



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB).

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autora:

Ing. Karen Alejandra Herrera Balseca

Tutor:

Ing. MSc. Ángel Guillermo Hidalgo Oñate

LATACUNGA – ECUADOR

2023


APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB)**” presentado por **Herrera Balseca Karen Alejandra**, para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera de que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, julio, 26, 2023

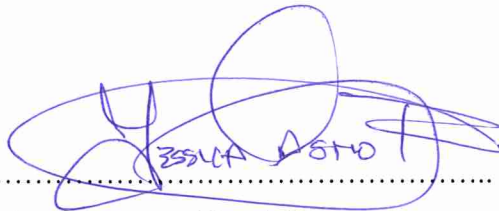


Ing. MSc. Ángel Guillermo Hidalgo Oñate
CC.: 0503257404

APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “**Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB)**”, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

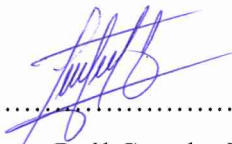
Latacunga, julio, 26, 2023



.....
Jessica Nataly Castillo Fiallos

0604590216

Presidente del tribunal



.....
Byron Paúl Corrales Bastidas

0502347768

Lector 2



.....
Luigi Orlando Freire Martínez

0502529589

Lector 3

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón este trabajo de titulación a mi madre, pues sin ella no lo habría logrado. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me haz protegido y por ello como ofrenda por tu paciencia y amor incondicional te regalo mi trabajo.

Alejandra Herrera

AGRADECIMIENTO

*Gracias a mis padres por apoyarme
de manera incondicional para
poder concluir con mi trabajo de
titulación.*

Ing. Karen Alejandra Herrera Balseca

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, julio, 26, 2023



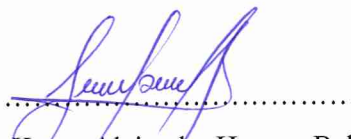
Ing. Karen Alejandra Herrera Balseca

C.C.: 05028978200

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, julio, 26, 2023



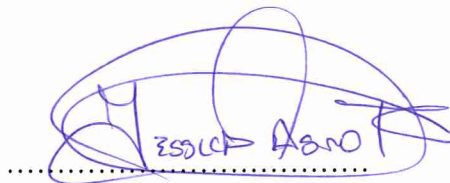
Ing. Karen Alejandra Herrera Balseca

C.C.: 05028978200

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB)** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los miembros del tribunal en la predefensa.

Latacunga, julio, 26, 2023



Jessica Nataly Castillo Fiallos

0604590216

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB).

Autora: Ing. Herrera Balseca Karen Alejandra

Tutor: Ing. Hidalgo Oñate Ángel Guillermo, MSc.

RESUMEN

Este trabajo se centra en la simulación de un convertidor de doble puente activo (DAB) aplicando una estrategia de control proporcional, integral y derivativo (PID) en lazo abierto y en lazo cerrado durante el proceso de carga y descarga del sistema de potencia basado en supercondensadores, controlando la salida de tensión cuando el convertidor trabaja en estado estacionario para mantener una transferencia de potencia constante durante un intervalo de tiempo.

PALABRAS CLAVE: PID, voltaje, convertidor, controlador.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

Title: Dvelopment of a PID control for a supercapacitor-based energy storage system using a Dual Active Bridge (DAB) converter.

Author: Ing. Herrera Balseca Karen Alejandra

Tutor: Ing. Hidalgo Oñate Ángel Guillermo, MSc.

ABSTRACT

This paper focuses on the simulation of a Dual Active Bridge converter (DAB) by applying an open-loop and closed-loop Proportional, Integral and Derivative (PID) control strategy during the charging and discharging process of the supercapacitor based power system, controlling the voltage output when the converter works in steady state to maintain a constant power transfer over a time span.

KEYWORD: PID, voltage, output, converter, controlling.

Yo, **Lcdo. Mario Fernando Lagla Chuquitarco** con cédula de identidad número 0502003650, Licenciado en Ciencia de la Educación especialización Inglés con número de registro de la SENESCYT 1020-05-583570; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB) de Ing. Karen Alejandra Herrera Balseca** aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, julio, 26, 2023

.....
Lcdo. Mario Fernando Lagla Chuquitarco
CC: 0502003650

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	1
3.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
4.	ESTRUCTURA DEL SISTEMA.....	4
4.1	Convertor DAB	4
4.2	Sistema de almacenamiento de energía mediante Supercapacitores	5
4.3	Simulación del Sistema de Estructura	7
5.	METODOLOGÍA.....	8
5.1	Modelo del convertor DAB en Matlab / Simulink.....	8
5.2	Principio de funcionamiento	11
5.3	Controlador.....	12
5.4	Parámetros	13
6.	RESULTADOS	15
6.1	Convertor DAB	15
6.2	Control PID: lazo cerrado.....	15
6.3	Sistema lazo abierto.....	17
6.4	Operación del Supercapacitor.....	18
7.	CONCLUSIONES	20
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelo del convertor DAB	11
Tabla 2: Control PI	12
Tabla 3: Supercapacitor Modelo Matlab/Simulink	14
Tabla 4: Mosfet Modelo Matlab/Simulink	14
Tabla 5: Valor comercial SC	14
Tabla 6: Transformador Modelo Matlab/Simulink	14
Tabla 7: Metodología SUS	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del sistema	4
Figura 2: Generador de pulso	7
Figura 3: Convertor DAB y Supercapacitor.....	7
Figura 4: Voltaje regulador PID	7
Figura 5: Convertor DAB.....	8
Figura 6: Forma de onda por ZCS	9
Figura 7: Forma de onda ZVS	10
Figura 8: Voltaje y corriente.....	15
Figura 9: Control PID con perturbación.....	16
Figura 10: Control PID sin perturbación.....	16
Figura 11: Control PID con perturbación.....	16
Figura 12: Control PID sin perturbación.....	17
Figura 13: Entrada escalón	17
Figura 14: Set point fijo.....	17
Figura 15: SOC Supercapacitor.....	18

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Desarrollo de un control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en supercapacitores mediante un Convertidor Dual Active Bridge (DAB).
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia.
Red nacional o internacional:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía eléctrica es una necesidad básica e imprescindible para el desarrollo de la propia sociedad, que permite que la economía de un país aumente en función de la demanda energética. Sin embargo, no es la energía eléctrica en sí misma la que tiene valor para las personas, sino los servicios que proporciona [1], por ello, la correcta integración entre las fuentes renovables y los sistemas de almacenamiento, permite un uso razonable de la energía utilizando dispositivos eficientes, capaces de suministrar energía, dando lugar a un ahorro considerable. La importancia de los sistemas de almacenamiento radica en el hecho de poder producir energía a partir de fuentes intermitentes en periodos de baja demanda, y suministrarla en periodos de alta demanda o cuando no se dispone de otra fuente de energía. Además de cumplir funciones como: compensación - regulación de carga, eficiencia, mejorar el rendimiento global y la calidad del sistema en general [2], [3].

Las fuentes de energía tradicionales basadas en gas natural, petróleo y carbón se han convertido en una parte importante del progreso económico mundial, sin embargo, debido a su impacto medioambiental y a la creciente demanda de energía, se ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas basadas en fuentes renovables [4]. Sin embargo, la producción de energía incluso de las fuentes más renovables es intermitente [5].

La solución propuesta desde la electrónica de potencia es el uso de convertidores con funciones especiales, según las necesidades, dentro de arquitecturas de interconexión de

potencia. Un primer enfoque y el más desarrollado es el centralizado, donde se han implementado grandes sistemas de energía eléctrica basados en economías de escala, así se instalaron grandes centros de generación con alta disponibilidad de energía primaria, sistemas de transmisión de alta potencia y centros de distribución ubicados en centros de alta concentración de consumidores. Un segundo enfoque es el descentralizado, donde la energía eléctrica se obtiene a partir de la energía primaria disponible en el centro de consumo; la disminución de los costos de transporte, el uso racional de la energía eléctrica y la creciente capacidad de almacenamiento eficiente ofrecen una alternativa cada vez más viable en la integración de energías renovables y el aprovechamiento de pequeñas cantidades de energía primaria [6]. La coexistencia de los dos enfoques, centralizado y descentralizado, se hace viable en la medida en que se incluyan estrategias de gestión, de manera que la incorporación de sistemas más pequeños, en lugar de perturbar el sistema eléctrico, contribuya a mejorar la calidad de la energía eléctrica presente en sistemas mayores [7].

Con respecto a las estrategias de control en la actualidad, y a pesar del sorprendente desarrollo de la teoría de control y del soporte tecnológico necesario para su implementación, el controlador de estructura PID es utilizado casi exclusivamente en el ámbito industrial a nivel mundial, ya que genera una señal de mando compuesta por tres términos aditivos que, como su nombre indica, son proporcionales a la señal de error, a su integral y a su derivada, para la selección de estos parámetros se puede proceder de diferentes formas dependiendo principalmente del proceso a controlar y de la información disponible a priori [8].

Sin embargo, la asimilación de los controladores PID en el ámbito industrial ha alcanzado tal grado que permite observar lo siguiente: por un lado, los usuarios se resisten a cualquier sustitución del controlador PID por controladores que presenten una estructura diferente por simple y robusta que sea, y por otro lado se aceptan controladores adaptativos sofisticados si vienen bajo un envoltorio PID [9].

Por lo tanto, en este artículo se presentará una estrategia de control PID durante el proceso de carga y descarga del sistema de potencia basado en supercondensadores,

limitando la tensión al valor máximo nominal de funcionamiento del convertidor DAB, para mantener una transferencia de potencia constante durante un periodo y un rango determinado.

Este artículo se divide en V Secciones, incluyendo la Introducción, en la Sección II se describe la formulación del problema, en la Sección III la estructura del sistema donde se menciona la técnica de detección utilizada, las características del sistema, en la Sección IV los resultados obtenidos utilizando control PID en lazo abierto y cerrado y finalmente en la Sección V se describe las conclusiones.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La electrónica de potencia es una parte esencial de la tecnología moderna para las fuentes de energía renovables, proporcionando las herramientas necesarias para aprovechar los nuevos esquemas de generación de energía, los convertidores de electrónica de potencia son utilizados para procesar la energía eléctrica y permiten acoplar sistemas de corriente directa a sistemas de corriente alterna y viceversa, estos son capaces de operar bajo diferentes condiciones en el sistema eléctrico fuera de parámetros ideales, tales como frecuencia, potencia, voltajes [7], por esta razón, los controladores PID ejercen una acción de control sobre una variable del sistema, denominada variable manipulada, para lograr mantenerse dentro de ciertos límites de operación deseables, garantizando una mayor calidad de energía a la salida del convertidor [10].

El almacenamiento de energía ha sido un problema de constante desarrollo científico e investigativo a través de los años, esto ha permitido incursionar en la reestructuración de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos, los cuales pueden almacenar energía eléctrica en forma indirecta (baterías) y directa (condensadores, supercondensadores), estos, son fundamentales para la implementación de nuevas tecnologías que permitan el consumo de alta potencia siendo una alternativa más amigable con el medio ambiente [11], por lo tanto, la aplicación de los supercondensadores como sistemas de almacenamiento de energía se debe principalmente a su alta densidad de potencia y alta eficiencia debido a su baja resistencia interna, Esta última característica permite a estos últimos suministrar un alto pico de corriente durante la descarga, pero también puede generar un transitorio de corriente durante el proceso de carga inicial, ya que este fenómeno se refleja como un corto circuito,

por lo tanto, cabe destacar que en estos sistemas el voltaje es directamente proporcional al estado de carga, y en conjunto con la electrónica de potencia permite al supercapacitor operar en un amplio rango de voltaje presentando un largo ciclo de vida con alta eficiencia y una rápida respuesta para la carga o descarga [12].

4. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

A continuación se describe la configuración de la estructura del sistema, que se muestra en la Figura 1.

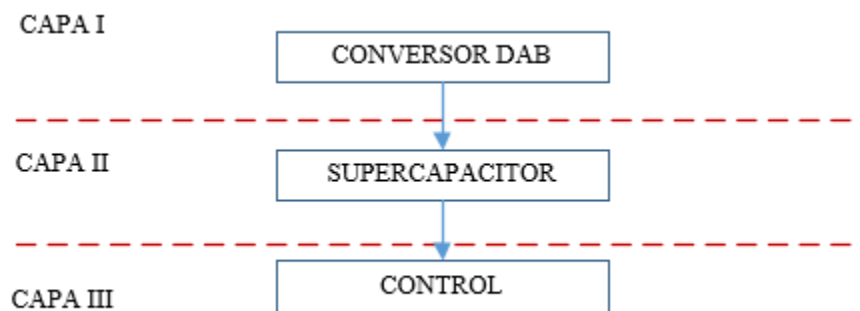


Figura 1: Estructura del sistema

4.1 Conversor DAB

El convertidor de doble puente activo es un convertidor controlable, con una alta densidad de potencia, está compuesto por 8 semiconductores de potencia en dos estructuras de puente en H unidas a través de un transformador de media frecuencia y una bobina de acoplamiento [13].

La magnitud y la dirección del flujo de potencia dependerán del ciclo de trabajo de los transistores, así como del desfase entre ambos y la magnitud de la tensión de salida es función de la relación de transformación del transformador, sin embargo, su principal característica es su bidireccionalidad, ya que permite el flujo de potencia en ambas direcciones [14]. El circuito de un convertidor DAB, se muestra en la Figura 3.

Corriente máxima del sistema, expresada en la ecuación (1)

$$i_{L(\max)} = \frac{(V_1 - V'_2)\pi + 2\phi V_1}{4\pi f_s L} \quad (1)$$

Comportamiento de transferencia de potencia respecto al desfaseamiento, se obtiene de la expresión (2)

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{4}{\pi^2} \phi (\pi - |\phi|) \quad (2)$$

4.2 Sistema de almacenamiento de energía mediante Supercapacitores

Los parámetros esenciales a considerar en un dispositivo de almacenamiento, se basan en cuanta energía puede almacenar y cuán rápido es capaz de entregarla [3], debido a las ventajas que presentan los supercondensadores, con disponibilidad para manejar altos valores de voltaje, corriente y temperatura, carga y descarga en ciclos cortos y relativamente largos con una disponibilidad adicional de mantenimiento óptimo de manera sencilla [15], [16]. El circuito del sistema de almacenamiento de energía por supercondensadores, se muestra en la Figura 3.

- **Variación del almacenamiento de energía:** los valores de tensión se alteran cuando el supercondensador está totalmente cargado o en el nivel mínimo de carga en la ecuación (3).

$$\Delta E = \frac{1}{2} C \left[(V_{0_1})^2 \pm (V_{0_2})^2 \right] \quad (3)$$

Se desea que los parámetros de potencia en el convertidor DAB, como la tensión de entrada y el valor del supercondensador, sean constantes; por lo tanto, la tensión de salida evolucionará en función de la energía del supercondensador [12].

La tensión del supercondensador es la tensión de salida del convertidor, y para alcanzar el nivel de tensión necesario para transferir un nivel de energía, debe variarse el ángulo de diferencia de fase entre los puentes del convertidor, como se expresa en la ecuación (4).

$$\phi_{(t)} = \pm \frac{\pi}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{8f_s LP}{nV_{2(t)}V_1}} \right] \quad (4)$$

- **Carga inicial del supercondensador:** Corriente pico en condiciones iniciales esto se refleja como un cortocircuito por el procedimiento de arranque suave en función del ciclo de trabajo [12], para determinar se utiliza la ecuación (5).

$$I'_{L(0)\max} = \frac{DT_s}{2L} V_1 \quad (5)$$

- **Control PID:** Controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID), la parte proporcional da un cambio a la señal de entrada igual al error de control, la parte integral del controlador aplica un cambio a la entrada igual al error integrado. Su objetivo principal es eliminar el desfase en la respuesta de salida. En cuanto a la parte derivativa, la entrada se modifica en función del error derivado, se utiliza para estabilizar el sistema o acelerar una respuesta. Una versión de expresar la acción de control PID se describe en la ecuación (6).

$$K_p + K_I \alpha_{(z)} + K_D \frac{N}{1 + N\alpha_{(z)}} \quad (6)$$

Donde K_p denotan la ganancia proporcional, K_I la ganancia integral y K_D la ganancia derivada respectivamente, N expresa el coeficiente de filtro e $\alpha_{(z)}$ indica el integrador de tiempo discreto de la planta [17]. El circuito del regulador de tensión PID, se muestra en la Figura 4.

4.3 Simulación del Sistema de Estructura

Generador de pulso del convertor DAB, observe en la Figura 2.

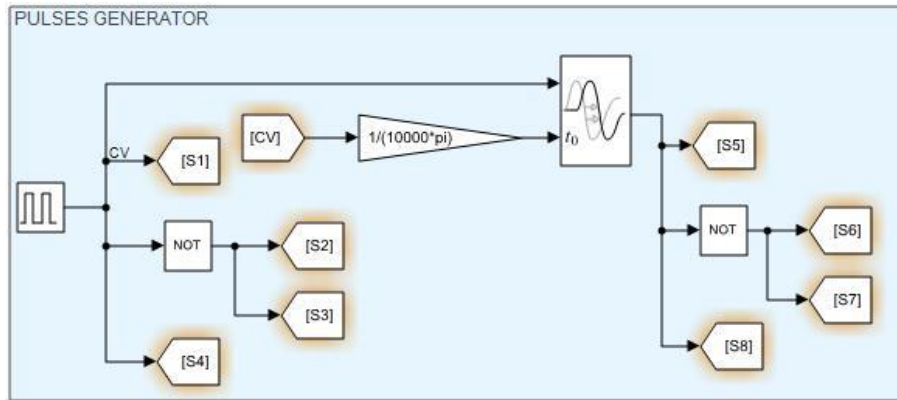


Figura 2: Generador de pulso

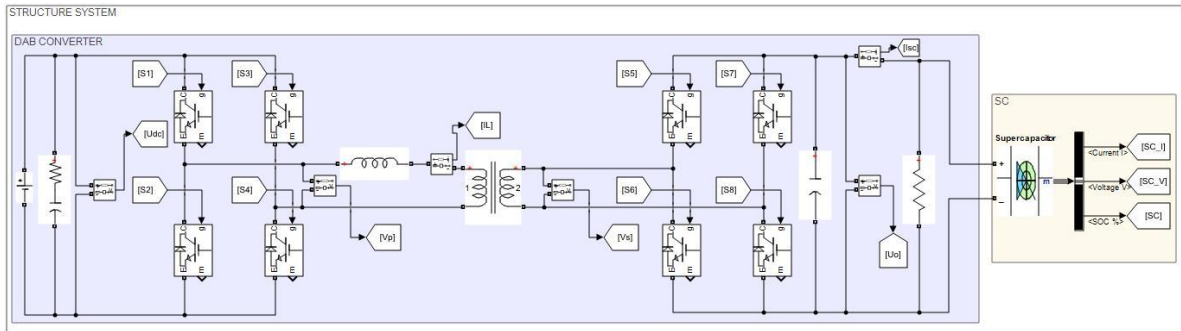


Figura 3: Convertor DAB y Supercapacitor

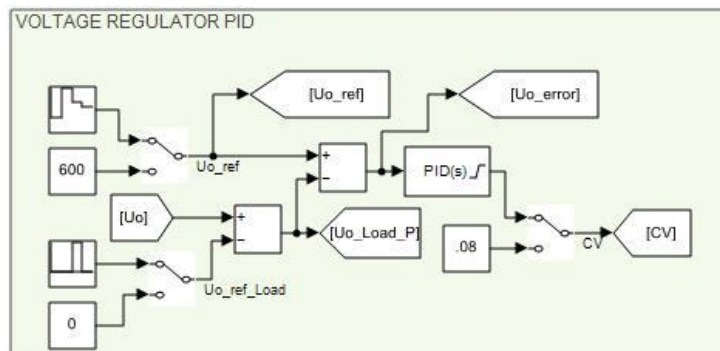


Figura 4: Voltaje regulador PID

5. METODOLOGÍA

5.1 Modelo del conversor DAB en Matlab / Simulink

Para el modelamiento de los parámetros, dimensionamiento, principio de funcionamiento se ha tomado en cuenta como referencia principal [17], por ende, los valores de los elementos son basados en la implementación del mismo circuito.

La topología básica de un DAB se define a partir de dos puentes activos conectados a través de un transformador diseñado para altas frecuencias. Dado que los dos puentes son puentes activos, como su nombre indica, el flujo de potencia puede ser bidireccional. Aunque hay múltiples variaciones para la inversión y rectificación de ondas como las técnicas de Pulse Width Modulation (PWM), la forma más simple es la de generación de ondas cuadradas con un duty cycle del 50%. De esta forma no se añade complejidad al control de la conmutación de los MOSFET, por consecuencia, la imposición de ondas cuadradas en los devanados de los transformadores permite que el tiempo “muerto” o fases en las que la tensión es nula se reducen y, aunque esto puede reducir las pérdidas de conmutación, reduce también la cantidad total de potencia transmitida, como se observa en la Figura 5.

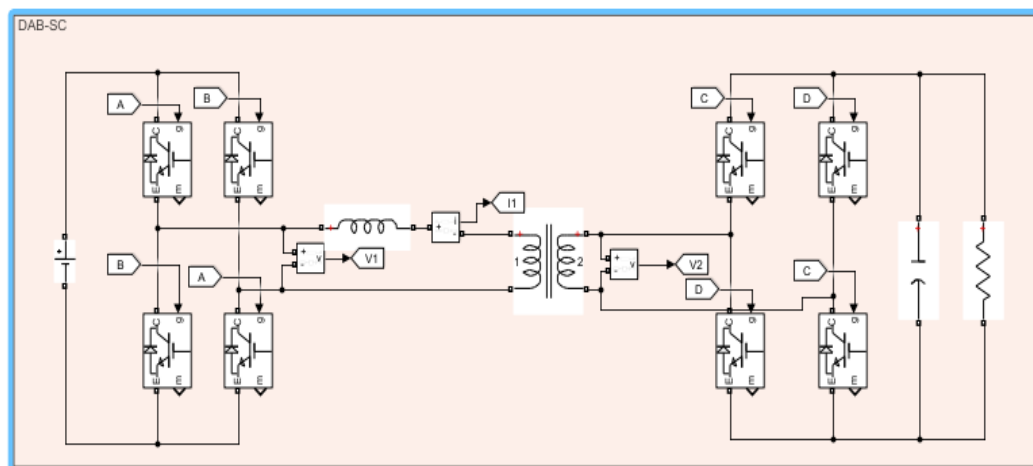


Figura 5: Conversor DAB

- Modelo estático:** el convertidor DAB consta de dos puentes completos en ambos extremos de un transformador, uno en el lado de alta tensión y otro en el lado de Baja tensión estos puentes son activos, y por lo tanto cada uno es capaz de crear una onda cuadrada diferente, que en este caso son de alta frecuencia. Los dos puentes están conectados a través de un transformador y una inductancia de acoplamiento. Esta inductancia puede ser la inductancia de fuga del transformador, o en caso de que se necesite un valor mayor, se debe poner otra en serie con ella. La suma de ambas inductancias se denomina inductancia de acoplamiento controlando adecuadamente los dispositivos de conmutación, las ondas cuadradas de alta frecuencia se desfasan, permitiendo el flujo de potencia de un puente H al otro; la potencia fluye desde el lado con la onda cuadrada más adelantada hacia el lado con la onda cuadrada más retrasada.
- Conmutación por corriente cero (ZCS):** este tipo de conmutación suave basa su funcionamiento en llevar la corriente a 0 antes de cambiar el estado del interruptor, es decir, de encendido a apagado o viceversa. Como se puede ver en la Figura 6, esto da lugar a un solapamiento con corriente cero cuando la tensión es positiva que incurrirá en pérdidas de conmutación.

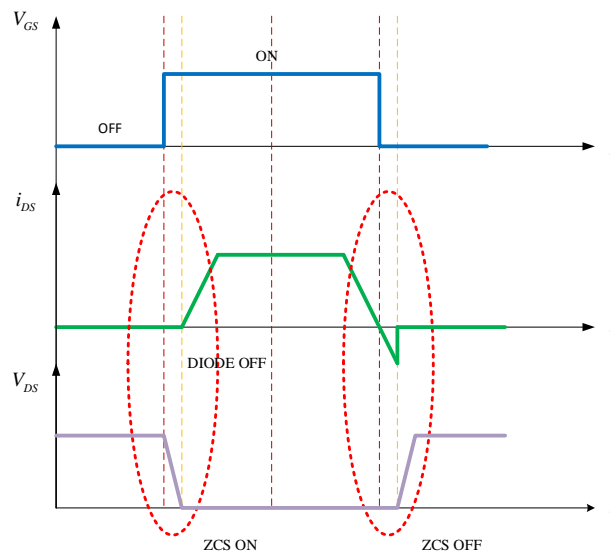


Figura 6: Forma de onda por ZCS

- Conmutación a tensión cero (ZVS):** En consecuencia, una estrategia ZVS indica que la tensión que "ve" el dispositivo de conmutación se pone a 0 antes de encenderse y apagarse a 0 antes de la conexión y desconexión. Del mismo modo la Figura 7, representa gráficamente el concepto. Ahora bien, el solapamiento se produce cuando la tensión es 0 y, por tanto, las pérdidas de conmutación también se reducen a 0 si se trata con componentes ideales.

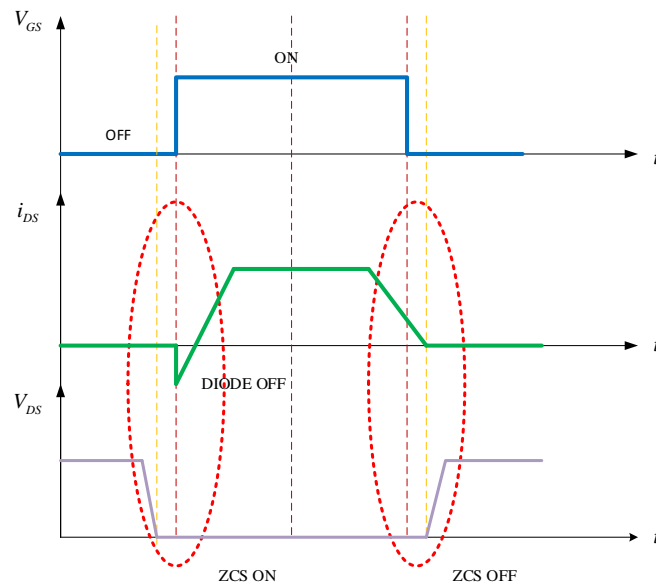


Figura 7: Forma de onda ZVS

La estrategia de conmutación a tensión cero (ZVS) presenta algunas ventajas clave frente a su homóloga, la ZCS. Entre ellas, destaca el hecho de que la mayoría de los dispositivos de conmutación, más concretamente los IGBT y los MOSFET, tienen diodos de cuerpo. Esto significa que en caso de que se obtenga la estrategia ZVS, la carga de recuperación inversa en este diodo de cuerpo no producirá pérdidas añadidas, ya que se despejará a 0[V], lo que significa que no habrá pérdidas de potencia. Además, también cabe mencionar que en caso de utilizar MOSFETs, la existencia de capacitancias parásitas y especialmente la capacitancia drenador-fuente puede actuar como un amortiguador ideal sin pérdidas, sujetando la tensión y haciendo una ZVS no sólo para el interruptor ideal MOSFET sino también para su diodo, esto significa que el ZVS se obtendrá sin pérdidas adicionales ni compromisos significativos.

Un amortiguador es un circuito auxiliar diseñado para proporcionar una vía de escape a una corriente que normalmente debe permanecer constante como en el caso de la existencia de un inductor, esto puede ocurrir cuando un interruptor se apaga y se abre, interrumpiendo el camino natural de la corriente, para no provocar un pico enorme en la tensión, este circuito proporciona un camino para que la corriente vaya. Normalmente, existen circuitos RC que pueden disipar potencia, y a veces con la apariencia de un diodo.

5.2 Principio de funcionamiento

- Modelo del convertor DAB:** las puertas MOSFET se accionan con dos señales por cada puente completo, el pequeño tiempo muerto necesario para ZVS se garantiza operando las señales de puerta con un ciclo de trabajo del 49%, en lugar del 50%, se muestra la señal STOP que se acciona mediante cuatro interruptores y pone a cero las señales de puerta cuando se inicia, esto sirve para simular una parada de emergencia. Los bloques adecuados se seleccionan de la biblioteca Simscape, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Modelo del convertor DAB

NOMBRE	VALOR
Voltaje primario V_p <i>Max/Min</i>	180/90[V]
Voltaje secundario V_s	340[V]
Potencia Nominal P_{nom}	1000[W]
Corriente primaria I_p <i>Max/Min</i>	11.4/5.7[A]
Corriente secundaria I_s	3[A]
Frecuencia f_s	250[kHz]
Ángulo de fase φ	$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$
Relación de giro n	9:17

- **Modos de funcionamiento:** El modelo funciona en dos modos principales: Estabilizar y cargar, antes de poder utilizar el modelo, debe activarse una señal de precarga. Esto iniciará una secuencia de precarga y cargará el condensador; una vez cargado el condensador, el convertidor puede utilizarse y se selecciona el modo deseado.
 - El modo de estabilización utiliza un regulador PID de tensión y pretende mantener una tensión constante de 340 V.
 - El modo de carga se selecciona para cargar el SC mediante una corriente constante.

5.3 Controlador

El control del desfase se consigue mediante un regulador PID, pero por consecuencia la parte derivativa no es necesaria para alcanzar el resultado deseado, los bloques de promediado se seleccionan para filtrar la señal de entrada, mientras que los interruptores se utilizan para elegir entre los dos modos de funcionamiento. Ambos reguladores PI se sintonizan con la aplicación Simulink Auto Tuner. El sintonizador automático es una herramienta integrada que permite un buen equilibrio entre robustez y rendimiento analizando el modelo de la planta. A continuación, interactuando con los controles deslizantes, se puede elegir el tiempo de respuesta de los controles y el comportamiento transitorio. Los valores de ganancia K_p y K_i de los respectivos controladores se muestran en la Tabla 2 .

Tabla 2: Control PI

NOMBRE	K_p	K_i
Voltaje de control	-0.0035	-2.4900
Corriente de control	-0.01	-100

5.4 Parámetros

- **Frecuencia de conmutación:** se pretende utilizar la rápida respuesta eléctrica del Supercondensador SC, por ende, se desea una alta frecuencia de conmutación. El objetivo es obtener una respuesta rápida y neutralizar rápidamente una caída de tensión en el bus de CC. Se ha elegido una frecuencia de 250 kHz.
- **Tiempo de muestreo:** con una frecuencia de conmutación de 250 kHz en el DAB, cada periodo equivale a $4\mu s$, los eventos de la simulación se deciden en tiempo discreto. Según el teorema de Nyquist-Shannon, el tiempo de muestreo de la simulación debe ser al menos dos veces más rápido que la frecuencia del sistema. Debido a que la relación de cambio de fase del modelo se ajusta con pequeños pasos entre $\pm \frac{T_s}{4} = 1\mu s$. Es importante que el muestreo sea muchas veces más rápido que este valor, mediante simulación, se decide que la frecuencia de muestreo tiene que ser de $0.01\mu s$ lo que da al desfase una precisión de 100 pasos tanto en sentido positivo como negativo, con una frecuencia de muestreo de 100 MHz.
- **Inductancia de fuga:** la inductancia de fuga total está directamente relacionada con la cantidad de potencia transferida, se ha decidido que el convertidor sea capaz de suministrar 1 kW de forma continua mientras el SC se descarga hasta 90 V. La inductancia de fuga necesaria es igual a $28.9\mu H$, por lo tanto, el convertidor tendrá una potencia máxima de potencia máxima de 2kW cuando la SC esté totalmente cargada.
La inductancia de fuga total del DAB procede de la inductancia total del transformador y del inductor. El transformador utilizado es un bloque transformador lineal, y sus parámetros. Para el inductor en la salida de los DABs, su inductancia tiene que compensar la inductancia de fuga que falta en el transformador, por lo tanto, la inductancia se adquiere restando la inductancia del transformador de la fuga inductancia.
- **Dimensionamiento:** en las siguientes tablas se observa los diferentes bloques utilizados como modelo en Matlab/ Simulink.

Tabla 3: Supercapacitor Modelo Matlab/Simulink

BLOQUE DEL SUPERCAPACITOR	
NOMBRE	VALOR
Capacidad nominal	5F
ESR DC	230.3m
Tensión nominal	180V
Condensadores en serie	5
Condensadores en paralelo	1
Temperatura de funcionamiento	25° C

Tabla 4: Mosfet Modelo Matlab/Simulink

BLOQUE DEL MOSFET	
NOMBRE	VALOR
Resistencia FET Ron	0.027Ω
Inductancia interna del diodo Lon	0H
Resistencia interna del diodo Rd	0.005Ω
Tensión directa del diodo interno Vf	2V
Resistencia amortiguador Rs	10kΩ
Capacitancia amortiguador Cs	inf F

Tabla 5: Valor comercial SC

Célula supercondensadora Maxwell Referencia: BCAP0360P270S18	
NOMBRE	VALOR
Capacitancia nominal	360F
Tolerancia de capacitancia min/máx.	0 / 20%
ESR DC media/máxima	2,9/3,2 m
Tensión nominal	2.7V
Corriente de fuga máxima	0.75mA
Energía almacena máxima	0.36Wh
Potencia específica utilizable	3.8kW / kg

Tabla 6: Transformador Modelo Matlab/Simulink

BLOQUE DEL TRANSFORMADOR	
NOMBRE	VALOR
Potencia Nominal Pn	2000W
Frecuencia fn	250kHz
Voltaje V1	180V
Resistencia R1	0.0324Ω
Inductancia L1	0.825μH
Voltaje V2	340V
Resistencia R2	0.1156Ω
Inductancia L2	2.9438μH
Resistencia de magnetización	8100Ω
Inductancia de magnetización	0.0051H
Relación de giro	9:17

6. RESULTADOS

6.1 Conversor DAB

Para el análisis en estado estacionario del convertidor, los circuitos primario y secundario de puente completo del transformador pueden sustituirse por un circuito equivalente como fuentes de tensión variables en el tiempo, por lo que se toman las siguientes consideraciones: la tensión de alimentación a la entrada es de valor constante; el supercondensador tiene un valor suficientemente grande, por lo que durante varios periodos de conmutación puede considerarse como una fuente de tensión constante; se desprecian las pérdidas en el circuito así como las capacitancias parásitas; la inductancia de magnetización paralela equivalente es considerablemente mayor que la inductancia externa, por lo que se desprecia.

En el primer gráfico se obtiene la tensión primaria, en el segundo la secundaria y, por último, la corriente que circula por el convertidor DAB cuando trabaja en condiciones estacionarias, véase en la Figura 8.

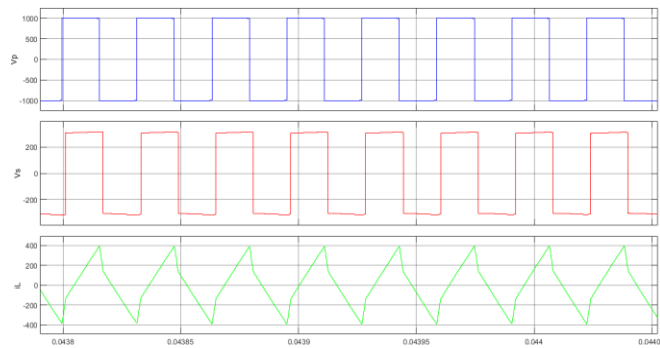


Figura 8: Voltaje y corriente.

6.2 Control PID: lazo cerrado

- **Automático:** el primer gráfico muestra la comparación de la tensión de salida frente a la tensión de referencia del controlador PID, el segundo gráfico muestra la tensión de salida del controlador y finalmente la tensión de error aplicando una perturbación al sistema, ver la Figura 9 y sin perturbar el sistema, ver la Figura 10.

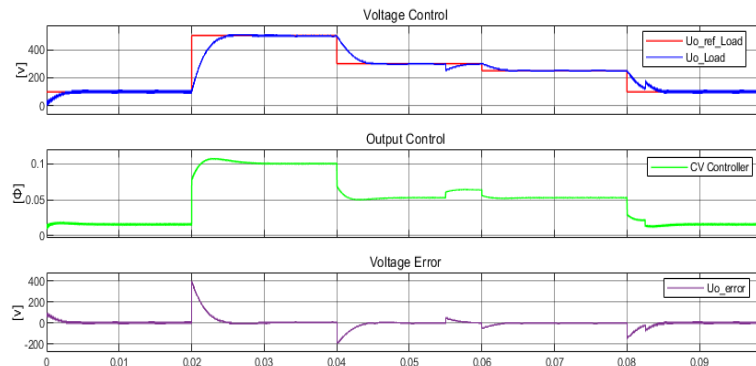


Figura 9: Control PID con perturbación.

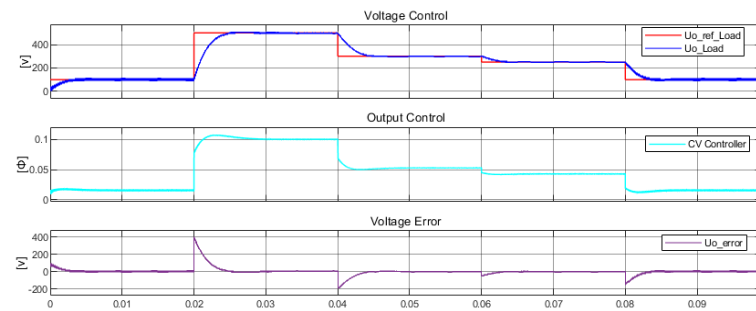


Figura 10: Control PID sin perturbación.

- Manual:** el primer gráfico muestra la comparación de la tensión de salida frente a la tensión de referencia del controlador PID, el segundo gráfico muestra la tensión de salida del controlador y finalmente la tensión de error aplicando una perturbación al sistema y entrada escalón, ver la Figura 11 y sin perturbar el sistema con consigna fija, ver la Figura 12.

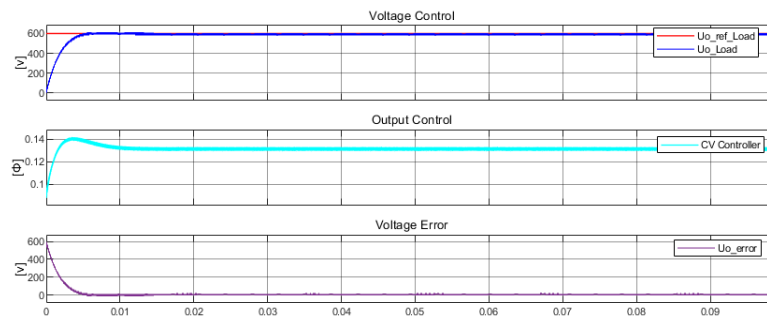


Figura 11: Control PID con perturbación.

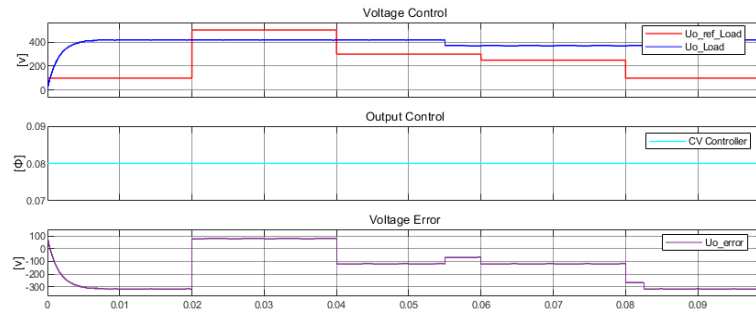


Figura 12: Control PID sin perturbación.

6.3 Sistema lazo abierto

El primer gráfico muestra la comparación de la tensión de salida frente a la tensión de referencia, el segundo gráfico muestra la tensión de salida fija del regulador de 0,8 y, por último, el error de tensión aplicando una entrada escalonada, véase la Figura 13 y con una consigna de 600, véase la Figura 14.

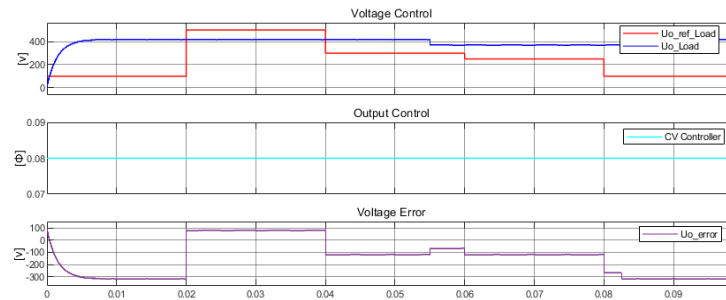


Figura 13: Entrada escalón

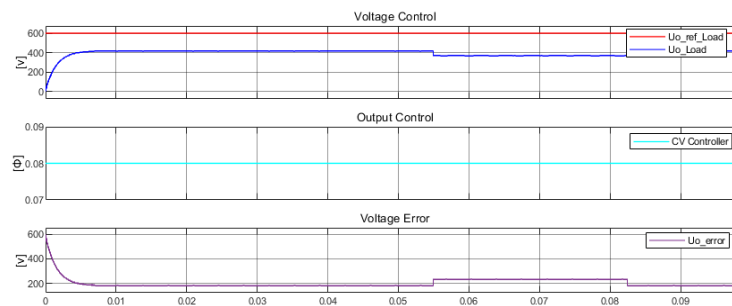


Figura 14: Set point fijo

6.4 Operación del Supercapacitor

El primer gráfico muestra la variación porcentual del supercondensador utilizando el control PID, y el segundo gráfico muestra la variación de tensión cuando se carga y descarga el supercondensador, véase la Figura 15.

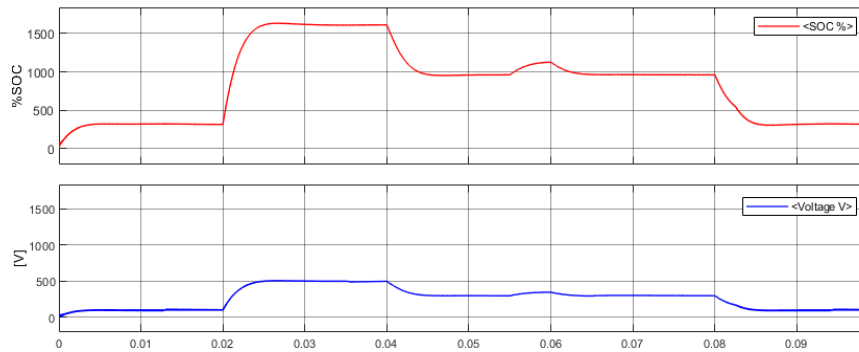


Figura 15: SOC Supercapacitor

Los resultados que se presentan a continuación indican la validez de la utilidad de los sistemas de almacenamiento de energía basados en supercondensadores que utilizan un convertidor DAB. En el método SUS, se suma la valoración de cada ítem, donde el rango más alto es 4 y el más bajo 0, se le da un valor de "1" si cumple el objetivo, pero si no se le da un "0", se centra en medir la fiabilidad de la aplicación para cumplir el propósito para el que fue desarrollada. Para la presentación de los resultados totales, se suma la puntuación final de las 10 preguntas y se multiplica por 2,5 [18].

La encuesta se realizó a 15 participantes estudiantes de ingeniería. El resultado estará dentro del rango de 0 a 100 por ciento, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Metodología SUS

PREGUNTAS	PUNTUACIÓN					VALOR
Desea utilizar la simulación para aprendizaje.				5	10	3,67
Considera que la simulación es compleja e innecesaria.	11	4				3,73
Cree que el uso del Software para la simulación es fácil de utilizar.				5	10	3,67
Necesita un manual o ayuda para utilizar la simulación.	15					4
Cree que las funciones de la simulación están correctamente distribuidas e integradas.			3	1	11	3,53
Hay flexibilidad en el uso de la aplicación.			1	4	10	3,6
Cree que los estudiantes aprenderían a utilizar el software para la simulación.				1	14	3,93
A la hora de utilizar la simulación le resulta difícil	10	4	1			3,6
Considera que la interacción de la simulación es intuitiva y amigable.				5	10	3,67
Cree que necesita tener conocimientos previos para utilizar la simulación.	11	4				3,73
TOTAL						37,13

El total, obtenido de la encuesta, arrojando un resultado de 37.13; se calcula la puntuación SUS, la cual nos permite verificar si la simulación es factible para el manejo y comprensión del control PID para un sistema de almacenamiento de energía basado en Supercondensadores utilizando un convertidor de doble puente activo (DAB), obteniendo un porcentaje de 92.83%, este resultado representa una alta usabilidad para este tipo de herramientas tecnológicas.

Para futuros trabajos de investigación se puede mejorar el convertidor DAB implementando estrategias de modulación, digitalizando el control y utilizando semiconductores estandarizados de última generación para optimizar la respuesta global del sistema.

7. CONCLUSIONES

Mediante simulaciones en Matlab®/Simulink® las características transitorias de las simulaciones tienden a dar una respuesta más rápida y a partir de los resultados se analizan los errores, la variación del porcentaje de carga y descarga del supercondensador.

El comportamiento de la corriente a través del inductor tiene una pendiente negativa en el proceso de carga, debido a que el supercondensador aumenta su nivel de tensión, mientras que en el proceso de descarga la pendiente aumenta debido a que la tensión en el supercondensador disminuye y para evitar el punto crítico en el momento de la descarga es necesario operar en arranque suave, evitando la saturación magnética y los fallos por sobrecarga en los semiconductores.

El proceso de operación en transferencia de potencia constante implica un ajuste continuo del ángulo de desfase, que tiene una relación no lineal con la tasa de energía; en consecuencia, esta relación tiene un comportamiento similar a la dinámica de la tensión en un condensador.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] L. A. Wong and V. Ramachandaramurthy, "Optimal Battery Energy Storage System Placement using Whale Optimization Algorithm," " *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 9, no. 3, pp. 163–170, 2020, doi: 10.18178/ijeetc.9.4.268-272.
- [2] M. Chancusig and C. Edison, "Optimization of electrical distribution network maintenance projects, based on the risk of occurrence of equipment failures at Empresa Eléctrica Cotopaxi S.A.," 2022.
- [3] G. R. Miranda, "Design and development of a supercapacitor module with flexible configuration for increasing discharge time at constant voltage," 2013.
- [4] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, "An overview of the renewable energy in the World, Latin America and Colombia," *Espacios*, vol. 39, no. 34, 2018.
- [5] Y. Lim, E.-T. Chok, K. Chua, and S. Liew, "Innovative Fuzzy Controller on Island Power Systems with Energy Storage and Renewable for Minimum Fuel Consumption," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 7, no. 2, pp. 38–42, 2018, doi: 10.18178/ijeetc.7.2.38-42.
- [6] J. Moreno, "Control of Dual Active Bridges (DABs) in Bidirectional High Power Density Power Systems", Universidad Politécnica de Valencia, 2015. doi: 10.4995/Thesis/10251/61627.
- [7] R. Naayagi, A. Forsyth, and R. Shuttleworth, "Bidirectional control of a dual active bridge DC-DC converter for aerospace applications," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 7, pp. 1104–1118, 2012, doi: 10.1049/iet-pel.2011.0278.
- [8] C. Pillajo, P. Bonilla, and R. Hincapié, "Genetic Algorithm for Tuning PID Integral Based on the absolute error," *Fac. Chem. Sci.*, vol. 13, pp. 1390–1869, 2016.
- [9] F. A. Bolívar-Guerrero, N. L. Díaz, and J. F. Bayona Navarro, "Design and implementation of a digital PID controller with pre-compensation for a half-bridge Boost PFC.," *UIS Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 179–192, 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n1-2020017.
- [10] J. Aguila, C. Chiñas, C. Vargas, J. Sotelo, E. Hurtado, and E. Garcia, "Optimal Tuning of a PID Controller for a DC-DC Trimmer-Lifter Converter Using a Gray Wolf Pack

- Optimization Algorithm,” *e-Gnosis*, vol. 18, no. 0, p. 11, 2020.
- [11] J. Mírez Tarrillo, “Energy storage systems,” *Res. Sci.*, no. 432, pp. 70–77, 2012.
 - [12] A. J. Coronado Vázquez J., Cárdenas V. Aganza Torres A., Álvarez Salas R., “Convertidor Dual-Active-Bridge para Almacenamiento de Energía en Supercondensador,” *Proc. Natl. Autom. Control Congr.*, pp. 448–453, 2016.
 - [13] A. Bandani and F. Barati, “Stable Operation Limits in Dual Active Bridge for SuperCapacitor Applications,” *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, vol. 35, no. 5, pp. 875–882, 2022, doi: 10.5829/ije.2022.35.05b.04.
 - [14] V. Ibáñez, “Modeling and scaled implementation of a closed-loop active double-bridge converter for multiple applications,” p. 76, 2019.
 - [15] E. Méndez, E. Arrobo, and A. Morocho, “Supercapacitors as a contribution to electric energy development, comparative analysis using applied computational simulation tools.,” *Espacios*, vol. 41, 2020.
 - [16] M. Escribano, “Model and control of a supercapacitor bank with converter,” Tecnológico Nacional de México.,” Tecnológico Nacional de México, 2019.
 - [17] M. Reigstad, F. Storebo, and V. Steinsland, “Bidirectional DC-DC Converter for Supercapacitor as DC-bus Stabilization Element,” 2021.
 - [18] J. Sauro and J. Lewis, “When designing usability questionnaires, does it hurt to be positive In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems,” *ACM*, p. . 2215–2224, 2013.

ANEXO
ARTÍCULO
ACADÉMICO

Development of a PID Control for a Supercapacitor-Based Energy Storage System Using a Dual Active Bridge (DAB) Converter

1st Karen Herrera

Faculty of Engineering and Applied Sciences

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga, Ecuador

karen.herrera8200@utc.edu.ec

2nd Ángel Hidalgo

Faculty of Engineering and Applied Sciences

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga, Ecuador

angel.hidalgo@utc.edu.ec

3rd Carlos Quinatoa

Faculty of Engineering and Applied Sciences

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga, Ecuador

carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec

Abstract— This paper focuses on the simulation of a Dual Active Bridge converter (DAB) by applying an open-loop and closed-loop Proportional, Integral and Derivative (PID) control strategy during the charging and discharging process of the supercapacitor-based power system, controlling the voltage output when the converter works in steady state to maintain a constant power transfer over a time span.

Keywords— PID, voltage, output, converter, controlling

I. INTRODUCTION

Nowadays, electricity is a basic and essential need for the development of society itself, which allows the economy of a country to increase according to the energy demand. However, it is not the electrical energy itself that has value for people but the services it provides [1], therefore, the proper integration between renewable sources and storage systems, allows a reasonable use of energy using efficient devices, capable of providing energy, resulting in considerable savings. The importance of storage systems lies in the fact of being able to produce energy from intermittent sources during periods of low demand, and to supply it during periods of high demand or when no other power source is available. Apart from fulfilling functions such as: compensation - load regulation, efficiency, improve the overall performance and quality of the overall system in general [2],[3].

Traditional energy sources based on natural gas, oil and coal have become an important part of the world's economic progress, however, due to their environmental impact and the growing demand for energy, the search for energy alternatives based on renewable sources has been driven [4]. However, energy production from even the most renewable sources is intermittent [5].

The solution proposed from power electronics is the use of converters with special functions, as required, within power interconnection architectures. A first and the most developed approach is the centralized one, where large electric power systems have been implemented based on economies of scale, thus large generation centers with high availability of primary energy, high power transmission systems and distribution

centers located in centers of high concentration of consumers were installed. A second approach is the decentralized one, where electrical energy is obtained from the primary energy available in the consumption center; the decrease in transportation costs, the rational use of electrical energy and the increasing capacity for efficient storage offer an increasingly viable alternative in the integration of renewable energies and the exploitation of small amounts of primary energy [6]. The coexistence of the two approaches, centralized and decentralized, becomes viable to the extent that management strategies are included, so that the incorporation of smaller systems, instead of disturbing the electrical system, contributes to improve the quality of the electrical power present in larger systems [7].

With respect to control strategies at present, and despite the surprising development of control theory and the technological support necessary for its implementation, the PID structure controller is used almost exclusively in the industrial environment worldwide, since it generates a command signal composed of three additive terms which, as its name indicates, are proportional to the error signal, its integral and its derivative, for the selection of these parameters can proceed in different ways depending mainly on the process to be controlled and the information available a priori [8].

However, the assimilation of PID controllers in the industrial field has reached such a degree that allows observing the following: on the one hand, users resist any replacement of the PID controller by controllers that present a different structure however simple and robust it may be, and on the other hand sophisticated adaptive controllers are accepted if they come under a PID packaging [9]. Therefore, this paper will present a PID control strategy during the charging and discharging process of the power system based on supercapacitors, limiting voltage to the maximum rated operating value of the DAB converter, to maintain a constant power transfer over a period and a certain range.

This article is divided into V Sections, including the Introduction, in Section II the problem formulation is described, in Section III the system structure where the detection technique used is described, the system characteristics, in Section IV the

results obtained by using PID control in open and closed loop are presented, and finally in Section V the conclusions are described.

II. FORMULATION OF THE PROBLEM

Power electronics is an essential part of modern technology for renewable energy sources, providing necessary tools to take advantage of new power generation schemes, power electronics converters are used to process electrical energy and allow coupling direct current systems to alternating current systems and vice versa, these are able to operate under different conditions in the electrical system outside ideal parameters, such as frequency, power, voltajes [7], for this reason, PID controllers exert a control action on a system variable, called manipulated variable, to achieve to stay within certain desirable operating limits, ensuring a higher quality of energy at the output of the converter [10].

Energy storage has been a problem of constant scientific and research development over the years, this has allowed to venture into the restructuring of electrical, electronic and mechanical devices, which can store electrical energy in indirect form (batteries) and direct form (capacitors, supercapacitors), these, are essential for the implementation of new technologies that allow the consumption of high power being a more environmentally friendly alternative [11], therefore, the application of supercapacitors as energy storage systems is mainly due to its high power density and high efficiency due to its low internal resistance, This last characteristic allows the latter to supply a high current peak during discharge, but it can also generate a current transient during the initial charging process, since this phenomenon is reflected as a short circuit, therefore, it should be noted that in these systems the voltage is directly proportional to the state of charge, and in conjunction with the power electronics allows the supercapacitor to operate in a wide voltage range by presenting a long life cycle with high efficiency and a fast response for charging or discharging [12].

III. SYSTEM STRUCTURE

The following item describes the configuration of the System structure, shown in the Fig. 1.

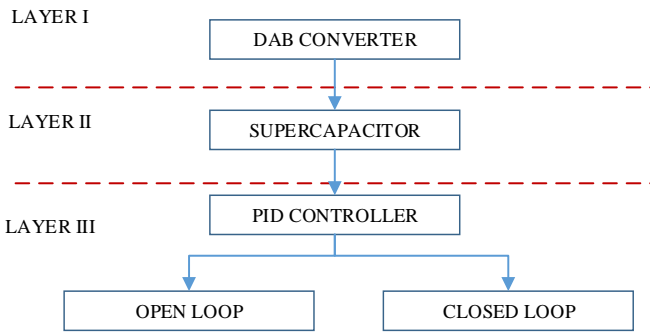


Fig. 1. System structure

A. DAB Converter

The Dual Active Bridge converter is a controllable converter, with a high power density, is composed of 8 power semiconductors in two H-bridge structures linked through a half-frequency transformer and a coupling coil [13]. The

magnitude and direction of the power flow will depend on the duty cycle of the transistors, as well as the phase shift between the two and the output voltage magnitude is a function of the transformer transformer ratio, however, its main feature is its bidirectionality, since it allows power flow in both directions [14]. The circuit of a DAB converter, show Fig. 3.

Maximum system current, expressed into equation (1).

$$i_{L(\max)} = \frac{(V_1 - V'_2)\pi + 2\phi V_1}{4\pi f_s L} \quad (1)$$

Power transfer behavior with respect to phase shift is obtained from expression (2).

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{4}{\pi^2} \phi(\pi - |\phi|) \quad (2)$$

B. Supercapacitor Energy Storage System

The essential parameters to consider in a storage device, are based on how much energy it can store and how fast it is able to deliver it [3], due to the advantages that supercapacitors present, with availability to handle high values of voltage, current and temperature, charge and discharge in short and relatively long cycles with an additional availability of optimal maintenance in a simple way [15], [16]. The circuit of the supercapacitor energy storage system, show Fig. 3

- a. *Energy storage variation:* voltage values are altered when the supercapacitor is fully charged or at minimum charge level into equation (3).

$$\Delta E = \frac{1}{2} C \left[(V_{0_1})^2 \pm (V_{0_2})^2 \right] \quad (3)$$

It is desired that the power parameters in the DAB converter such as the input voltage and the value of the supercapacitor are constant; therefore, the output voltage will evolve according to the energy of the supercapacitor [12].

The voltage of the supercapacitor is the output voltage of the converter, and to achieve the voltage level required to transfer a level of energy, the phase difference angle between the bridges of the converter must be varied, as expressed into equation (4).

$$\phi_{(t)} = \pm \frac{\pi}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{8f_s LP}{nV_{2(t)}V_1}} \right] \quad (4)$$

- b. *Initial load of the supercapacitor:* Peak current at initial conditions this is reflected as a short circuit by the soft start procedure as a function of duty cycle [12], to determine is used equation (5).

$$I'_{L(0)\max} = \frac{DT_s}{2L} V_1 \quad (5)$$

C. PID Control

Proportional, Integral and Derivative (PID) controller, the proportional part gives a change to the input signal equal to the

control error, the integral part of the controller applies a change to the input equal to the integrated error.

Its main purpose is to eliminate the offset in the output response. As for the derivative part, the input is changed according to the derived error, it is used to stabilize the system or accelerate a response. One version of expressing the PID control action is described into equation(6).

$$K_P + K_I \alpha_{(z)} + K_D \frac{N}{1 + N \alpha_{(z)}}, \quad (6)$$

Where K_P, K_I, K_D denote the proportional gain, integral gain and derivative gain respectively, expresses the filter coefficient and $\alpha_{(z)}$ indicates the discrete time integrator of the plant [17].

The circuit of voltage regulator PID, show Fig. 4.

D. Simulation of the System Structure

Pulse generator for the DAB converter, show Fig. 2.

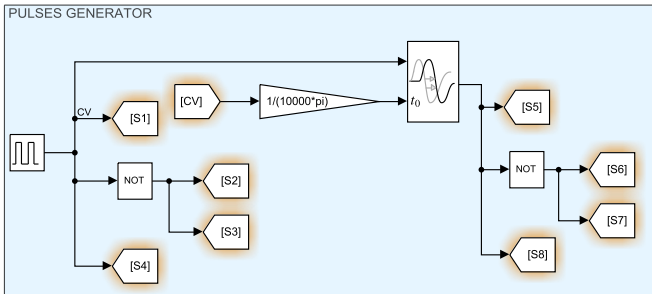


Fig. 2. Pulse generator

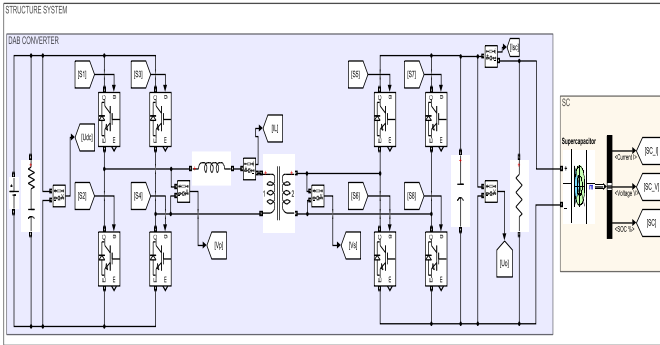


Fig. 3. DAB converter and Supercapacitor

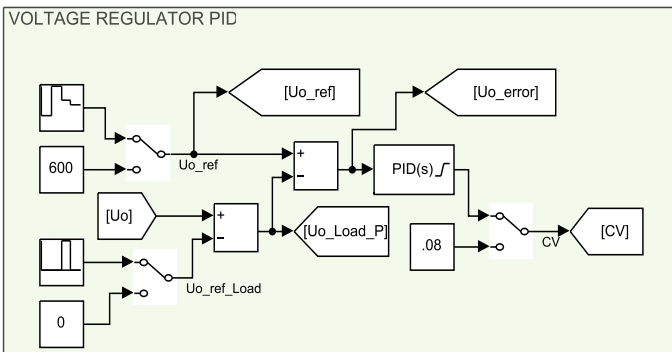


Fig. 4. Voltage regulator PID

IV. RESULTS

A. Converter DAB

For the steady-state analysis of the converter, the transformer primary and secondary full-bridge circuits can be replaced by an equivalent circuit as time-varying voltage sources, therefore, the following considerations are taken: the supply voltage at the input is of constant value; the supercapacitor is large enough in value, therefore, during several switching periods it can be considered as a constant voltage source; the losses in the circuit as well as the parasitic capacitances are neglected; the equivalent parallel magnetization inductance is considerably larger than the external inductance so it is neglected.

In the first graph the primary voltage is obtained, in the second graph the secondary voltage and finally the current flowing in the DAB converter when working in stationary conditions, see Fig. 5.

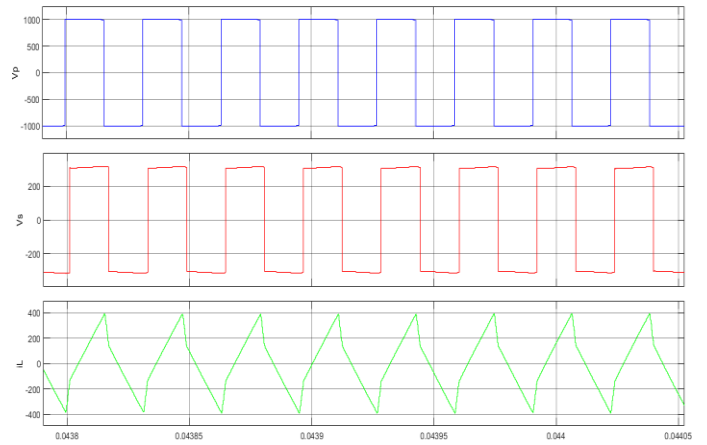


Fig. 5. Voltage and current

B. PID Control: Closed Loop

a. *Automatic:* the first graph shows the comparison of the output voltage vs. the reference voltage of the PID controller, the second graph shows the controller output voltage and finally the error voltage by applying a perturbation to the system, see Fig. 6 and without perturbing the system, see Fig. 7.

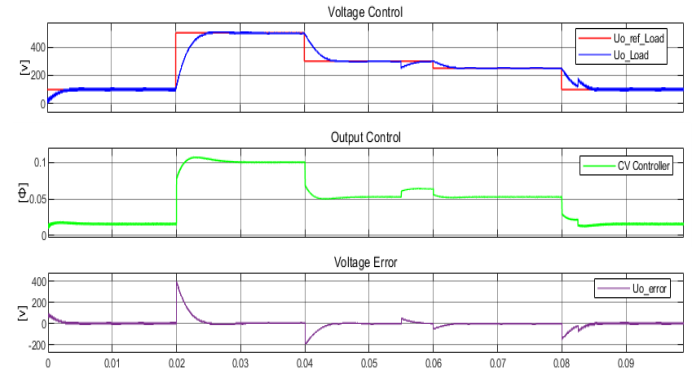


Fig. 6. PID control with disturbance

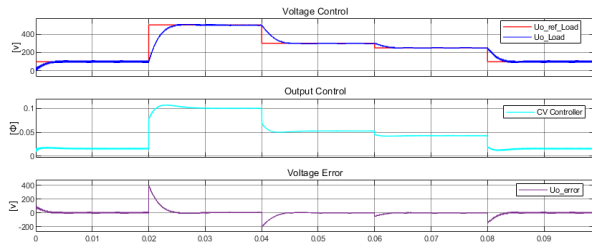


Fig. 7. PID control without disturbance

b. *Manual*: the first graph shows the comparison of the output voltage versus the reference voltage of the PID controller, the second graph shows the output voltage of the controller and finally the error voltage by applying a perturbation to the system and step input, see Fig. 8 and without perturbing the system with a fixed set point, see Fig. 9.

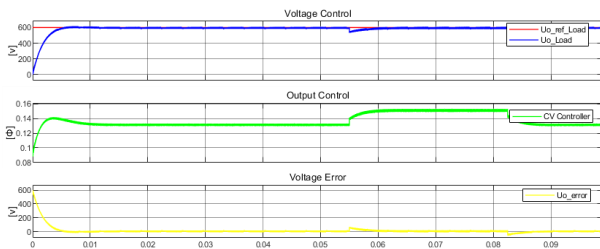


Fig. 8. PID control with disturbance

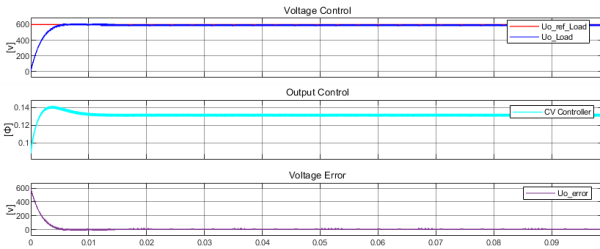


Fig. 9. PID control without disturbance

C. PID Control : Open Loop

The first graph shows the comparison of the output voltage versus the reference voltage, the second graph shows the fixed controller output voltage of 0.8 and finally the voltage error applying a step input, see Fig. 10 and with a set point of 600, see Fig. 11.

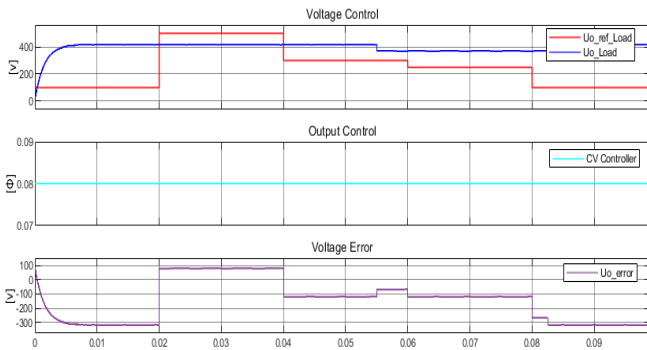


Fig. 10. Entrance step

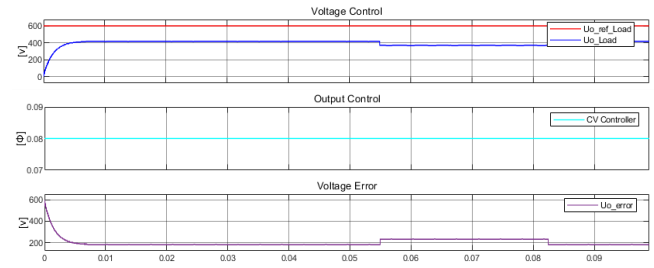


Fig. 11. Fixed set point

D. Supercapacitor Operation

The first graph shows the percentage variation of the supercapacitor using PID control, and the second graph shows the voltage variation when the supercapacitor is charged and discharged, see Fig. 12.

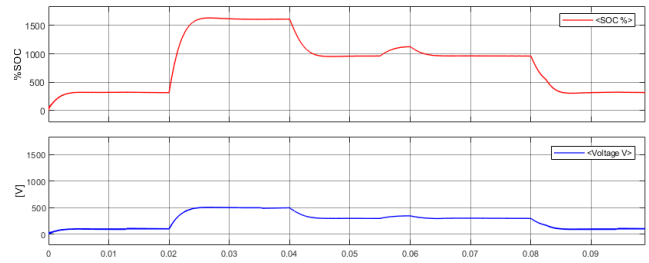


Fig.12. Supercapacitor charge/discharge variation

The results presented below indicate the validity of the utility of supercapacitor-based energy storage systems using a DAB converter. In the SUS method, the assessment of each item is added, where the highest range is 4 and the lowest 0, a value of "1" is given if it meets the objective, but if it is not given a "0", it focuses on measuring the reliability of the application to meet the purpose for which it was developed. For the presentation of the total results, the final score of the 10 questions, is added up and multiplied by 2.5 [18].

The survey conducted with 15 participants who are engineering students. The result will be within the range of 0 to 100 percentage, as shown in Table I.

TABLE I. RESULTS OBTAINED FROM THE SURVEY.

Questions	Score				Operation	
Wants to use simulation for learning.			5	10	3,67	
Considers simulation to be complex and unnecessary.	11	4			3,73	
Believes that using the software for simulation is easy to use.			5	10	3,67	
You need a manual or help to use the simulation.	15				4	
Believes that the functions of the simulation are well distributed and integrated.			3	1	11	3,53
There is flexibility in the use of the application.			1	4	10	3,6

You think that students would learn to use the software for simulation.				1	14	3,93
He finds it difficult to use the simulation.	10	4	1			3,6
He considers that the interaction of the simulation is intuitive and user friendly.				5	10	3,67
He thinks that he needs to have previous knowledge to use the simulation.	11	4				3,73
TOTAL						37,13

The total, obtained from the survey, yielding a result of 37.13; the SUS score is calculated, which allows us to verify if the simulation is feasible for the management and understanding of the PID control for an energy storage system based on Supercapacitors using a double active bridge (DAB) converter, obtaining a percentage of 92.83%, this result represents a high usability for this type of technological tools.

For future research work the DAB converter can be improved by implementing modulation strategies, digitizing the control and using standardized state-of-the-art semiconductors to optimize the overall system response

V. CONCLUSIONS

Through simulations in Matlab®/Simulink® the transient characteristics of the simulations tend to give a faster response and from the results the errors, the variation of the percentage of charge and discharge of the supercapacitor are analyzed.

The behavior of the current through the inductor has a negative slope in the charging process, because the supercapacitor increases its voltage level, while in the discharge process the slope increases because the voltage in the supercapacitor decreases and to avoid the critical point at the time of discharge is necessary to operate in soft start, avoiding magnetic saturation and overload failures in the semiconductors.

The process of constant power transfer operation involves a continuous adjustment of the phase shift angle, which has a nonlinear relationship with the energy rate; consequently, this relationship has a behavior similar to the dynamics of the voltage in a capacitor.

REFERENCES

[1] L. A. Wong and V. Ramachandaramurthy, "Optimal Battery Energy Storage System Placement using Whale Optimization Algorithm," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 9, no. 3, pp. 163–170, 2020, doi: 10.18178/ijeetc.9.4.268-272.

[2] M. Chancusig and C. Edison, "Optimization of electrical distribution network maintenance projects, based on the risk of occurrence of equipment failures at Empresa Eléctrica Cotopaxi S.A.," 2022.

[3] G. R. Miranda, "Design and development of a supercapacitor module with flexible configuration for increasing discharge time at constant voltage," 2013.

[4] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, "An overview of the renewable energy in the World, Latin America and Colombia," *Espacios*, vol. 39, no. 34, 2018.

[5] Y. Lim, E.-T. Chok, K. Chua, and S. Liew, "Innovative Fuzzy Controller on Island Power Systems with Energy Storage and Renewable for Minimum Fuel Consumption," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 7, no. 2, pp. 38–42, 2018, doi: 10.18178/ijeetc.7.2.38-42.

[6] J. Moreno, "Control of Dual Active Bridges (DABs) in Bidirectional High Power Density Power Systems", Universidad Politécnica de Valencia, 2015. doi: 10.4995/Thesis/10251/61627.

[7] R. Naayagi, A. Forsyth, and R. Shuttleworth, "Bidirectional control of a dual active bridge DC-DC converter for aerospace applications," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 7, pp. 1104–1118, 2012, doi: 10.1049/iet-pel.2011.0278.

[8] C. Pillajo, P. Bonilla, and R. Hincapié, "Genetic Algorithm for Tuning PID Integral Based on the absolute error," *Fac. Chem. Sci.*, vol. 13, pp. 1390–1869, 2016.

[9] F. A. Bolívar-Guerrero, N. L. Díaz, and J. F. Bayona Navarro, "Design and implementation of a digital PID controller with pre-compensation for a half-bridge Boost PFC.," *UIS Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 179–192, 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n1-2020017.

[10] J. Aguila, C. Chiñas, C. Vargas, J. Sotelo, E. Hurtado, and E. Garcia, "Optimal Tuning of a PID Controller for a DC-DC Trimmer-Lifter Converter Using a Gray Wolf Pack Optimization Algorithm," *e-Gnosis*, vol. 18, no. 0, p. 11, 2020.

[11] J. Mírez Tarrillo, "Energy storage systems," *Res. Sci.*, no. 432, pp. 70–77, 2012.

[12] A. J. Coronado Vázquez J., C. Ardenas V. Aganza Torres A., Álvarez Salas R., "Convertidor Dual-Active-Bridge para Almacenamiento de Energía en Supercondensador," *Proc. Natl. Autom. Control Congr.*, pp. 448–453, 2016.

[13] A. Bandani and F. Barati, "Stable Operation Limits in Dual Active Bridge for SuperCapacitor Applications," *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, vol. 35, no. 5, pp. 875–882, 2022, doi: 10.5829/ije.2022.35.05b.04.

[14] V. Ibáñez, "Modeling and scaled implementation of a closed-loop active double-bridge converter for multiple applications," p. 76, 2019.

[15] E. Méndez, E. Arrobo, and A. Morocho, "Supercapacitors as a contribution to electric energy development, comparative analysis using applied computational simulation tools.," *Espacios*, vol. 41, 2020.

[16] M. Escribano, "Model and control of a supercapacitor bank with converter," Tecnológico Nacional de México., Tecnológico Nacional de México, 2019.

[17] M. Reigstad, F. Storebo, and V. Steinsland, "Bidirectional DC-DC Converter for Supercapacitor as DC-bus Stabilization Element," 2021.

[18] J. Sauro and J. Lewis, "When designing usability questionnaires, does it hurt to be positive In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems," *ACM*, p. 2215–2224, 2013.