicatoria

A mi familia, por ser la base y el motor de cada uno de mis logros.

A mi mama, por su amor y sacrificio; a mi hermano, por su apoyo incondicional, sus consejos y felicitaciones; a mi tía Nancy y a mi prima Katherin, por brindarme siempre su compañía, confianza y apoyo sincero durante este camino.

A mi querida abuela quien, aunque ya no se encuentra en vida, fue muy especial para mí y para mis estudios desde el inicio; su recuerdo, cariño y enseñanzas me acompañan en cada paso que doy. Extiendo también esta dedicatoria a mis familiares y a mis amigos cercanos que, de distintas maneras, me motivaron y creyeron en mí. Gracias a cada uno de ustedes por ser parte fundamental de la realización de este sueño académico.

Bryan Paul Ortiz Valarezo

Dedico este proyecto, en primer lugar, a Dios, por abrirme las puertas en Ecuador. A mis padres, Gustavo y Arelys, quienes con su esfuerzo incommensurable me brindaron la oportunidad de formarme como profesional.

A mi abuela Carmen, cuyas sabias palabras siempre fueron motivo de aliento y fortaleza.

A mis hermanos, Gabriel y Ámbar, también a Astrid, Gilson, Dora, Carolina y a toda mi gran familia, que siempre se preocuparon por mí y me ofrecieron su apoyo incondicional. A mis amigos Aldo y Howard, quienes me acompañaron en los momentos más difíciles de la carrera. A mis abuelos Crisanto, Isabel y Antonio, cuya memoria y ejemplo permanecen como guía en mi vida. Y finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, formaron parte de este camino y dejaron una huella en mi formación personal y profesional.

Gustavo Alejandro Chacón Cárdenas

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por brindarnos la salud, la sabiduría y las fuerzas para formarnos día a día como profesionales. A nuestra tutora MSc. Sara Rios que con sus conocimientos nos guió para el desarrollo del proyecto. Al PhD. Efrén Herrera que semana a semana realizó las correcciones a seguir. A la Ing. Jocelyne Salgado por facilitar los instrumentos de medición. Al Ing. José Larrea por abrirnos las puertas del laboratorio de Sistemas Digitales Avanzados.

Declaración Expressa

Nosotros Gustavo Alejandro Chacón Cárdenas y Bryan Paul Ortiz Valarezo acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales derechos de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 días del mes de agosto del 2025.



Gustavo Chacón



Bryan Ortiz

Evaluadores

PhD. Efrén V. Herrera Muentes

Profesor de Materia

MSc. Sara J. Ríos Orellana

Tutor de proyecto

Resumen

La creciente dependencia del sistema eléctrico ecuatoriano de fuentes hidroeléctricas ha evidenciado su vulnerabilidad frente a eventos climáticos, como la escasez de lluvias registrada en el último trimestre del año 2024. Esta situación afectó el suministro energético de manera crítica, incluyendo a instituciones educativas como la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL). Frente a ello, se plantea el diseño de un convertidor puente activo dual con control predictivo, integrado a un sistema de almacenamiento solar, como una solución de respaldo energético para los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC) perteneciente a ESPOL. El proyecto tiene como objetivo garantizar un suministro autónomo, seguro y eficiente ante interrupciones del servicio eléctrico, alineándose con los principios de sostenibilidad institucional. Durante el desarrollo del proyecto se utilizarán herramientas de simulación como MATLAB/Simulink para modelar y analizar el comportamiento del convertidor bajo diversas condiciones operativas. El enfoque se centrará en la implementación de un controlador predictivo basado en modelo (MPC), que permitirá optimizar la gestión energética y anticiparse a variaciones en la carga del sistema. El diseño incluirá esquemas detallados, selección de componentes y estrategias de control. Y, por último, se realizarán pruebas comparativas que demuestren los beneficios del MPC.

Palabras Clave: respaldo energético, convertidor activo dual, control predictivo, energía solar, MATLAB/Simulink, vulnerabilidad climática.

Abstract

The growing dependence of the Ecuadorian electrical system on hydroelectric sources has highlighted its vulnerability to climatic events, such as the shortage of rainfall recorded in the last quarter of 2024. This situation critically affected the energy supply, including educational institutions such as ESPOL. In response, the design of a dual active bridge converter with predictive control, integrated into a solar storage system, is proposed as an energy backup solution for the laboratories of the Faculty of Electrical and Computer Engineering (FIEC).

The project aims to ensure an autonomous, safe, and efficient power supply in the event of service interruptions, in line with the principles of institutional sustainability. During the development of the project, simulation tools such as MATLAB/Simulink will be used to model and analyze the behavior of the converter under various operating conditions. The focus will be on the implementation of a model predictive controller (MPC), which will optimize energy management and anticipate variations in system load. The design will include detailed diagrams, component selection, and control strategies.

Keywords: *energy backup, dual active bridge converter, predictive control, solar energy, MATLAB/Simulink, climate vulnerability.*

ÍNDICE GENERAL

Evaluadores	5
Resumen	VI
<i>Abstract</i>	VII
Simbología (se colocan en orden alfabético).....	XIV
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XVIII
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	1
1.1. Descripción del Problema.....	1
1.2. Justificación del Problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4. Marco teórico	4
1.4.1. Sistemas de respaldo energético.....	4
1.4.2. Convertidor Puente Activo Dual.	4
1.4.3. Estructura General del DAB.	5
1.4.4. Principio de Funcionamiento.	6

1.4.5. Ventajas del DAB	7
1.4.6. Tipo de modulación para convertidor DAB.....	7
1.4.7. Modulación por Desplazamiento de Fase (Phase Shift Modulation)	8
1.4.8. Análisis de la Modulación SPS.....	8
Capítulo 2	15
2. Metodología.....	15
2.1. Planteamiento de alternativas de solución	15
2.1.1. Tipos de convertidores	15
2.1.2. Comparación técnica entre topologías.....	17
2.1.3. Selección del DAB como solución óptima	18
2.2. Arquitectura del Sistema de Respaldo Energético.....	18
2.2.1. Descripción general de la microrred aislada	18
2.2.2. Componentes del sistema.....	19
2.2.3. Esquema de control general (PI vs MPC).....	20
2.3. Metodología de Diseño del Sistema de Respaldo	21
2.3.1. Estudio de carga y evaluación energética del laboratorio	21
2.3.2. Modelo físico del sistema.....	25
2.3.3. Modelo matemático del DAB.....	26
2.3.4. Linealización y obtención del modelo discreto en espacio de estados	27
2.3.5. Diseño de controladores.....	29
2.3.6. Simulación del sistema en MATLAB/Simulink.....	32
2.4. Fundamentos Técnicos del Convertidor DAB con Control Predictivo	33

2.4.1.	Principio de transferencia de energía mediante SPS	34
2.4.2.	Control de potencia mediante ángulo de fase ϕ	34
2.4.3.	Operación bidireccional y flujo de energía	35
2.4.4.	Predicción dinámica para la regulación del bus DC	35
2.5.	Parámetros de Diseño	36
2.5.1.	Parámetros eléctricos seleccionados.....	36
2.5.2.	Parámetros de control MPC	38
2.6.	Especificaciones Técnicas del Sistema Propuesto.....	39
2.6.1.	Regulaciones del DC BUS	39
2.6.2.	Tiempo de respuesta ante pérdidas de generación solar.....	39
2.6.3.	Rango operativo del ángulo de fase ϕ	40
2.6.4.	Corriente máxima y capacidad de respaldo energético.....	40
2.7.	Consideraciones Éticas, Normativas y de Seguridad.....	41
2.7.1.	Promoción de energías limpias y sostenibles	41
2.7.2.	Normas técnicas aplicada.....	41
	Capítulo 3	43
3.	Resultados y análisis	43
3.1.	Experimento #1: Carga constante y variación del voltaje del bus DC	44
3.1.1.	Simulación del DAB con control PI	44
3.1.2.	Simulación del DAB con MPC General	46
3.1.3.	Simulación del DAB con MPC físico.....	47
3.2.	Experimento #2: Voltaje constante y variación en la carga.....	49

3.2.1.	Simulación DAB con PI- Carga variable y voltaje constante	49
3.2.2.	Simulación DAB con MPC General -Carga variable y voltaje constante .	51
3.2.3.	Simulación DAB con MPC físico - Carga variable y voltaje constante ...	53
3.3.	Experimento #3: Carga y voltaje variables.	55
3.3.1.	Simulación DAB con control PI - Carga y voltaje variable.....	55
3.3.2.	Simulación DAB con MPC General - Carga y voltaje variables	61
3.3.3.	Simulación DAB con MPC físico - Carga y voltaje variables	69
3.3.4.	Análisis de resultados	78
3.3.5.	Costos.....	78
	CAPÍTULO 4	80
4.	Conclusiones y recomendaciones	80
4.1.	Conclusiones.....	80
4.2.	Recomendaciones	83

Abreviaturas

AC	Alternating Current (Corriente Alterna)
CPU	Central Processing Unit
DAB	Dual Active Bridge (Convertidor Puente Activo Dual)
DC	Direct Current (Corriente Continua)
DPS	Dual Phase Shift
EPS	Extended Phase Shift
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCS-MPC	Finite Control Set Model Predictive Control
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
HV	High Voltage (Alta Tensión)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LV	Low Voltage (Baja Tensión)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPC	Model Predictive Control (Control Predictivo Basado en Modelo)
NMPC	Nonlinear Model Predictive Control
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PI	Proporcional Integral

PV	Photovoltaic (Fotovoltaico)
SPS	Single Phase Shift (Modulación por Desplazamiento de Fase Simple)
TPS	Triple Phase Shift
Vbus	Voltaje del bus de corriente continua
ZVS	Zero Voltage Switching (Comutación a Voltaje Cero)

Simbología

A, B, C	Matrices del modelo del sistema (espacio de estados)
F	Frecuencia de conmutación
Ilk	Corriente a través de la inductancia de acoplamiento
Lk	Inductancia de acoplamiento
u(k)	Entrada de control en el instante k (ϕ)
V1, V2	Voltajes DC en el lado primario y secundario del DAB
vLk(t)	Voltaje sobre la inductancia de acoplamiento
x(k)	Estado del sistema en el instante k (Vbus)
y(k)	Salida del sistema en el instante k
ω	Frecuencia angular, $\omega = 2\pi f$
ϕ (phi)	Ángulo de desfase entre puentes H en el convertidor DAB

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático del convertidor DAB.....	5
Figura 2. Registro de Potencia activa instantánea durante el periodo de monitoreo (21 - 28 julio de 2025).....	23
Figura 3. Perfil horario de consumo eléctrico – 23 julio de 2025.....	24
Figura 4. Perfil horario de consumo eléctrico – 24 julio de 2025.....	24
Figura 5. Tendencia semanal del consumo eléctrico promedio diario – 21 al 28 julio de 2025.....	25
Figura 6. Tendencia del Promedio de Carga.....	25
Figura 7. Diagrama en Simulink para control PI.....	33
Figura 8. Diagrama en Simulink para control MPC.....	33
Figura 9. Respuesta DAB con PI – Voltaje inicial mayor a 400 V	45
Figura 10. Respuesta del DAB con PI – Voltaje inicial inferior a 400 V.....	46
Figura 11. Respuesta del DAB con MPC General – Voltaje inicial superior a 400 V....	47
Figura 12. Respuesta del DAB con MPC General – Voltaje inicial inferior a 400 V.....	47
Figura 13. Respuesta del DAB con MPC Físico – Voltaje inicial superior a 400 V.....	48
Figura 14. Respuesta del DAB con MPC Físico – Voltaje inicial inferior a 400 V.....	49
Figura 15. Respuesta del DAB con PI – Carga variable en t = 0.01 s.....	49
Figura 16. Respuesta del DAB con PI – Carga variable en t = 0.02 s.....	50
Figura 17. Respuesta del DAB con PI – Carga variable en t = 0.03 s.....	50
Figura 18. Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en t = 0.01 s.....	51
Figura 19. Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en t = 0.02 s.....	52

Figura 20. Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en t = 0.03 s.....	52
Figura 21. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en t = 0.01 s.....	53
Figura 22. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en t = 0.02.....	54
Figura 23. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en t = 0.03 s.....	54
Figura 24. Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso i).....	56
Figura 25. Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso i).....	56
Figura 26. Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	57
Figura 27. Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	57
Figura 28. Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	58
Figura 29. Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	58
Figura 30. Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	59
Figura 31. Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	60
Figura 32. Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	60
Figura 33. Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	61
Figura 34. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)....	62
Figura 35. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)...	62
Figura 36. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)....	63
Figura 37. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)63	
Figura 38. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii)...64	
Figura 39. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii)...64	
Figura 40. Voltaje del bus DC con MPC General –Carga y voltaje variables (Caso ii)....65	
Figura 41. espuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii)..65	
Figura 42. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii)...66	
Figura 43. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii)..66	
Figura 44. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii)...67	

Figura 45. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	67
Figura 46. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	68
Figura 47. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	68
Figura 48. Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	69
Figura 49. Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	69
Figura 50. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i).....	70
Figura 51. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i).....	70
Figura 52. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i).....	71
Figura 53. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i).....	71
Figura 54. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	72
Figura 55. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	72
Figura 56. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	73
Figura 57. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii).....	73
Figura 58. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	74
Figura 59. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	74
Figura 60. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	75
Figura 61. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii).....	75
Figura 62. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	76
Figura 63. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	76
Figura 64. Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	77
Figura 65. Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv).....	77

Índice de tablas

Tabla 1. Componentes del convertidor DAB.....	5
Tabla 2. Comparación de las técnicas de modulación del DAB presentan el siguiente balance técnico.....	9
Tabla 3. Comparación técnica entre topologías.....	17
Tabla 4. Desglose de costos de componentes del sistema fotovoltaico–DAB.....	79

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Descripción del Problema

El panorama energético actual del Ecuador, la alta dependencia de fuentes hidroeléctricas para la generación de electricidad ha revelado una significativa vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos. Durante octubre, noviembre y diciembre del año 2024, el país experimentó una grave crisis energética derivada de una prolongada escasez de lluvias, lo que redujo drásticamente la capacidad operativa de las principales centrales hidroeléctricas. Como consecuencia, se implementaron cortes programados y no programados del suministro eléctrico en todo el territorio nacional, generando impactos negativos en sectores clave como el residencial, comercial, industrial y educativo.

En el ámbito universitario, la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) se vio directamente afectada por estas interrupciones. Las actividades académicas y experimentales en los laboratorios sufrieron alteraciones significativas, comprometiendo la continuidad de procesos formativos y de investigación. A pesar de contar con sistemas de respaldo convencionales, se evidenciaron limitaciones funcionales que agravaron la situación y pusieron de manifiesto la fragilidad de la infraestructura energética ante condiciones adversas.

Este contexto resalta la urgencia de analizar las condiciones estructurales y operativas del entorno universitario frente a eventos de contingencia eléctrica, así como

la importancia de reflexionar sobre la planificación energética institucional y su capacidad de adaptación frente a desafíos sistémicos que podrían intensificarse con el cambio climático.

1.2. Justificación del Problema

La creciente vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional ante fenómenos climáticos, como la escasez de lluvias que afecta a las hidroeléctricas del Ecuador, evidencia la necesidad urgente de soluciones energéticas descentralizadas, resilientes y sostenibles. Esta problemática se agrava en espacios críticos como laboratorios universitarios, donde la continuidad eléctrica es esencial para garantizar la calidad educativa, la investigación y la seguridad de equipos e infraestructura.

En este contexto, el diseño y simulación de un convertidor de puente activo dual (DAB) con control predictivo representa una solución técnica adecuada. La propuesta busca mantener un suministro energético autónomo, seguro y eficiente en entornos educativos sensibles a fallos de red.

La elección del DAB se basa en dos ventajas clave:

Primero, su capacidad de manejar mayores niveles de potencia que otros convertidores bidireccionales, permitiendo escalar el sistema según las necesidades del laboratorio.

Segundo, su transformador de alta frecuencia ofrece aislamiento galvánico, lo que mejora la seguridad y facilita la integración con distintos niveles de tensión, aumentando la flexibilidad del diseño.

El uso de Model Predictive Control (MPC) añade valor al sistema al anticipar el comportamiento del convertidor y ajustar sus variables en tiempo real. A diferencia de

técnicas tradicionales, el MPC opera de forma discretizada, lo que facilita su implementación en sistemas digitales como microcontroladores o DSP. Además, su capacidad para manejar restricciones multivariables y adaptarse a condiciones dinámicas lo hace ideal para maximizar la eficiencia y minimizar el desgaste de componentes.

Esta solución reduce la necesidad de emplear combustibles fósiles para generar energía, lo que disminuye emisiones contaminantes y hace posible la autosuficiencia energética institucional. También puede replicarse en otros laboratorios o edificios universitarios, apoyando los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad social.

Este proyecto no solo es técnicamente viable, sino que también responde a principios éticos y de impacto global, promoviendo una transición energética justa, segura y adaptada a las necesidades eléctricas de la comunidad universitaria.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y simular un convertidor Puente Activo Dual con control predictivo como parte de un sistema de almacenamiento de energía solar, para evaluar su viabilidad como solución de respaldo energético autónomo para un laboratorio de la FIEC ante las interrupciones del servicio eléctrico.

1.3.2 Objetivos específicos

- I. Diseñar el convertidor de puente activo dual mediante herramientas de modelado electrónico, considerando los requisitos de operación con sistemas fotovoltaicos y bancos de baterías.

- II. Simular el comportamiento del sistema de conversión con control predictivo, para analizar el desempeño en escenarios de carga, descarga y fallos de red.

III. Realizar un estudio comparativo entre el control predictivo y otros métodos de control convencionales, para determinar las ventajas operativas en términos de eficiencia y gestión energética.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Sistemas de respaldo energético

Los sistemas de respaldo energético garantizan el suministro continuo ante fallas, protegiendo cargas en sectores como salud, industria y educación. Entre las soluciones actuales, las baterías de ion-litio destacan por su rápida respuesta, operación limpia y fácil integración con energía solar. Para gestionar el flujo entre paneles, baterías y cargas se emplean convertidores bidireccionales eficientes. En este contexto, el Puente Activo Dual (DAB) resulta adecuado gracias a su transferencia bidireccional, aislamiento y operación en alta frecuencia. Su control mediante estrategias predictivas como MPC optimiza el desempeño y lo convierte en una opción robusta para aplicaciones críticas.

1.4.2. Convertidor Puente Activo Dual.

El convertidor puente activo dual (DAB, Dual Active Bridge) es una topología DC-DC bidireccional con aislamiento, ampliamente utilizada en electrónica de potencia moderna. Está formado por dos puentes completos activos acoplados mediante un transformador que trabaja a una alta frecuencia, lo que hace posible una transferencia de energía en los dos sentidos mediante la modulación de fase. Su diseño simétrico, junto con la conmutación a voltaje cero (ZVS), reduce pérdidas y el tamaño de componentes magnéticos, posibilitando sistemas más compactos y eficientes. El DAB se aplica en vehículos eléctricos, almacenamiento de energía, redes DC, UPS y cargadores rápidos, donde se requiere conversión bidireccional de alta eficiencia.

1.4.3. Estructura General del DAB.

El convertidor DAB es un convertidor DC-DC aislado y bidireccional que posee dos puentes H, un transformador y una inductancia de acoplamiento. Su arquitectura permite una transferencia de energía controlada y eficiente mediante modulación de fase.

La Fig. 1 muestra el esquema eléctrico típico del DAB:

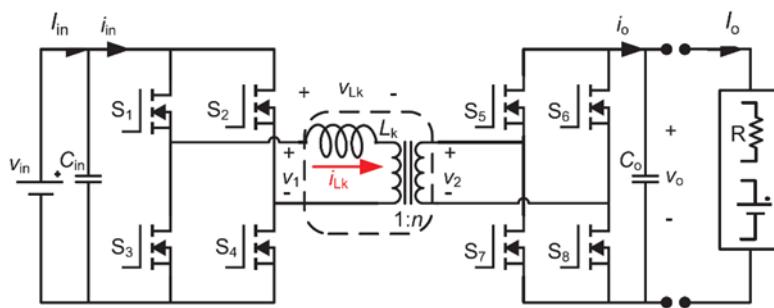


Figura 1: Diagrama esquemático del convertidor DAB

Tabla 1: Componentes del convertidor DAB.

Componente	Descripción
Fuente de entrada y condensador Cin	La fuente Vin alimenta el sistema mientras que condensador Cin filtra el rizado de conmutación y estabiliza la tensión de entrada.
Puente H primario (S ₁ a S ₄)	Genera una señal cuadrada V _p con ciclo útil del 50%. La fase se controla respecto al puente secundario.
Transformador de alta frecuencia	Aísla galvánicamente entrada y salida. Opera a alta frecuencia (\geq 20 kHz) y puede adaptar niveles de tensión mediante su relación de espiras n:1.
Inductancia de acoplamiento L _k	Regula la corriente i _{Lk} que transfiere energía entre los puentes.
Puente H secundario (S ₅ a S ₈)	Genera una señal cuadrada V _s sincronizada con V _p , pero con desfase. También con ciclo útil del 50%.
Condensador de salida C ₀	Suaviza el voltaje de salida V _o , filtrando el rizado para entregar una señal DC estable a la carga.
Carga activa o pasiva RR	Puede ser una carga resistiva, batería o sistema electrónico.

1.4.4. Principio de Funcionamiento.

El DAB utiliza la modulación por desfase de fase (SPS), ambos puentes generan señales cuadradas con ciclo útil del 50% y el control se basa en el ángulo de desfase (ϕ). Este induce un voltaje sobre la inductancia de acoplamiento Lk y una corriente triangular cuya dirección y magnitud dependen de ϕ , posibilitando la transferencia bidireccional de energía sin modificar el ciclo útil ni las conexiones. En condiciones ideales, la potencia media transferida se expresa como función del voltaje, la inductancia y el desfase.

$$P = \frac{nV1V2}{2\pi f Lk} \times \phi \times (1 - \phi) \quad (1.1)$$

- $V1, V2$: voltajes DC en el lado primario y secundario.
- n : relación de transformación del transformador.
- Lk : inductancia de acoplamiento.
- f : frecuencia de conmutación.
- ϕ : desfase normalizado entre 0 y 1 dentro del semiperíodo de conmutación.

Esta ecuación indica que la transferencia de potencia es **proporcional al producto de los voltajes, al desfase y a su complemento**. Por tanto, variando únicamente ϕ , se puede controlar de manera lineal y eficiente la potencia transferida en un amplio rango operativo.

La diferencia de ϕ de los puentes H define el sentido del flujo de energía:

- $\phi=0$:

Las señales están sincronizadas. No hay diferencia de voltaje entre los puentes, por lo que no se transfiere energía neta. La corriente en Lk es nula o puramente osculatoria.

- $\phi>0$:

El puente primario adelanta en fase al secundario. Esto genera un voltaje positivo en L_k , y por lo tanto la energía fluye del primario al secundario, es decir, de entrada, a salida.

- $\phi<0$:

Cuando el puente secundario adelanta al primario, la diferencia de voltaje se invierte y la energía fluye de la salida a la entrada. Esta propiedad permite el funcionamiento bidireccional del sistema.

1.4.5. Ventajas del DAB.

- Transferencia bidireccional sin modificar la topología, ideal para sistemas de almacenamiento con carga y descarga controlada.
- Aislamiento galvánico mediante transformador de alta frecuencia, lo que mejora la seguridad y permite compatibilidad entre distintos niveles de voltaje.
- Alta eficiencia gracias a la conmutación suave (ZVS) y operación en frecuencias elevadas como 20 kHz, que reducen pérdidas y posibilitan diseños más compactos y ligeros.
- Control de potencia sencillo mediante el ángulo de desfase (ϕ) y capacidad de soportar amplias diferencias de voltaje, lo que lo hace apto para cargadores rápidos y microrredes DC.

1.4.6. Tipo de modulación para convertidor DAB.

Los convertidores DC-DC tradicionales, como buck o boost, utilizan PWM (Pulse Width Modulation), donde la regulación del voltaje se logra variando el ciclo útil (Duty Cycle) de la señal, mientras la frecuencia y el desfase permanecen fijos. En cambio, el

convertidor DAB trabaja con señales cuadradas de ciclo útil constante (50%), introduciendo un desfase variable (ϕ) entre los puentes H. Este parámetro se convierte en la variable principal de control de potencia.

1.4.7. Modulación por Desplazamiento de Fase (Phase Shift Modulation).

La PSM es el control principal de flujo en convertidores DAB. Regula el flujo de energía introduciendo un desfase angular entre las señales cuadradas de los puentes H, manteniendo un ciclo útil fijo del 50%. Su versión básica, Single Phase Shift (SPS), genera en la inductancia de acoplamiento una corriente triangular cuya dirección depende del signo del desfase: si el primario adelanta, la energía fluye hacia la carga; si lo hace el secundario, fluye en sentido inverso. El SPS permite control bidireccional sin variar ciclo útil ni frecuencia, lo que simplifica la implementación digital y resulta eficaz cuando la relación de voltaje es cercana a 1 y la carga nominal. No obstante, en baja carga o con ganancias distintas de la unidad, incrementa la potencia reactiva y las pérdidas, reduciendo la eficiencia y afectando la commutación suave (ZVS).

1.4.8. Análisis de la Modulación SPS.

La transferencia de potencia de un DAB bajo modulación SPS se describirse desde un enfoque analítico considerando la aplicación de una señal cuadrada desfasada entre los puentes H. El voltaje diferencial $v_{Lk}(t)$ sobre la inductancia de acoplamiento induce una corriente triangular cuya pendiente depende del valor instantáneo de:

$$v_{Lk}(t) = v_1(t) - \frac{v_2(t)}{n} \quad (1.2)$$

Donde $v_1(t)$ y $v_2(t)$ son las formas de onda cuadradas generadas por los puentes, y n es la relación del transformador. La corriente resultante $i_{Lk}(t)$ tiene un promedio no

nulo cuando existe desfase, lo cual da lugar a transferencia neta de potencia. La potencia activa promedio transferida en un ciclo de conmutación puede expresarse como:

$$P = \frac{V1V2}{\omega Lk} \cdot \left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} \right) \quad (1.3)$$

- V1, V2: voltajes en HV y LV, respectivamente.
- $\omega = 2\pi f$: frecuencia angular de conmutación.
- Lk: inductancia de acoplamiento.
- ϕ : ángulo de desfase entre señales, en radianes.

La ecuación indica que la potencia transferida varía cuadráticamente con el desfase: es nula en $\phi=0$, máxima en $\phi=\pi/2$ y su signo define la dirección del flujo, habilitando el funcionamiento bidireccional del DAB.

Tabla 2: Comparación de las técnicas de modulación del DAB presentan el siguiente balance técnico.

Técnica	Desfases controlables	Eficiencia (carga parcial)	ZVS	Complejidad de implementación	Corriente RMS
SPS	1 (entre puentes)	Limitada	Parcial	Baja	Elevada
EPS	2 (inter e intra-puente)	Media	Amplia	Media	Moderada
DPS/TPS	3+	Alta	Óptima	Alta	Baja

El SPS se caracteriza por su simplicidad y eficiencia, siendo adecuado cuando la ganancia es estable y las condiciones de carga constantes. Aunque su manejo de corriente no siempre es óptimo, resulta satisfactorio en la mayoría de las aplicaciones prácticas.

1.4.9. Control Predictivo Basado en Modelo (MPC).

Fundamentos del MPC.

El Model Predictive Control (MPC) es una técnica avanzada que optimiza sistemas dinámicos anticipando su evolución en un horizonte de predicción. Mediante un modelo matemático ya sea lineal o no lineal, calcula en tiempo real la secuencia de control que minimiza el error respecto a la referencia, considerando restricciones físicas como límites de voltaje o corriente. “Diversos trabajos han validado la aplicación de MPC en convertidores DAB. Por ejemplo, Chen et al. evaluaron un esquema MDCS-MPC en un prototipo experimental de 1 kW, mostrando buena capacidad de amortiguación de resonancias...” Chen et al. (2022). A diferencia de métodos clásicos, maneja múltiples variables y restricciones internas. En convertidores DAB, controla el ángulo de desfase (ϕ), regulando con precisión la potencia transferida.

Ecuación general de la potencia transferida en un DAB:

$$P = \frac{nV1V2}{\omega L_k} \cdot \emptyset(1 - \emptyset) \quad (1.4)$$

- V1, V2: Voltajes de entrada y salida en DC.
- n: Relación de transformación del transformador.
- $\omega = 2\pi f$: Frecuencia angular de conmutación.
- Lk: Inductancia de acoplamiento.

Variantes de MPC en convertidores.

Existen diversas implementaciones de MPC en convertidores, y en el caso del DAB se destacan dos principales:

- **FCS-MPC (Finite Control Set MPC):** Opera directamente sobre los estados de los interruptores, evaluando el coste de cada acción en el siguiente paso. Es compatible con sistemas digitales y no requiere moduladores externos, lo que

simplifica el hardware, aunque puede demandar alta frecuencia de muestreo para alcanzar precisión en topologías rápidas como el DAB.

- **Nonlinear MPC (NMPC):** Emplea un modelo no lineal completo del convertidor, lo que aumenta la precisión y la robustez ante perturbaciones o condiciones variables. Aunque más demandante computacionalmente, ofrece un seguimiento de referencia más estable y exacto, especialmente en aplicaciones con cargas dinámicas o energías renovables. “En esta línea, Nardoto et al. implementaron un MPC adaptativo en un DAB de 12 kW, obteniendo reducción de pérdidas de conmutación y mejor respuesta en tiempo real. De igual manera, Nguyen y Lee propusieron un MPVC basado en modelo promedio, destacando estabilidad y buena estimación de estados.” (Nardoto et al. (2022))

Modelo típico de estado del sistema (linealizado):

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k \quad (1.5)$$

$$yk = Cx_k \quad (1.6)$$

- X_k : Vector de estados.
- u_k : Entrada de control (ϕ).
- A, B, C: Matrices del modelo del sistema.

Este modelo es usado por variantes como el NMPC para predecir la dinámica del convertidor.

Comparación con controladores convencionales.

Comparado con controladores tradicionales como PID o PI, el MPC ofrece ventajas clave:

- Mayor capacidad de predicción: anticipa el efecto de las acciones de control, mientras que los PID reaccionan al error ya presente.
- Robustez frente a perturbaciones: se adapta mejor a variaciones de carga o entradas ruidosas.
- Manejo de restricciones: algo que los PID no pueden gestionar directamente.
- Multivariable: el MPC puede controlar simultáneamente múltiples entradas y salidas.

Aunque los controladores PI son más simples y fáciles de implementar, pueden no ser suficientes para sistemas con dinámicas altamente no lineales como el DAB, especialmente en modos bidireccionales o durante transiciones rápidas de potencia. “Wang et al. validaron experimentalmente un esquema MPC con observador STISMO, comprobando mayor robustez frente a incertidumbres del sistema, en contraste con controladores clásicos.” Wang, Yu & Qi (2023)

Implementación en DAB.

En el DAB, el MPC se implementa el ángulo de desfase ϕ como variable de control, que regula la potencia transferida. El algoritmo predice la evolución del voltaje de salida V_o y la corriente i_L , utilizando modelos reducidos (lineales o no lineales), y determina el valor óptimo de ϕ que minimiza la función coste en cada paso de muestreo.

El diseño del MPC en convertidores DAB puede incluir:

- Modelo dinámico (estado-espacio o promedio) para describir las variables del sistema.
- Función de coste con restricciones, que penaliza errores de voltaje y esfuerzos en los interruptores, considerando límites de voltaje, corriente y desfase.

- Optimización en tiempo real, resolviendo el problema de control en cada ciclo de operación.

Aunque el MPC implica mayor coste computacional que un PI tradicional, los avances en microcontroladores y FPGAs lo han hecho viable. Simulaciones y prototipos demuestran que, aplicado al DAB, mejora la eficiencia energética, reduce la distorsión armónica y mantiene una estabilidad más robusta ante condiciones cambiantes o no lineales.

Aplicaciones del DAB con MPC en Sistemas de Almacenamiento y Respaldo Energético.

Rol del DAB en microrredes DC.

En microrredes DC, el DAB actúa como convertidor bidireccional entre buses de distinta tensión, integrando fuentes renovables, almacenamiento y cargas críticas. Su topología aporta aislamiento galvánico, adaptación de voltaje y alta densidad de potencia. Mediante modulación por desfase (SPS) regula la transferencia de energía, y con el Model Predictive Control (MPC) mejora la precisión, garantiza el ZVS y limita corrientes u oscilaciones, permitiendo operar como regulador principal o actuador intermedio en esquemas de control jerárquico. “Más recientemente, Wang et al. demostraron en un DAB de tres niveles que el MPC mejora la respuesta ante variaciones de carga y asegura ZVS, lo que refuerza su potencial en aplicaciones de respaldo y microrredes.” (Wang et al. (2025))

Respaldo energético en laboratorios universitarios.

La implementación del DAB con MPC en entornos académicos, como laboratorios universitarios, permite desarrollar prototipos funcionales de respaldo energético para cargas prioritarias. En estos casos, el DAB se conecta entre las baterías y

el bus DC principal, gestionando con precisión la transición entre carga y descarga durante interrupciones de red. La estrategia MPC define funciones objetivo que penalizan tanto el error de potencia como el esfuerzo de control ($\Delta\phi$), considerando restricciones de voltaje/corriente y dinámicas del sistema. Esto resulta en mayor autonomía operativa, menor degradación del almacenamiento y mayor robustez ante perturbaciones o variaciones de carga.

Beneficios de la integración del DAB con MPC.

- La integración de un controlador predictivo en el DAB ofrece mejoras notables en rendimiento energético y protección de activos.
- El MPC disminuye conmutaciones innecesarias, suaviza las oscilaciones de corriente i_{Lk} y preserva la conmutación suave (ZVS), incluso con cargas parciales.
- Al aplicar restricciones dinámicas, se evitan excesos de corriente en carga/descarga, protegiendo los componentes internos sensibles de la batería.
- El MPC anticipa perturbaciones externas y optimiza la respuesta, mejorando la estabilidad del sistema.

Capítulo 2

2. Metodología.

2.1. Planteamiento de alternativas de solución

Para diseñar un convertidor DAB con control predictivo orientado al almacenamiento solar en un entorno de laboratorio universitario, se evaluaron distintas arquitecturas de conversión bidireccional DC-DC. La necesidad de gestionar con eficiencia la carga y descarga de un banco de baterías, bajo condiciones variables de generación y consumo, motivó la comparación de distintas topologías de los convertidores. Estas fueron evaluadas considerando criterios como eficiencia energética, capacidad de control, aislamiento galvánico y compatibilidad con estrategias avanzadas de regulación como el MPC.

2.1.1. Tipos de convertidores

- *Convertidor Buck-Boost bidireccional*

El convertidor Buck-Boost bidireccional es una de las topologías más simples para conversión en ambos sentidos, alternando entre modo buck y boost según el flujo de energía y regulando el voltaje con técnicas PWM convencionales. Aunque es económico y sencillo, presenta limitaciones importantes: carece de aislamiento galvánico, lo que compromete la seguridad en buses de alta tensión, y la circulación de corrientes elevadas genera pérdidas resistivas y estrés térmico en los interruptores, dificultando su uso en sistemas de mediana o alta potencia (Xie, Sun, & James, 2010; Wai, Duan, & Jheng, 2012). Además, su respuesta no lineal y dependiente de la carga complica la aplicación de estrategias de control como el MPC, reduciendo su adaptabilidad frente a perturbaciones rápidas o condiciones variables.

- ***Convertidor intercalado bidireccional (Interleaved)***

La arquitectura intercalada se aplica al convertidor Buck-Boost incorporando varias fases en paralelo, conmutadas en desfase. Este enfoque permite distribuir la carga, disminuir el rizado y mejorar la eficiencia térmica, lo que posibilita manejar mayores niveles de potencia (Khan & Tolbert, 2009; Nyman & Andersen, 2010). No obstante, también introduce una mayor complejidad en el control, la sincronización y el balance de corriente entre fases, además de carecer de aislamiento galvánico. Aunque resulta más robusta que un convertidor simple, la cantidad de variables y la interdependencia entre las fases dificultan su integración con métodos predictivos como el MPC, lo que limita sus beneficios en aplicaciones que requieren alta precisión.

- ***Convertidor Dual Active Bridge (DAB)***

El convertidor DAB se presenta como una solución avanzada y especialmente adecuada para el control predictivo. Está conformado por dos puentes completos interconectados a través de un transformador, lo que le proporciona aislamiento galvánico inherente y, al mismo tiempo, permite reducir de manera considerable el tamaño de los elementos pasivos gracias al incremento de la frecuencia de operación (Rukonuzzaman & Mahboob, 2024; Benmakhlof & Hacil, 2023). La transferencia de potencia se gestiona mediante la modulación SPS, en la que el ángulo de desfase entre los puentes regula tanto la dirección como la magnitud del flujo de energía. Esta característica asegura una respuesta continua, estable y predecible, idónea para su modelado en espacios de estados discretos e ideal para su integración con estrategias basadas en MPC.

El DAB posibilita una operación bidireccional eficiente: permite cargar el banco de baterías con energía solar y, en ausencia de generación, abastecer la carga. Su simetría estructural y la relativa linealidad en el punto de operación seleccionado lo convierten en

una plataforma confiable para el diseño de controladores dinámicos avanzados. Aunque su implementación demanda un diseño cuidadoso, especialmente en la selección del transformador —considerando la relación de transformación, la inductancia de fuga y los materiales del núcleo—, este esfuerzo se ve compensado con mayores niveles de eficiencia, mejor calidad de regulación y un nivel superior de seguridad eléctrica.

2.1.2. Comparación técnica entre topologías

Tabla 3: Comparación técnica entre topologías

Criterio Técnico	Buck-Boost	Intercalado Bidireccional	Dual Active Bridge (DAB)
Aislamiento galvánico	No proporciona aislamiento	No proporciona aislamiento	Aislado mediante transformador de alta frecuencia
Operación bidireccional	Permite flujo en ambos sentidos	Permite carga y descarga	Bidireccional nativo mediante modulación por desfase
Eficiencia en alta potencia	Limitada por altas pérdidas y calentamiento	Mejorada por paralelización parcial	Alta eficiencia gracias a commutación suave (ZVS)
Complejidad del control	Baja, adecuada para control clásico	Media, requiere balanceo entre fases	Alta, pero compatible con estrategias predictivas avanzadas
Compatibilidad con control predictivo	No apto debido a su topología no aislada	Difícil integración por arquitectura limitada	Compatible por su modelo matemático bien definido
Tamaño de componentes pasivos	Grandes inductancias y capacitores	Requiere duplicación de etapas	Compactos por alta frecuencia de operación
Escalabilidad y robustez del sistema	Limitado a aplicaciones de baja escala	Escalable con mayor complejidad de control	Altamente escalable y robusto en sistemas de mayor potencia

2.1.3. Selección del DAB como solución óptima

Del análisis comparativo se concluye que el DAB es el convertidor más ideal para el desarrollo del sistema de respaldo energético planteado. Su capacidad de proporcionar aislamiento galvánico, junto con el control de potencia basado en SPS, le confiere ventajas significativas frente a topologías no aisladas. Asimismo, su comportamiento dinámico predecible y su estructura simétrica facilitan el modelado en espacios de estados discretos, lo que permite una integración directa con estrategias de control predictivo como el MPC. Estas cualidades, sumadas a su alta eficiencia en conmutación a frecuencias elevadas, posicionan al DAB como una solución robusta, segura y escalable para aplicaciones de almacenamiento solar en microrredes aisladas. Por ello, se seleccionó esta arquitectura como base del sistema propuesto.

2.2. Arquitectura del Sistema de Respaldo Energético.

2.2.1. Descripción general de la microrred aislada

La arquitectura propuesta se fundamenta en una microrred de corriente continua (DC) diseñada para operar de manera autónoma en un entorno académico, con el propósito de garantizar un suministro ininterrumpido a una carga sin recurrir a generadores de combustión, como los de gasolina. Este planteamiento busca reducir la dependencia de soluciones tradicionales altamente contaminantes y, en su lugar, fomentar la integración de fuentes renovables junto con sistemas de almacenamiento eficientes.

En esta configuración, la generación principal proviene de un panel solar conectado directamente al bus DC, lo que posibilita una conversión más eficiente y directa, evitando múltiples etapas intermedias. Sin embargo, debido a la intermitencia e imprevisibilidad de la energía solar, se incorpora un sistema de respaldo basado en

baterías, enlazado al bus mediante un convertidor bidireccional tipo DAB. Este dispositivo permite tanto la inyección de energía desde el banco de baterías al bus durante períodos de baja generación, como la absorción de excedentes en momentos de sobreproducción. La coordinación entre generación, almacenamiento y demanda se realiza a través de una arquitectura de control jerárquico que asegura la estabilidad del bus DC y asegura el cumplimiento de la demanda de la carga crítica, sin necesidad de recurrir a fuentes fósiles.

2.2.2. Componentes del sistema

- Panel solar fotovoltaico (PV)**

Fuente primaria del sistema. Su salida se conecta directamente al bus DC de 400 V, entregando energía mientras exista irradiancia suficiente. El voltaje de operación del panel puede variar entre 100 V y 600 V, regulado mediante un convertidor adaptador (si aplica) para compatibilidad con el bus.

- Bus DC**

Es el punto común de carga del sistema, con nivel nominal de 400 V. Recibe energía directamente desde el panel solar y es el punto donde se conecta tanto la carga como el lado HV del convertidor DAB.

- Convertidor DAB**

El convertidor se conecta por su lado de alta tensión (HV) al bus DC y por su lado de baja tensión (LV) al banco de baterías. Su función es actuar como intermediario, inyectando energía desde la batería al bus cuando la generación fotovoltaica resulta insuficiente, o almacenando el excedente cuando la producción supera la demanda.

- Banco de baterías**

Ubicado en el lado LV del convertidor DAB, el banco de baterías cumple la función de almacenamiento energético. Dependiendo del balance energético, puede suministrar energía al sistema en modo de respaldo o absorberla en modo de carga.

- **Carga**

Conectada al bus DC, representa los equipos del laboratorio (instrumentación, sistemas de control, bancos de prueba). Tiene una demanda estimada en 5 kW, con pequeñas variaciones transitorias durante la operación.

2.2.3. Esquema de control general (PI vs MPC)

El sistema de respaldo propuesto utiliza una arquitectura de control jerárquico para mantener el voltaje del bus DC en una referencia de 400 V. La regulación se logra ajustando el ángulo de desfase (ϕ) del convertidor DAB, que gobierna el flujo bidireccional de energía entre las baterías (lado LV) y el bus DC (lado HV), encargado de alimentar la carga.

- **Controlador PI (controlador comparativo)**

En el enfoque convencional basado en control PI, se emplean dos lazos de control:

- Lazo externo: un controlador PI regula el voltaje del bus DC comparándolo con la referencia de 400 V. La salida de este lazo es una corriente de referencia I_{ref} , que representa cuánta energía debe ser entregada o absorbida por el sistema.
- Lazo interno: un segundo controlador PI compara I_{ref} con la corriente real del lado LV (I_2), y en función del error ajusta el valor del ángulo ϕ para cumplir con la transferencia de potencia requerida.

- **Controlador MPC (controlador propuesto)**

El enfoque propuesto en este proyecto se fundamenta en el control predictivo basado en modelo (MPC). A diferencia del regulador PI, el MPC mide directamente el voltaje del bus DC y, mediante un modelo dinámico discreto del sistema, determina el ángulo de fase (ϕ) que minimiza el error respecto al valor de referencia. Este esquema optimiza el comportamiento del sistema dentro de un horizonte de predicción, considerando restricciones físicas como los límites de ϕ y su velocidad de cambio. Gracias a esta capacidad de anticipación, el MPC mejora de forma significativa la respuesta del sistema frente a transitorios, como disminuciones en la generación fotovoltaica o incrementos súbitos de carga, garantizando una regulación más precisa y estable del voltaje en el bus DC.

2.3. Metodología de Diseño del Sistema de Respaldo

La metodología de diseño de este sistema inicia con el análisis energético real del entorno, para luego avanzar hacia el modelado físico y matemático del convertidor DAB. Posteriormente, se formula el esquema de control PI-MPC y se valida mediante simulaciones en MATLAB/Simulink. Este enfoque gradual garantiza que cada decisión de diseño se base en datos reales, en modelos físicos representativos y en criterios de control robustos, adecuados a las condiciones de operación previstas.

2.3.1. Estudio de carga y evaluación energética del laboratorio

Para establecer una base técnica precisa para el sistema de respaldo, se realizó un estudio de la carga del *Laboratorio de Sistemas Digitales Avanzados*. A diferencia de un enfoque general que busca cubrir todo el consumo del laboratorio, el sistema fue diseñado específicamente para respaldar únicamente las cargas esenciales, es decir, aquellas necesarias para

garantizar la continuidad mínima operativa durante interrupciones del suministro eléctrico.

El análisis incluyó la identificación de los principales equipos involucrados en las sesiones prácticas:

- 21 estaciones de trabajo compuestas por CPU y monitor, donde cada CPU (Intel Core i7) consume aproximadamente 500 W y cada monitor 100 W.
- 8 luminarias de tipo LED con tres tubos de 1,20 m por unidad, cada una con una potencia total de 18 W.

El cálculo del consumo se realizó considerando el uso simultáneo de 6 computadoras por parte de los estudiantes, más la estación del docente. Esto representa una condición de operación típica en sesiones prácticas con grupo reducido o durante simulacros de contingencia. Bajo esta configuración, se obtuvo el siguiente desglose de consumo eléctrico:

- **CPU (7 estaciones):** $500 \text{ W} \times 7 = 3,5 \text{ kW}$.
- **Monitores (7):** $80 \text{ W} \times 7 = 560 \text{ W}$.
- **Luminarias (8):** $18 \text{ W} \times 8 \times 3 = 450 \text{ W}$.

El resultado arroja una demanda total estimada de aproximadamente 4,5 kW, la cual fue redondeada a 5 kW para incorporar un margen de seguridad operacional frente a transitorios, envejecimiento de componentes o pequeñas expansiones futuras. Este valor se estableció como la potencia nominal objetivo del sistema de respaldo, y fue utilizado como base para el dimensionamiento del convertidor DAB y el banco de baterías.

- **Evaluación energética basada en mediciones reales**

Para contrastar la estimación teórica con datos reales, se registró la potencia activa del laboratorio durante una semana usando un analizador de redes portátil

AEMC 3945B. El monitoreo permitió obtener tendencias por día y por hora e identificar valores característicos de operación.

Durante la semana de clases (21–28 jul 2025) el comportamiento de la carga fue regular: entre 09:00 y 16:00 se mantuvo un nivel de demanda prácticamente constante en $\approx 0,45\text{--}0,58\text{ kW}$, mientras que fuera de ese horario la carga base fue $\approx 20\text{--}60\text{ W}$. El promedio del periodo fue 96,37 W y el pico instantáneo alcanzó 703,3 W el 23-jul a las 09:11. En días laborables (21–24 jul) se observaron máximos de 500–584 W entre 09:00–16:00; el promedio diario creció de 66 W (21-jul) a 181 W (24-jul) y bajó a $\approx 60\text{ W}$ el fin de semana (26–27 jul).

La figura 2 muestra desde el programa DataView, el estudio carga realizado durante los días 21-28 del mes de julio del 2025.

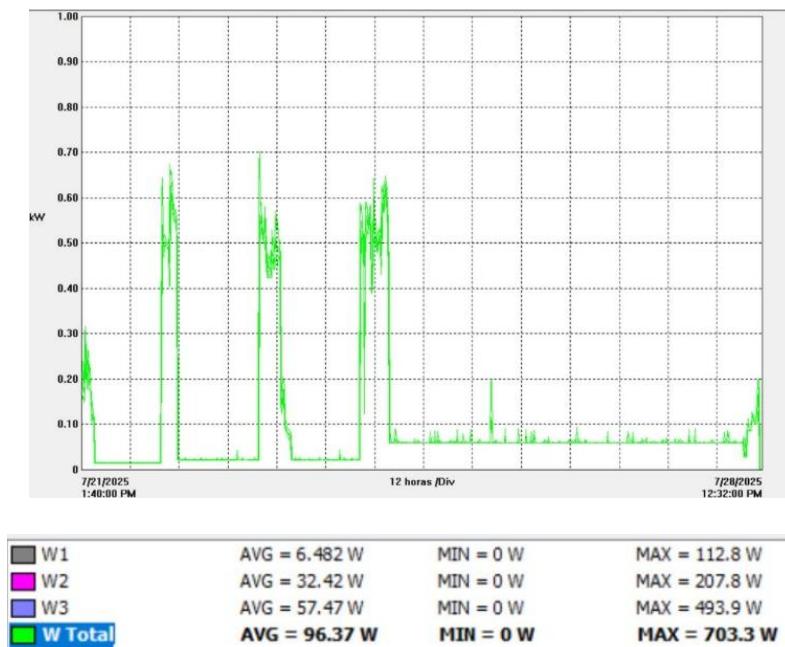


Figura 2: Registro de potencia activa instantánea durante el periodo de monitoreo (21-28 julio de 2025)

Las figuras 3 y 4 muestran la gráfica del estudio de carga en los días 23 y 24 de julio del 2025, días que tenían valores de carga más alto en comparación a otros.

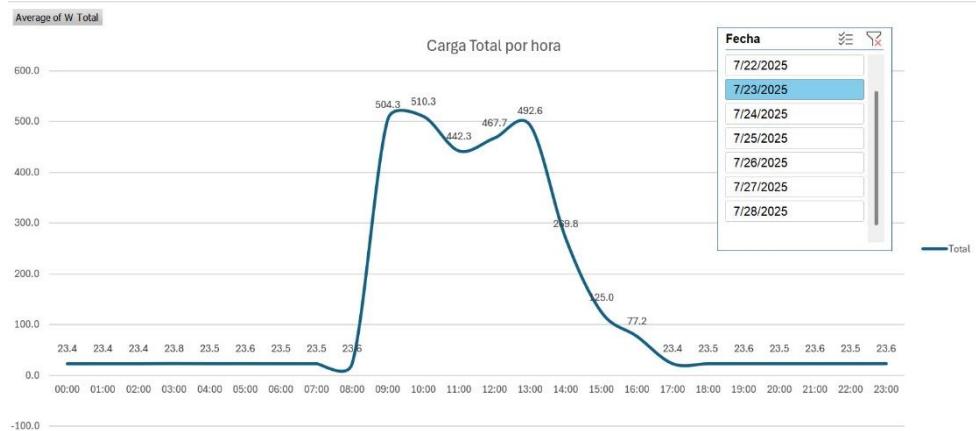


Figura 3: Perfil horario de consumo eléctrico – 23 julio de 2025

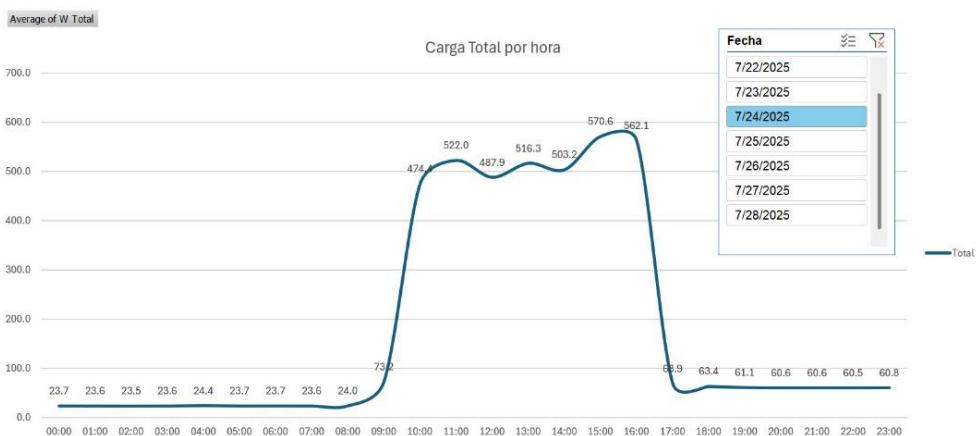


Figura 4: Perfil horario de consumo eléctrico – 24 julio de 2025

La figura 5, muestra los valores de carga por día obtenidos a partir del estudio realizado.

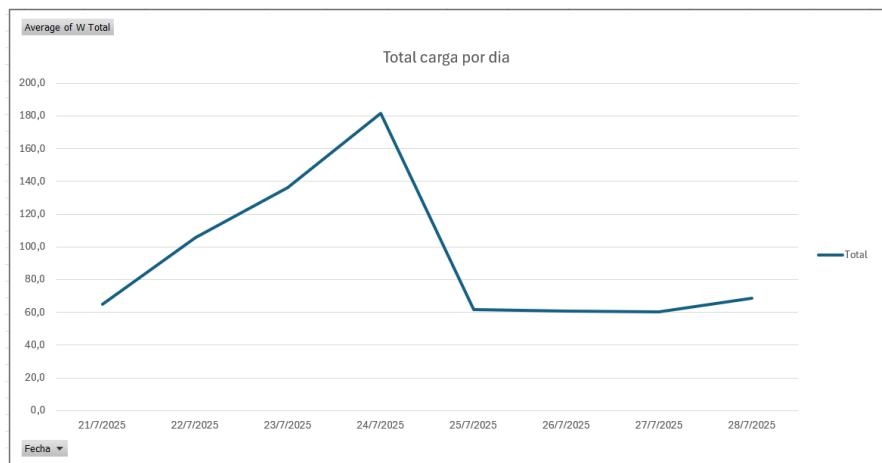


Figura 5: Tendencia semanal del consumo eléctrico promedio diario – 21 al 28 julio de 2025

En contraste, el 14 de agosto de 2025 (semana de proyectos), con el laboratorio lleno, la potencia se mantuvo alta y estable durante ~ 5 h (10:15–15:15) en $\approx 1,2\text{--}1,55$ kW, es decir 2,5–3 veces por encima de un día típico de clases. Esto considera que en el laboratorio existen picos de carga en días de alta ocupación; comparado con el valor de diseño (5 kW), el sistema estaría preparado para asumir esos niveles incluso en jornadas de alto consumo.

La figura 6, muestra los datos recopilados durante el día 14 de agosto desde las 10:15 de la mañana hasta las 3:15 de la tarde.

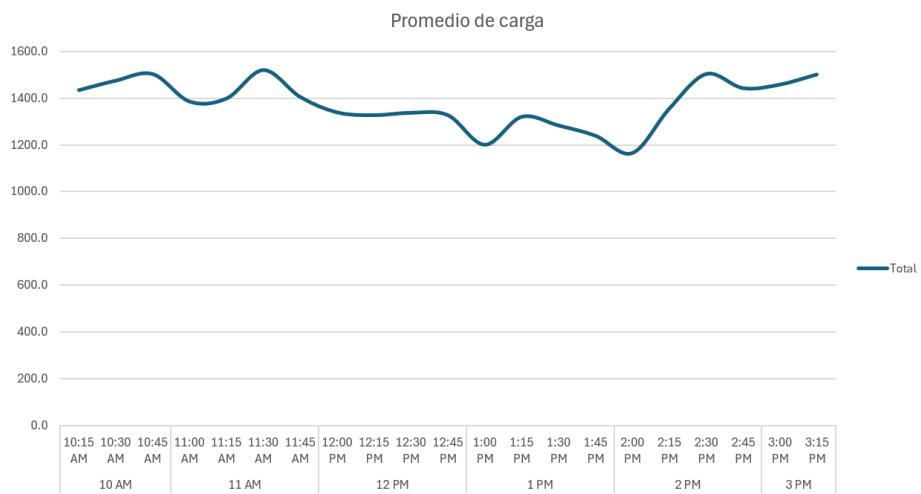


Figura 6: Tendencia del Promedio de Carga

2.3.2. Modelo físico del sistema

El modelado físico permitió definir las características eléctricas y operativas del sistema a partir de los componentes seleccionados.

- **Parámetros eléctricos del DAB**

Se definió una frecuencia de 100 kHz, una inductancia de acoplamiento de 15 μH y una relación de transformación de 400 V (HV) a 204.8 V (LV). Estos parámetros posibilitan una operación aislada con alta eficiencia y permiten la transferencia bidireccional de potencia a través de la modulación SPS.

- **Capacidad del banco de baterías**

El sistema de almacenamiento se dimensionó para brindar un continuo suministro a la carga durante los periodos en que la generación solar resulta insuficiente. Para ello, se consideró una demanda de respaldo de 5 kW durante 2 horas, lo que determina una capacidad mínima requerida de 10 kWh.

- **Condiciones de operación de los paneles PV**

El módulo fotovoltaico opera dentro de un rango de voltaje de 325 V a 500 V, inyectando energía de manera directa al bus DC. Dado que la generación se ve influenciada por las variaciones de irradiancia, el sistema de control debe actuar de forma dinámica para mantener la estabilidad del bus.

2.3.3. Modelo matemático del DAB

El comportamiento dinámico del DAB se modela incluyendo la técnica de modulación SPS, la cual regula la transferencia de potencia entre ambos lados del convertidor mediante el ajuste del ángulo de cada puente activo. Para el análisis se asumió un régimen estacionario, sin pérdidas y con conmutación ideal, condiciones que resultan apropiadas para fines de diseño y simulación.

La potencia media transferida desde el lado LV hacia el lado HV está dada por:

$$P = \frac{nV_1V_2}{2\pi f L k} \cdot \phi \cdot (1 - \phi) \quad (2.1)$$

La relación obtenida muestra que la potencia transferida depende cuadráticamente del ángulo de fase ϕ . Esta característica introduce una no linealidad en el sistema que influye de manera directa en su comportamiento dinámico y debe ser considerada en el diseño del control. A partir de esta

expresión es posible derivar un modelo linealizado que describe cómo pequeñas variaciones en ϕ afectan la dinámica del voltaje en el bus DC. Dicho modelo se establece como el inicio para el desarrollo de controladores avanzados como el MPC, ya que permite anticipar la reacción del sistema bajo distintas condiciones de operación.

2.3.4. Linealización y obtención del modelo discreto en espacio de estados

Una vez establecido el modelo no lineal de potencia del DAB, se procedió a su linealización con el fin de facilitar el diseño del controlador predictivo. La ecuación original de potencia en función del ángulo de fase introduce una no linealidad que complica su aplicación directa en esquemas de control. Por ello, se optó por aproximar este comportamiento a través de un modelo linealizado en torno a un punto de operación, definido por valores representativos del sistema, como $V1 = 400$ V y $V2 = 204.8$ V.

Se derivó la potencia con respecto al ángulo ϕ , obteniendo la pendiente de operación:

$$\frac{dP}{d\phi} = \frac{n \cdot V1 \cdot V2}{2\pi f L} \cdot (1 - 2\phi) \quad (2.2)$$

Esta expresión permitió cuantificar cómo una pequeña variación en ϕ afecta la potencia transferida. Luego, se relacionó esta variación de potencia con el cambio del voltaje en el bus DC utilizando la ecuación de energía en el capacitor del bus:

$$C_{bus} \cdot \frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{P}{V1} \quad (2.3)$$

Esta ecuación describe que el cambio en el voltaje del bus depende de cuánta potencia entra o sale, normalizada por el voltaje del lado HV (considerado como $V_1 \approx V_{bus}$). Sustituyendo la linealización de P:

$$\frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{1}{C_{bus} \cdot V_{bus}} \cdot \frac{dP}{d\phi} \cdot \Delta\phi \quad (2.4)$$

Se obtiene así un modelo continuo lineal de primer orden, en el cual el voltaje del bus es la variable de estado y el ángulo de fase es la entrada de control.

Como el controlador MPC se implementa digitalmente, se discretizó este modelo usando el método de Euler hacia adelante, considerando un tiempo de muestreo $T_s = 1 \mu s$. Esto conduce a la siguiente relación:

$$\Delta V_{bus} = \frac{T_s}{C_{bus} \cdot V_{bus}} \cdot \frac{dP}{d\phi} \cdot \Delta\phi \quad (2.5)$$

Y, por lo tanto, la ganancia del sistema discretizado se define como:

$$B = \frac{T_s}{C_{bus} \cdot V_{bus}} \cdot \frac{dP}{d\phi} \quad (2.6)$$

Finalmente, el modelo discreto en espacio de estados queda expresado como:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot \Delta u(k) \quad (2.7)$$

$$y(k) = C \cdot x(k) \quad (2.8)$$

Donde:

- $x(k)=V_{bus}(k)$: estado del sistema.
- $u(k)=\phi(k)$: entrada de control (ángulo).
- $y(k)=V_{bus}(k)$: salida observada.

Y:

- $A=1$: porque el sistema es de primer orden sin dinámica propia.
- $B=B$: la ganancia discreta calculada.
- $C=1$: salida directa del estado.

El modelo discretizado constituye da paso al uso de un controlador MPC. Al describir de manera explícita como el ángulo de fase y genera un cambio en la dinámica del voltaje en el bus DC, ofrece una representación computacionalmente eficiente y adecuada para anticipar y corregir variaciones del sistema en tiempo real. Su sencillez, junto con la posibilidad de incorporar restricciones físicas, lo convierte en una herramienta sólida para el diseño de controladores avanzados en convertidores DAB.

2.3.5. Diseño de controladores

- **Control PI**

El controlador proporcional–integral (PI) es una técnica clásica de control ampliamente utilizada en sistemas eléctricos y electrónicos gracias a su sencillez y efectividad para regular variables como voltaje o corriente. Su estructura combina dos acciones principales; acción proporcional y acción integral.

La ecuación del control PI en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (2.9)$$

En el contexto de un **convertidor DAB** para sistemas de respaldo energético, el control PI se implementa generalmente en dos lazos:

1. **Lazo externo de voltaje:** Compara el voltaje del bus DC con la referencia (por ejemplo, 400 V) y genera una corriente de referencia necesaria para corregir la desviación.
2. **Lazo interno de corriente:** Compara la corriente medida en el lado LV del DAB con la salida del lazo externo de voltaje, y mueve el ángulo de fase (ϕ) para regular la transferencia de potencia.

En este proyecto, el control PI se emplea como referencia comparativa frente al MPC, evaluando su desempeño en aspectos clave como el tiempo de respuesta, la estabilidad ante transitorios y la capacidad de mantener el voltaje del bus dentro de los límites establecidos bajo distintos escenarios de operación.

El PI combina una acción proporcional (respuesta rápida) y una acción integral (error estacionario nulo). En el DAB se usa típicamente en dos lazos:

- a. Lazo externo de voltaje que compara V_{bus} con 400 V y genera una corriente de referencia I^* .
- b. Lazo interno de corriente que compara I^* con la corriente medida (lado LV) y ajusta ϕ para transferir la potencia requerida.

Rangos y límites de la señal de control. Por seguridad y eficiencia, ϕ se restringe a $\pm 60^\circ$ ($\pm \pi/3$ rad) y su tasa de cambio a $\pm 30^\circ$ por ciclo de control; esto evita sobre corrientes, pérdidas elevadas y cambios bruscos.

- **Controlador MPC**

Se implementaron dos variantes de control predictivo. La primera, denominada MPC generalizado, emplea un modelo discreto simplificado que no contempla restricciones. La segunda, el MPC basado en el modelo físico del DAB, incorpora las ecuaciones linealizadas del sistema y considera ciertas restricciones operativas.

- **MPC Generalizado**

Esta primera implementación se utilizó como prototipo para validar la estructura y el funcionamiento del MPC antes de integrar el modelo físico detallado del convertidor. El diseño se basó en el modelo discreto mencionado previamente, donde se fijaron los valores $A=1$ y $C=1$, mientras que a B se le

asignó un valor arbitrario de 0.05 con el fin de representar, de manera general, la influencia de $\Delta\phi$ sobre el voltaje del bus (Vbus).

Este modelo, al no depender de la física del convertidor, simplifica la implementación inicial con los siguientes horizontes:

- Prediccion: $N_p=20$
- Control: $N_c=5$
- Pesos en la función de costo:
 - o Salida: $w_y=1.$
 - o Magnitud de ϕ : $w_u=0.1.$
 - o Tasa de cambio de ϕ : $w_{\Delta u}=0.1.$

En esta etapa no se consideraron restricciones sobre la magnitud ni sobre la tasa de cambio del ángulo de fase, lo que permitió observar la respuesta ideal del controlador bajo escenarios con dinámicas variables. Este diseño funcionó como un banco de pruebas para afinar los parámetros del MPC y establecer un punto de referencia en el desempeño, tanto en comparación con el controlador PI como con el MPC basado en el modelo físico del convertidor.

- **MPC Basado en el Modelo Físico del DAB**

En esta segunda variante, el modelo interno del MPC se obtuvo a partir del modelo discretizado desarrollado en la Sección 2.3.4. A diferencia del caso anterior, la ganancia B se calculó directamente a partir de la derivada de la ecuación de potencia del DAB con respecto al ángulo de fase, incorporando además el balance de energía en el capacitor del bus DC. De esta manera, las predicciones del controlador representan con mayor fidelidad

la dinámica real del sistema. El modelo resultante se expresó de la siguiente forma:

$$A = 1, C = 1, B = \frac{T_S}{C_{bus}V_1} \cdot \left. \frac{dP}{d\phi} \right|_{\phi_0} \quad (2.17)$$

donde $dP/d\phi$ se obtiene de la linealización de la ecuación de potencia bajo modulación SPS en torno al punto de operación ϕ_0 .

El controlador mantuvo los mismos parámetros de configuración que el MPC generalizado ($N_p=20$, $N_c=5$, $w_y=1$, $w_u=0.1$, $w\Delta u=0.1$), pero en este caso se incorporaron restricciones físicas para garantizar una operación segura del convertidor:

- Límite de magnitud:

$$-\frac{\pi}{3} \leq \phi(k) \leq \frac{\pi}{3} \quad (2.18)$$

$\pm 60^\circ$ para evitar sobrecorrientes y pérdidas elevadas

- Límite de variación por ciclo:

$$-\frac{\pi}{6} \leq \Delta\phi(k) \leq \frac{\pi}{6} \quad (2.19)$$

$\pm 30^\circ$ por ciclo de control para evitar cambios bruscos

Este nuevo diseño aprovecha la capacidad del MPC para anticipar la evolución futura de V_{bus} y optimizar la acción de control a partir de un modelo más realista del sistema. Gracias a ello, se mejora la acción de estabilización con respecto a la referencia, la gestión de los límites operativos y la estabilidad frente a perturbaciones.

2.3.6. Simulación del sistema en MATLAB/Simulink

Una vez definidos los modelos y controladores, se construyó una simulación completa del sistema en MATLAB/Simulink. En la figura 7, se

incluyeron los bloques físicos del DAB, el modelo de batería, la generación solar variable y la carga. Se probaron distintos escenarios de operación:

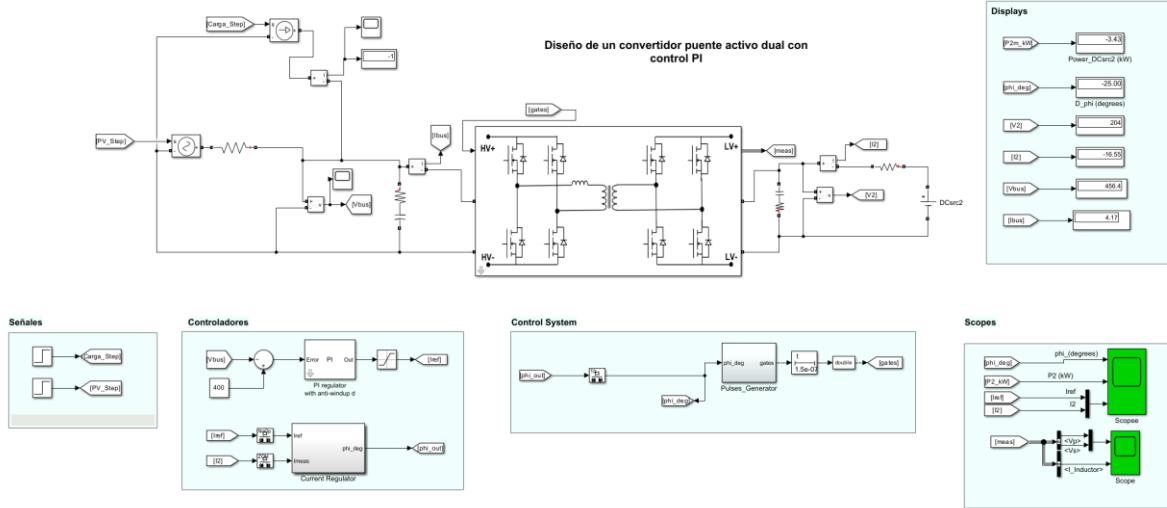


Figura 7: Diagrama en Simulink para control PI

En la figura 8 se encuentra el diagrama de simulink con el bloque MPC.

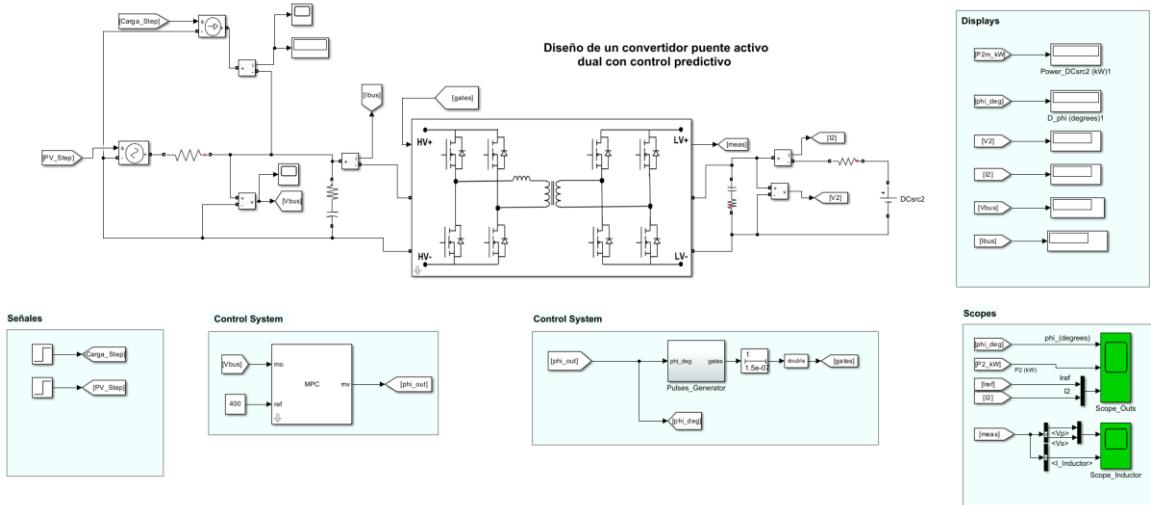


Figura 8: Diagrama en Simulink para control MPC

2.4. Fundamentos Técnicos del Convertidor DAB con Control Predictivo

La elección del convertidor DAB se sustenta no solo en su capacidad bidireccional y en el aislamiento galvánico que ofrece, sino también en su

compatibilidad estructural con estrategias avanzadas de control como el MPC.

En esta sección se presentan los principios técnicos que permiten al DAB operar de manera eficiente y estable dentro de una microrred con almacenamiento, destacando la modulación por desfase, la relación entre el ángulo ϕ y la potencia transferida, así como la implementación del MPC para la regulación del voltaje del bus DC.

2.4.1. Principio de transferencia de energía mediante SPS

El ángulo de desfase ϕ entre las señales de control de los puentes determina tanto la dirección como la magnitud del flujo de energía. Cuando ambos puentes comutan en fase ($\phi = 0$), no se transfiere potencia neta. Esto resulta en que si el ángulo ϕ aumenta, la expresión de la potencia adquiere una componente cuadrática, resultando en una transferencia proporcional a $\phi(1 - \phi)$. Este principio permite un control continuo, suave y eficiente del flujo de energía, sin necesidad de modificar la frecuencia de commutación ni añadir etapas adicionales de conversión.

2.4.2. Control de potencia mediante ángulo de fase ϕ

El control de potencia en el DAB se fundamenta en la modulación del ángulo de desfase ϕ , el cual actúa como la variable manipulada del sistema. En el DAB la transferencia de potencia no presenta una relación lineal con ϕ , sino que sigue una dependencia no lineal dentro de un rango determinado. Además, la dirección del flujo de energía está directamente definida por el signo de ϕ :

- $\phi > 0$: la potencia fluye del lado LV (batería) hacia el bus DC (modo descarga).
- $\phi < 0$: la potencia fluye del bus DC hacia la batería (modo carga).

El sistema de control ajusta este ángulo para mantener el voltaje del bus dentro de los límites deseados, compensando las variaciones en la generación fotovoltaica o en la carga.

2.4.3. Operación bidireccional y flujo de energía

La capacidad de operar de manera bidireccional, lo hace especialmente ideal en aplicaciones con sistemas de almacenamiento energético. Esta característica deriva de su estructura simétrica: al invertir el desfase entre los puentes, también se invierte el sentido de flujo del DAB. En el sistema propuesto, el DAB conecta el banco de baterías (lado de baja tensión, LV) con el bus de 400 V en corriente continua (lado de alta tensión, HV).

Durante periodos de baja irradiancia solar, el convertidor actúa en modo de descarga, transfiriendo energía desde las baterías hacia el bus para garantizar el suministro de la carga. En contraste, cuando la generación fotovoltaica supera la demanda, el DAB opera en modo de carga, enviando el excedente de energía al banco de baterías. Todo este proceso se gestiona sin necesidad de reconfiguraciones físicas, únicamente mediante el ajuste del ángulo de desfase ϕ , lo que simplifica el hardware y aumenta la eficiencia operativa.

2.4.4. Predicción dinámica para la regulación del bus DC

La regulación precisa del bus de corriente continua (DC) se requiere para cumplir con la estabilidad de la microrred y proteger el suministro de la carga. En el sistema propuesto, esta regulación se implementa mediante un esquema de control basado en MPC, construido a partir de un modelo linealizado y discretizado del convertidor DAB en su punto de operación nominal

El MPC anticipa la evolución del voltaje del bus DC dentro de un horizonte de predicción finito (por ejemplo, 20 pasos) y, en cada instante, determina el valor óptimo del ángulo de desfase ϕ que minimiza una función de costo cuadrática. Dicha función pondera tanto el error respecto al valor de referencia (400 V) como los cambios excesivos en ϕ , lo que garantiza una respuesta simultáneamente rápida y suave. A diferencia del control PI convencional, el MPC no solo reacciona al error, sino que predice y anticipa los efectos de sus acciones antes de que se materialicen, lo que le permite responder de manera más efectiva frente a perturbaciones tales como:

- Reducción repentina en la generación solar.
- Aumento abrupto de la demanda.
- Transiciones entre carga y descarga de batería.

Además, el esquema MPC permite incorporar de manera explícita restricciones sobre las variables críticas del sistema, tales como el ángulo máximo de desfase ϕ o el rango máximo de cambio que puede tener el ángulo. Esta capacidad de integrar restricciones físicas directamente en el proceso de optimización incrementa la robustez del controlador y contribuye a una operación más segura y confiable del sistema.

2.5. Parámetros de Diseño

2.5.1. Parámetros eléctricos seleccionados

- Frecuencia de conmutación

Se estableció una frecuencia de 100 kHz para el convertidor DAB. Una frecuencia elevada favorece la respuesta dinámica ante variaciones de carga o de generación. Sin embargo, se consideró cuidadosamente que el aumento en

la frecuencia no generara pérdidas de conmutación excesivas, manteniendo así un equilibrio adecuado entre eficiencia y rapidez de respuesta.

- Inductancia de acoplamiento

La L_{dab} desempeña un papel esencial en la regulación de la circulación de potencia entre los dos puentes activos del DAB. Para este diseño se seleccionó un valor de $15 \mu\text{H}$, suficiente para limitar los picos de corriente sin restringir en exceso la transferencia de energía. Una inductancia demasiado baja incrementaría la corriente RMS y, en consecuencia, las pérdidas por conducción, mientras que un valor excesivamente alto dificultaría el control de potencia y alargaría los tiempos de respuesta.

- Capacitancia del bus DC

El condensador conectado al bus DC tiene la función de mantener la tensión estable frente a transitorios de carga y variaciones en la generación. Para este diseño se seleccionó una capacitancia de $100 \mu\text{F}$, suficiente para atenuar el rizado producido por la conmutación y sostener el voltaje del bus durante perturbaciones de corta duración. El valor fue dimensionado de manera que la tensión se mantenga dentro de un margen de $\pm 5 \text{ V}$ respecto al nominal de 400 V , lo cual resulta crítico para garantizar la continuidad del suministro y evitar fallos en las cargas del laboratorio.

- Relación de transformación del transformador

El diseño del transformador se fundamentó en una relación de transformación de 400 V a 204.8 V . Esto garantiza una conversión eficiente en ambos sentidos de operación: carga y descarga del banco de baterías. El valor de 204.8 V fue seleccionado en función de los requerimientos del lado de almacenamiento. Asimismo, esta relación de transformación favorece una

transferencia de potencia simétrica y estable, aspecto clave para la correcta implementación del control mediante modulación por desfase de fase.

- Rango de voltaje PV

El sistema fue diseñado para admitir una entrada fotovoltaica en un rango de 300 V a 500 V, cubriendo así las condiciones reales de operación de un generador solar expuesto a variaciones de irradiancia y temperatura. Esta amplitud en el rango de tensión proporciona flexibilidad en la configuración de los arreglos fotovoltaicos, permitiendo su adaptación tanto a condiciones nominales como a escenarios extremos, como baja irradiancia por cielos nublados o incrementos de temperatura ambiente. Asimismo, este rango resulta compatible con la mayoría de los controladores MPPT disponibles en el mercado, lo que facilita su integración con sistemas fotovoltaicos existentes o su futura expansión.

2.5.2. Parámetros de control MPC

- Prediction Horizon

El horizonte de predicción (N_p) determina la cantidad de pasos futuros que el MPC utiliza para anticipar el comportamiento del sistema. En este diseño se seleccionó un horizonte de 20 pasos, lo que resulta adecuado para capturar la dinámica de un sistema de conmutación rápida como el DAB, operando a 100 kHz. Con un tiempo de muestreo de 1 μs , el controlador evalúa el comportamiento en una ventana de 20 μs , lo que le permite prever la evolución del voltaje del bus y ajustar el ángulo de fase de forma anticipada.

- Control Horizon

El horizonte de control (N_c) define el número de pasos futuros en los que el controlador está autorizado a modificar el ángulo ϕ del DAB. En este

proyecto se seleccionó un horizonte de 5 pasos, lo que permite optimizar las primeras cinco acciones de control, manteniendo constantes las restantes hasta completar el horizonte de predicción. El valor de $N_c = 5$ se determinó tras pruebas de simulación, obteniendo un balance adecuado entre rendimiento dinámico, estabilidad del sistema y tiempo de cómputo en cada ciclo de control.

2.6. Especificaciones Técnicas del Sistema Propuesto

2.6.1. Regulaciones del DC BUS

El sistema fue diseñado para mantener el voltaje del bus de corriente continua (DC) en su valor nominal de 400 V, con un margen de tolerancia de ± 5 V. Esta regulación estricta resulta fundamental para garantizar la operación segura y estable de las cargas conectadas. El controlador MPC ajusta dinámicamente el ángulo de fase ϕ del convertidor DAB, inyectando o absorbiendo potencia según sea necesario y compensando en tiempo real las fluctuaciones derivadas de cambios en la generación fotovoltaica o en la demanda de carga. Gracias a esta capacidad de autorregulación, el sistema logra mantener el voltaje del bus dentro de los límites de seguridad sin requerir respaldo directo de la red eléctrica.

2.6.2. Tiempo de respuesta ante pérdidas de generación solar.

Frente a perturbaciones como una caída repentina en la generación fotovoltaica, ya sea por desconexión de paneles o por variaciones abruptas en la irradiancia, el sistema debe responder con rapidez para evitar que el voltaje del bus DC caiga por debajo de los niveles aceptables. En este proyecto se estableció como criterio de diseño un tiempo de respuesta máximo de 20 ms.

Los resultados de simulación demostraron que el controlador MPC, gracias a su capacidad de anticipar la dinámica del sistema, logra estabilizar el voltaje del bus en menos de 10 ms, asegurando así una operación continua y confiable del sistema de respaldo.

2.6.3. Rango operativo del ángulo de fase ϕ

El ángulo de fase ϕ , encargado de regular el flujo de potencia en el convertidor DAB, se restringe a un intervalo de $\pm 60^\circ$ ($\pm\pi/3$ rad), lo que asegura una operación simétrica y eficiente del sistema.

Este rango habilita la bidireccionalidad de energía entre el LV (conectado a la batería) y el HV (conectado al bus DC), en función de las condiciones de operación. Adicionalmente, se establecen límites a la velocidad de variación de ϕ (Rate Limit) de $\pm 30^\circ$ por ciclo de control, con el fin de evitar transiciones bruscas que comprometan la integridad de los interruptores y, al mismo tiempo, favorecer la estabilidad global del sistema.

2.6.4. Corriente máxima y capacidad de respaldo energético

El convertidor DAB fue dimensionado para una potencia nominal de 5 kW, lo que corresponde a una corriente máxima aproximada de 26 A en el lado de baja tensión (LV), considerando un voltaje de batería de 204.8 V. Este valor define la capacidad máxima de inyección o absorción de potencia en condiciones normales de operación.

En cuanto al almacenamiento, el banco de baterías se diseñó para proporcionar una autonomía mínima de una hora a plena carga, equivalente a una capacidad útil de 5 kWh. Dicho dimensionamiento se estableció a partir del estudio de demanda energética del laboratorio.

2.7. Consideraciones Éticas, Normativas y de Seguridad

2.7.1. Promoción de energías limpias y sostenibles

El proyecto propuesto tiene como objetivo principal garantizar la continuidad operativa en redes aisladas mediante el aprovechamiento eficiente de fuentes renovables, particularmente la energía solar fotovoltaica. Esta elección no responde únicamente a una necesidad técnica, sino que refleja también un compromiso con la sostenibilidad ambiental.

La incorporación de una batería como sistema de almacenamiento logra compensar la intermitencia inherente a la generación solar, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a la disminución de la huella de carbono de la instalación. Asimismo, al desarrollarse en un entorno académico, el sistema se concibe como una plataforma de aprendizaje e innovación tecnológica orientada a las energías limpias, fortaleciendo las capacidades de investigación y formación. De esta manera, el proyecto aporta de forma directa a la transición energética y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 7: Energía asequible y no contaminante.

2.7.2. Normas técnicas aplicadas

Durante el diseño del sistema se consideraron estándares técnicos internacionales para asegurar la seguridad, interoperabilidad y robustez del sistema:

- IEC 62109-1: Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems.**

Esta norma establece los requisitos mínimos de seguridad eléctrica, térmica y mecánica que deben cumplir los convertidores conectados a

sistemas de energía renovable. Su aplicación garantiza la protección de usuarios, operadores y equipos ante posibles fallos eléctricos o térmicos.

- **IEEE Std 1547: IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.**

Esta norma define los requisitos para la conexión segura y confiable de sistemas distribuidos (como los sistemas PV con respaldo en batería) a la red eléctrica o microrredes. Aunque el sistema está diseñado para operar de forma aislada, su arquitectura cumple con estos principios, permitiendo una eventual conexión segura en escenarios de expansión o transición hacia redes híbridas.

- **ISO 50001: Energy Management.**

La norma ofrece un esquema para que las instituciones diseñen, desplieguen, mantengan y perfeccionen de forma continua un sistema de gestión de la energía. Su propósito fundamental es impulsar la eficiencia energética, disminuir los costos asociados al consumo y minimizar el impacto ambiental de las actividades que se realizan. En el contexto del sistema propuesto, la aplicación de esta norma facilita la optimización del uso de la energía en la microrred aislada, promoviendo prácticas sostenibles y asegurando un control más eficiente y confiable del consumo energético.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación del convertidor DAB operando bajo diferentes condiciones de perturbación. El análisis se centra en tres escenarios: carga constante con variación en el voltaje del bus DC, carga variable con voltaje del bus constante y, finalmente, variaciones simultáneas tanto de carga como de voltaje. En todos los casos se comparan tres estrategias de control: un PI convencional en lazo cascada voltaje–corriente, un controlador predictivo basado en un modelo simplificado (MPC general) y un controlador predictivo basado en el modelo físico del convertidor con restricciones explícitas de operación (MPC físico). Los criterios de evaluación incluyen tiempo de establecimiento, sobreimpulso, error acumulado, corriente pico y cumplimiento de los límites del ángulo de fase.

En el primer escenario, la carga conectada al bus DC se mantiene constante mientras se introduce una variación en el voltaje inicial o en la potencia suministrada por la fuente primaria. Se consideran dos situaciones principales: partir de un voltaje inicial superior a 400 V y reducirlo hasta el valor de referencia, o partir de un voltaje inferior y elevarlo hasta el objetivo. Adicionalmente, se evalúa el efecto de una disminución o incremento súbito en la energía entregada por el panel fotovoltaico, lo que provoca fluctuaciones en el bus. En estos casos se observa cómo cada estrategia de control actúa para corregir la desviación, manteniendo la estabilidad y minimizando el esfuerzo de control. Las respuestas de V_{bus} , P_2 , I_2 y ϕ permiten comparar la rapidez y suavidad de la corrección, así como la adecuación de cada método a las restricciones físicas del sistema.

En el segundo escenario, el voltaje del bus DC se mantiene fijo en 400 V mientras se aplican cambios escalonados en la demanda de carga. Se analizan dos casos: un aumento súbito desde una carga ligera hasta una demanda elevada, y la situación opuesta, en la que se reduce bruscamente la carga. Estas variaciones provocan caídas o sobrevoltajes transitorios en el bus, obligando a los controladores a ajustar rápidamente el flujo de potencia transferida mediante la modulación de ϕ . El seguimiento de la corriente medida respecto a su referencia, así como la magnitud y dirección de P_2 , permiten evaluar la capacidad de cada estrategia para compensar la perturbación con la menor desviación posible y dentro de los límites operativos establecidos.

El tercer escenario representa la condición más exigente, ya que combina variaciones en la carga con cambios en el voltaje inicial del bus. Un ejemplo de ello es partir de un voltaje inferior a 400 V al mismo tiempo que la carga aumenta, lo que requiere una doble acción correctiva: elevar el voltaje y suplir la mayor demanda. Otro caso es iniciar con un voltaje por encima de 400 V y reducir la carga, lo que obliga a invertir el flujo de potencia para evitar sobrevoltajes. Este tipo de pruebas revela la capacidad de anticipación de los controladores predictivos frente al PI, así como la importancia de respetar los límites de ϕ y minimizar los picos de corriente en condiciones dinámicas complejas.

3.1. Experimento #1: Carga constante y variación del voltaje del bus DC

3.1.1. Simulación del DAB con control PI

La figura 9 es gráfica de la respuesta del sistema cuando el voltaje inicial es superior a 400 V y se reduce hasta el valor de referencia. El control PI actúa incrementando gradualmente la magnitud negativa del ángulo de fase ϕ , con el fin de invertir el flujo de potencia P_2 y permitir la absorción de energía desde el bus hacia la

fuente secundaria. Este proceso provoca una disminución controlada del voltaje hasta alcanzar la referencia. La corriente medida I_2 sigue la trayectoria de la referencia I_{ref} con un retardo moderado, manteniéndose dentro de los límites operativos y sin evidenciar oscilaciones significativas.

En la figura 10 se muestra el escenario inverso, en el que el voltaje inicial es inferior a 400 V y debe incrementarse hasta el valor de referencia. En este caso, el controlador PI ajusta el ángulo de fase ϕ hacia valores positivos, incrementando la potencia P_2 suministrada al bus para elevar su tensión. La corriente I_2 acompaña la variación de la referencia I_{ref} de forma estable y sin sobreimpulsos considerables. En ambos casos, el control PI logra mantener la estabilidad del sistema y evitar fluctuaciones abruptas, aunque el tiempo de establecimiento es mayor en comparación con las estrategias basadas en control predictivo.

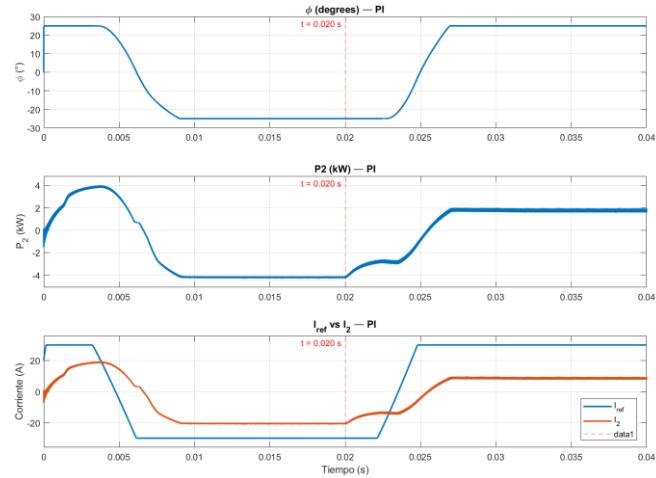


Figura 9: Respuesta del DAB con control PI cuando el voltaje inicial del bus DC es superior a 400V y se reduce hasta el valor de referencia.

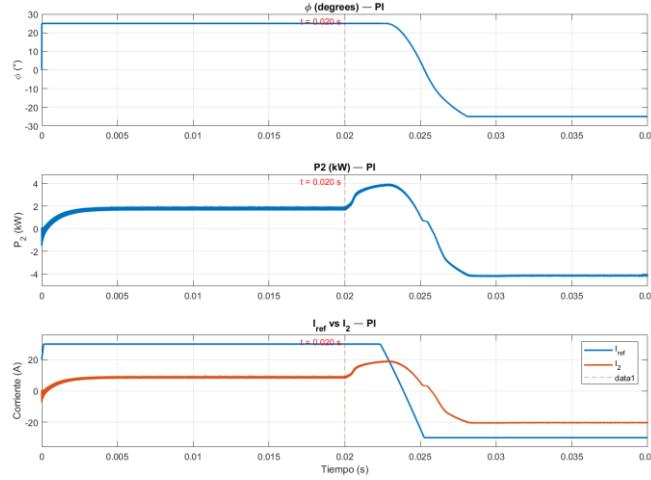


Figura 10: Respuesta del DAB con PI – Voltaje inicial inferior a 400 V

3.1.2. Simulación del DAB con MPC General

Primero se muestra la respuesta del sistema (Figura 11) cuando el voltaje inicial del bus DC es superior a 400 V y se reduce hasta alcanzar el valor de referencia. El controlador MPC general modifica de forma inmediata el flujo de potencia P_2 , invirtiéndolo para absorber energía del bus y disminuir su tensión. El ángulo de fase ϕ alcanza valores muy por encima del rango físico habitual, lo que refleja la ausencia de restricciones definidas en esta simulación. La corriente I_2 presenta un cambio abrupto asociado a la acción de control, sin relación de seguimiento respecto a I_{ref} , ya que en el MPC la corriente no es la variable directamente controlada.

La segunda grafica presenta el caso inverso (Figura 12), en el que el voltaje inicial del bus DC es inferior a 400 V y se incrementa hasta el valor de referencia. El controlador MPC general aumenta de manera inmediata la potencia P_2 , elevando la tensión del bus sin oscilaciones apreciables. La señal de ϕ mantiene valores elevados, y la corriente I_2 se ajusta en función de la estrategia predictiva, sin correspondencia directa con I_{ref} .

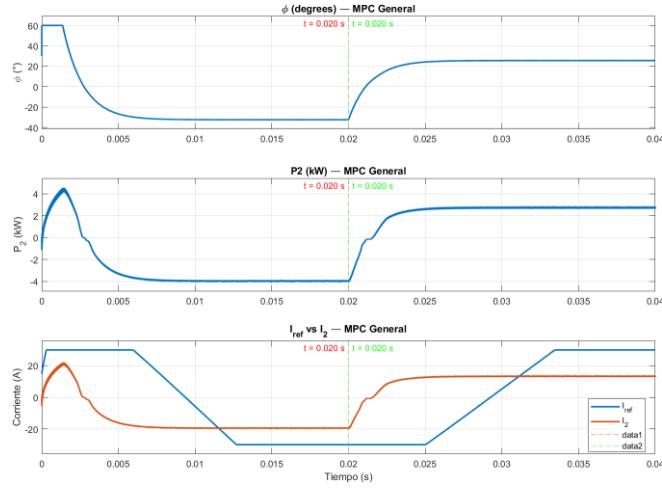


Figura 11: Respuesta del DAB con MPC General – Voltaje inicial superior a 400 V

En la Figura 11, el controlador invierte de inmediato el flujo de potencia para absorber energía, con ϕ elevado y sin seguimiento directo de I_2 a I_{ref} .

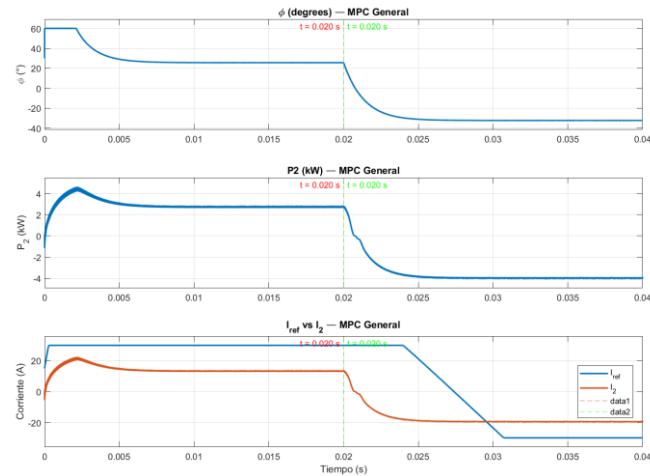


Figura 12: Respuesta del DAB con MPC General – Voltaje inicial inferior a 400 V

En la Figura 12, El controlador incrementa rápidamente P_2 para elevar el voltaje, manteniendo estabilidad sin oscilaciones apreciables.

3.1.3. Simulación del DAB con MPC físico

La primera gráfica (Figura 13) se observa el ángulo de fase ϕ , el cual se ajusta de forma inmediata tras la perturbación ($t = 0,02$ s), pasando de su valor inicial positivo al

límite inferior cercano a -60° , en cumplimiento con las restricciones de amplitud definidas en el controlador. Este cambio controlado permite invertir el flujo de potencia del convertidor. En la segunda gráfica se aprecia la potencia medida en el secundario P_2 , que pasa de valores positivos (entrega de potencia al bus) a valores negativos inmediatamente después de la variación de voltaje, reflejando la absorción de energía necesaria para disminuir la tensión del bus. En la tercera gráfica se muestra la corriente I_2 , que sigue la dinámica impuesta por la potencia transferida, alcanzando un valor negativo durante el proceso de absorción y logrando estabilizarse.

Luego se presenta el caso inverso (Figura 14), con un voltaje inicial inferior a 400 V que debe ser elevado hasta la referencia. En la primera gráfica, el ángulo de fase ϕ se incrementa de manera inmediata y controlada hasta el límite superior próximo a $+60^\circ$, manteniéndose dentro del rango permitido. La segunda gráfica evidencia el aumento de P_2 hacia valores positivos, lo que representa la entrega de energía al bus para compensar el déficit de voltaje. Finalmente, en la tercera gráfica, la corriente I_2 adopta valores positivos en correspondencia con la potencia suministrada, estabilizándose una vez alcanzado el voltaje objetivo.

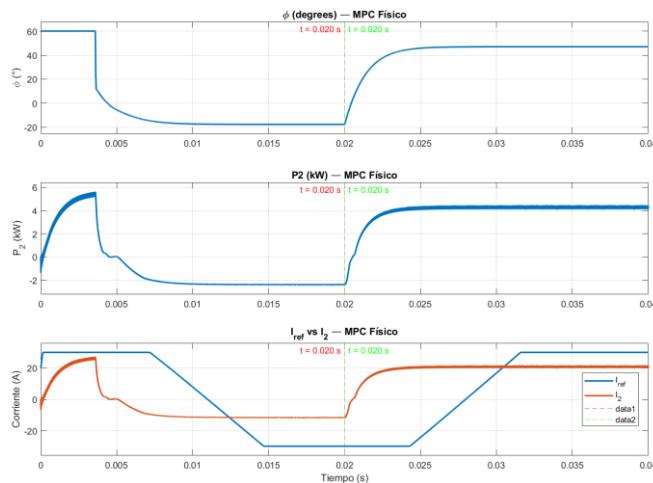


Figura 13: Respuesta del DAB con MPC Físico – Voltaje inicial superior a 400 V

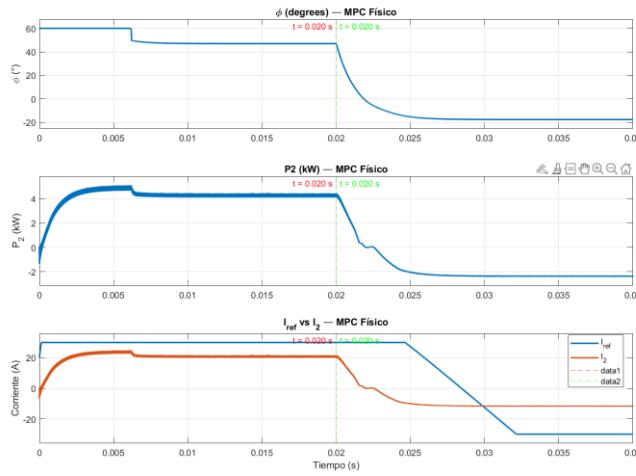


Figura 14: Respuesta del DAB con MPC Físico – Voltaje inicial inferior a 400 V

3.2. Experimento #2: Voltaje constante y variación en la carga.

3.2.1. Simulación DAB con PI- Carga variable y voltaje constante

En este escenario se aumentó la carga en los instantes establecidos para comprobar la acción que tiene la carga en el sistema aun cuando el voltaje en el bus DC es constante.

- $T = 0.01 \text{ s}$

En la Figura 15 se tiene la simulación del controlador PI ante el cambio de carga en $t = 0.01 \text{ s}$.

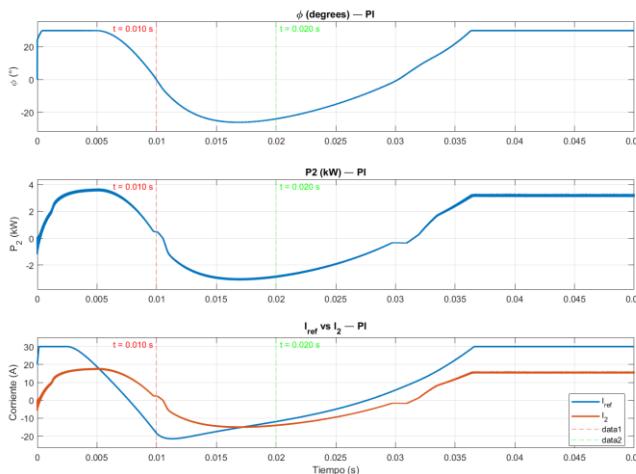


Figura 15: Respuesta del DAB con PI – Carga variable en $t = 0.01 \text{ s}$

- $T=0.02$ s

En la Figura 16 se tiene la simulación del controlador PI ante el cambio de carga en 0.02 s.

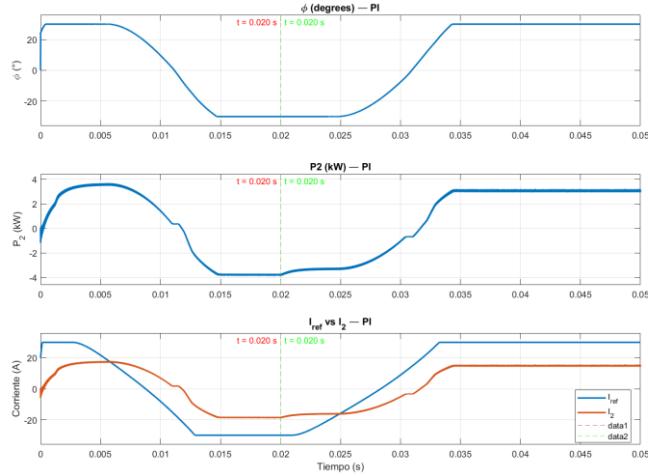


Figura 16: Respuesta del DAB con PI – Carga variable en $t = 0.02$ s

- $T=0.03$ s

En la Figura 17 se tiene la simulación del controlador PI ante el cambio de carga en 0.03 s.

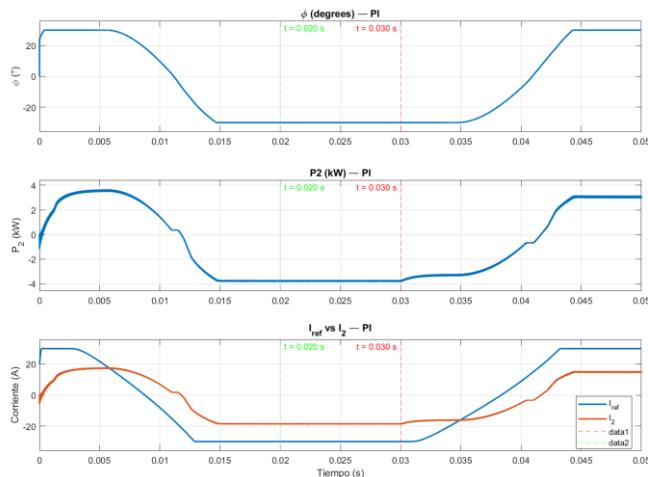


Figura 17: Respuesta del DAB con PI – Carga variable en $t = 0.03$ s

3.2.2. Simulación DAB con MPC General - Carga variable y voltaje constante

En este escenario se aumentó la carga en los instantes establecidos para comprobar la acción que tiene la carga en el sistema aun cuando el voltaje en el bus DC es constante.

Se realizaron tres simulaciones independientes. En la primera, con aumento de carga en $t=0,010$ s, el DAB venía en absorción y, ante el escalón, el MPC general incrementó de inmediato el desfase; P_2 e I_2 invirtieron su sentido y el convertidor pasó a suministro, mantuvo el bus próximo a la referencia y no mostró oscilaciones apreciables. En la segunda, con aumento de carga en $t=0,020$ s, se observó el mismo patrón: el sistema partía en absorción, el controlador elevó rápidamente el ángulo, P_2/I_2 cambiaron a modo de entrega y el equilibrio de potencia se recuperó con una transición limpia. En la tercera, con aumento de carga en $t=0,030$ s, el DAB también se encontraba en absorción y el MPC forzó de nuevo el paso a suministro incrementando el desfase, tras lo cual la condición se estabilizó. La estabilización al momento del cambio de carga fue de 4 ms para cada simulación.

- $T= 0.01$ s

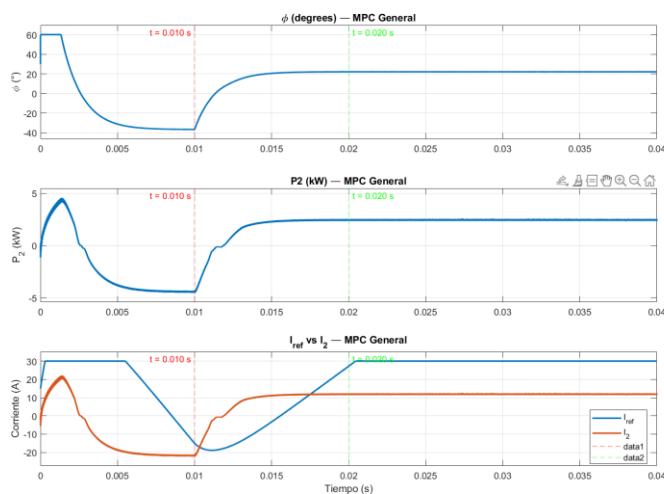


Figura 18: Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en $t = 0.01$ s

Se observa en la Figura 18 como el sistema pasa de absorción a suministro de manera inmediata; P_2 e I_2 invierten su sentido y el bus se mantiene estable sin oscilaciones.

- $T = 0.02 \text{ s}$

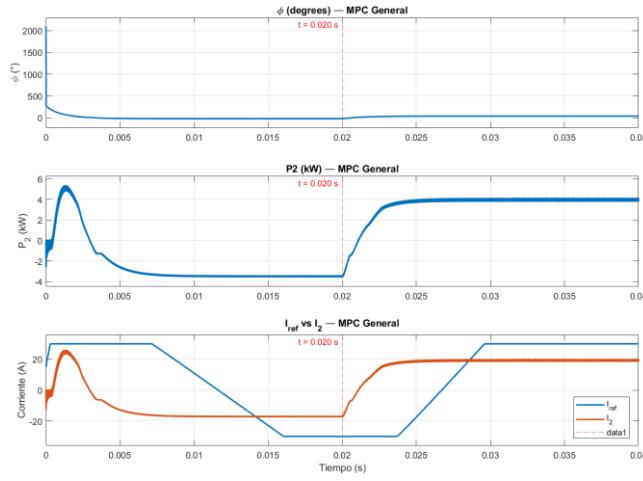


Figura 19: Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en $t = 0.02 \text{ s}$

En la Figura 19 el controlador incrementa rápidamente el ángulo, forzando la transición a suministro; el equilibrio de potencia se recupera con una transición limpia.

- $T = 0.03 \text{ s}$

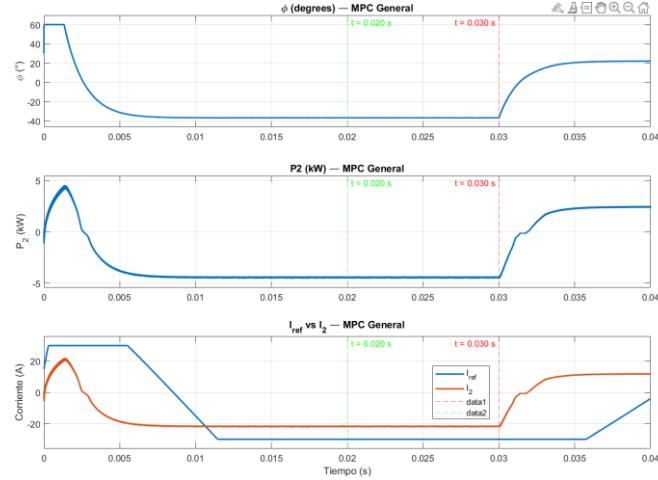


Figura 20: Respuesta del DAB con MPC General – Carga variable en $t = 0.03 \text{ s}$

En la Figura 20 el MPC nuevamente fuerza el paso a suministro mediante el incremento del desfase, logrando estabilización en $\sim 4 \text{ ms}$.

3.2.3. Simulación DAB con MPC físico - Carga variable y voltaje constante

En este escenario se incrementó la carga en los instantes establecidos para obtener la respuesta del sistema controlado mediante MPC físico, manteniendo constante el voltaje de referencia en el bus DC.

Antes de cada cambio de carga, el DAB se encontraba absorbiendo energía porque la generación superaba la demanda. En $t = 0.01$ (Figura 21) ya se había estabilizado en absorción; al aplicarse el aumento de carga, el controlador cambió de inmediato a suministro, incrementó el ángulo y con ello I_2 y P_2 , con tiempo de estabilización del suministro de $\sim 2\text{--}3$ ms. Cuando se aumentó la carga en $t = 0.02$ s (Figura 22) y $t = 0.03$ s (Figura 23) se observó el mismo patrón: se partió desde absorción y, tras el incremento de carga, el DAB pasó a suministrar energía, asimismo en la bajada de voltaje la subida de I_2 fue más marcada. En todos los casos, la estabilización en modo de absorción fue más lenta (~ 7 ms), mientras que la estabilización en modo de suministro se mantuvo en $\sim 2\text{--}4$ ms.

- $T = 0.01$ s

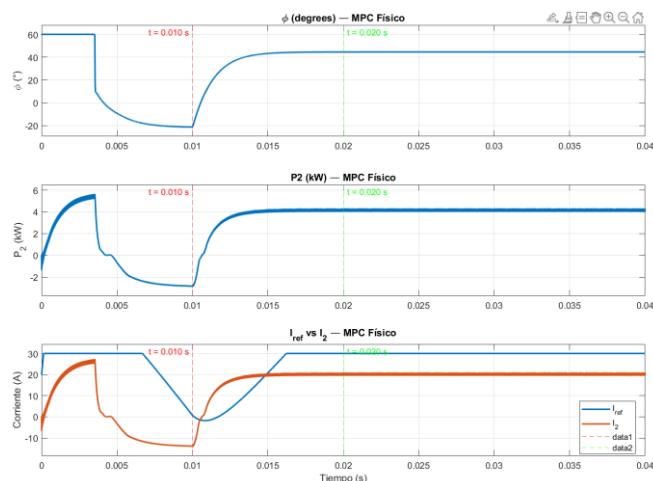


Figura 21: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en $t = 0.01$ s

Para la Figura 21, el sistema pasa de absorción a suministro de forma inmediata; P_2 e I_2 aumentan con estabilización rápida de $\sim 2\text{--}3$ ms.

- $T = 0.02 \text{ s}$

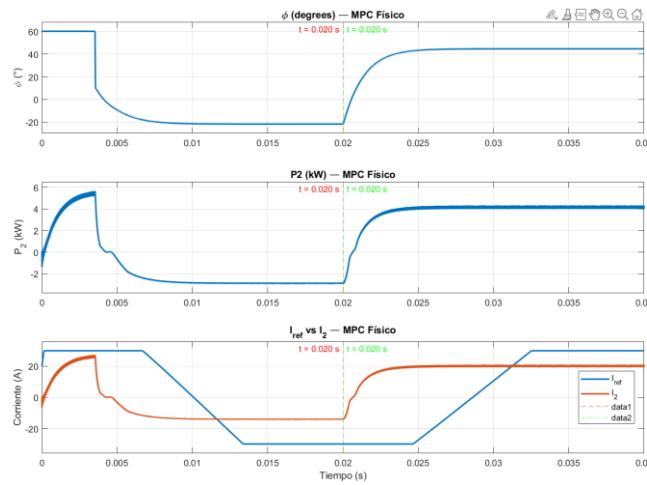


Figura 22: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en $t = 0.02$

En la Figura 22, cuando ocurre el incremento de carga, el controlador eleva el ángulo y fuerza la transición a suministro; la estabilización ocurre en $\sim 2\text{--}4 \text{ ms}$.

- $T = 0.03 \text{ s}$

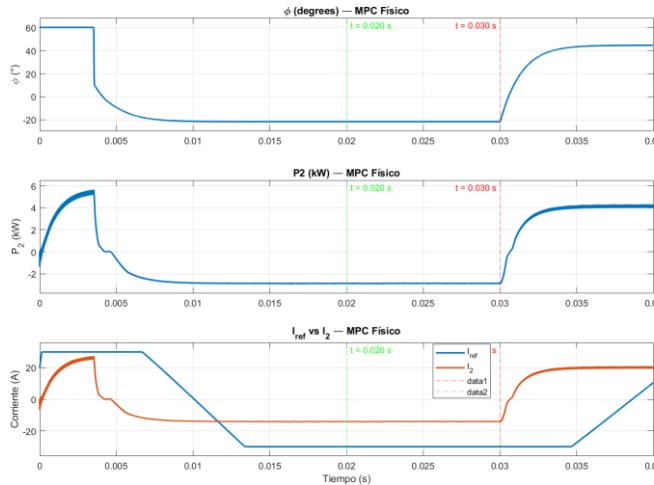


Figura 23: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga variable en $t = 0.03 \text{ s}$

En la figura 23, se visualiza el DAB repite el patrón: pasa de absorción a suministro con aumento marcado de I_2 y estabilización en pocos milisegundos.

3.3. Experimento #3: Carga y voltaje variables.

En el Experimento 3 se evaluó el desempeño de los tres controladores ante variaciones simultáneas de carga y del voltaje del bus DC. Los cambios de carga se programaron en $t = 0,01$ s y $t = 0,03$ s, mientras que la modificación del voltaje se realizó en $t = 0,02$ s. Bajo esta configuración se analizaron cuatro casos específicos: (i) carga de mayor a menor con voltaje de menor a mayor, (ii) carga de mayor a menor con voltaje de mayor a menor, (iii) carga de menor a mayor con voltaje de menor a mayor y (iv) carga de menor a mayor con voltaje de mayor a menor, a fin de evaluar la respuesta de cada estrategia de control en los escenarios posibles.

3.3.1. Simulación DAB con control PI - Carga y voltaje variable

Se presenta los resultados con el control PI operando bajo condiciones simultáneamente variables de carga y voltaje del bus DC.

i. El primer caso.

- $T = 0.01$ s

Hasta $t = 0.01$ s el DAB suministró potencia. La reducción de carga en ese instante apenas alteró la operación: P_2 cambió poco, la corriente se mantuvo igual, de modo que el DAB continuó suministrando energía. En el aumento de voltaje en $t = 0.02$ s generó una corrección clara: el PI fue cerrando el ángulo de forma gradual, la corriente I_2 cayó a ~ 20 A y P_2 pasó de positiva a prácticamente nula o débilmente negativa, es decir, el DAB dejó de inyectar y comenzó a absorber suavemente. La estabilización del sistema tardó alrededor de 12 ms después del escalón de voltaje.

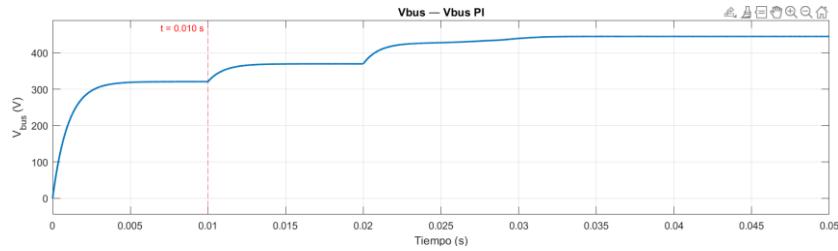


Figura 24: Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso i)

En la figura 24, se observa el aumento de V_{bus} en $t = 0.01$ s y en $t = 0.02$ s.

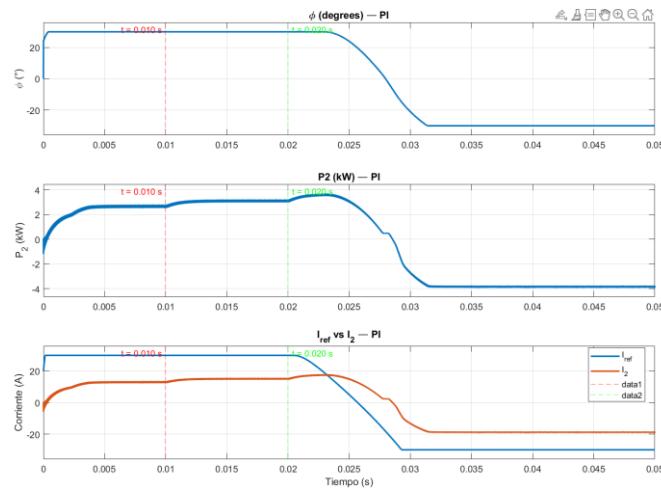


Figura 25: Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso i)

En la Figura 25, cuando ocurre el aumento de voltaje en $t = 0.02$ s, el PI ajusta gradualmente la operación por lo que el sistema se estabiliza en ~ 12 ms.

ii. Segundo caso.

- $T = 0.01$ s

El DAB estuvo suministrando energía hasta $t = 0.01$ s (Figura 26). Cuando la carga disminuyó en ese instante, el PI comenzó a reducir el ángulo de fase de forma gradual, de modo que el DAB pasó a absorber energía. Debido a la acción integral, esta transición fue lenta y no alcanzó a asentarse antes del segundo evento. Al ocurrir la caída de voltaje en $t=0.02$ s, el sistema necesitó volver a entregar potencia, pero primero durante unos 3 ms el DAB se mantuvo estable absorbiendo energía. A partir de allí, I_2 aumentó de manera

continua hasta establecerse en régimen de suministro aproximadamente 18 ms después del cambio de 0.02 s (Figura 27). La respuesta no mostró oscilaciones marcadas, pero sí un asentamiento claramente más lento y en rampa, consistente con la dinámica del PI.

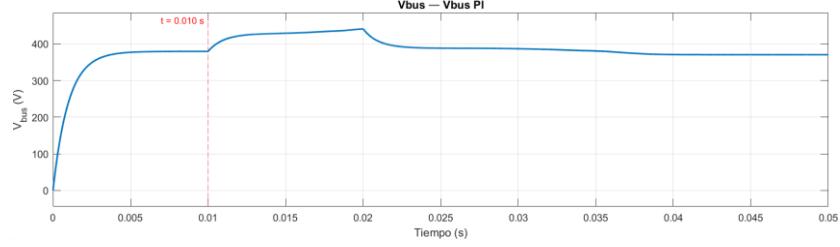


Figura 26: Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 26, tras la reducción de carga, el V_{bus} en el bus aumentó, y luego se redujo el V_{bus} en $t = 0.02$ s.

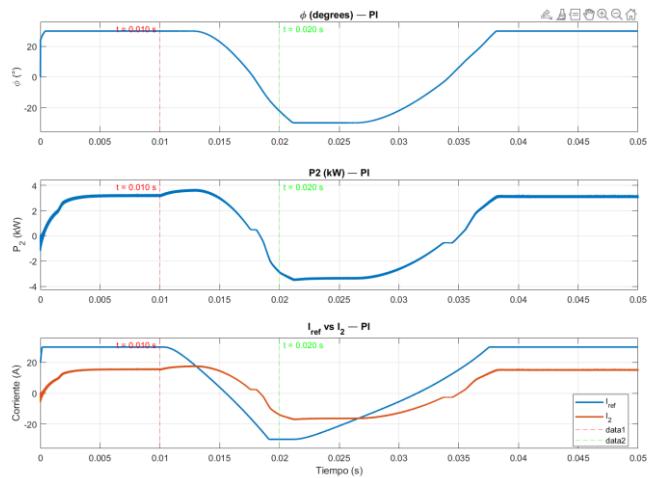


Figura 27: Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 27, el PI redujo ϕ y el DAB pasó a absorber energía en $t = 0.01$ s; luego, tras el evento en $t = 0.02$ s, I_2 aumentó gradualmente, estabilizándose en ~ 18 ms.

iii. Tercer caso.

- $T = 0.01$ s

En este caso, el DAB se mantuvo todo el tiempo en modo de suministro. Las perturbaciones fueron pequeñas y el controlador actuó de forma conservadora: a $t = 0.01$ s (cambio de carga) casi no hubo corrección en I_2 y P_2 cambió apenas; el ángulo permaneció prácticamente constante. Luego, a $t = 0.02$ s (aumento de voltaje) el PI elevó la potencia entregada de manera gradual: I_2 subió suavemente, sin oscilaciones apreciables, y se estabilizó alrededor de 3 ms.

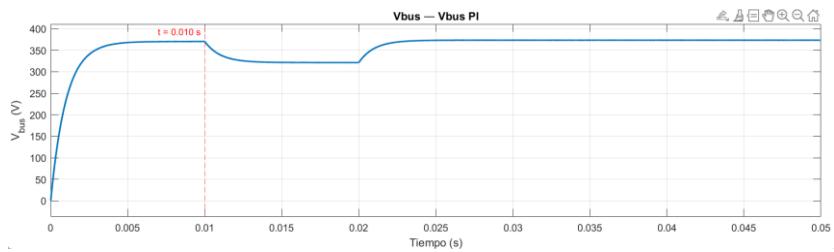


Figura 28: Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso iii)

En la Figura 28, el V_{bus} disminuyó en $t = 0.01$ y aumentó en $t=0.03$ s.

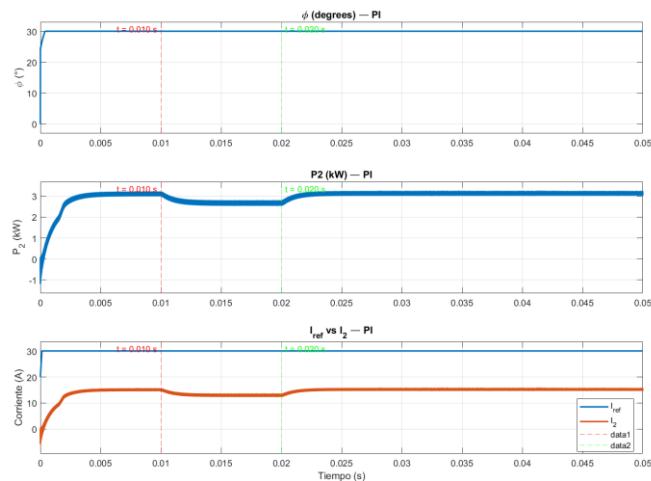


Figura 29: Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso iii)

En la Figura 29, En $t = 0.01$ s casi no hubo cambios en I_2 ni P_2 ; en $t = 0.02$ s el PI incrementó suavemente la potencia entregada, con estabilización en ~3 ms. Las perturbaciones fueron pequeñas y no alteraron significativamente el régimen de suministro.

iv. Cuarto caso.

- $T = 0.01 \text{ s}$

Con el PI, el escenario inició con voltaje alto y demanda baja, por lo que el DAB debía absorber energía. El controlador empezó a desplazar el ángulo en esa dirección y la potencia P2 tendió a valores negativos, incluso cruzó momentáneamente por cero, pero su dinámica lenta no le permitió asentarse en régimen de absorción antes del aumento de carga en $t = 0.01 \text{ s}$. En ese instante, al aumentar la carga, el PI invirtió la acción y fue elevando gradualmente la corriente I2; P2 pasó a positiva y el convertidor volvió a suministrar energía, aunque con un retardo apreciable.

Con la caída de tensión en $t = 0.02 \text{ s}$ apareció un nuevo transitorio: el lazo aumentó de nuevo el suministro para compensar el menor voltaje, y la corrección se completó de forma rápida (2 ms).

En esta simulación se evidenció la falta rapidez en la estabilización del sistema durante cambios repentinos de las variables, de modo que el DAB no pudo aprovechar la energía excedente que existía debido a la respuesta del controlador.

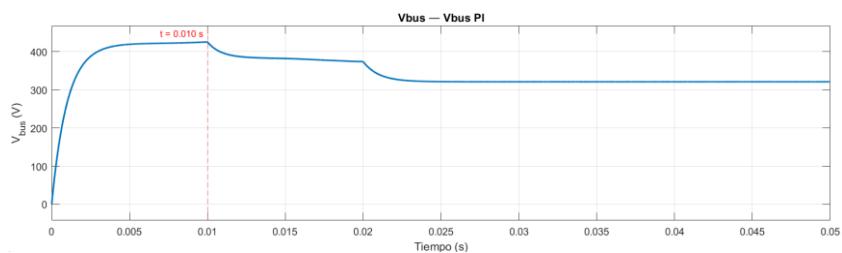


Figura 30: Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la Figura 30, el Vbus inició en voltaje alto, luego se redujo en $t=0.01 \text{ s}$ y $t=0.02 \text{ s}$.

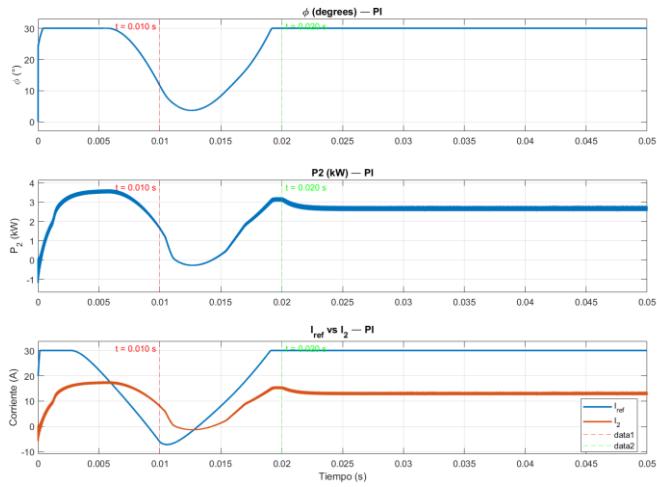


Figura 31: Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la Figura 31, en $t = 0.01$ s el PI pasó de absorción a suministro con retardo, luego, con la caída de tensión en $t = 0.02$ s, la corrección fue rápida y efectiva.

- $T = 0.03$ s

El sistema partió con carga baja y voltaje alto, de modo que el DAB entró en absorción y se estabilizó en ese régimen en 15 ms. Al producirse la caída de tensión en $t = 0.02$ s, la demanda siguió siendo reducida y el controlador mantuvo una respuesta de absorción: el ángulo apenas cambió y el DAB continuó cercano al modo de absorción con una corrección lenta entre 0.02 s y 0.03 s. Con el incremento de carga en $t = 0.03$ s el PI reaccionó con claridad, aumentando el ángulo, elevando I_2 y pasando a suministro; esa transición se estabilizó en torno a 5 ms.

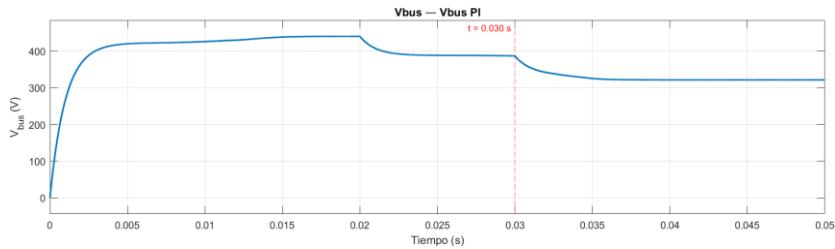


Figura 32: Voltaje del bus DC con PI – Carga y voltaje variables (Caso v, $t = 0.03$ s)

En la Figura 32, el Vbus se mantuvo por encima de 400 V hasta $t=0.02$ s, donde se redujo y luego disminuyó también en $t=0.03$ s.

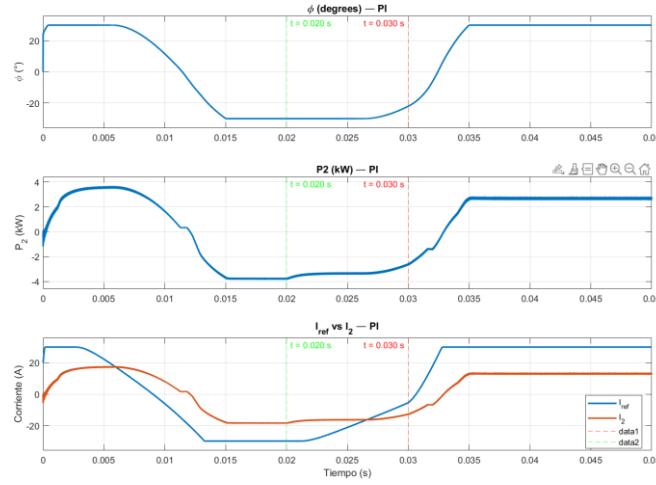


Figura 33: Respuesta del DAB con PI – Carga y voltaje variables (Caso v, $t = 0.03$ s)

En la Figura 33, el sistema estuvo en absorción inicial, el PI mantuvo baja acción; en $t=0.03$ s, elevó ϕ e I_2 , pasando a suministro con estabilización en ~ 5 ms. El sistema permaneció en absorción hasta $t = 0.03$ s. Además, se observa la primera respuesta lenta del sistema debido a las variaciones de generación y carga.

3.3.2. Simulación DAB con MPC General - Carga y voltaje variables

Se presentan los resultados del MPC general operando bajo condiciones simultáneamente variables de carga y voltaje del bus DC.

i. El primer caso.

- $T=0.01$ s

Antes de $t=0.01$ s el convertidor operaba con un ángulo elevado para sostener la transferencia. En la Figura 35 se observa como cuando la carga disminuyó ($t=0.01$ s), el controlador redujo el ángulo de inmediato; I_2 descendió hasta el nuevo nivel y, por tanto, el DAB suministró menos energía (P_2 quedó acorde con la menor demanda). Después, al

descender el voltaje del bus ($t=0.02$ s), el controlador aumentó la transferencia, elevando I_2 y con ello la energía suministrada por el DAB. En ambos eventos, I_2 se estabilizó en ≈ 3 ms, sin picos visibles ni oscilaciones.

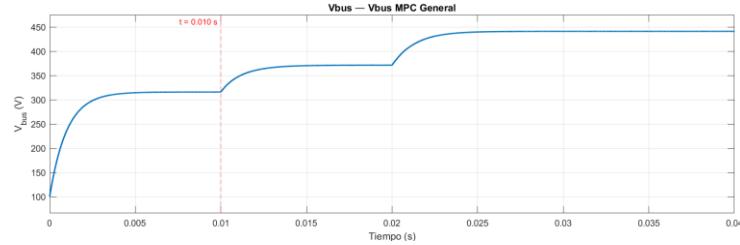


Figura 34: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)

En la Figura 34, el V_{bus} cambió debido a la reducción de carga y la caída posterior de tensión.

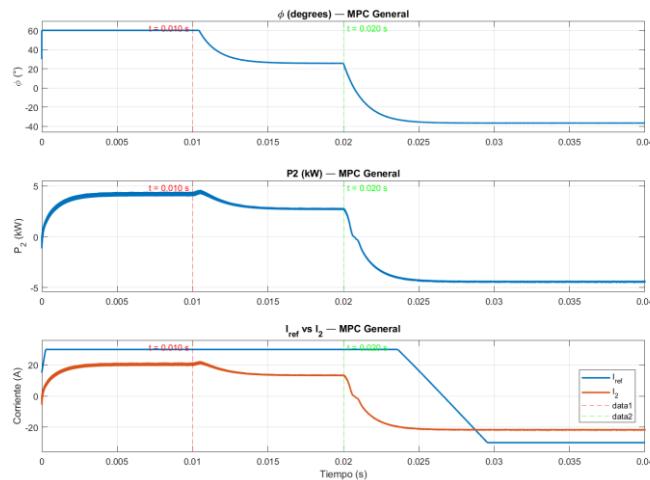


Figura 35: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso i)

- $T= 0.03$ s

En la figura 35 se visualiza que, el aumento de voltaje en $t=0.02$ s hizo que el sistema disminuyera el ángulo por lo que I_2 se redujo y el DAB pasó a suministrar menos energía, quedando estabilizado en ≈ 3 ms. Luego, cuando la carga disminuyó ($t=0.03$ s), I_2 bajó y el DAB pasó a absorber la energía extra, con tiempo de establecimiento también ≈ 3 ms.

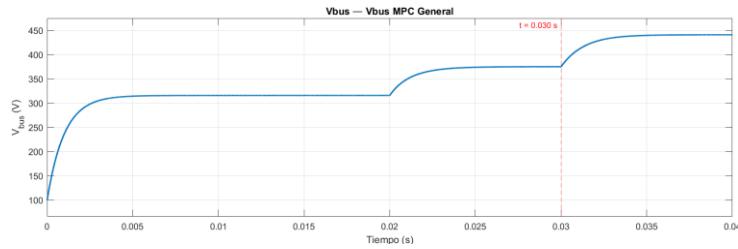


Figura 36: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii,

$$t = 0.03\text{s}$$

En la figura 36, se visualiza como el voltaje aumenta en $t=0.02$ s pero sigue estando por debajo de 400 V, y en $t=0.03$ s donde si sobrepasa los 400 V.

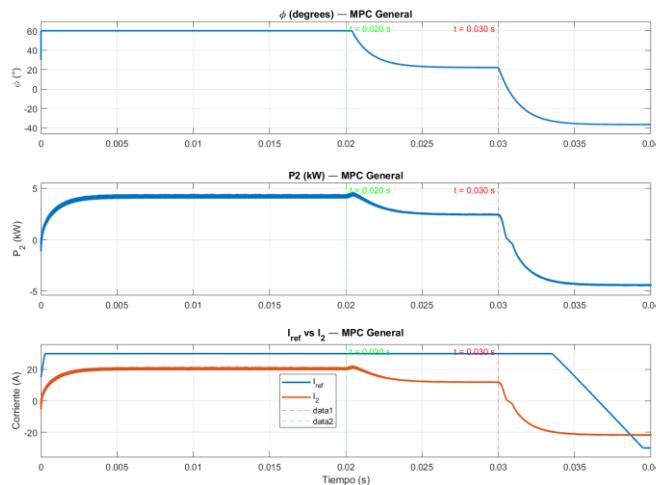


Figura 37: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables

$$(\text{Caso ii, } t = 0.03 \text{ s})$$

ii. El segundo caso.

- $T = 0.01$ s

En la Figura 39, en $t=0.01$ s se desconectó gran parte de la carga y debido a que el voltaje era alto el controlador bajó el ángulo de fase de inmediato, disminuyendo I_2 , haciendo que el DAB deje de entregar energía para absorberla; la potencia P_2 acompañó esa reducción. En $t=0.02$ disminuyó el voltaje, de esta forma el controlador aumentó el

ángulo y elevó I_2 , por lo que el DAB volvió a suministrar energía hacia HV para ajustarse a la falta de voltaje en el bus. En ambos cambios, I_2 se estabilizó en ≈ 4 ms.

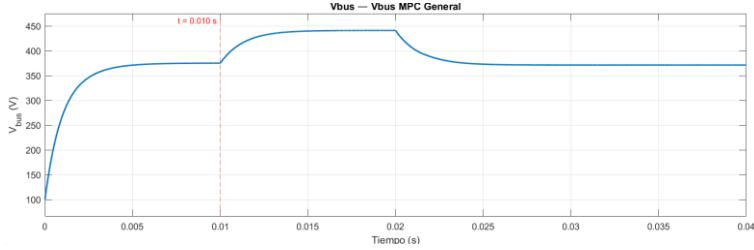


Figura 38: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii, t = 0.01s)

En la figura 38, se observa el aumento de V_{bus} en $t=0.01\text{ s}$; la disminución en $t=0.02\text{ s}$.

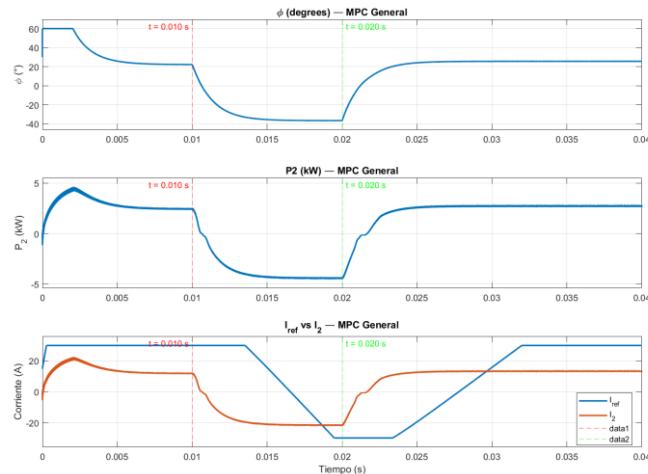


Figura 39: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso ii, t = 0.01s)

- T= 0.03 s

En la Figura 41 se visualiza que, hasta $t = 0.02\text{ s}$ el controlador mantuvo al DAB suministrando energía. En $t = 0.02\text{ s}$ el V_{bus} disminuyó; el controlador respondió aumentando el ángulo de fase, con lo que I_2 y P_2 se elevaron para compensar la menor tensión del bus. La corriente se estabilizó en aproximadamente 2 ms. Luego, en $t = 0.03\text{ s}$ la carga se redujo; el controlador recortó el ángulo y en consecuencia I_2 y P_2

descendieron hasta el nuevo nivel de demanda. Se observó un pequeño realce justo antes de que la corriente se estabilizara (aproximadamente 3 ms).

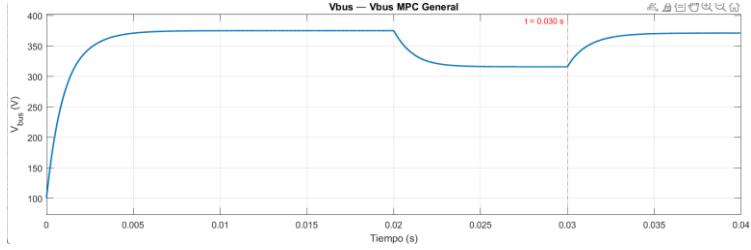


Figura 40: Respuesta del Vbus con MPC General – Carga y voltaje variables ($T = 0.03\text{s}$)

En la Figura 40, el Vbus se mantuvo debajo de 400 V durante toda la simulación.

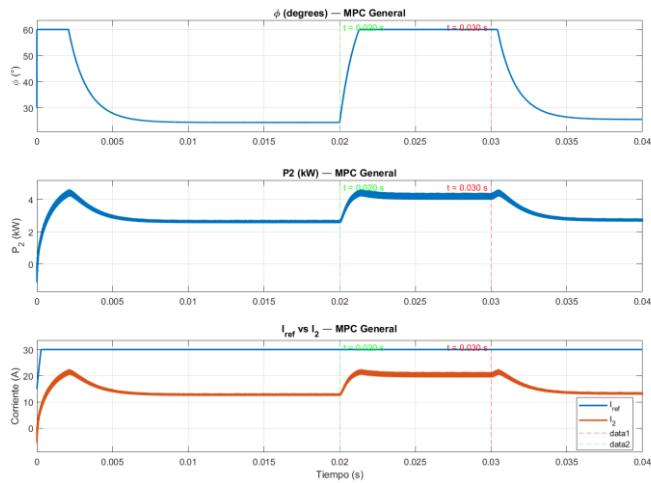


Figura 41: Variables de control con MPC General – Carga y voltaje variables ($T = 0.03\text{s}$).

iii. El tercer caso.

- $T = 0.01 \text{ s}$

En la Figura 43 se observa que, bajo estas condiciones del caso 3, el DAB se mantuvo suministrando energía durante toda la simulación. En $t = 0.01 \text{ s}$ la carga aumentó y el controlador abrió el ángulo de fase, por lo que I_2 y P_2 crecieron y se estabilizaron en aproximadamente 2 ms. En $t = 0.02 \text{ s}$ el voltaje del bus DC aumentó, en consecuencia, I_2

y P_2 disminuyeron para entregar menos energía con la nueva tensión, con estabilización de 5 ms, un poco más lenta por el desplazamiento del punto de operación. En ambos cambios apareció un pequeño realce transitorio antes de asentarse.

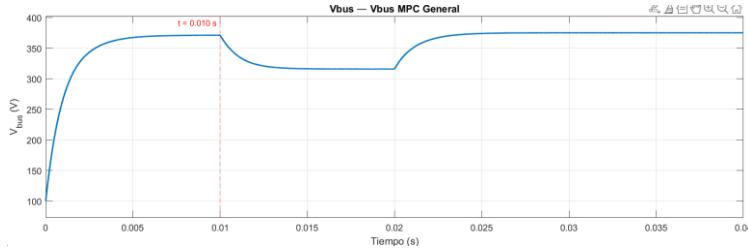


Figura 42: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii)

En la figura 42, el V_{bus} se mantuvo desde el inicio hasta el final por debajo de los 400 V.

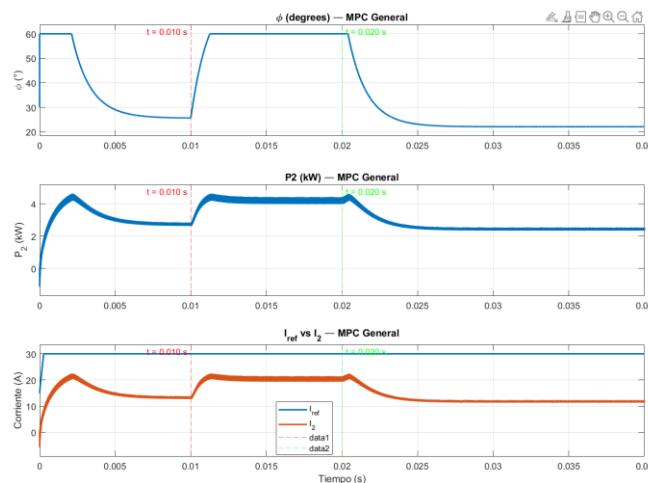


Figura 43: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iii)

- $T = 0.03$ s

En la Figura 45 se observa que, el DAB suministró energía desde el inicio hasta $t = 0.02$ s; en ese instante el aumento de V_{bus} con baja carga hizo que el controlador cerrara el ángulo, haciendo que el DAB absorbiera energía, estabilizándose en ≈ 3 ms. Luego, en $t = 0.03$ s la carga aumentó; el controlador aumentó el ángulo e, I_2 procedió a aumentar

poco a poco, es decir, el DAB retomó el suministro debido a la falta de energía, con una estabilización cercana a 5 ms y un pequeño realce inicial debido a la energía almacenada.

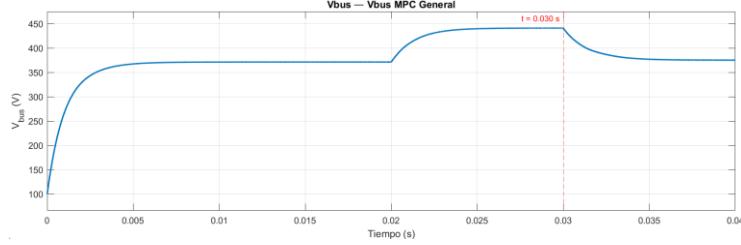


Figura 44: Evolución del voltaje Vbus con MPC General – T=0.03 s.

En la figura 44, el Vbus estuvo por debajo de 400 V hasta $t=0.02$ s, donde luego se redujo en $t=0.03$

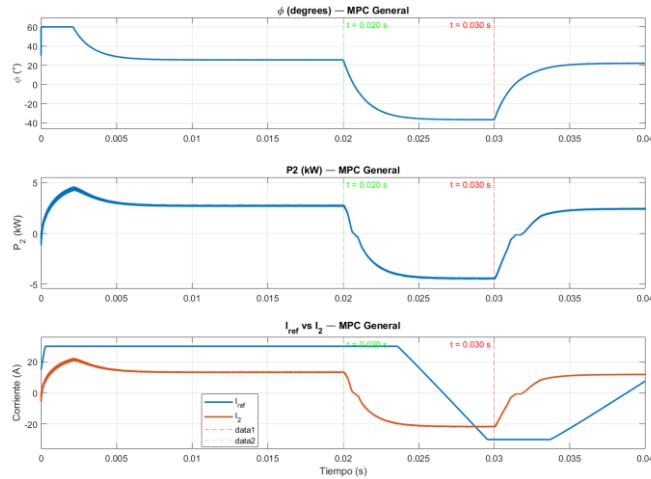


Figura 45: Respuesta del DAB con MPC General – T=0.03 s (ϕ , P_2 e I_2).

iv. El cuarto caso.

- $T=0.01$ s

En la Figura 47 se visualiza que, este escenario, desde el arranque se observó exceso de energía en el bus respecto a la demanda, por lo que I_2 fue negativa y el DAB absorbió energía hasta el aumento de carga en $t=0.01$ s. A partir de ese instante, el sistema requirió aporte neto y el controlador abrió el ángulo para que el DAB comenzara a suministrar hasta $t=0.02$ s. Cuando en $t=0.02$ s se produjo la disminución del voltaje del

bus, el controlador incrementó aún más la transferencia, elevando I_2 y P_2 para sostener la operación con la nueva tensión. Los tiempos característicos fueron: ≈ 8 ms para estabilizar la absorción inicial y ≈ 3 ms para estabilizar tras el cambio a suministro.

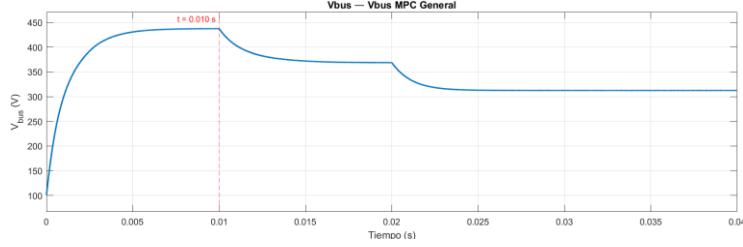


Figura 46: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la figura 46, el V_{bus} inicia alto hasta en $t=0.01$ s que aumenta la carga, luego el voltaje se reduce nuevamente en $t=0.02$ s.

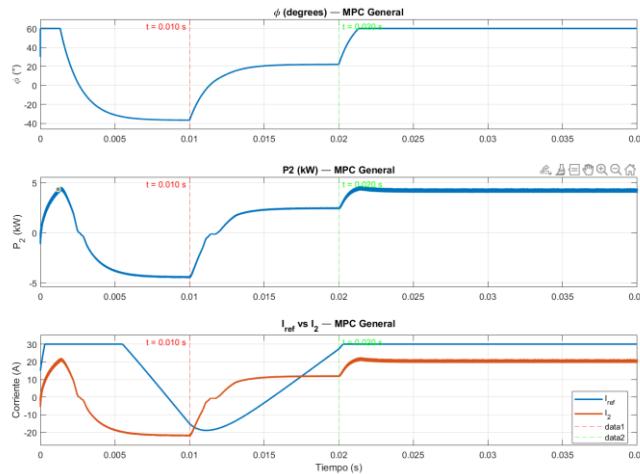


Figura 47: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv)

- $T = 0.03$ s

En la Figura 49, el DAB absorbió energía hasta $t = 0.02$ s. En ese instante, el V_{bus} disminuyó, y el controlador aumentó el ángulo y revirtiendo el flujo: I_2 pasó a positiva y el DAB comenzó a suministrar energía, con estabilización ~ 4 ms. Posteriormente, en $t = 0.03$ s el aumento de carga requirió mayor transferencia; el controlador abrió aún más el ángulo, I_2 y P_2 crecieron y el sistema se estabilizó ~ 2 ms.

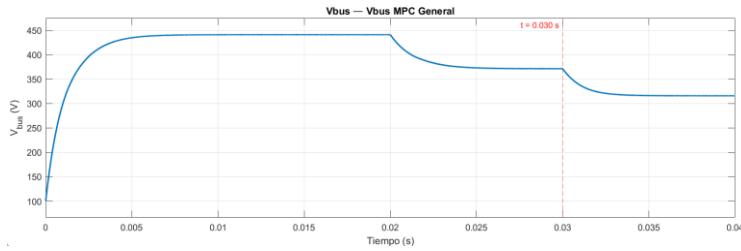


Figura 48: Voltaje del bus DC con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la figura 48, el Vbus se mantiene alto hasta $t=0.02$ s, y luego pasa a tener un valor menor a 400 V.

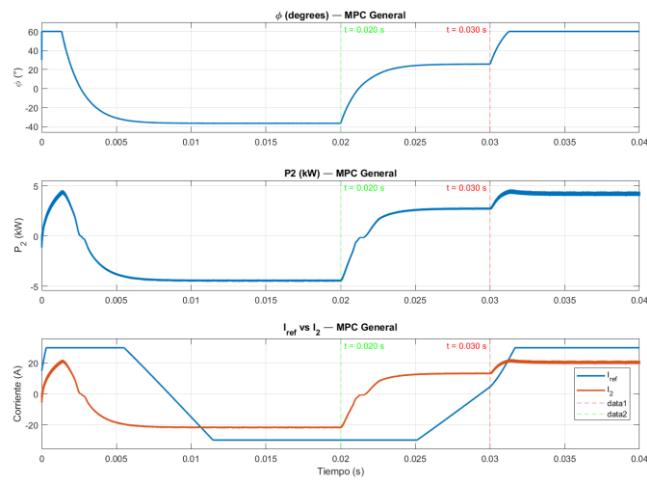


Figura 49: Respuesta del DAB con MPC General – Carga y voltaje variables (Caso iv)

3.3.3. Simulación DAB con MPC físico - Carga y voltaje variables

Se presentan los resultados del MPC físico operando bajo condiciones simultáneamente variables de carga y voltaje del bus DC.

i. El primer caso.

- $T = 0.01$ s

Con el MPC físico, antes de $t = 0.01$ s el DAB estaba suministrando potencia. Cuando la carga disminuyó en $t = 0.01$ s, el controlador ajustó el ángulo, por lo que I_2 y P_2 descendieron y se estabilizaron en $\sim 3-4$ ms. Posteriormente, al aumentar Vbus en $t =$

0.02 s, el controlador cerró el ángulo hacia -20° ; y el DAB pasó a absorber la energía excedente, con estabilización ~ 4 ms. En todo el proceso no se observaron oscilaciones sostenidas, el rizado se mantuvo bajo y el ángulo respetó sus límites.

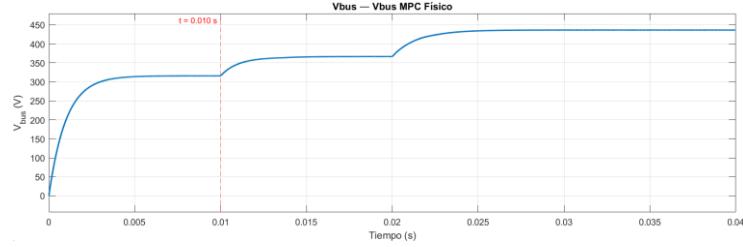


Figura 50: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i)

En la Figura 50, el V_{bus} se mantuvo menor a 400 V hasta $t=0.02$ s.

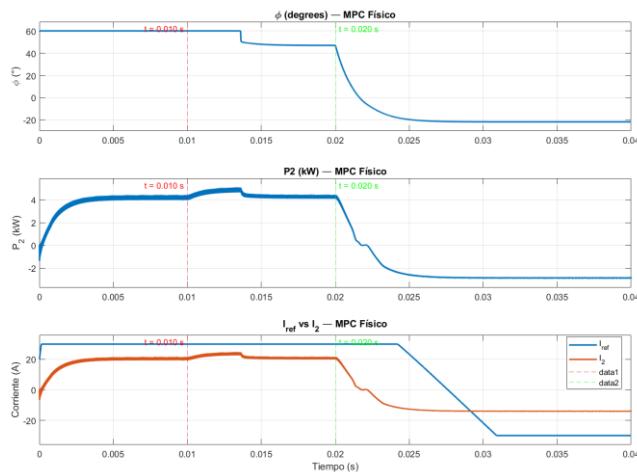


Figura 51: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso i)

En la Figura 51, en $t = 0.02$ s, el aumento de V_{bus} llevó al controlador a cerrar el ángulo hacia -20° , pasando a absorción; el sistema se estabilizó en ~ 4 ms sin oscilaciones sostenidas.

- $T = 0.03$ s

El DAB se mantuvo suministrando energía desde el inicio hasta el cambio de voltaje en $t = 0.02$ s. Ante ese aumento de V_{bus} , el controlador redujo el ángulo en rampa

y se observó un realce apreciable en I_2/P_2 antes de asentarse; la estabilización fue ≈ 4 ms.

Posteriormente, cuando la carga disminuyó en $t = 0.03$ s, el controlador recortó de nuevo el ángulo, I_2 descendió hasta cero y luego negativo, y el DAB pasó a absorber la energía excedente; el asentamiento fue del orden de ≈ 4 ms.

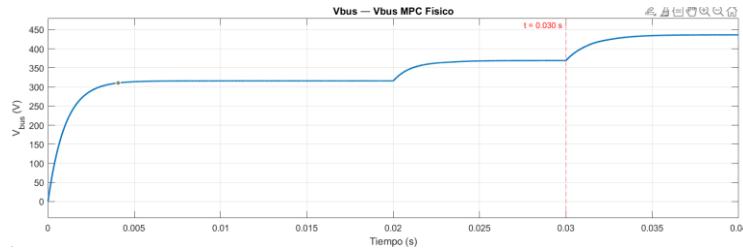


Figura 52: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 52, el V_{bus} se mantuvo menor a 400 V hasta $t=0.03$ s, donde luego sobrepasó los 400 V.

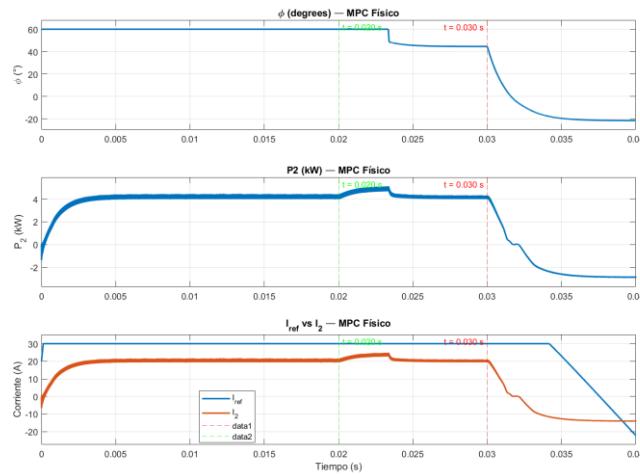


Figura 53: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 53, en $t = 0.03$ s la disminución de carga provocó que I_2 pasara de positivo a negativo, y el DAB absorbió energía; el controlador ajustó el ángulo y estabilizó la condición en ≈ 4 ms.

ii. El segundo caso.

- $T = 0.01$ s

En la Figura 55 se observa que, el DAB partió entregando potencia (I_2 positiva).

Al producirse la reducción de carga en $t = 0.01$ s, el controlador disminuyó el ángulo la corriente cayó hasta cruzar cero, por lo que el convertidor dejó de aportar y comenzó a absorber la energía que quedaba disponible. Luego, cuando el voltaje del bus descendió en $t = 0.02$ s, el controlador volvió a abrir el ángulo, I_2 recuperó valores positivos y el DAB retomó el suministro para compensar el menor nivel de tensión. En ambos cambios la corriente se asentó en torno a 3 ms, con realces pequeños y sin oscilaciones sostenidas.

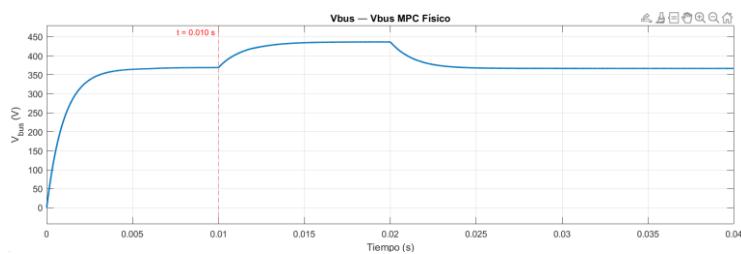


Figura 54: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 54, el V_{bus} aumentó en $t=0.02$ s y luego se redujo en $t=0.03$ s.

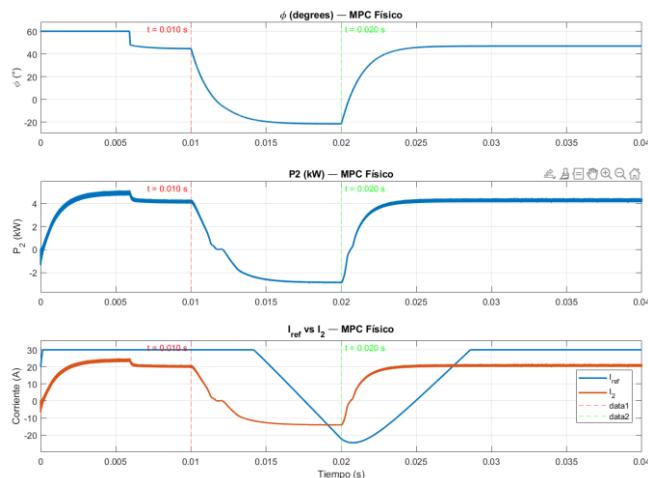


Figura 55: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

- $T = 0.03$ s

En la Figura 57, el DAB suministró energía durante toda la simulación, ya que V_{bus} se mantuvo por debajo de 400 V. Cuando el voltaje del bus disminuyó en $t = 0.02$ s,

s, el controlador abrió el ángulo para sostener la transferencia: I_2 aumentó y P_2 se elevó de forma proporcional; el asentamiento fue rápido (≈ 3 ms) con un realce pequeño. Finalmente, al elevarse V_{bus} en $t = 0.03$ s, el controlador redujo el ángulo y, en consecuencia, I_2 y P_2 descendieron para adaptar la potencia al nuevo nivel de tensión. En este segundo evento el realce fue más visible que en la caída de voltaje, pero sin oscilaciones sostenidas y con tiempo de estabilización de 4 ms.

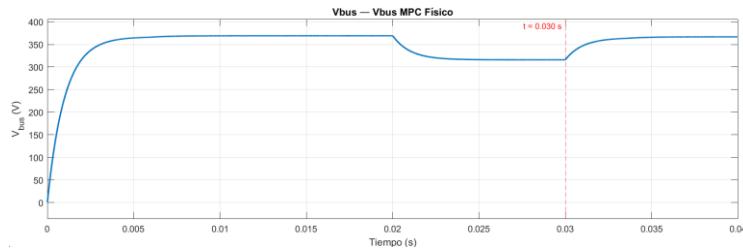


Figura 56: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

En la Figura 56, el V_{bus} se mantuvo por debajo de 400 V debido a las condiciones de carga y generación.

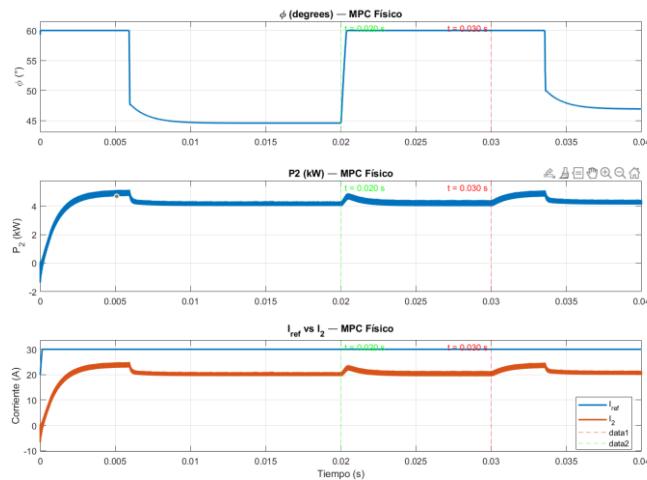


Figura 57: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso ii)

iii. El tercer caso.

- $T = 0.01$ s

En la Figura 59, el DAB permaneció todo el tiempo en régimen de suministro ($I_2 > 0$). Ante la reducción de carga en $t = 0.01$ s, el MPC físico reajustó el ángulo de fase, para disminuir P_2 , tras la cual la corriente se asentó en torno a 3 ms. Con el incremento de V_{bus} en $t = 0.02$ s, el controlador volvió a reducir ϕ de forma más marcada, en consecuencia, P_2 bajó y I_2 convergió nuevamente en unos 3 ms. En ambos eventos aparecieron pequeños realces iniciales, pero sin oscilaciones sostenidas.

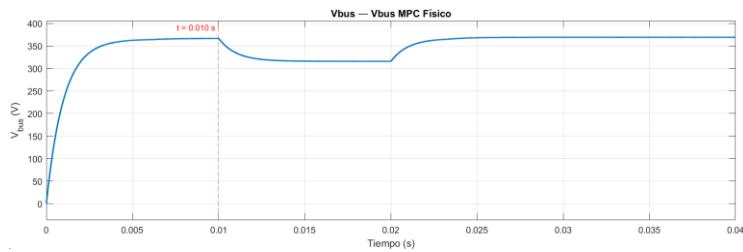


Figura 58: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii)

En la Figura 58, el V_{bus} estuvo por debajo de 400 V, y en $t=0.02$ s se redujo más debido al aumento de la carga. Luego en $t=0.02$ s el v_{bus} aumentó.

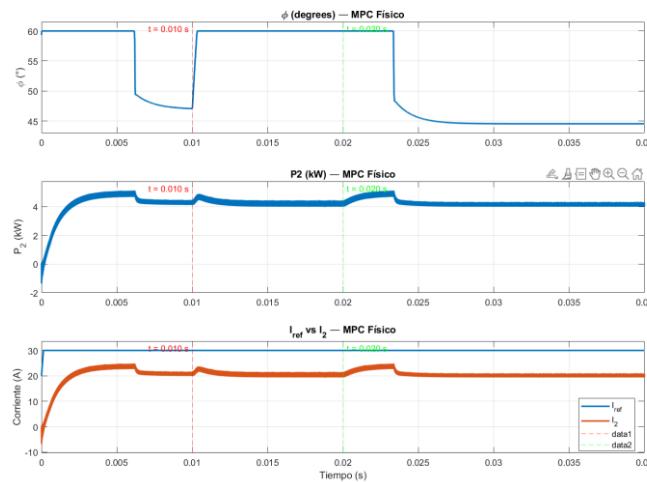


Figura 59: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii)

- $T = 0.03$ s

En la Figura 61, el DAB estuvo entregando energía desde el inicio. Cuando el bus subió de tensión en $t=0.02$ s, el controlador redujo el ángulo de desfase para recortar la

transferencia: la corriente cayó, cambió de signo y la potencia pasó a negativa, es decir, el DAB comenzó a absorber energía. Esa condición se estabilizó en alrededor de 6 ms, sin oscilaciones apreciables. Luego, en $t = 0.03$ s, la disminución de carga hizo necesaria nuevamente la entrega de energía; el controlador abrió el ángulo, la corriente volvió a valores positivos y la potencia recuperó signo positivo, con un tiempo de estabilización cercano a 4 ms.

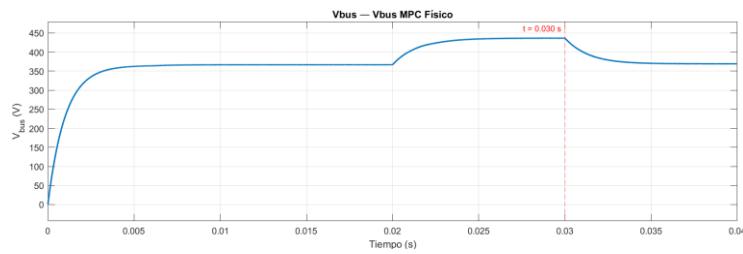


Figura 60: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii)

En la Figura 60, el V_{bus} se mantuvo por debajo de 400 V hasta $t=0.02$ s, luego se redujo en $t=0.03$ s por el aumento de la carga.

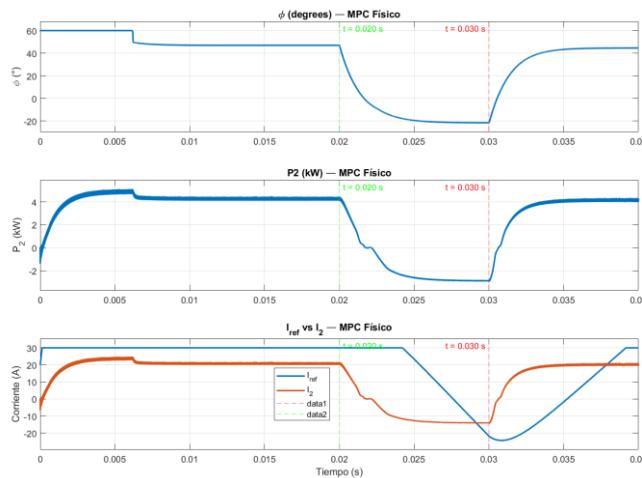


Figura 61: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iii)

iv. El cuarto caso.

- $T = 0.01$ s

En la Figura 63, el sistema partió con voltaje alto y demanda baja, por lo que el DAB absorbió energía. Cuando la carga aumentó en $t=0.01$ s, el bus cayó y el controlador incrementó el ángulo de fase; I_2 cruzó a valores positivos y P_2 creció, es decir, el DAB pasó a suministrar energía para sostener el nuevo punto de operación. Al disminuir el nivel de generación en $t=0.02$ s, el controlador volvió a abrir el ángulo para aportar más potencia desde el DAB y se estabilizó en 2 ms.

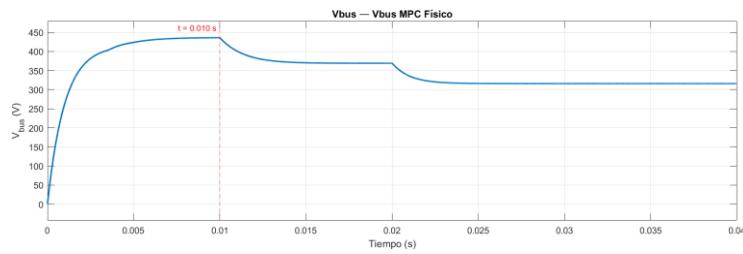


Figura 62: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la figura 62, se tuvo V_{bus} alto en hasta $t=0.01$ s, se redujo tanto en $t=0.01$ s debido al aumento de la carga como en $t=0.02$ s con la disminución del voltaje de generación.

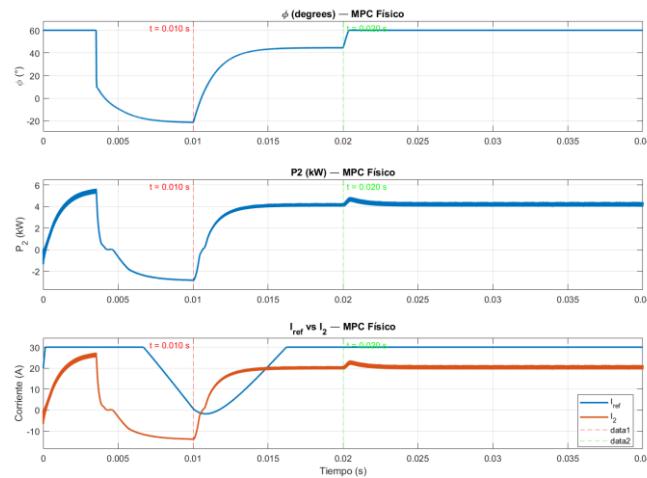


Figura 63: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv)

- $T=0.03$ s

En la Figura 65, la carga se mantuvo baja hasta $t=0.02$ s, por lo que el DAB operó absorbiendo energía. Cuando el voltaje disminuyó en $t=0.02$ s, el controlador aumentó el

ángulo, invirtió el flujo de potencia y el DAB pasó a suministrar energía; la corriente y la potencia transferida se asentaron en ~ 4 ms, sin oscilaciones relevantes. Finalmente, al incrementarse la carga en $t=0.03$ s, el DAB elevó la entrega de potencia con un tiempo de establecimiento cercano a 2 ms y un leve sobre impulso transitorio antes de estabilizarse.

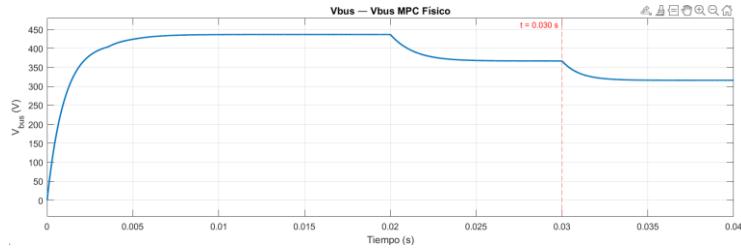


Figura 64: Voltaje del bus DC con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv)

En la figura 64, el V_{bus} se mantuvo alto hasta $t=0.02$ s donde luego se redujo en $t=0.02$ s y en $t=0.03$ s.

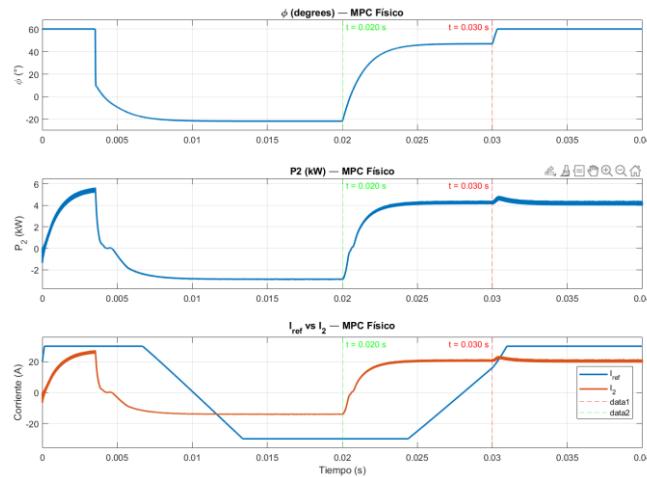


Figura 65: Respuesta del DAB con MPC Físico – Carga y voltaje variables (Caso iv)

Nota. I_2 y P_2 reflejan los cambios de flujo: absorción inicial, suministro tras la caída de voltaje y mayor aporte al crecer la carga. El controlador ajustó el ángulo de forma precisa y rápida, sin oscilaciones relevantes.

3.3.4. Análisis de resultados

El PI mantuvo la estabilidad y un rizado bajo; rindió mejor cuando los cambios de punto de operación fueron pequeños o moderados y cuando los eventos estuvieron separados, pero fue el más lento: necesitó típicamente 10–25 ms para asentarse y, en algunos casos, no alcanzó a estabilizarse antes del siguiente evento, con un esfuerzo de control (variación de ángulo de fase) bajo–moderado. El MPC general mostró la respuesta más rápida (\approx 2–4 ms) y transiciones limpias en corriente y potencia, aunque lo logró a costa de acciones no factibles (ángulos y tasas fuera de límites), por lo que sirvió como referencia de desempeño deseable más que como opción realizable. El MPC físico ofreció el mejor compromiso: respetó las restricciones del convertidor, mantuvo corrientes y potencias realistas (en absorción coincidieron bien con lo esperado) y se asentó en 2–4 ms al pasar a suministro y en \sim 7 ms al pasar a absorción, con sobre impulsos, pero sin oscilaciones sostenidas. Ante perturbaciones simultáneas de carga y bus, conservó acciones factibles; en algunas corridas el MPC general fue levemente más veloz, pero a costa de órdenes que el hardware no podría ejecutar, mientras que el MPC físico se mantuvo dentro de márgenes seguros.

3.3.5. Costos

- **Costo Indirectos**

- Diseño del modelo — 100 h.
- Estudio del MPC — 80 h.
- Estudio de carga en el laboratorio— 12 h.

- **Costos directos**

Tabla 4: Desglose de costos de componentes del sistema fotovoltaico–DAB

Categoría	Elemento	Especificación	Cant.	U	Costo unit. (USD)	Subtotal (USD)
Fotovoltaico	Módulos FV	Monocristalinos; $\geq 550 \text{ Wp}$	10	unid	145	1450
Fotovoltaico	Estructura y anclajes	Exterior; aluminio/galvanizado	1	lote	200	200
Fotovoltaico	Protecciones DC	Fusibles string, seccionador, SPD TII	1	kit	150	150
Batería	Banco LiFePO ₄	$\sim 204,8 \text{ V}; \approx 10 \text{ kWh}$	1	unid	2200	2200
DAB	Transformador HF aislado	$n \approx 1,9567; \geq 5 \text{ kW}$	1	unid	400	400
DAB	Inductor serie	$\geq 5 \text{ kW}$; baja ESR	1	unid	180	180
DAB	Semiconductores + drivers	8 MOSFET/IGBT; drivers aislados	1	set	140	140
DAB	Sensores V/I	LEM/shunt; medición bus y ramas	1	set	120	120
DAB	Control (MPC)	MCU/FPGA; PSU control	1	unid	250	250
DAB	PCB, disipación y enclosure	PCB potencia; disipadores; gabinete	1	lote	250	250
Microrred	Distribución DC y puesta a tierra	Canalización, breakers DC, SPD	1	lote	300	300
Instrumentac.	Analizador AEMC 3945B	Prestado	1	unid	0	0
					Total	5340

Un generador de $\geq 5 \text{ kW}$ en Ecuador cuesta cerca de USD 600, pero es una solución a corto plazo que depende de gasolina (USD 2,75/gal), exige mantenimiento y su costo real por kWh crece con las horas de uso y las fallas. En cambio, un sistema solar + batería + DAB requiere más inversión al inicio, pero luego entrega energía con combustible cero, poco mantenimiento y alta confiabilidad; a lo largo de los años resulta más económico cuando hay cortes frecuentes o se busca operación continua. Además, es silencioso, sin emisiones y alineado con el compromiso de la FIEC de impulsar energías sostenibles.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

A partir del diseño y modelado del convertidor DAB para una microrred aislada con generación de energía solar y almacenamiento en baterías, se implementa un esquema de control predictivo y se contrasta su desempeño frente a un controlador convencional PI de referencia. Las simulaciones consideran variaciones drásticas de generación PV, cambios de carga y condiciones de operación reales del laboratorio. En base a las simulaciones obtenidas en el capítulo 3, se establecen conclusiones que responden directamente al objetivo general y a los objetivos específicos planteados en la tesis.

- El sistema paneles solares–batería–DAB, regulado por un MPC, es una solución de respaldo autónomo viable para el laboratorio FIEC. Mantiene el bus DC en 400 V (± 5 –10 V) ante variaciones severas de la generación fotovoltaica y cambios de carga; transfiere potencia bidireccional hasta ± 5 kW cumpliendo las restricciones físicas; y ajusta de forma anticipativa el flujo entre batería, bus DC y carga con tiempos de asentamiento ~ 2 –4 ms. Gracias a esta estabilización rápida, el sistema puede operar como respaldo principal en microrred aislada y reduce el uso de generadores auxiliares. Además, cumple los criterios de seguridad de la IEC 62109 y es escalable a mayores niveles de potencia y energía.
- El convertidor DAB se diseña para acoplar un bus DC de 400 V en el lado de alta tensión con un banco de baterías de 204,8 V en el lado LV, empleando un transformador de alta frecuencia con relación $N=2,197$, inductancia de acoplamiento $L=15 \mu\text{H}$, frecuencia de conmutación de 100 kHz y $C_{\text{bus}}=1000 \mu\text{F}$.

Con esta configuración, el DAB transfiere energía en ambos sentidos de forma estable dentro del rango previsto y sin exceder los límites eléctricos y de control definidos en el diseño (ángulo de fase, tasa de cambio y corriente). El aislamiento galvánico propio del transformador cumple los requisitos de seguridad para operación en microrred aislada, al separar eléctricamente los lados HV y LV y mitigar riesgos de falla. Por otra parte, la estrategia de modulación Single-Phase-Shifting (SPS) vincula directamente la potencia transferida con el desplazamiento de fase entre los puentes, lo que permite gobernar el flujo de energía de manera precisa y reversible (carga o descarga de la batería según la condición del bus y del PV). A partir de ese comportamiento, el convertidor se abstrae en un modelo discreto de primer orden, suficiente para el diseño del control porque captura de forma directa cómo pequeños cambios en el desfase entre sus puentes se reflejan en la tensión del bus por medio de la energía que fluye sobre el DAB, y a la vez mantiene baja complejidad computacional para su ejecución en tiempo real.

- Para validar el comportamiento del MPC general y físico en el sistema completo, se simulan tres escenarios representativos del laboratorio: (i) carga constante con escalones severos de voltaje PV que fuerzan el cambio de sentido del flujo del DAB; (ii) PV alto con rampa de carga de baja a alta, que exige pasar de absorción a suministro de energía; y (iii) variaciones simultáneas de PV y carga que emulan la operación diaria. En todos los casos, se emplea el modelo linealizado-discreto del DAB con $T_s = 1 \mu s$, se configuran un horizonte de predicción de 20 pasos y un horizonte de control de 5 pasos, y se imponen restricciones explícitas. Los resultados muestran que, ante escalones de PV y rampas de carga, ambos controladores mantienen V_{bus} en torno a 400 V dentro de $\pm 5-10$ V, con tiempos de acomodo de $\sim 2-7$ ms y sin oscilaciones sostenidas. En las transiciones de

potencia (entrega-absorción), el cambio de signo se gestiona sin inversiones indeseadas gracias a los límites sobre el ángulo y su velocidad, lo que evita saturaciones prolongadas y contiene los picos de I_2 . Bajo variaciones simultáneas de PV y carga, se obtienen trayectorias de φ suaves que a su vez hace que se conserve I_2 dentro de los límites, especialmente el de carga de batería. En conjunto, los casos de simulación evidencian que el esquema predictivo seleccionado estabiliza el bus DC y cumple con las transiciones de carga/descarga del DAB en condiciones cercanas a la operación real de la microrred.

- Se realiza una comparación directa entre el PI en cascada y dos variantes del control predictivo: un MPC “general” (sin restricciones estrictas) y un MPC “físico” que incorpora los límites eléctricos del convertidor. La evaluación se hace en los mismos tres escenarios: escalones severos del voltaje fotovoltaico con carga constante, rampa de carga desde valores bajos a altos con voltaje fotovoltaico elevado, y variaciones simultáneas de generación y demanda. El PI mantiene la estabilidad del bus y un rizado bajo cuando los cambios de punto de operación son pequeños o moderados y cuando los eventos no se superponen. Sin embargo, ante perturbaciones grandes se asienta más lento: típicamente entre 10 y 25 milisegundos y, en un caso, alrededor de 24 milisegundos; en escenarios con eventos seguidos puede no alcanzar a estabilizarse antes del siguiente cambio. Su esfuerzo de control es moderado, pero alargar los transitorios incrementa la energía disipada en los semiconductores y el inductor. El MPC general entrega la respuesta más rápida, con tiempos de establecimiento de aproximadamente 2 a 4 milisegundos y transiciones limpias en corriente y potencia. No obstante, lo logra emitiendo órdenes que exceden los límites físicos del convertidor (ángulo de fase y su velocidad), por lo que sirve como referencia de desempeño deseable, pero no

como opción realizable en hardware. El MPC físico ofrece el mejor compromiso. Respeta de forma explícita los límites de ángulo de fase, su tasa de cambio y la corriente del lado de baja tensión, y mantiene el bus regulado en torno a 400 voltios dentro de márgenes de 5 a 10 voltios. En los cambios de sentido del flujo de energía pasa a suministro en 2 a 4 milisegundos y a absorción en aproximadamente 7 milisegundos, con sobreimpulsos acotados y sin oscilaciones sostenidas. Además, reduce los picos de corriente y el esfuerzo de control frente al PI, lo que disminuye el estrés térmico y las pérdidas de conmutación. Los resultados experimentales, muestran que el MPC físico aporta mayor calidad de regulación, mayor robustez ante perturbaciones críticas y mejor manejo de energía, todo ello con el mismo hardware de potencia que los otros dos controladores. Por estas razones el MPC físico resulta la alternativa más adecuada para mejorar la eficiencia operativa y la gestión energética del sistema DAB en la microrred.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar una campaña de medición continua de al menos un mes para caracterizar los perfiles reales de demanda del laboratorio. Deben registrarse P, V, I, factor de potencia y, junto con marcas de uso por área/equipo. Con estos datos se elaborarán curvas de duración de carga y perfiles horarios/diarios/semanales, se estimarán factores de coincidencia y diversidad, y se calcularán demanda máxima, carga base y factor de carga. Esta información más detallada permitirá dimensionar la potencia (kW) y energía (kWh) del almacenamiento y de los equipos de conversión, definir autonomía objetivo y reservas, priorizar cargas, fijar umbrales de conmutación, y proyectar el tamaño

óptimo de la generación fotovoltaica, todo antes de cualquier implementación de convertidores o estrategias de control.

- Se recomienda utilizar el sistema OPAL-RT de la universidad para validar el sistema en tiempo real, haciendo que el MPC interactúe con un modelo detallado del DAB, del bus DC y de la batería, alimentado con datos reales de irradiancia y carga e incluyendo ruido de medición, latencias, cuantización y retardos de modulación. Con ello se verifican las restricciones operativas, y se mide el tiempo de cómputo por ciclo para asegurar margen respecto al periodo de muestreo. Se debe realizar el estudio de la siguiente manera: primero model-in-the-loop, luego software- o processor-in-the-loop y, por último, hardware-in-the-loop, con emulación de fuente fotovoltaica y batería y pruebas de estrés. Esta validación permite detectar tempranamente configuraciones no factibles, reducir retrabajo y acelerar la transición al prototipo físico, además de dejar un banco de pruebas reproducible transferible a otros laboratorios.

Referencias

- Chen et al. (2022) – MDCS-MPC en DAB 1 kW. Chen, T., Zhong, Q., Song, W., & Zhang, X. (2022). Moving Discretized Control Set MPC for Dual Active Bridge Converter. 2022 IEEE 13th Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE), 1–8. IEEE. <https://nottingham-repository.worktribe.com/OutputFile/4163921>
- Nardoto et al. (2022) – Adaptive MPC en DAB 12 kW. Nardoto, D. R., D’Angelo, R. P., Bernardes, T., Cavalcanti, M. C., & Gules, R. (2022). Adaptive Model Predictive Control for Dual Active Bridge DC-DC Converters. *Energies*, 15(18), 6628. MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15186628>
- Nguyen & Lee (2023) – MPVC basado en modelo promedio. Nguyen, T. T., & Lee, J. (2023). Model Predictive Voltage Control of Dual Active Bridge DC-DC Converter Using Generalized Average Model. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 21, 2482–2493. <https://doi.org/10.1007/s12555-023-0191-3>
- Wang, Yu & Qi (2023) – MPC con observador STISMO. Wang, Y., Yu, W., & Qi, L. (2023). A Model Predictive Control Strategy Based on Super-Twisting Integral Sliding Mode Observer for Dual Active Bridge Converters. *Electronics*, 14(8), 1496. MDPI. <https://doi.org/10.3390/electronics14081496>
- Wang et al. (2025) – MPC en DAB de tres niveles (respuesta ZVS). Wang, L., Zhang, H., Liu, S., & Chen, Y. (2025). Model predictive control of three-level dual active bridge converters based on midpoint clamp to achieve ZVS. *Scientific Reports*, 15, 12345. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89079-w>

Benmakhlof, H., & Hacil, M. (2023). Comparison of Single-Phase-Shift and Extended-Phase-Shift Modulation of Isolated Bidirectional DC-DC Converter. En Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technologies (ICEEAT23) (pp. 1–6). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICEEAT60471.2023.10426189>

Chaurasiya, S., & Singh, B. (2020). Performance of SPS Control with External and Internal Phase Shift for DAB DC-DC Converter. En 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) (pp. 456–463). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GUCON48875.2020.9231135>

Fan, S., Hu, X., Li, Y., Dai, W., & Yuan, Y. (2019). Comparative Analysis of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converter Based on EPS and DPS. En 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922041>

Fiaz, M. F., Calligaro, S., & Petrella, R. (2020). Analytical Modelling and Control of Dual Active Bridge Converter Considering all Phase-Shifts. En 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 5984–5992). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236423>

Rukonuzzaman, M., & Mahboob, M. (2024). Control of a Single-Phase Dual Active Bridge (DAB) Bidirectional DC-DC Converter in DC Microgrids. En 2024 6th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI) (pp. 1–10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/STI64222.2024.10951156>

Zhao, C., Round, S. D., & Kolar, J. W. (2008). An isolated three-port bidirectional DC–DC converter with decoupled power flow management. IEEE Transactions on Power Electronics, 23(5), 2443–2453.

- Kim, J., Song, H. S., & Nam, K. (2011). Asymmetric duty control of a dual half-bridge DC–DC converter for single-phase distributed generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 973–982.
- Oggier, G. G., Garcia, G. O., & Oliva, A. R. (2011). Modulation strategy to operate the dual active bridge DC–DC converter under soft switching in the whole operating range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1228–1236.
- Zhao, B., Song, Q., Liu, W., & Sun, Y. (2014). Overview of dual-active bridge isolated bidirectional DC–DC converter for high-frequency-link power conversion system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(8), 4091–4106.
- Costinett, D., Zane, R., & Maksimovic, D. (2012). Automatic voltage and dead time control for efficiency optimization in a dual active bridge converter. In Proceedings of the 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 1104–1111). IEEE.
- Benmakhlof, H., & Hacil, M. (2023, noviembre). Comparison of single-phase-shift and extended-phase-shift modulation of isolated bidirectional DC-DC converter. In Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technologies (ICEEAT 2023) (pp. 1–5). IEEE.
- Khan, F. H., & Tolbert, L. M. (2009). Bi-directional power management and fault tolerant feature in a 5-kW multilevel DC–DC converter with modular architecture. *IET Power Electronics*, 2(5), 595–604.
- Nymand, M., & Andersen, M. A. E. (2010). High-efficiency isolated boost DC–DC converter for high-power low-voltage fuel-cell applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), 505–514.

Rukonuzzaman, M., & Mahboob, M. (2024, diciembre). Control of a single-phase dual active bridge (DAB) bidirectional DC-DC converter in DC microgrids. In Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI 2024) (pp. 1–6). IEEE.

Wai, R. J., Duan, R. Y., & Jheng, K. H. (2012). High-efficiency bidirectional DC-DC converter with high-voltage gain. *IET Power Electronics*, 5(2), 137–184.

Xie, Y. H., Sun, J., & James, S. F. (2010). Power flow characterization of a bidirectional galvanically isolated high-power DC/DC converter over a wide operating range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(1), 54–65

Anexos

Anexo 1



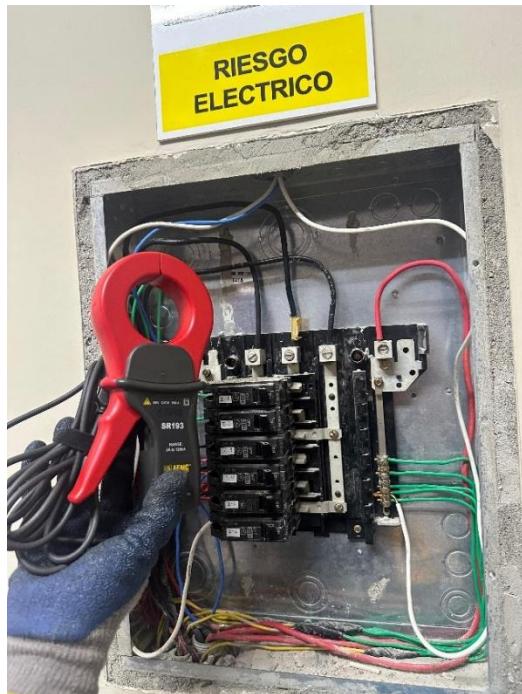
Anexo 1: Laboratorio Sistemas Digitales Avanzados en semana de proyectos.

Anexo 2



Anexo 2: Panel eléctrico del Laboratorio de Sistemas digitales avanzados.

Anexo 3



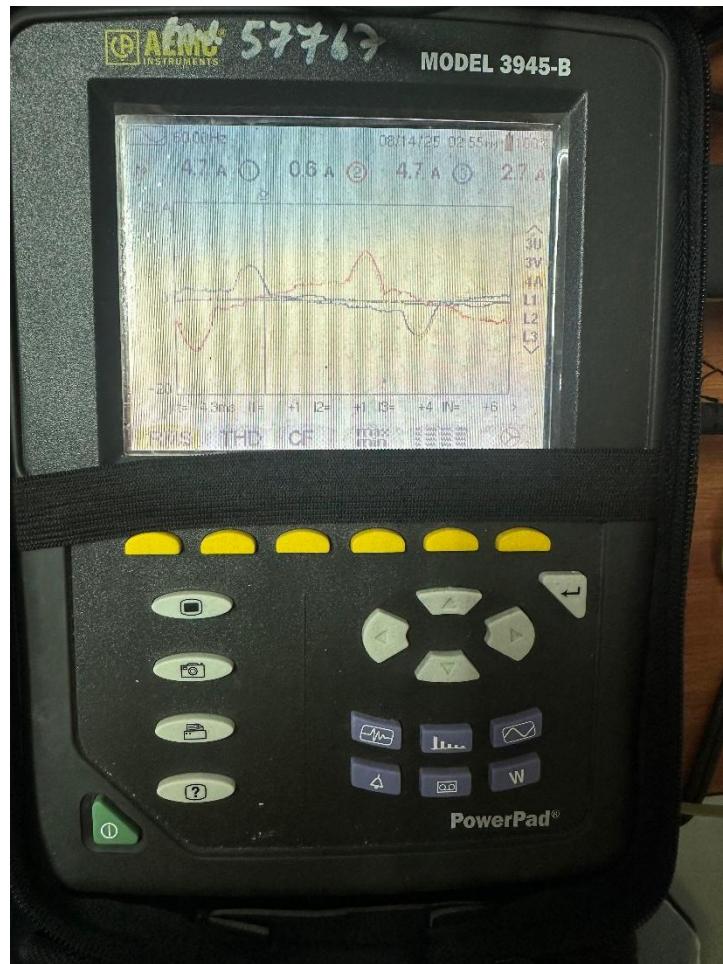
Anexo 3. Inicio de conexión del analizador de carga en el Laboratorio de Sistemas digitales avanzados.

Anexo 4



Anexo 4. Conexión del analizador de carga en el Laboratorio de Sistemas digitales avanzados.

Anexo 5



Anexo 5. Medición en tiempo real durante la semana de proyectos.