



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA.

ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, DE COMPUTADORES Y SISTEMAS.

DISEÑO DEL CARGADOR DE BATERÍAS DE UN KIT DE GENERACIÓN PORTÁTIL PARA LA ELECTRIFICACIÓN PARA ZONAS RURALES EN ÁFRICA SIN ACCESO A LA RED ELÉCTRICA

D. Uría López, Mario
TUTOR: D. Navarro Rodríguez, Ángel
COTUTOR: D. Blanco Charro, Cristian

Julio 2022

*A mi novia por apoyarme siempre y a
mi familia por estar ahí cuando más la
necesito.*

MEMORIA

Índice de contenido

1.	Motivación y ámbito.....	7
2.	Introducción.....	9
3.	Hipótesis de partida y alcance	11
	3.1.- HIPÓTESIS DE PARTIDA	11
	3.2.- ALCANCE.....	11
4.	Objetivos concretos y estado del arte	12
	4.1.- OBJETIVOS CONCRETOS.....	12
	4.2.- ESTADO DEL ARTE.....	12
	4.2.1.- Soluciones de electrificación en regiones en vías de desarrollo.	12
	4.2.2.- Topología del Energy Kiosk	13
	4.2.3.- Importancia del Battery Pack	14
	4.2.4.- Topología del Battery Pack:	14
	4.2.5.- Elección y dimensionamiento de las baterías.....	16
	4.2.6.- Elección y topología del convertidor bidireccional	17
5.	Metodología de trabajo.....	20
6.	Trabajo realizado y resultados.....	22
	6.1.- CÁLCULOS DEL CONVERTIDOR DAB	22
	6.1.1.- Tensiones a la salida de los inversores en valor eficaz	22
	6.1.2.- Desfases máximo y mínimo entre las tensiones del bus y de la batería.....	23
	6.1.3.- Tensiones en la bobina	23
	6.1.4.- Inductancia y corrientes	23
	6.1.5.- Transformador.....	24
	6.1.6.- Inductancia magnetizante.....	25
	6.1.7.- Pérdidas en los MOSFET	25
	6.2.- IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA EN PLECS	27
	6.3.- LAZO DE CONTROL DE POTENCIA PLECS	27

6.4.- LAZO DE CONTROL DE TENSIÓN PLECS	29
6.5.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN PLECS	31
6.6.- DISCRETIZACIÓN DEL REGULADOR DE TENSIÓN.....	40
6.7.- CONTROL DEL LAZO DE TENSIÓN Y POTENCIA EN PLECS CON REGULADOR DISCRETIZADO	43
7. Conclusiones y trabajos futuros.....	49
7.1.- CONCLUSIONES	49
7.2.- TRABAJOS FUTUROS	49
8. Bibliografía.....	52

Índice de figuras

Figura 1.1: Diagrama de sectores de la población mundial sin acceso a electricidad en sus hogares [1]	7
Figura 1.2: Estación de carga en Chalowka.[2].....	8
Figura 2.1: Diagrama de bloques.....	9
Figura 4.2.2.1: Diagrama conceptual del Energy Kiosk [1].....	13
Figura 4.2.4.1: Diagrama conceptual del Battery Pack.	14
Figura 4.2.4.2: Topología 1 del Battery Pack.....	14
Figura 4.2.4.3: Topología 2 del Battery Pack.....	15
Figura 4.2.4.4: Topología 3 del Battery Pack.....	15
Figura 4.2.5: Batería seleccionada.....	17
Figura 4.2.6.1: Esquema del convertidor bidireccional DC-DC [6].....	18
Figura 4.2.6.2: Topología del puente activo dual monofásico. DAB [7].	18
Figura 5.1: Diagrama de Gantt del proyecto	21
Figura 6.2.1: Esquema de la planta en PLECS.....	27
Figura 6.3.1: Lazo de control de potencia en PLECS (I).	28
Figura 6.3.2: Lazo de control de potencia en PLECS (II).	28
Figura 6.3.3: Lazo de control de potencia en PLECS (III).....	28
Figura 6.4.1: Diagrama de bloques para el control de tensión.	29
Figura 6.4.3: Esquema del lazo de control de tensión en PLECS (II).....	31
Figura 6.5.1: Esquema de la planta en PLECS con medidores.	32
Figura 6.5.2: Tensión en el lado del primario (I).....	33
Figura 6.5.3: Tensión en el lado del primario (II).	33
Figura 6.5.4: Corrientes en el lado del primario (I).....	34
Figura 6.5.5: Corrientes en el lado del primario (II).	34
Figura 6.5.6: Tensión, corriente y potencia en el lado del secundario, sin cargas adicionales.	36
Figura 6.5.7: Desfase en el secundario, sin cargas adicionales.	37

Figura 6.5.8: Tensión, corriente y potencia en el lado del secundario, con cargas adicionales.	38
Figura 6.5.9: Comparación de la potencia de referencia con la potencia controlada.	39
Figura 6.5.10: Desfase en el secundario, con cargas adicionales.	40
Figura 6.6.1: Diagrama de bloques.	41
Figura 6.6.2: Regulador de tensión discretizado en PLECS.	42
Figura 6.6.3: Comparación en la respuesta de reguladores discretizados en PLECS.	42
Figura 6.6.4: Comparación en la respuesta de reguladores discretizados en PLECS (zoom). .	43
Figura 6.7.1: Esquema del lazo de control de tensión con regulador discretizado.	43
Figura 6.7.2: Comparación de la potencia de referencia con la potencia controlada, con regulador.	44
Figura 6.7.3: Tensión, corriente y potencia, con cargas adicionales y regulador discretizado.	45
Figura 6.7.4: Desfase en el secundario, con cargas adicionales y regulador discretizado.	46
Figura 6.8.1: Control del sistema en SIMULINK.	46
Figura 6.8.2: Planta en PLECS con entradas y salidas de control en SIMULINK.	47
Figura 6.8.3: Lazo de control de potencia implementado en SIMULINK.	47
Figura 6.8.4: Lazo de control de tensión implementado en SIMULINK, con regulador discretizado.	48
Figura 7.2.1: Esquema de la simulación mediante Hardware In The Loop.	51

Listado de abreviaturas y símbolos

A	Corriente en Amperios
DAB	Dual Active Bridge
DC	Corriente continua
kg	Kilogramos
kHz	kilohercios
HIL	Hardware in the Loop
m	metros
mm	milímetros
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse width Modulation
s	segundos
T	Teslas
V	Voltios
Ω	ohmios
μH	Microhenrios

1. Motivación y ámbito

La extensión de la electrificación de la red a las zonas rurales ha demostrado ser un gran problema en gran parte del África subsahariana. Dado que, debido a la continua y rápida urbanización de la región y las crecientes limitaciones de gasto estatal, los gobiernos se han visto obligados en gran medida a centrarse en desafíos como mantener y expandir el servicio basado en redes urbanas y, como resultado, el problema aún más difícil de la electrificación rural ha permanecido, efectivamente, sin abordar como se muestra en la *Figura 1.1*.

Población mundial sin acceso a electricidad en sus hogares

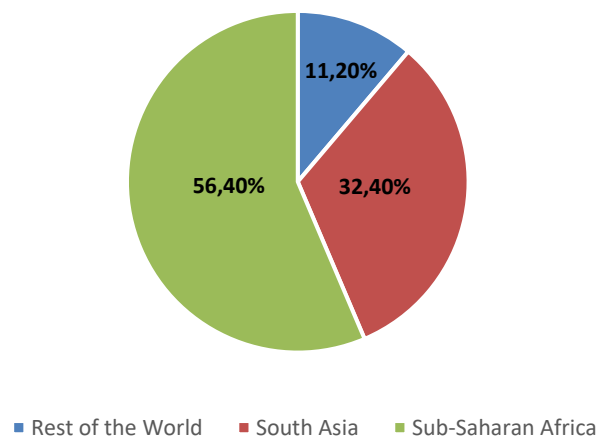


Figura 1.1: Diagrama de sectores de la población mundial sin acceso a electricidad en sus hogares [1]

Ante esta situación se argumentó que, para lograr la electrificación rural, los planificadores de energía tienen necesidad de buscar nuevos enfoques fuera del modelo tradicional, expandiendo las redes convencionales. Al mismo tiempo, la mejora de la asequibilidad de tecnologías fotovoltaicas y otras opciones de energía renovable ha presentado una nueva y crítica gama de opciones para llevar electricidad a comunidades remotas (y no tan remotas). Además, y particularmente en el contexto de preocupaciones crecientes sobre el cambio climático, la energía renovable modular y las tecnologías que la acompañan han ganado un atractivo cada vez mayor como tecnologías de "leap-frog", manteniendo la promesa de eludir los enfoques convencionales basados en redes.

Entre las diversas soluciones al problema de la difusión que se han explorado, un enfoque particularmente importante ha sido la creación de estaciones de carga de energía solar, como la mostrada en la *Figura 1.2*:



Figura 1.2: Estación de carga en Chalowka.[2]

Pequeños quioscos de aldea electrificados con módulos fotovoltaicos que actúan como centros de recarga de móviles, linternas, bombillas y otros pequeños artículos eléctricos. Ofrecen un funcionamiento modelo que se basa en principios económicos relativamente sólidos, pero que también es lo suficientemente flexible como para adaptarse a diferentes contextos locales. No obstante, aunque estos sistemas descentralizados se han probado durante las últimas tres décadas, solo ha sido en los últimos años, con un aumento de atención mundial a las relaciones entre la reducción de la pobreza y mitigación del cambio climático, que el enfoque ha ganado prominencia generalizada.

Gracias a estas estaciones de carga, se podrá obtener energía y transportarla con un Battery Pack, mediante el cual, los usuarios podrán tener en sus hogares una fuente de energía almacenada, para satisfacer las necesidades más básicas, como por ejemplo, disponer de luz en sus viviendas. Cuando este pack de baterías se agote, no tendrán más que llevarlo de nuevo a estos quioscos de aldea, para volver a cargarlo y poder usarlo de nuevo en sus casas.

2. Introducción

El presente proyecto se centra, en un primer instante, en el diseño y simulación de la etapa de continua de un Battery Pack, para ello se abordarán los siguientes bloques:

Dimensionamiento de las baterías, en el cual, se seleccionan dichas baterías en función del sistema a diseñar y de factores clave como la tensión de red, la potencia máxima del sistema, la temperatura de trabajo, el tiempo de uso o el tiempo de carga de las mismas.

En una segunda parte se estudia y recoge la topología del sistema, en este caso, un estudio y control del convertor DC-DC bidireccional, más en concreto, el puente activo dual monofásico, ya que sus características permiten la incorporación de fuentes de energías alternativas y renovables de diferentes niveles de tensión, así como propuestas de nuevas arquitecturas de diseño distribuidas y no solo centradas en los sistemas de potencia.

Finalmente, se aborda el control del sistema, el cual, se ha realizado de manera jerárquica, es decir, en un primer instante se ha realizado la planta, una vez asentados todos los parámetros de la planta en funcionamiento, se ha implementado el lazo de control más interno del diagrama de bloques, el control de potencia para modificar el desfase. Una vez asegurado el funcionamiento de este bloque, se ha procedido a realizar el control de tensión. Con todos los lazos de control en activo, se analizan los resultados y se prepara al sistema para la simulación en Hardware In The Loop como un objetivo futuros. El diagrama de bloques genérico del sistema se puede observar en la *Figura 2.1*.

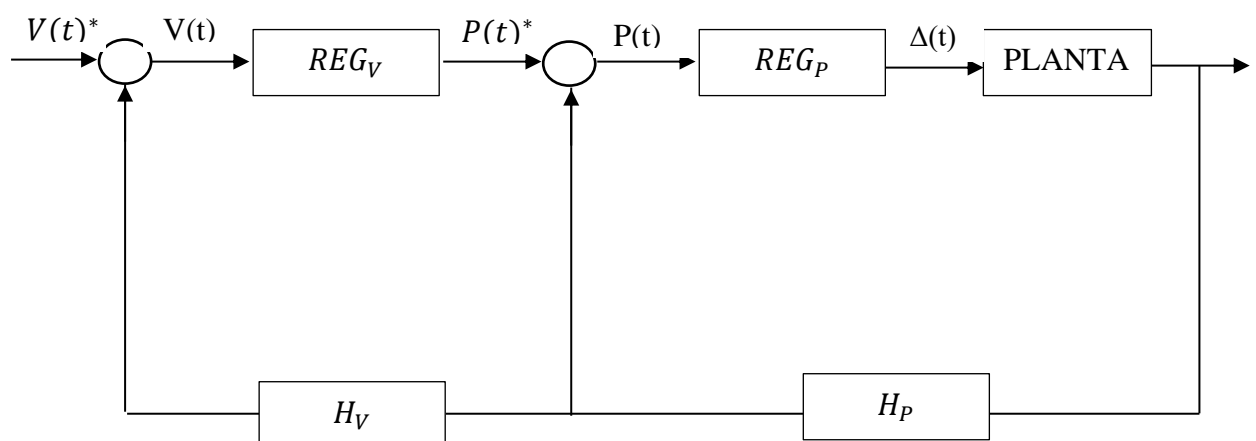


Figura 2.1: Diagrama de bloques.

Donde, las variables del diagrama simbolizan:

$V(t)^*$ Tensión de referencia en función del tiempo.

$V(t)$ Tensión controlada en función del tiempo.

$P(t)^*$ Potencia de referencia en función del tiempo.

$P(t)$ Potencia controlada en función del tiempo.

$\Delta(t)$ Desfase en función del tiempo.

REG_V Regulador de tensión.

REG_P Regulador de potencia

H_P Sensor de potencia.

H_V Sensor de tensión.

Los sensores de potencia y tensión se consideran que no tienen dinámica, así pues, toman un valor de 1.

3. Hipótesis de partida y alcance

3.1.- HIPÓTESIS DE PARTIDA

Con la creciente tendencia a desarrollar fuentes de energía autosostenibles y limpias, la integración de los Sistemas de Almacenamiento de Carga es la clave para mantener una red y protegerla contra fluctuaciones de energía, lo cual genera una gran preocupación por la inclusión de una energía eficiente y totalmente controlable para permitir un paso intermedio.

El convertidor Dual-Active-Bridge (DAB) proporciona un control total, así como aislamiento galvánico. La conversión aislada de corriente continua es crítica en este proceso, ya que se procederá a vincular puertos en el convertidor DAB, para facilitar la integración de sistemas de energía adicionales.

La elección de esta topología ha sido en base a que es uno de los sistemas que ofrece mejor densidad de potencia, así como un tamaño y peso reducidos. Se estudia entonces en este trabajo un DAB para satisfacer las necesidades de un convertidor DC-DC bidireccional con fines de almacenamiento, capacidad de operación en serie, alta densidad de potencia y rápida respuesta dinámica y peso reducido.

3.2.- ALCANCE

La modularidad del DAB para la operación en serie se plantea desde la concepción de un lazo de control de tensión y un lazo de control de potencia.

Para este convertidor, tanto la parte que se refiere al control, como la planta, serán simulados a través de PLECS y Simulink, para, en futuros trabajos, realizar una implementación Hardware-in-the-Loop (HIL) del sistema.

Así pues, el diseño ha sido validado mediante la construcción y experimentación de un prototipo de potencia nominal 1 KW con una frecuencia de conmutación de 100 kHz.

4. Objetivos concretos y estado del arte

4.1.- OBJETIVOS CONCRETOS

El enfoque principal de este proyecto es caracterizar el convertidor DAB y validar su funcionamiento dentro del Battery Pack, para la aplicación especificada. Este estudio espera llegar a un diseño óptimo para resolver cualquier problema de implementación que surja. Los objetivos fundamentales que guían este trabajo pueden enumerarse así:

- Elección y dimensionamiento de las baterías en función de las características del convertidor y de factores clave, como la temperatura de trabajo o el tiempo de uso.
- Análisis de la topología del convertidor DAB. Este análisis debería caracterizar las expresiones fundamentales de operación y, además, permitir una futura implementación de la estructura de control.
- Desarrollo de estructuras de control en lazo abierto y en lazo cerrado. El propósito del diseño del convertidor es permitir una operación de conversión óptima, bajo las especificaciones marcadas.
- Simulación del convertidor con cada una de las estructuras de control seguidas.

4.2.- ESTADO DEL ARTE

4.2.1.- Soluciones de electrificación en regiones en vías de desarrollo.

La demanda por la energía renovable con bajo impacto medioambiental y un idílico coste cero de combustibles fósiles ha aumentado de forma prominente. Por este motivo, la energía solar fotovoltaica se ha propuesto como una solución a estos problemas. Recientemente, se han estudiado diferentes materiales, como el silicio, con el objetivo de crear células fotovoltaicas más eficientes. No obstante, estas mejoras pasan, en ocasiones, desapercibidas, pues la inhabilidad para provisionar de energía durante el periodo nocturno, o simplemente, cuando las células reciben bajos niveles de luz solar en condiciones de sombra parcial. De hecho, cuando las células tienen su insolación reducida a causa de este efecto de sombra, generalmente como resultado de nubes, el MPPT produce diferentes picos y sus condiciones de control llegan a ser sumamente complejas.

Superar estos desafíos parece estar cada vez más cerca, sobre todo cuando el futuro más probable de la producción eléctrica es fuertemente influenciado por la generación distribuida. En este contexto, es cuando la idea de la energía solar fotovoltaica como una fuente de energía gana una tremenda solidez. Así pues, la integración de las baterías en la red cambiará el modo de funcionamiento de la regulación, la oferta y la demanda deben permanecer iguales, pero las baterías pueden tomar partido en ambas, dependiendo de la situación.

El mayor inconveniente de la energía solar fotovoltaica es la fluctuación de potencia, la cual puede contribuir a problemas de inestabilidad en la red eléctrica, sobre todo en lo que se refiere a estabilidad de frecuencia y tensión. Para solventar este problema, los sistemas de almacenamiento de energía han sido empleados para diseñar y modificar nuevas plantas con el objetivo de garantizar una estabilidad de red y disminuir cualquier fluctuación de potencia.

Una de las soluciones para mejorar, o incluso en algunas zonas, hacer llegar la electrificación a todos los hogares de estas regiones con un acceso limitado o nulo a la electricidad, puede ser el uso de microrredes y la construcción de quioscos de energía controlados, los cuales, se fundamentan en la obtención de energía solar y su posterior almacenamiento en baterías[3].

4.2.2.- Topología del Energy Kiosk

La arquitectura de estas estaciones de carga se puede observar en la *Figura 4.2.2.1* Los principales componentes técnicos son: paneles fotovoltaicos, estación de baterías, controlador de carga, inversor y PBKs. Además, está incluido en el diseño un sistema de transmisión y registro de datos.

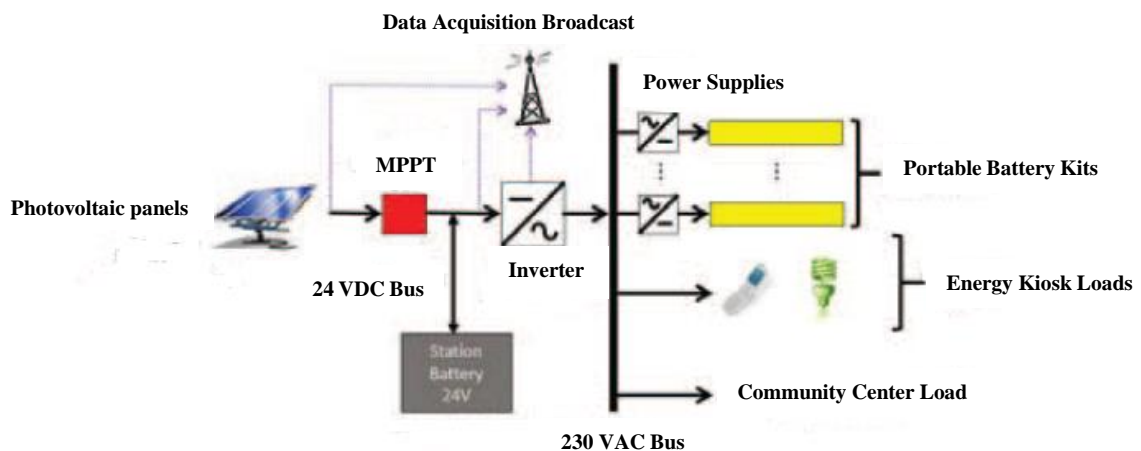


Figura 4.2.2.1: Diagrama conceptual del Energy Kiosk [1].

4.2.3.- Importancia del Battery Pack

En muchas regiones del África subsahariana, la electricidad no llega a todos los hogares, por ello el Battery Pack es una gran herramienta, que permitirá a todos los usuarios disponer en sus casa, tanto de luz para iluminar la casa, hasta una fuente de energía para cargar cualquier dispositivo electrónico necesario de baja potencia, como el teléfono móvil o el ordenador.

Por estos motivos, es de suma importancia exigir que este pack de baterías sea lo más ligero y ocupe el menor volumen posible, ya que está pensado para que los usuarios puedan llevarlo hasta sus residencias durante largas distancias, en ocasiones a pie, o mediante medios de transporte rudimentarios.

4.2.4.- Topología del Battery Pack:

Este tipo de cargadores portátiles, siguen una topología como la mostrada en la *Figura 4.2.4.1*. Los principales componentes técnicos son: un bus AC, un conversor bidireccional y una batería.

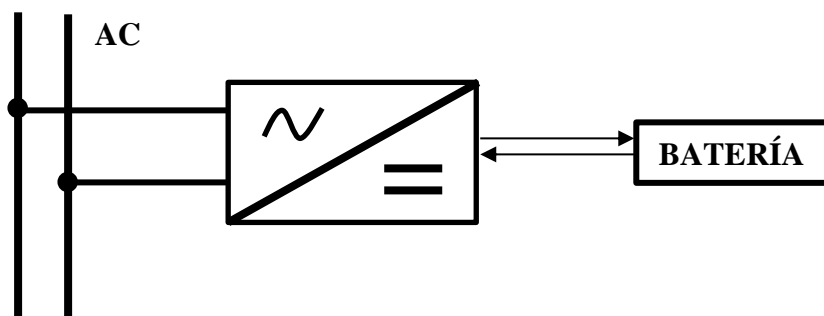


Figura 4.2.4.1: Diagrama conceptual del Battery Pack.

Para realizar esta conversión de energía entre el bus de alterna y la batería se presentan diferentes topologías [3]:

Topología 1: batería de 24 V, convertidor DC/AC de tensión eficaz máxima 8,4 V y transformador 50/60 Hz.

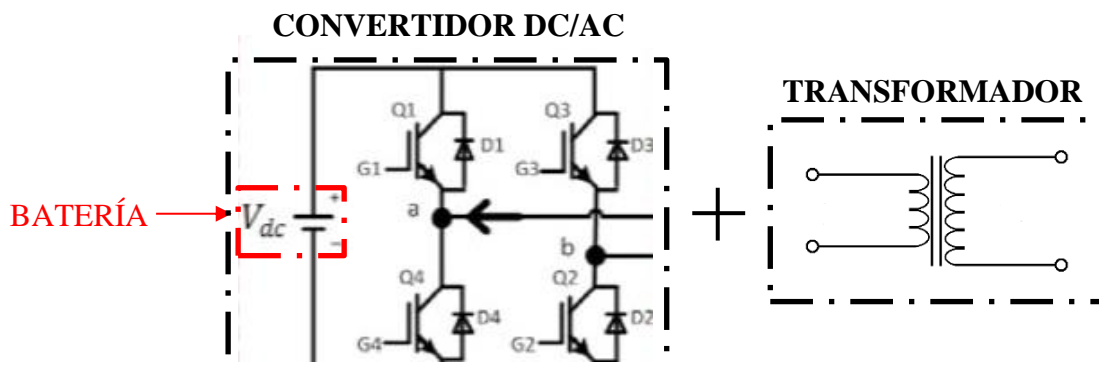


Figura 4.2.4.2: Topología 1 del Battery Pack.

Topología 2: batería de 24 V, convertidor DC/DC no aislado de tensión 80 V, convertidor DC/AC de tensión eficaz máxima 28 V y transformador 50/60 Hz.

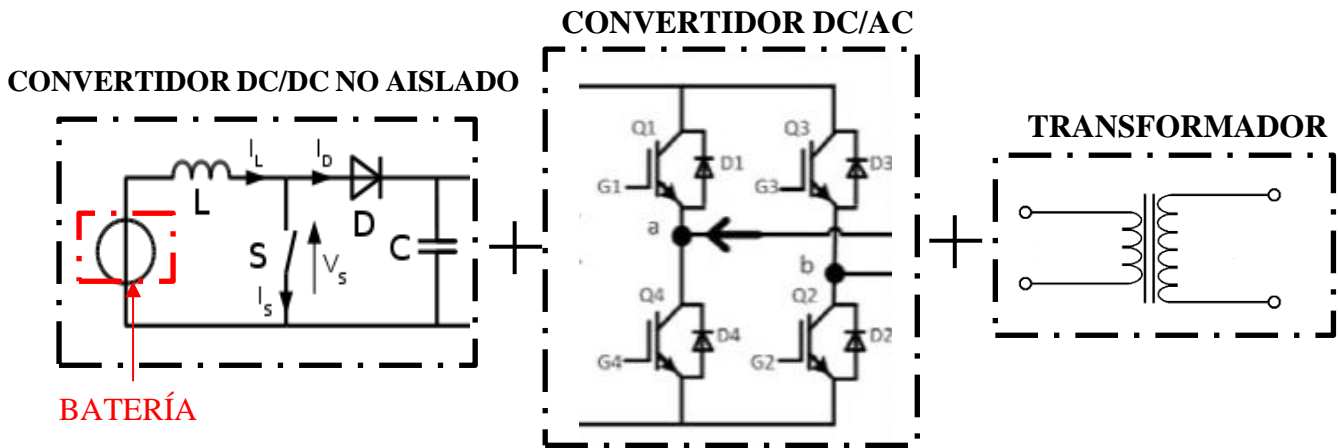


Figura 4.2.4.3: Topología 2 del Battery Pack.

Topología 3: batería de 24 V, convertidor aislado DC/DC aislado de tensión 400 V con transformador de alta frecuencia y convertidor DC/AC de tensión eficaz 230 V.

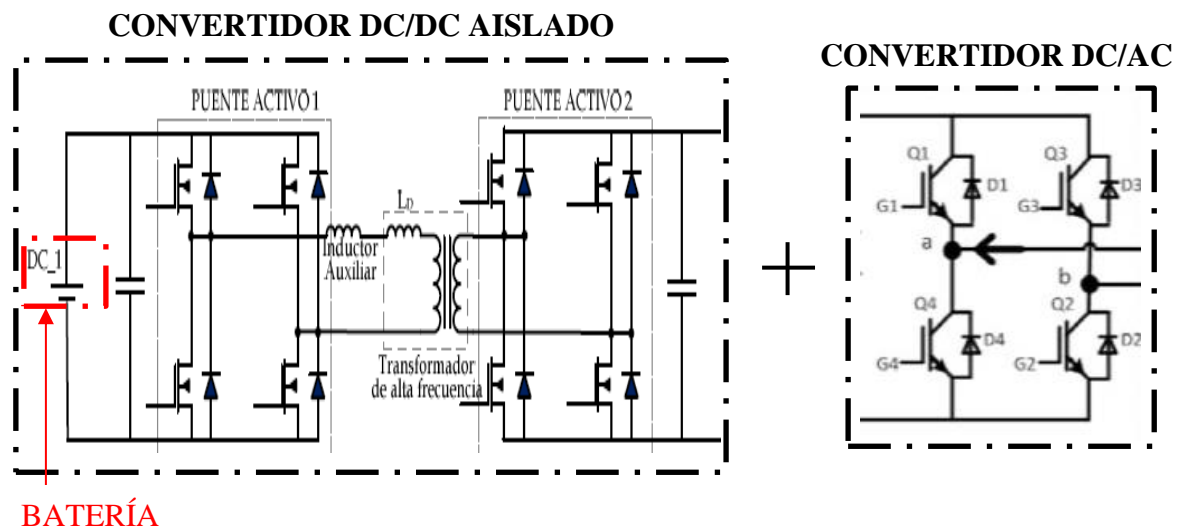


Figura 4.2.4.4: Topología 3 del Battery Pack.

Uno de los principales motivos en la elección de la **Topología 3** para realizar el desarrollo de este Battery Pack, ha sido la búsqueda de un tamaño reducido del mismo, ya que al ocupar poco volumen se facilita el transporte, la tensión de las baterías debería ser muy baja, de 24 V. Por lo tanto, sería necesario un transformador en el lado de AC que fuera capaz de suministrar 230 V, o bien, utilizar una topología DC-DC, la cual fuera capaz de elevar el bus de continua a 400 V. Se elige pues el DAB, ya que, entre otras de sus múltiples ventajas, posteriormente

explicadas, permite incluir un transformador de alta frecuencia que reduce el tamaño en comparación con otros transformadores de 50/60 Hz.


4.2.5.- Elección y dimensionamiento de las baterías

La elección de las baterías para el presente proyecto se ha realizado en base a distintos criterios, que presentan una gran importancia, tanto en el ámbito social-económico, como en el ámbito tecnológico.

Desde el punto de vista económico, tiene gran relevancia la búsqueda de un precio de baterías que consiga abaratar el coste lo máximo posible, ya que el establecimiento de las mismas será en zonas rurales de África, las cuales, no gozan de amplios recursos económicos. Otro punto importante a tener en cuenta es el ámbito social, ya que en esta zona geográfica no todos los usuarios pueden disponer de vehículo propio o transporte si quiera, así pues, estas baterías deben tener un peso razonable para poder ser transportadas con facilidad, no más de 10 kg.

En lo referente al ámbito tecnológico, uno de los factores más relevantes es la tensión de la red eléctrica de la zona. También, es importante tener en cuenta la temperatura a la que trabajarán las baterías, en esta zona geográfica las temperaturas a lo largo del día pueden ser elevadas, llegando en ocasiones a los 45 °C, y sufriendo por la noche bruscas caídas, llegando a alcanzar los -10 °C. Otro factor clave es la potencia máxima del sistema, en este caso, las especificaciones marcan 1 kW. Además, el tiempo de uso y de descarga de las baterías tiene una vital importancia, pues su empleo diario ayudará a muchas familias a tener comodidades básicas, como luz y carga de dispositivos electrónicos o televisión, entre otras muchas facilidades.

En base a todas estas características, la batería seleccionada ha sido la que se muestra en la *Figura 4.2.5*:



		Nerlit 12v@35Ah-D*	Nerlit 12v@100Ah-D	Nerlit 24v@20Ah-D*	Nerlit 24v@40Ah-D
Tensión Nominal (Max - Min)	V	12.8(14.6-11)	12.8 (14.6-11)	25.6 (29.2 - 21)	25.6 (29.2 - 21)
Capacidad	Ah	35.2	99.2	19.2	41.6
Energía disponible	kWh	0.45	1.27	0.49	1.06
Corriente Máxima DESCARGA	A	25	50	20	40
Corriente Máxima CARGA	A	25	50	20	35
TASA de autodescarga	Mensual	< 5%			
Ciclos de vida (80% DoD)	Ciclos (carga+desc)	>5000			
Rango de Tª de funcionamiento CARGA	°C	0° < T < +55°			
Rango de Tª de funcionamiento DESCARGA	°C	-20° < T < +55°			
Tª de almacenamiento recomendada	°C	10° < T < +40°			
Peso	kg	7	14	6	10
Dimensiones (Longitud x anchura x altura)	mm	115 x 250 x 175	225 x 250 x 175	115 x 250 x 175	170 x 250 x 175
Conexión de potencia		2 x Conectores para tornillo M6 (incluido KIT de amarre en batería)			
Química		LiFePO4 (Litio-Ferrosulfato)			
Serializable		NO			
Paralelizable		Sí, hasta 8 módulos			
Battery Management System (BMS)		Incluye PROTECCIONES de sobrecarga, cortocircuito, subtensión, sobretensión, temperatura (max-min) CONTROL de corriente, tensión, temperatura y equilibrio de series equilibrado de series y COMUNICACIONES			
Display de visualización del Estado de Carga (SOC)		5 Leds para indicación del SOC, con alarma sonora por bajo estado de carga (>10%)			

8 | **CECASA** *Conexión eléctrica: Molex connector ref. 42816-0212

Figura 4.2.5: Batería seleccionada.

La duración de estas baterías se puede calcular fácilmente mediante la relación de la energía disponible y el consumo en cada vivienda. A continuación, se detalla en la siguiente tabla la duración de las baterías en función del consumo en cada hogar [4], [5]:

Dispositivos conectados	Consumo [W]	Duración [h]
1 punto de luz (halógeno)	100	10
TV	150	6,7
Router	10	100
Ordenador	65	15,4
Teléfono	5	200
Frigorífico	110	9

4.2.6.- Elección y topología del convertidor bidireccional

Este proyecto se centrará en el estudio y diseño del Battery Pack, que recoge la parte de conversión entre el banco de baterías y el inversor, que se tomará como una fuente de tensión continua.

El convertidor aislado bidireccional DC-DC, es el núcleo de todos los circuitos diseñados para conmutar a altas frecuencias y para realizar conversiones de grandes flujos de potencia. En la inmensa mayoría de los casos, sigue la estructura marcada en la *Figura 4.2.6.1*:

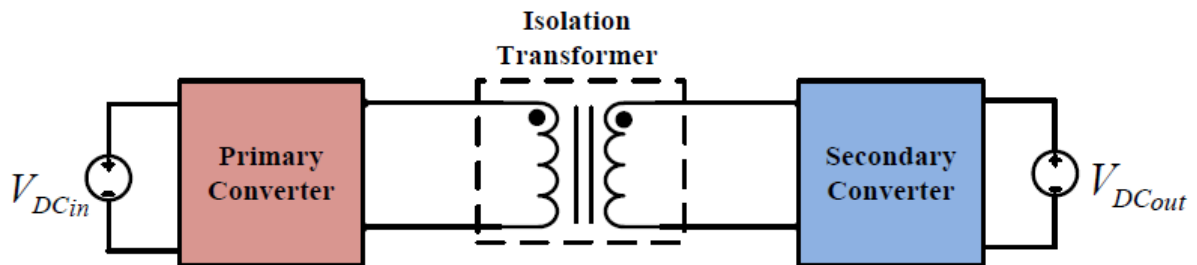


Figura 4.2.6.1: Esquema del convertidor bidireccional DC-DC [6].

En particular, los convertidores de puente completo proporcionan una gran flexibilidad en sus aplicaciones, los convertidores DAB son una topología poderosa en el área de la conversión bidireccional DC-DC aislada.

Este convertidor es muy atractivo por su alta densidad de potencia, peso y tamaño reducidos.

La *Figura 4.2.6.2* muestra el esquema básico de la topología DAB monofásica. Dos fuentes de tensión DC se interconectan mediante dos puentes en H y un transformador de alta frecuencia. En serie con el transformador se instala una inductancia, cuya función es reflejar la inductancia de fugas del transformador. Cada puente en H tiene una red de condensadores, cuyo objetivo es filtrar el rizado de corriente del lado DC, de manera que con la inductancia y los condensadores entre las fuentes DC-1 y DC-2, la corriente de alta frecuencia entre ellas sea muy reducida. Se consigue un sistema de ruido bajo sin afectar a la eficiencia o el coste.

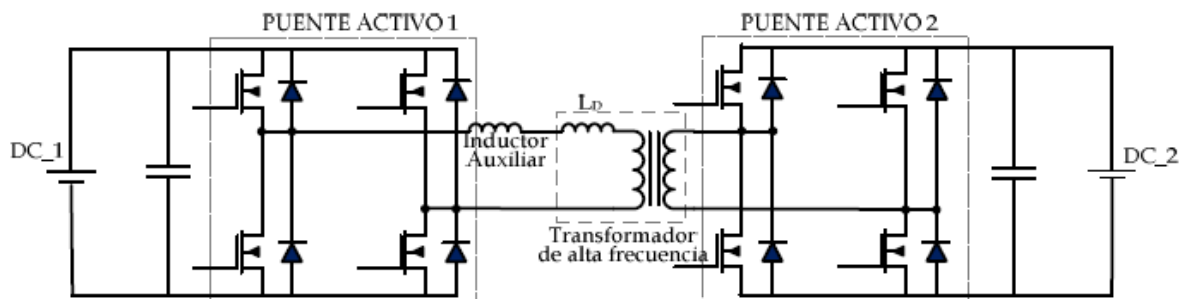


Figura 4.2.6.2: Topología del puente activo dual monofásico. DAB [7].

Dado que los dos puentes son activos, como su propio nombre indica, el flujo de potencia puede ser bidireccional. No obstante, existen múltiples versiones para la inversión y rectificación de ondas como las técnicas PWM, el método más sencillo es generar ondas cuadradas con un ciclo

de trabajo del 50%, de este modo no se le suma complejidad al control de la conmutación de los MOSFET. Además, siendo este proyecto consistente en la simulación a una frecuencia de conmutación elevada, se ha descubierto que las ondas cuadradas son más adecuadas para altas potencias. La imposición de este tipo de ondas en los devanados de los transformadores permiten que el “tiempo muerto”, o fases en la que la tensión es nula, se reduzca. Aunque este puede reducir las pérdidas de conmutación, reduce también la cantidad total de potencia que se transmite.

Así pues, el control de potencia se mantiene prácticamente igual, el ángulo relativo entre las dos ondas cuadradas define la cantidad y dirección del flujo de energía en cada instante. En este proceso, la inductancia de dispersión del transformador juega un papel importante, pues se encarga de la transmisión de potencia. Cabe destacar que la potencia fluye desde las ondas cuadradas adelantadas hasta las retrasadas, lo que significa que si la potencia necesita fluir de un nivel bajo de tensión, como la batería, hasta otro de mayor tensión, como el bus DC, la onda cuadrada obtenida en el lado de baja tensión deberá estar adelantada respecto al lado de alta tensión del puente.

5. Metodología de trabajo

Con el principal objetivo de lograr mejores resultados y alcanzar metas mayores, en el presente proyecto se han seguido una serie de pautas y tiempos marcados.

En este sentido, los tiempos del proyecto se han repartido en distintas etapas con diferentes objetivos. Teniendo en cuenta, que el inicio del proyecto se sitúa en el día 15 de octubre de 2020.

- **Lectura, toma de contacto y formación del grupo de trabajo:** esta fase abarca desde el inicio del proyecto hasta el 9 de marzo de 2021. Durante este tiempo se asentaron los fundamentos básicos del trabajo y se recabó información de diferentes fuentes sobre el proyecto. También se formó el grupo de trabajo, en el que los profesores asignaron dentro del equipo diferentes tareas para cada uno de los integrantes.
- **Desarrollo del proyecto:** con la tarea marcada de desarrollar el convertidor de potencia y dimensionamiento de las baterías para el Battery Pack, esta fase ocupó el mayor tiempo dentro del proyecto. Durante este tiempo, cada integrante del equipo comunicaba con frecuencia los avances realizados en cada parte correspondiente del proyecto. Esta etapa finalizaba con la correcta simulación del convertidor de potencia.
- **Redacción del trabajo:** desde el fin de la fase anterior, el día 5 de mayo de 2022, hasta la presentación del documento ante el tribunal se ha dedicado el tiempo en dar cuerpo y forma a este proyecto.

La estructura del proyecto puede verse claramente en la *Figura 5.1*, donde se desglosan de forma detallada las tareas realizadas, con cada tiempo de duración correspondiente a cada una de ellas.

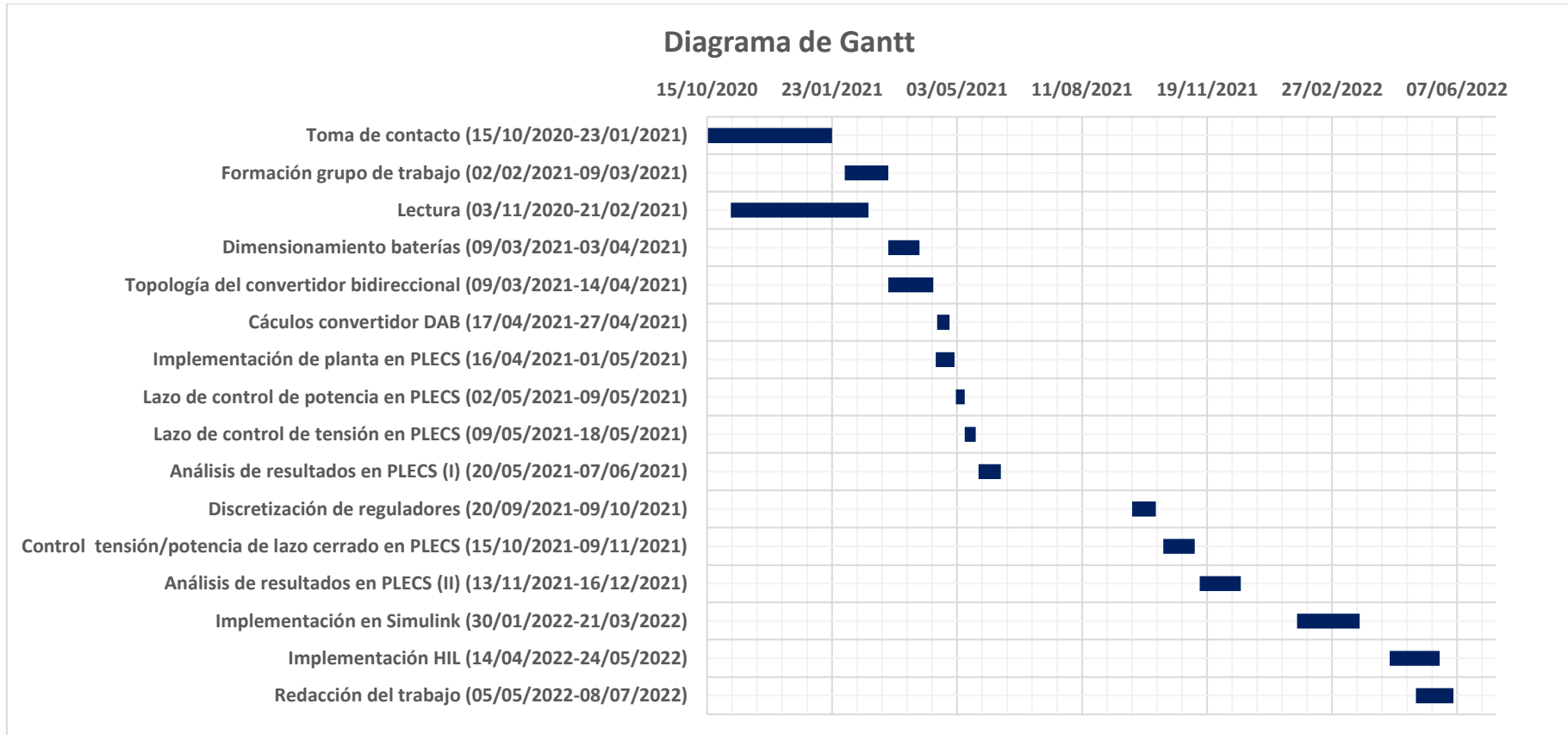


Figura 5.1: Diagrama de Gantt del proyecto.

6. Trabajo realizado y resultados

6.1.- CÁLCULOS DEL CONVERTIDOR DAB

En este apartado se calcularán las tensiones a la salida de ambos inversores, la bobina, la inductancia y el transformador, en base a las especificaciones solicitadas.

Para facilitar la comprensión de todas las variables y agilizar el seguimiento de los cálculos, se ha elaborado una tabla de abreviaturas para este apartado, con cada valor correspondiente.

Nombre	Abreviatura	Valor	Unidades
Tensión del bus	V_{bus}	400	V
Tensión de la batería	V_{bat}	24	V
Frecuencia de conmutación	f_c	100	kHz
Potencia de descarga	P_d	1000	W
Área transversal del transformador	A_e	0,229	m^2
Densidad de flujo magnético de saturación	B	0,510	T
Longitud del camino de flujo	L_e	0,060	m
Permeabilidad en el vacío	μ_0	$4.\pi.10^{-7}$	$\frac{m. kg}{s^2. A^2}$
Permeabilidad relativa	μ_r	2000	$\frac{m. kg}{s^2. A^2}$
Resistencia de MOSFET	R_{ds}	0,030	Ω

6.1.1.- Tensiones a la salida de los inversores en valor eficaz

$$V1_{rms} = \frac{4V_{bus}}{\sqrt{2}\pi} \quad (1)$$

A partir de la ecuación (1) y con un valor de $V_{bus} = 400$ V, se obtiene el valor nominal, mínimo y máximo de la tensión en el primario:

$$V1nom_{rms} = 360,12 \text{ V}$$

$$V1min_{rms} = 342,12 \text{ V}$$

$$V1max_{rms} = 378,13 \text{ V}$$

$$V2_{rms} = \frac{4V_{bat}}{\sqrt{2}\pi} n \quad (2)$$

Con la ecuación (2) y un valor de $V_{bat} = 24 \text{ V}$ obtenemos la tensión nominal en función de la relación de transformación:

$$V2nom_{rms} = 21,61n \text{ V}$$

Para hallar la relación de transformación, y con ello $V2_{rms}$ se sigue el siguiente criterio:

$$V1min_{rms} \geq V2nom_{rms} \quad (3)$$

De esta ecuación (3) se obtiene un valor de $n < 15,83$. Luego se elige una relación de transformación de 1:15, tomando entonces $V2nom_{rms}$ un valor de 324,14 V.

6.1.2.- Desfases máximo y mínimo entre las tensiones del bus y de la batería

$$\Delta_{max} = \arccos \frac{V2nom_{rms}}{V1max_{rms}} \quad (4)$$

$$\Delta_{min} = \arccos \frac{V2nom_{rms}}{V1min_{rms}} \quad (5)$$

De las ecuaciones (4) y (5) se deduce los desfases $\Delta_{max} = 31,0^\circ$ y $\Delta_{min} = 18,6^\circ$.

6.1.3.- Tensiones en la bobina

$$VL1_{rms} = V1nom_{rms} \cdot \text{sen}(\Delta_{max}) \quad (6)$$

$$VL2_{rms} = V2nom_{rms} \cdot \text{sen}(\Delta_{min}) \quad (7)$$

Con las ecuaciones (6) y (7) se hallan los valores de $VL1_{rms} = 185,48 \text{ V}$ y $VL2_{rms} = 103,39 \text{ V}$.

6.1.4.- Inductancia y corrientes

Las especificaciones marcan una frecuencia de conmutación $f_c = 100 \text{ kHz}$ y la potencia de descarga de las baterías será $P_d = 1000 \text{ W}$.

$$P_d = V2nom_{rms} \cdot IL2_{rms} \quad (8)$$

Con la ecuación (8) se obtiene $IL2_{rms} = 3.09$ A.

Por tanto, la inductancia de la bobina se obtendrá con la siguiente ecuación (9):

$$L_x = \frac{VL2_{rms}}{2.\pi.f_c.IL2_{rms}} \quad (9)$$

Donde L_x resulta un valor de aproximadamente 50 μ H.

Así pues, se calcula la corriente que circula por la inductancia en la ecuación (10):

$$IL1_{rms} = \frac{VL1_{rms}}{2.\pi.f_c.L_x} \quad (10)$$

La corriente toma un valor de 5,9 A.

6.1.5.- Transformador

Para calcular el número de espiras en el primario tomamos la ecuación (11):

$$N1 = \frac{L_x.IL1_{rms}}{A_e.B} \quad (11)$$

De donde el número de espiras N1 resulta ser aproximadamente 2. Así pues, como la relación de transformación es 1:15, el número de espiras en el secundario será N2 = 30.

Con N1 calculado, se procede a hallar el entrehierro en el transformador con la ecuación (12):

$$g = \frac{\mu_0.IL1_{rms}.N1}{B} - \frac{L_e}{\mu_r} \quad (12)$$

El entrehierro toma un valor muy bajo, tanto que para facilitar los cálculos se puede aproximar $g \simeq 0$ mm.

Con este valor del entrehierro, ya se puede conocer el valor de la inductancia del transformador con la ecuación (13):

$$L = \frac{\mu_0.A_e.N1^2}{g + \frac{L_e}{\mu_r}} \quad (13)$$

De esta ecuación se obtiene $L = 38,37$ μ H.

Ahora se procede a hallar el campo magnético máximo a través de la ecuación (14):

$$B_{max} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{\frac{L_e}{\mu r}} \quad (14)$$

De donde se obtiene $B_{max} = 0,084$ T.

Como $B_{max} < B$, se confirma la viabilidad del transformador escogido.

6.1.6.- Inductancia magnetizante

Para calcular la inductancia magnetizante, basta con operar la ecuación (15):

$$L_m = A_e \cdot N^2 \quad (15)$$

Donde $L_m = 900 \mu\text{H}$.

6.1.7.- Pérdidas en los MOSFET

De la ecuación (16) se puede calcular la pérdida de potencia en cada MOSFET:

$$P_m = R_{ds} \cdot i^2 \quad (16)$$

De donde $P_m = 0,001$ W.

Al ser 8 MOSFET, $P_m = 8 \cdot 0,001$ W = 0,008 W.

Para lograr una mejor perspectiva de los resultados obtenidos en este apartado, se ha elaborado la siguiente tabla:

Nombre	Abreviatura	Resultado	Unidades
Tensión eficaz nominal en el primario	$V1_{nom_{rms}}$	360,12	V
Tensión eficaz máxima en el primario	$V1_{max_{rms}}$	378,13	V
Tensión eficaz mínima en el primario	$V1_{min_{rms}}$	342,12	V
Tensión eficaz nominal en el secundario	$V2_{nom_{rms}}$	324,14	V
Desfase máximo	Δ_{max}	31,0	°
Desfase mínimo	Δ_{min}	18,6	°
Tensión eficaz en la bobina en el primario	$VL1_{rms}$	185,48	V
Tensión eficaz en la bobina en el secundario	$VL2_{rms}$	103,39	V
Corriente eficaz en la bobina en el secundario	$IL2_{rms}$	3,09	A
Inductancia de la bobina	L_x	50	μH
Corriente eficaz en la bobina en el secundario	$IL1_{rms}$	5,9	A
Relación de transformación	r	1:15	
Número de espiras en el primario	N1	2	
Número de espiras en el secundario	N2	30	
Entrehierro	g	0	mm
Inductancia magnetizante	L	900	μH
Densidad de flujo magnético de saturación máxima	B_{max}	0,084	T
Pérdidas de potencia en los ocho MOSFET	Pm	0,008	W

6.2.- IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA EN PLECS

Como primera toma de contacto con el programa PLECS, se comienza a desarrollar en el entorno la planta del sistema. La *Figura 6.2.1* muestra el convertidor DAB, en el cual, las dos fuentes de tensión continua reflejan la tensión del bus y de la batería, respectivamente.

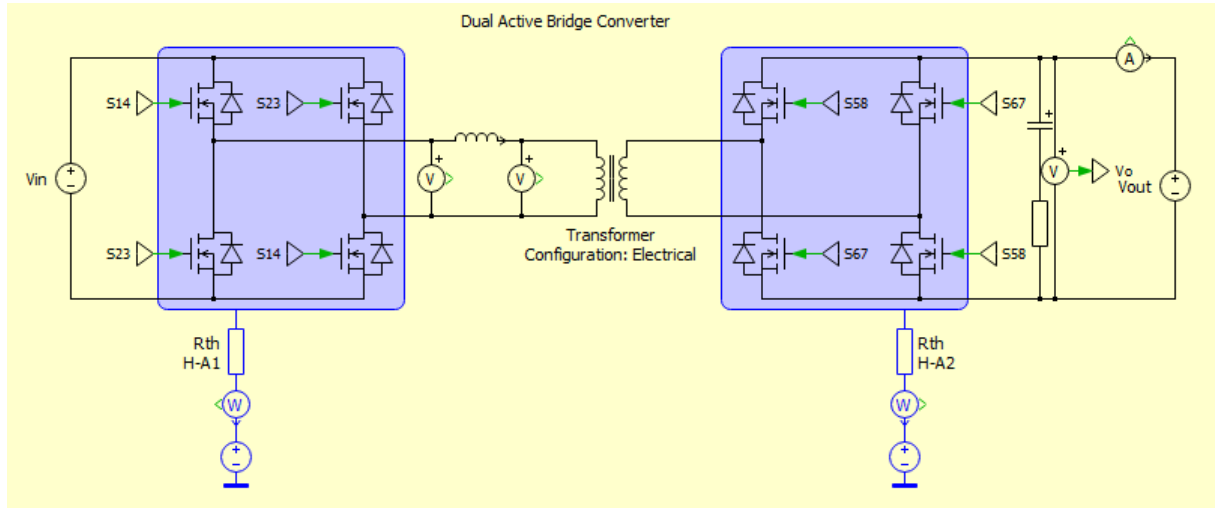


Figura 6.2.1: Esquema de la planta en PLECS.

6.3.- LAZO DE CONTROL DE POTENCIA PLECS

Para la realización del lazo de control de potencia en PLECS se toma de referencia la ecuación (17), donde se puede observar como el desfase es función de la potencia:

$$\Delta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{P}{P_{max}}} \right) \quad (17)$$

Así pues, el diagrama de bloques que rige el control de potencia de la planta en PLECS, mostrado en la *Figura 6.3.1*, en la *Figura 6.3.2* y en la *Figura 6.3.3*, logra actuar sobre el desfase, controlando directamente la potencia del sistema.

El bloque Phase Shift Controller de la *Figura 6.3.3* contiene al subsistema mostrado en la *Figura 6.3.2*, que a su vez contiene en el bloque Phase-Shift PWM, el lazo de control de potencia mostrado en la *Figura 6.3.1*.

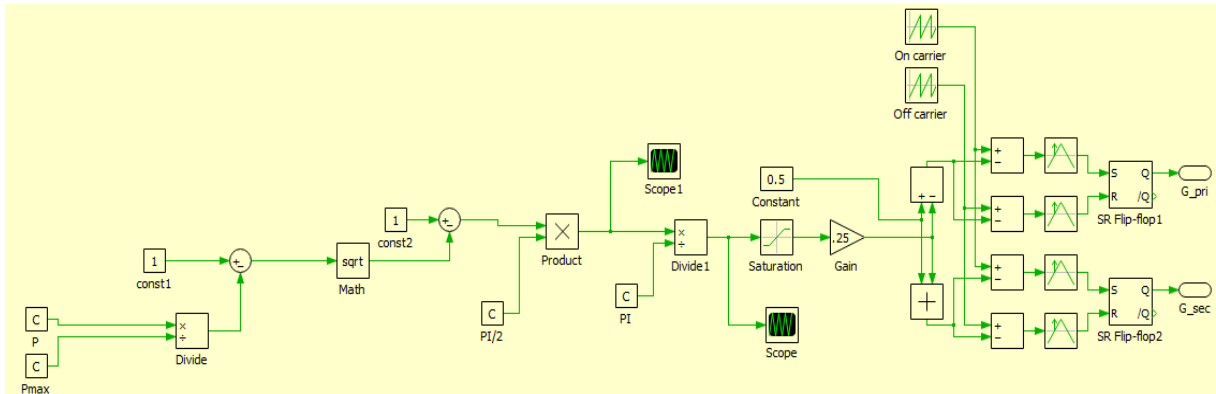


Figura 6.3.1: Lazo de control de potencia en PLECS (I).

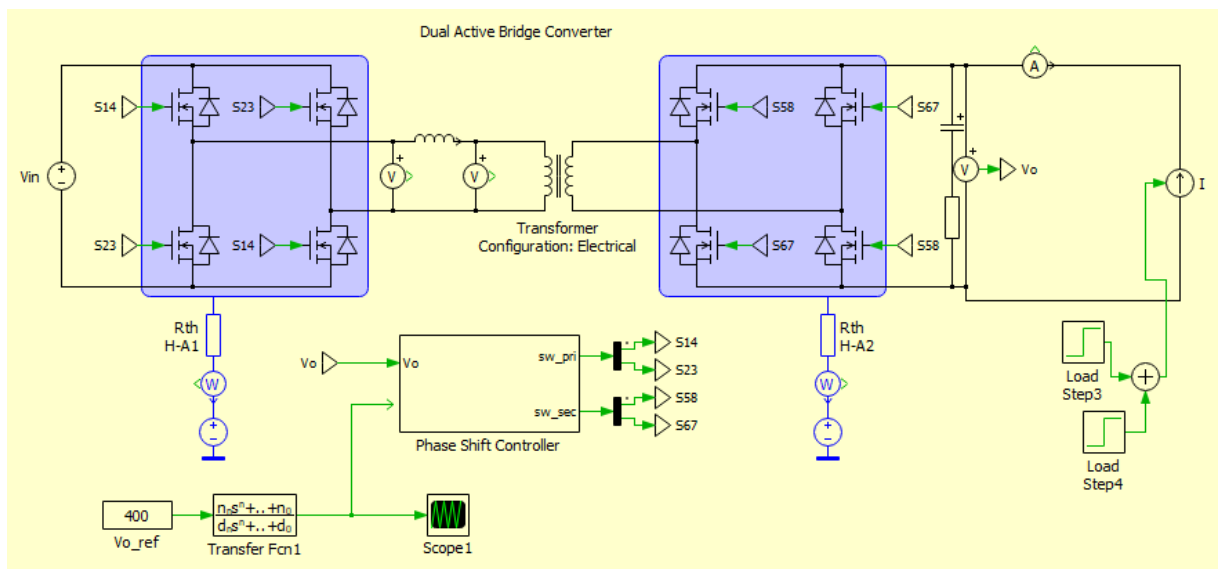


Figura 6.3.2: Lazo de control de potencia en PLECS (II).

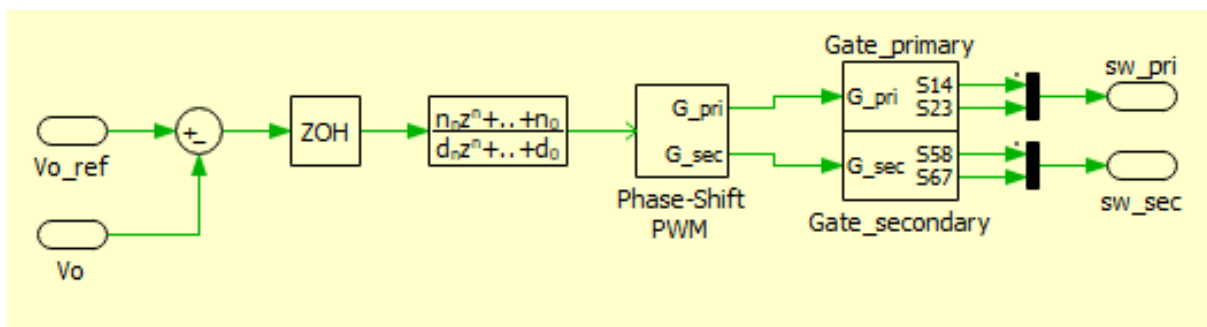


Figura 6.3.3: Lazo de control de potencia en PLECS (III).

6.4.- LAZO DE CONTROL DE TENSIÓN PLECS

Para la realización de este lazo de control, ha sido necesaria la sintonización de un regulador PI. Para ello, se ha elaborado el diagrama de bloques mostrado en la *Figura 6.4.1*, del cual se deducen todas las ecuaciones que permiten los cálculos de los parámetros del regulador.

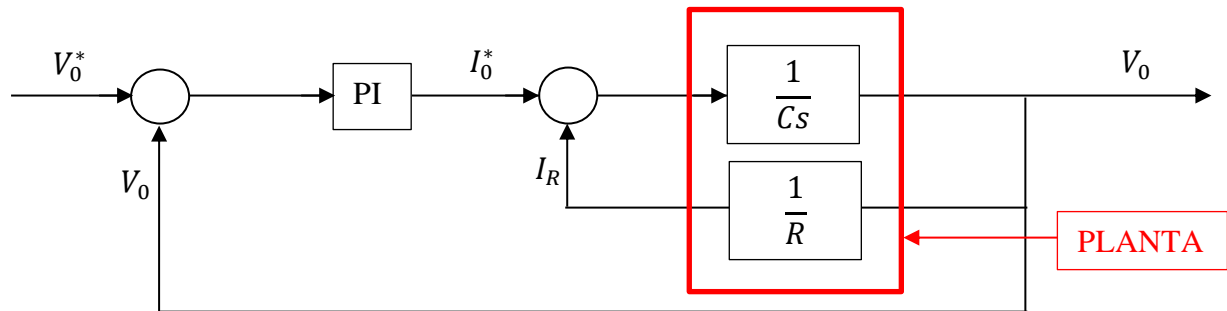


Figura 6.4.1: Diagrama de bloques para el control de tensión.

De la anterior figura se deduce la siguiente relación entre entrada y salida, mostrada en las ecuaciones (18) y (19):

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{PI.G(s)}{1+PI.G(s)} \quad (18)$$

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{Kp(Ts+1)}{TCs^2+Kp(Ts+1)} \quad (19)$$

Una vez se ha obtenido la relación entre la entrada y la salida, se procede a sintonizar el regulador PI mediante el método de Cancelación Polo-Cero, para el cual se asume la ecuación (20):

$$T_P = -\frac{1}{RC} \quad (20)$$

Con las ecuaciones (18) y (19) se deduce la ecuación (21):

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{Kp\left(\frac{s+\frac{1}{T}}{s}\right)\left(\frac{c}{s+\frac{1}{RC}}\right)}{1+Kp\left(\frac{s+\frac{1}{T}}{s}\right)\left(\frac{c}{s+\frac{1}{RC}}\right)} \quad (21)$$

Asumiendo la igualdad mostrada en la ecuación (22):

$$s+\frac{1}{T} = s+\frac{1}{RC} \quad (22)$$

Se deduce, finalmente, la relación entre las tensiones de la ecuación (23):

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{\frac{Kp.C}{s}}{1 + \frac{Kp.C}{s}} \quad (23)$$

Simplificando la expresión anterior se obtiene la ecuación (24):

$$\frac{V_0}{V_0^*} = \frac{Kp.C}{s + Kp.C} \quad (24)$$

Así pues, el regulador PI queda sintonizado, con una Kp que sigue la expresión mostrada en la ecuación (25):

$$Kp = 2 \cdot \pi \cdot Bw \cdot C \quad (25)$$

Una vez calculados los parámetros que caracterizan el regulador, se procede a implementar el lazo de tensión en PLECS.

En la *Figura 6.4.2* se puede apreciar el lazo de control de tensión, con el regulador PI que previamente se ha calculado. En la *Figura 6.4.3* se muestra la planta del sistema y el bloque Phase Shift Controller, dentro del cual se sitúa el lazo de control de tensión.

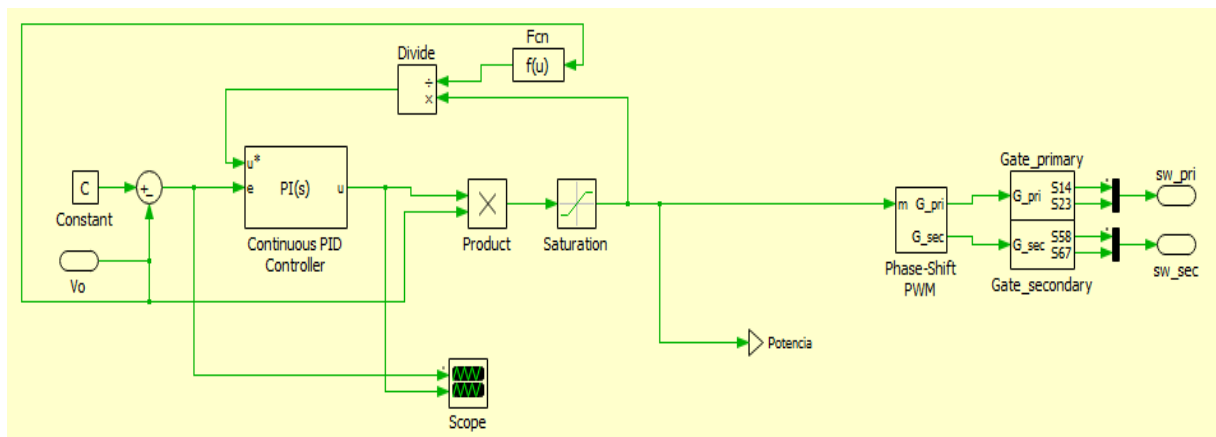


Figura 6.4.2: Esquema del lazo de control de tensión en PLECS (I).

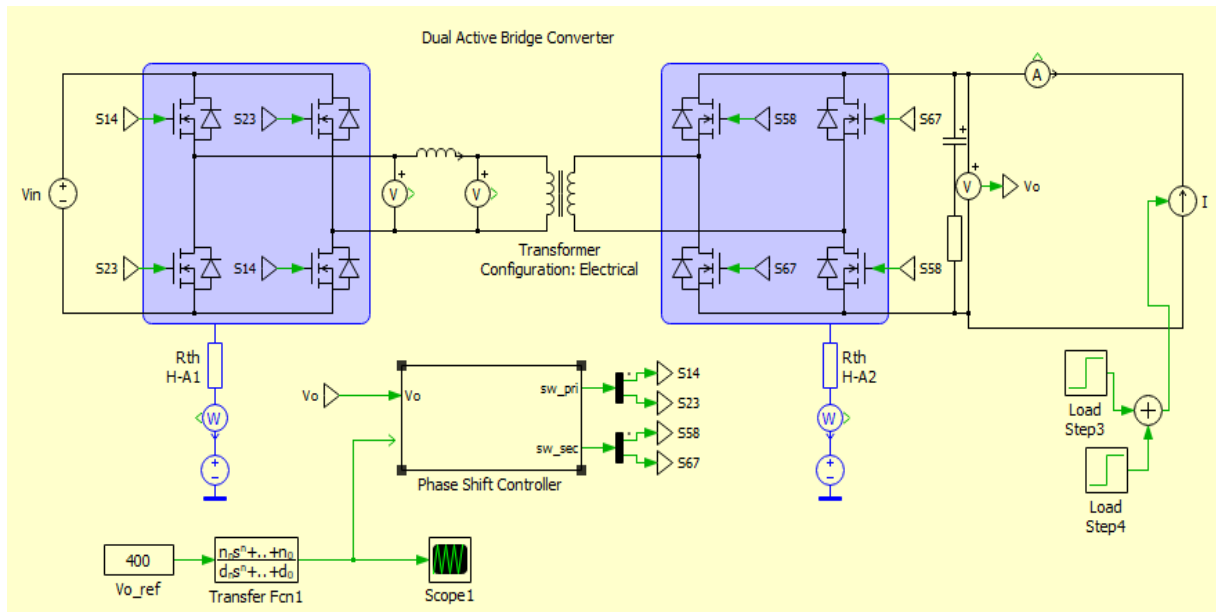


Figura 6.4.3: Esquema del lazo de control de tensión en PLECS (II).

6.5.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN PLECS

Una vez conseguido implementar los lazos de potencia y de tensión en PLECS, se analizan los resultados obtenidos y se comprueba el correcto funcionamiento del sistema.

Para entender mejor la interpretación de los resultados de este control, se muestran las siguientes Figuras:

En esta Figura 6.5.1 se muestra la implementación de la planta en PLECS, con los bloques que contienen su control correspondiente y los elementos que miden las variables a estudiar, como la tensión, la corriente, la potencia y el desfase, tanto en el primario, como en el secundario.

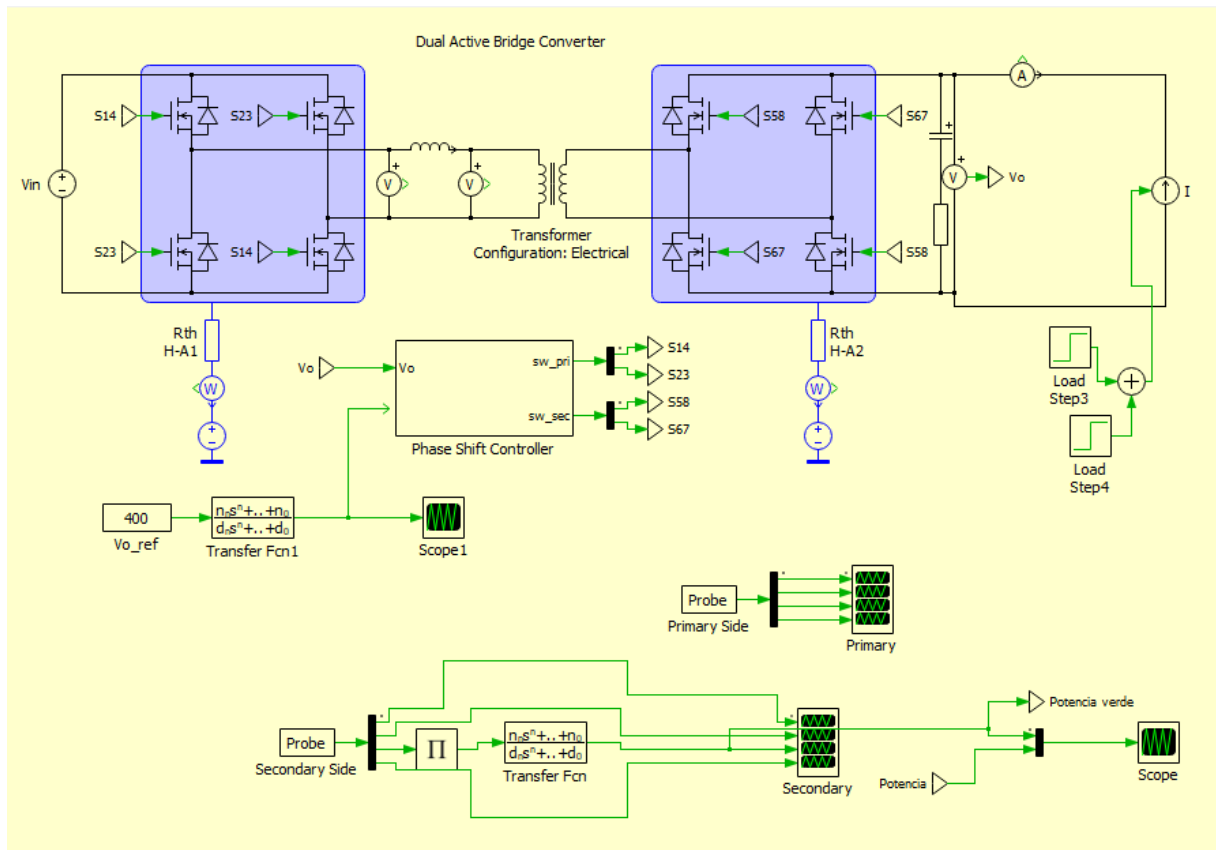


Figura 6.5.1: Esquema de la planta en PLECS con medidores.

En el lado del primario se han colocado medidores de tensión, que nos permiten ver el comportamiento de esta variable en el tiempo, mostrada en la *Figura 6.5.2* y en la *Figura 6.5.3*.

En esta *Figura 6.5.2*, se puede observar el comportamiento de la tensión con la evolución del tiempo en el lado del primario, se aprecia en los instantes iniciales una sobreoscilación, hasta que rápidamente se logra estabilizar.

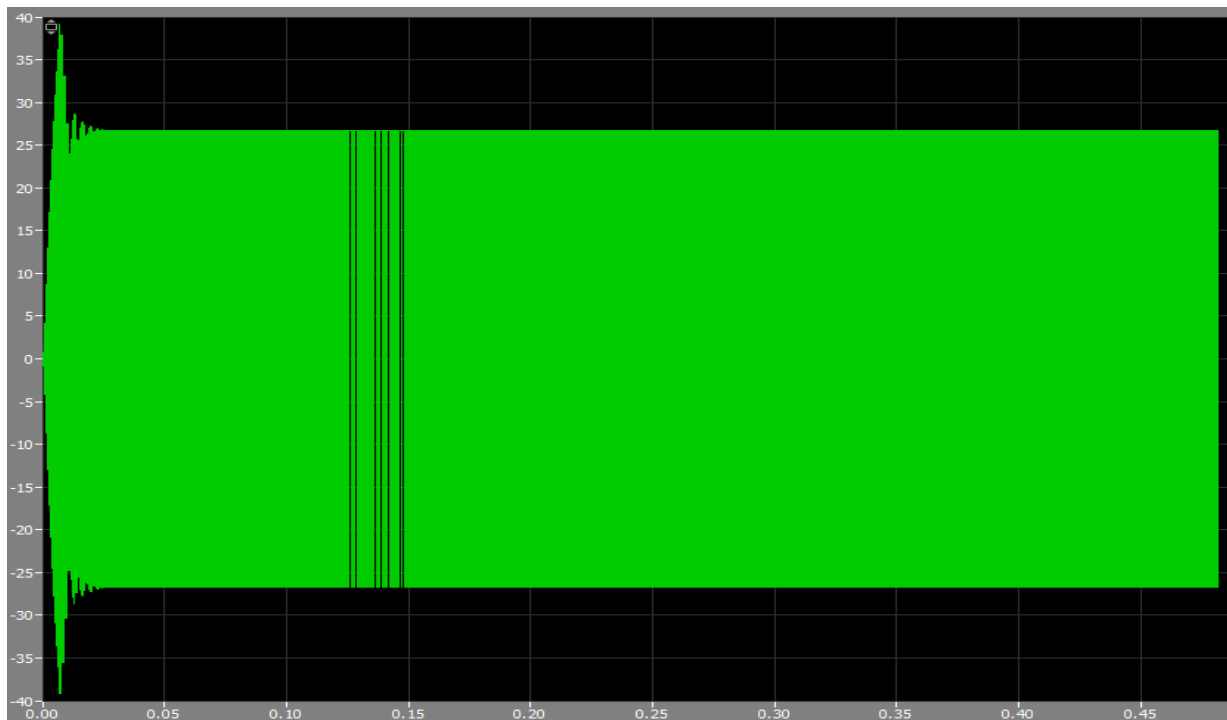


Figura 6.5.2: Tensión en el lado del primario (I).

Lo que esta *Figura 6.5.3* está mostrando, no es más que un zoom de la función de onda anterior, entre los instantes 1,6837 s y 1,6854 s, para que se pueda observar correctamente esa forma de onda cuadrada.

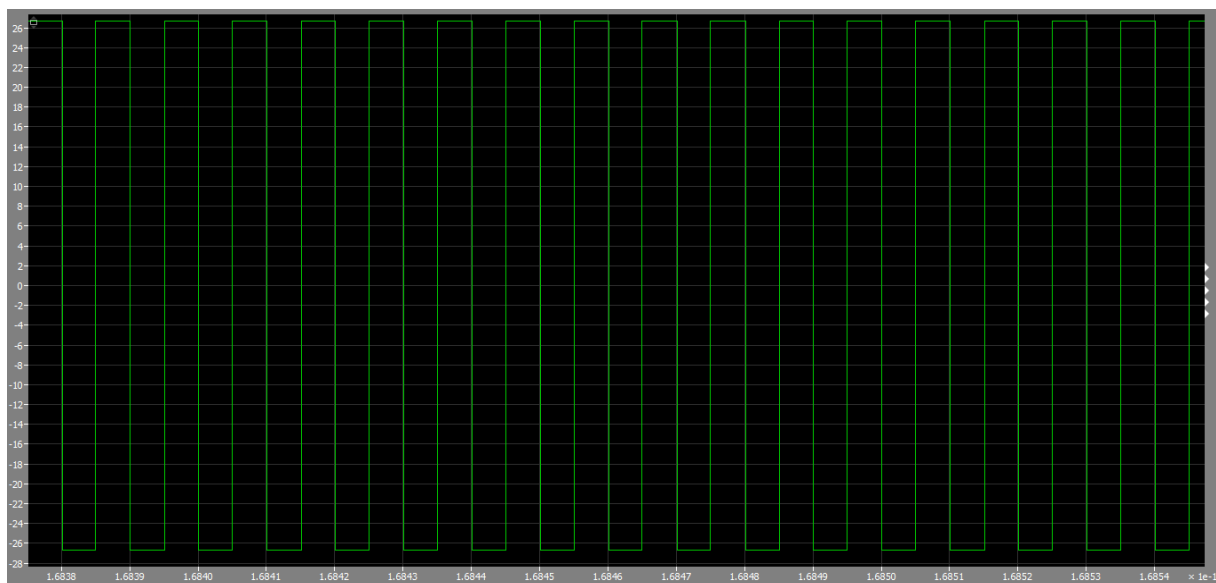


Figura 6.5.3: Tensión en el lado del primario (II).

Las siguientes *Figuras 6.5.4* y *6.5.5*, muestran las corrientes que circulan en el lado del primario y su evolución a lo largo del tiempo, se aprecia también esa sobreoscilación en el instante inicial, hasta que rápidamente se estabiliza. En la segunda se ha realizado un zoom entre los instantes 1,6635 s y 1,6651 s, para una mejor observación del tipo de onda presente.



Figura 6.5.4: Corrientes en el lado del primario (I).

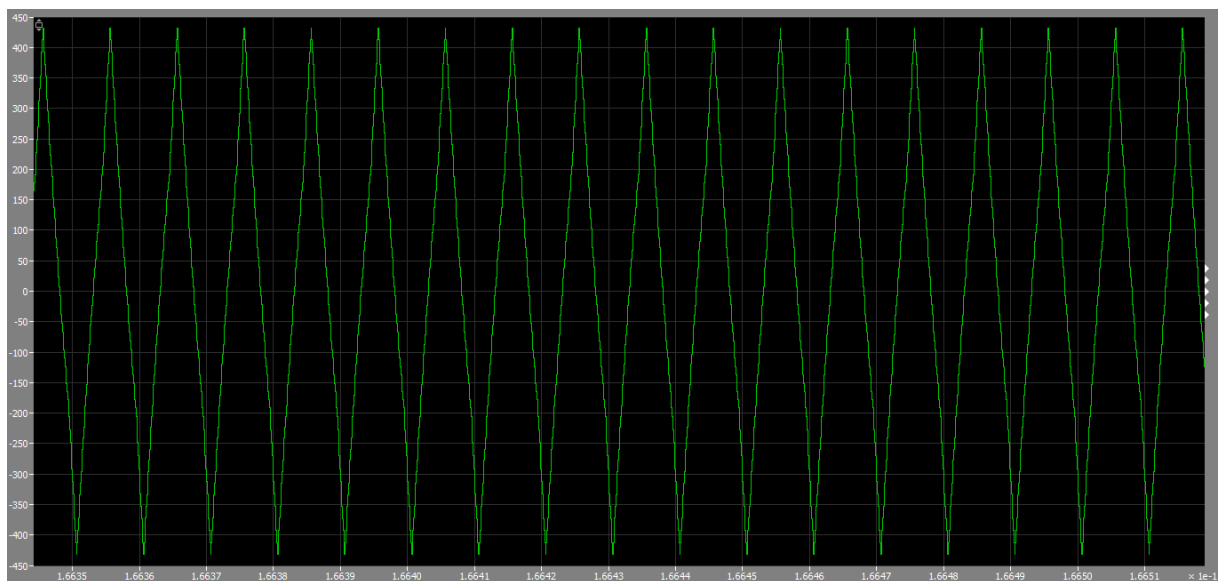


Figura 6.5.5: Corrientes en el lado del primario (II).

En cuanto al lado del secundario, se han medido las variables de tensión, intensidad, potencia y desfase, que se reflejan en las siguientes *Figuras* y serán comentados posteriormente.

Al no haber introducido ningún tipo de carga, se puede observar como en la primera gráfica, la variable de tensión controlada (en verde) sigue perfectamente la referencia de tensión (en rojo), con una pequeña sobreoscilación en los instantes iniciales, es decir, el regulador PI de tensión

funciona correctamente. Por otro lado, tanto la potencia, como la corriente en el secundario son cero, ya que, como se ha mencionado, no se han introducido cargas. Así pues, el desfase, siguiendo el mismo razonamiento que con la corriente y la potencia, también tiene un valor de cero, aunque, en esta ocasión tiene una sobreoscilación en los instantes iniciales, al igual que la tensión, ya que el desfase también se ve afectado por el regulador PI. Estas variables se muestran en la *Figura 6.5.6* y *Figura 6.5.7*:

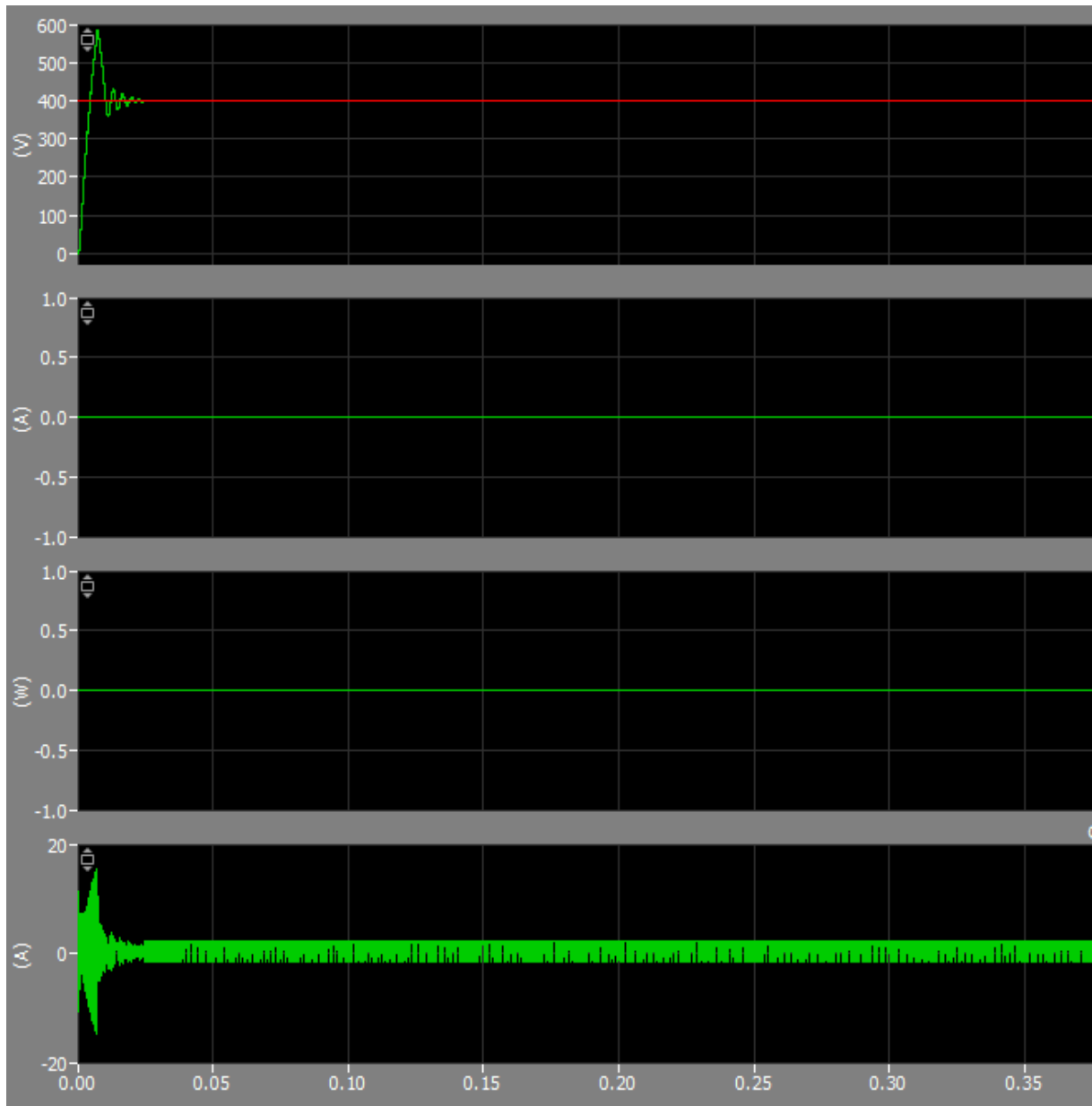


Figura 6.5.6: Tensión, corriente y potencia en el lado del secundario, sin cargas adicionales.

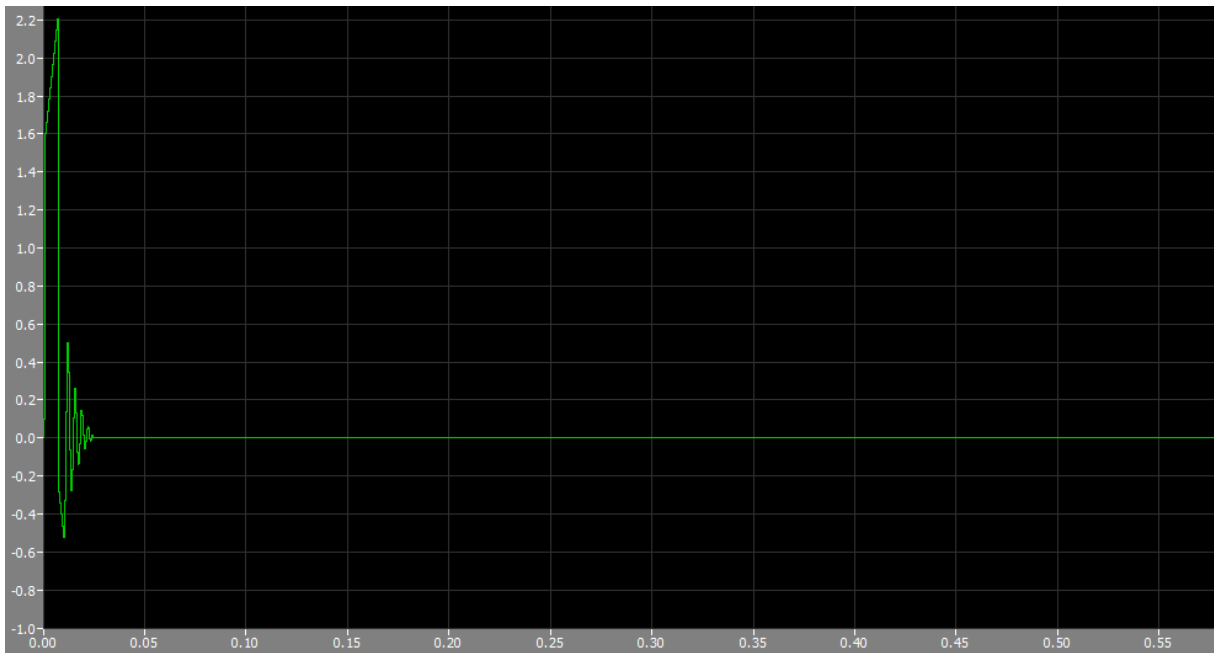


Figura 6.5.7: Desfase en el secundario, sin cargas adicionales.

Ahora, se procede a incluir dos cargas, simuladas con dos Steps conectados a una fuente de tensión que inyecta corriente en el lado del secundario, con esto, se puede ver el comportamiento de la tensión, la corriente, la potencia y el desfase, cuando se incluyen perturbaciones en el sistema a controlar.

El primer Step entra a los 0,10 s, suministrando una corriente de 2 A, y el segundo Step inyecta -4 A, transcurridos 0,15 s.

La *Figura 6.5.8* refleja el comportamiento de las variables tensión corriente y potencia en el transcurso del tiempo, una vez se han incluido los Steps mencionados anteriormente.

La primera gráfica muestra la evolución de la tensión de referencia (en rojo) y la tensión controlada (en verde), se puede observar como esta variable controlada sigue perfectamente a la referencia, aunque con pequeñas sobreoscilaciones en los momentos iniciales y en el inicio de los Steps. La variación de estas oscilaciones cuando se aplican los distintos saltos de carga es en torno al 6,25%.

La segunda gráfica se centra en presentar la corriente inyectada por los Steps, que simula las cargas adicionales en el sistema.

En cuanto a la tercera gráfica, se muestra la potencia en el secundario, la cual se ha calculado multiplicando la tensión por la corriente, y también se observa como al igual que las demás variables varía en función del valor del Step.

Por último, en la cuarta gráfica se observa la evolución de la corriente que circula por el condensador, viéndose también afectada por las sobreoscilaciones, anteriormente comentadas

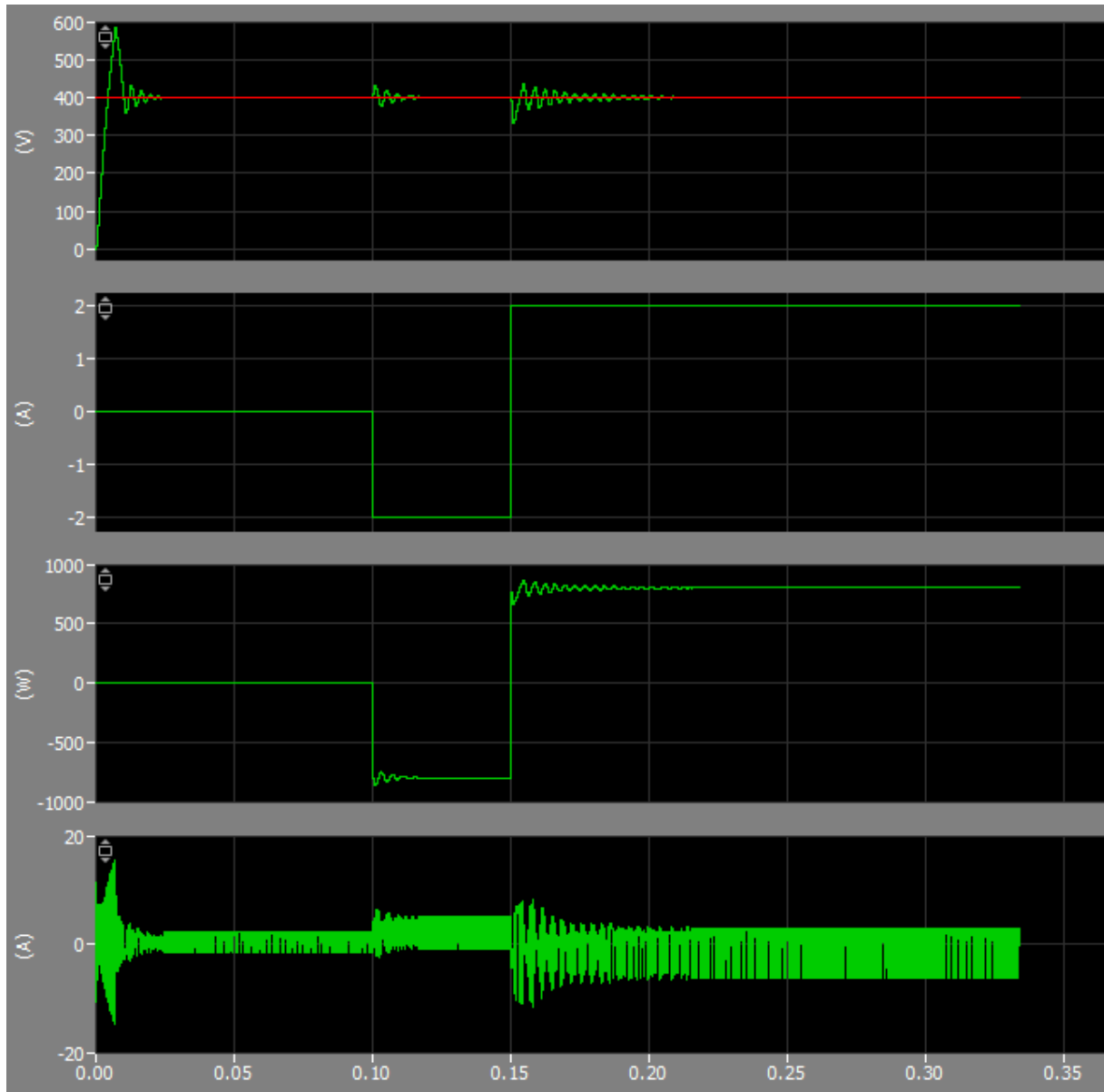


Figura 6.5.8: Tensión, corriente y potencia en el lado del secundario, con cargas adicionales.

.Lo que esta *Figura 6.5.9* muestra es la comparación entre la potencia de referencia (en verde) y la potencia controlada (en rojo). Se aprecia como la variable controlada es capaz de seguir la referencia con la evolución del tiempo, aunque se presentan sobreoscilaciones al principio y al inicio de cada Step.



Figura 6.5.9: Comparación de la potencia de referencia con la potencia controlada.

En esta *Figura 6.5.10* se puede observar la evolución del desfase en el tiempo, las mismas sobreoscilaciones mencionadas antes, son las que también afectan a esta variable al principio y en el inicio de los Steps. Se puede ver como el ángulo varía con cada perturbación en el sistema, afectando el ciclo de trabajo en los MOSFET y variando así el flujo de carga.



Figura 6.5.10: Desfase en el secundario, con cargas adicionales.

6.6.- DISCRETIZACIÓN DEL REGULADOR DE TENSIÓN

Para discretizar el regulador de tensión se ha seguido el procedimiento descrito a continuación:

Asumiendo un sistema básico como el mostrado en la *Figura 6.6.1*:

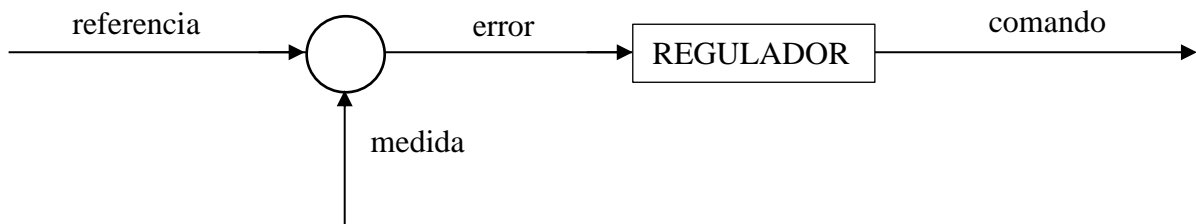


Figura 6.6.1: Diagrama de bloques.

Partiendo de la función de transferencia del diagrama y sustituyendo s por z , se obtiene la ecuación (26):

$$H(z) = \frac{az^2 + bz^1 + cz^0}{dz^2 + ez^1 + fz^0} \quad (26)$$

Si se multiplica el numerador y el denominador por z^{-2} , resulta la ecuación (27):

$$H(z) = \frac{az^0 + bz^{-1} + cz^{-2}}{dz^0 + ez^{-1} + fz^{-2}} \quad (27)$$

Siendo $z^0 = n$, $z^{-1} = n-1$ y $z^{-2} = n-2$, y multiplicando en cruz, se obtiene la ecuación (28):

$$a.in[n] + b.in[n-1] + c.in[n-2] = d.out[n] + e.out[n-1] + f.out[n-2] \quad (28)$$

Donde in simboliza el error de tensión y out es el comando de tensión.

Así pues, se despeja $out[n]$, resultando la ecuación (29):

$$out[n] = \frac{a.in[n] + b.in[n-1] + c.in[n-2] - e.out[n-1] - f.out[n-2]}{d} \quad (29)$$

Para poder implementarlo en PLECS, la s se sustituye por la igualdad mostrada en la ecuación (30):

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (30)$$

Para comprobar si el procedimiento seguido es el correcto, se coloca en paralelo un bloque fdt y otro fdt discreto, y se comprueba si, efectivamente, la salida es la misma.

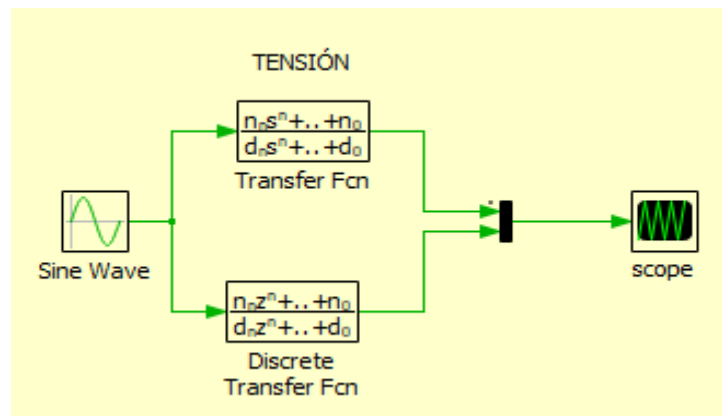


Figura 6.6.2: Regulador de tensión discretizado en PLECS.

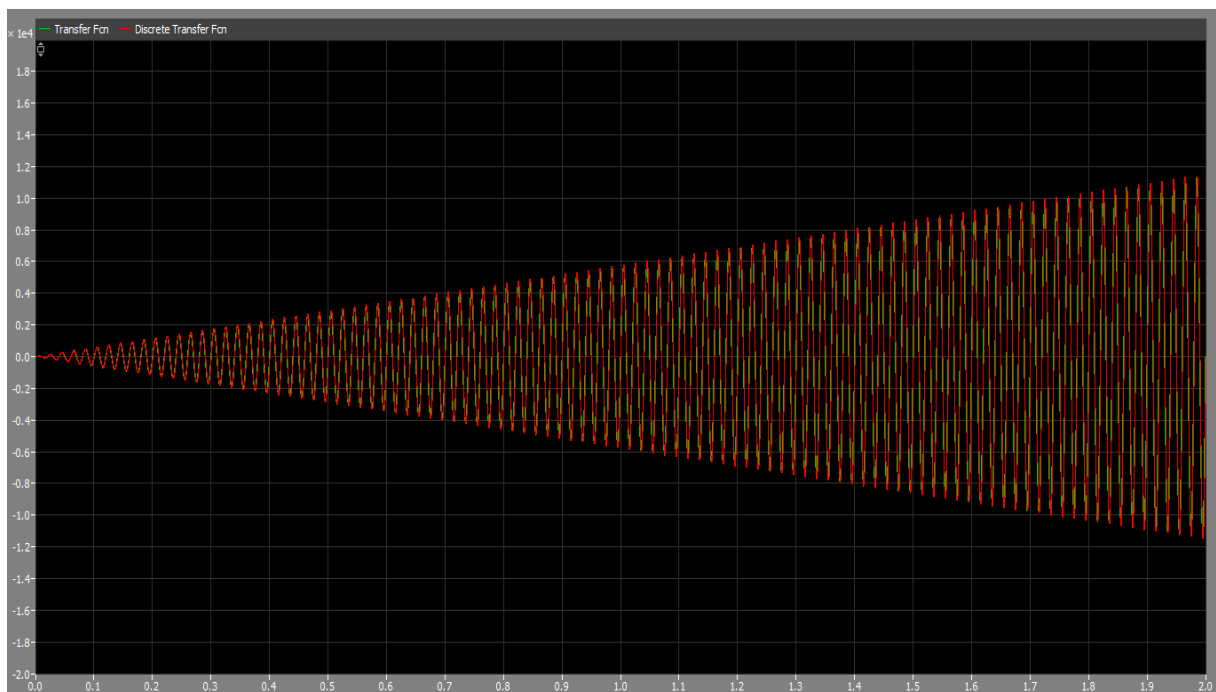


Figura 6.6.3: Comparación en la respuesta de reguladores discretizados en PLECS.

Efectivamente, se comprueba como ambas señales están sobrepuestas, lo que indica que se ha realizado correctamente la sintonización. En la siguiente Figura 6.6.4, se ha realizado un zoom entre los instantes 1,3 s y 1,4 s, y se puede apreciar de forma más precisa esta comparativa.

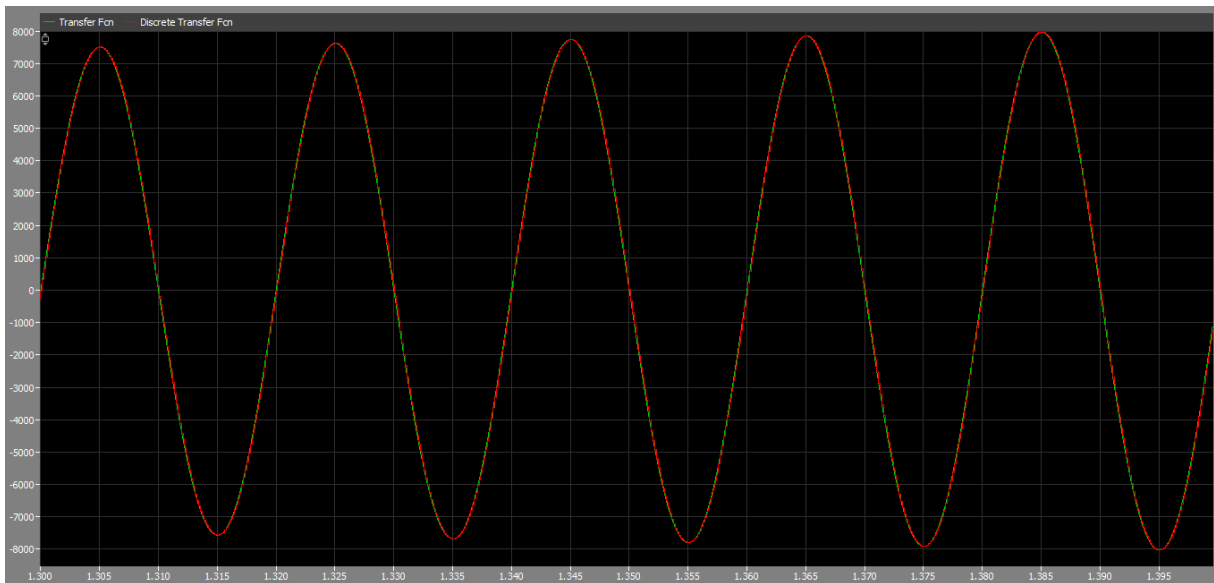


Figura 6.6.4: Comparación en la respuesta de reguladores discretizados en PLECS (zoom).

6.7.- CONTROL DEL LAZO DE TENSIÓN Y POTENCIA EN PLECS CON REGULADOR DISCRETIZADO

En este apartado, se ha incorporado la discretización del regulador de tensión realizada anteriormente. Así pues, el regulador PI que, controlaba el lazo de tensión, se ha sustituido por el regulador discretizado, como se muestra en la *Figura 6.7.1*:

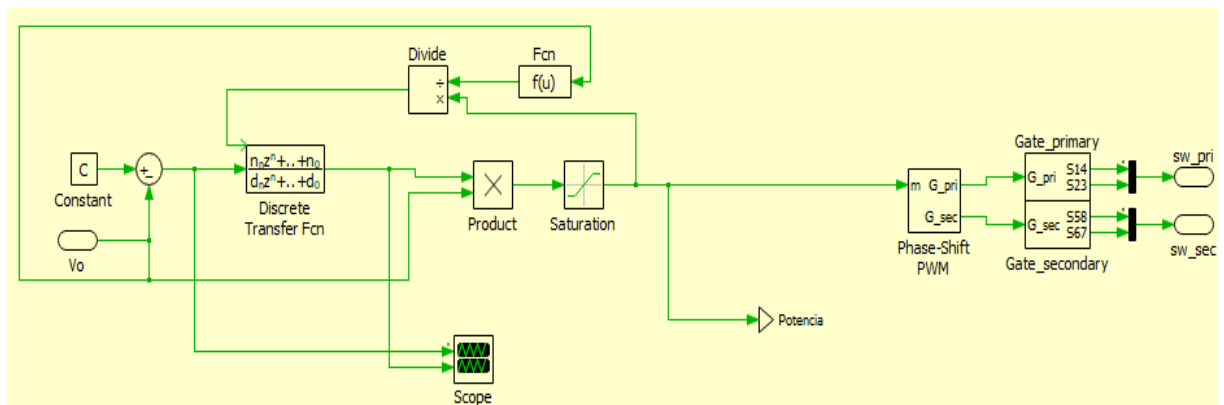


Figura 6.7.1: Esquema del lazo de control de tensión con regulador discretizado.

Para comprobar la correcta discretización del regulador y, con ello, el adecuado funcionamiento del sistema se procede a simular y medir las variables tensión, corriente, potencia y desfase. Para ello, al igual que anteriormente, se han introducido Steps para simular cargas y ver la respuesta de las variables ante estas perturbaciones en el sistema.

En esta *Figura 6.7.2* se puede observar una comparativa entre la potencia de referencia (en verde) y la potencia controlada (en rojo). Se aprecia como la variable controlada es capaz de seguir la referencia con la evolución del tiempo, aunque se presentan sobreoscilaciones al principio y al inicio de cada Step.



Figura 6.7.2: Comparación de la potencia de referencia con la potencia controlada, con regulador.

En esta *Figura 6.7.3*, se pueden observar cuatro gráficas, que corresponden a mediciones de tensión, corriente y potencia en el lado del secundario.

En la primera gráfica, se muestran la tensión de referencia (en rojo) y la tensión controlada (en verde). Se puede observar como, pese a las sobreoscilaciones, anteriormente comentadas, la tensión controlada logra seguir a la tensión de referencia, aunque en este caso, después de cada Steps, se tiene un pequeño error en régimen permanente de apenas 10 V. Lo que supone un error del 2.5%.

La segunda gráfica se centra en presentar la corriente inyectada por los Steps, que simula las cargas adicionales en el sistema.

En cuanto a la tercera gráfica, se muestra la potencia en el secundario, la cual se ha calculado multiplicando la tensión por la corriente, y también se observa como al igual que las demás variables varía en función del valor del Step.

Por último, en la cuarta gráfica se observa la evolución de la corriente que circula por el condensador, viéndose también afectada por las sobreoscilaciones, anteriormente comentadas.

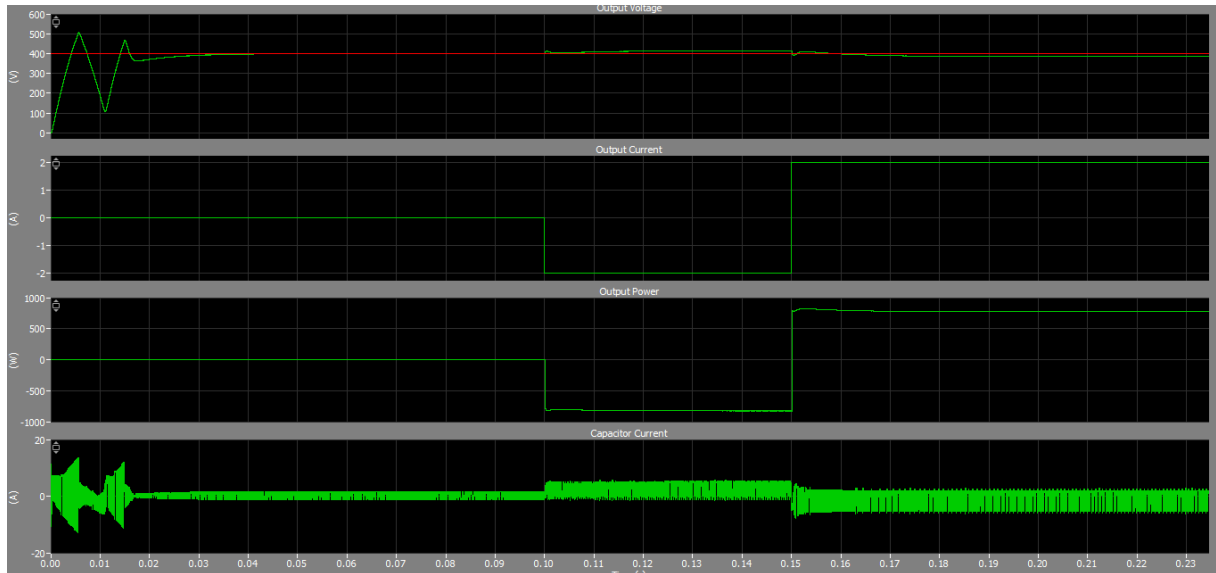


Figura 6.7.3: Tensión, corriente y potencia, con cargas adicionales y regulador discretizado.

En esta *Figura 6.7.4*, se puede observar la evolución del desfase en el tiempo, las mismas sobreoscilaciones mencionadas antes, son las que también afectan a esta variable al principio y en el inicio de los Steps. Se puede ver como el ángulo varía con cada perturbación en el sistema, afectando el ciclo de trabajo en los MOSFET y variando así el flujo de carga.

A la vista de todos los resultados obtenidos, se puede concluir de forma satisfactoria, la correcta discretización del regulador de tensión.

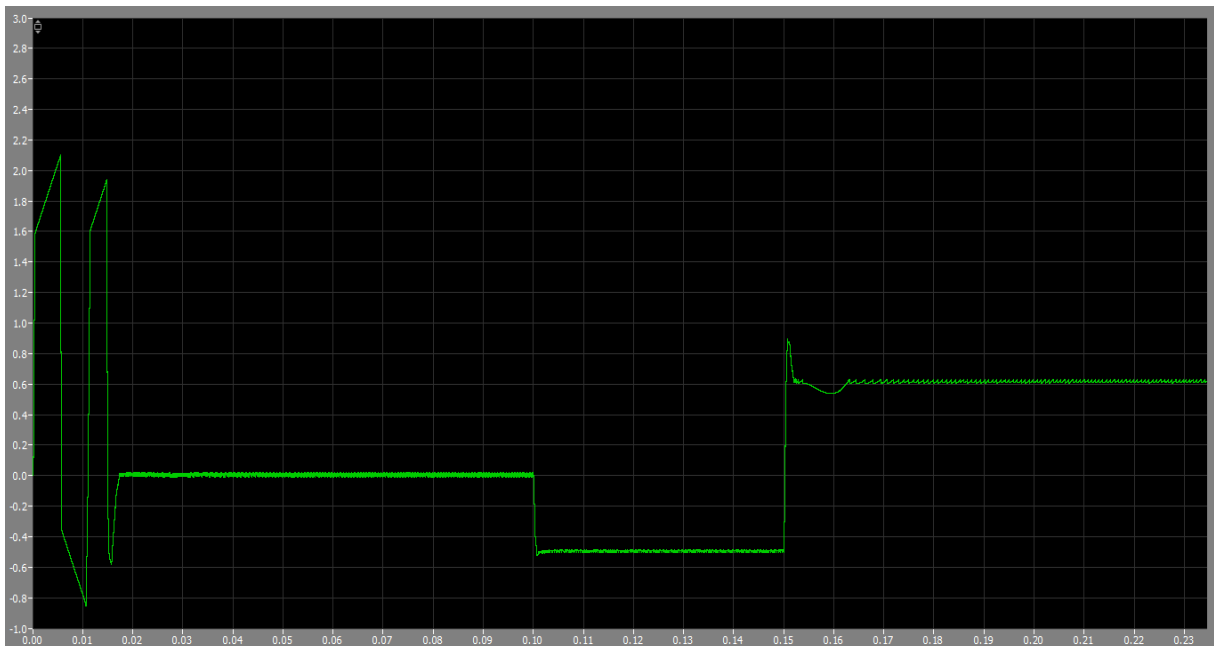


Figura 6.7.4: Desfase en el secundario, con cargas adicionales y regulador discretizado.

6.8.- IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN SIMULINK

En este apartado se ha procedido a llevar toda la parte de control realizada en PLECS a SIMULINK, y se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema.

En esta *Figura 6.8.1*, se puede apreciar como el control del sistema se ha realizado en SIMULINK, dentro del bloque Phase Shift Controller, pero la planta se ha mantenido en PLECS.

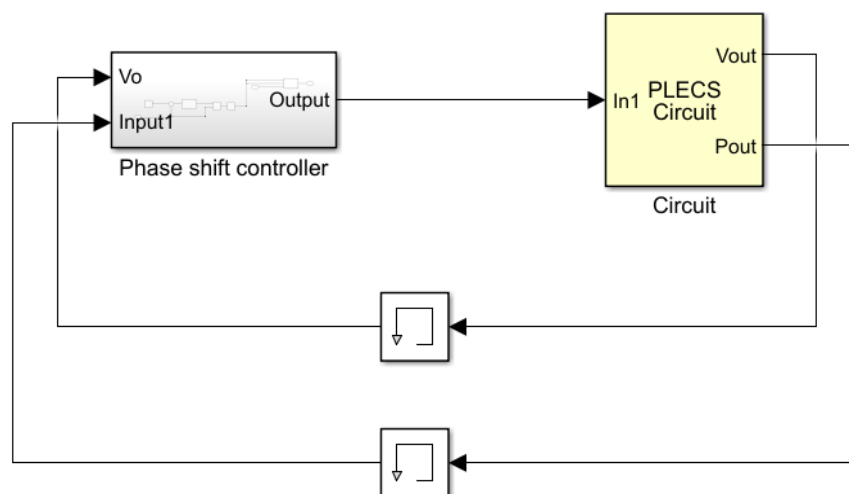


Figura 6.8.1: Control del sistema en SIMULINK.

A través de la *Figura 6.8.2*, se observa la planta en PLECS, pero con la entrada In1, que es la variable controlada de la tensión y la salida Vout, que simboliza la tensión de referencia que llega al bloque de control de tensión.

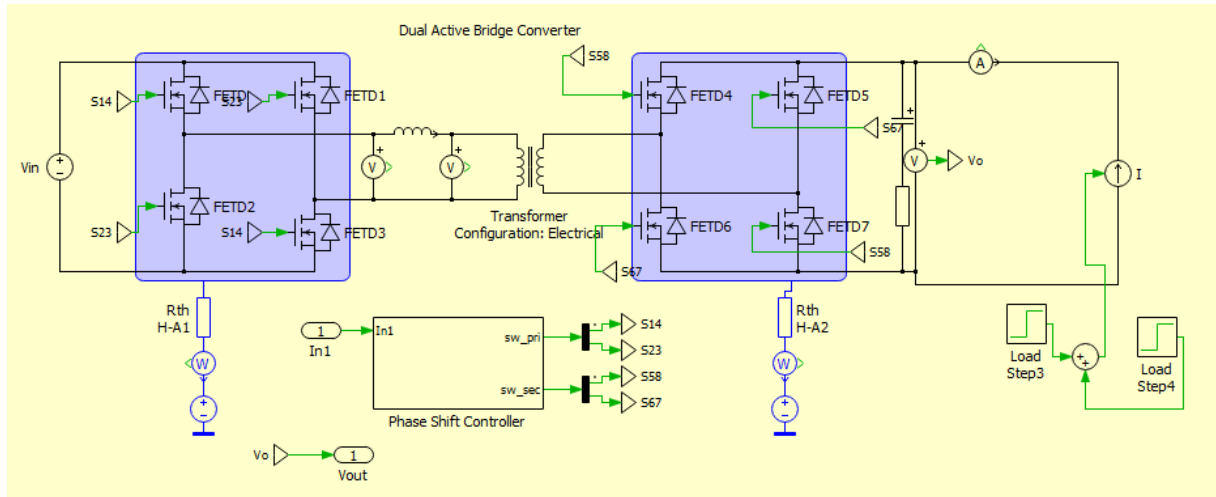


Figura 6.8.2: Planta en PLECS con entradas y salidas de control en SIMULINK.

En esta *Figura 6.8.3*, se observa el control de potencia implementado en SIMULINK, cuya variable de entrada es la potencia medida y la variable de salida es el desfase.

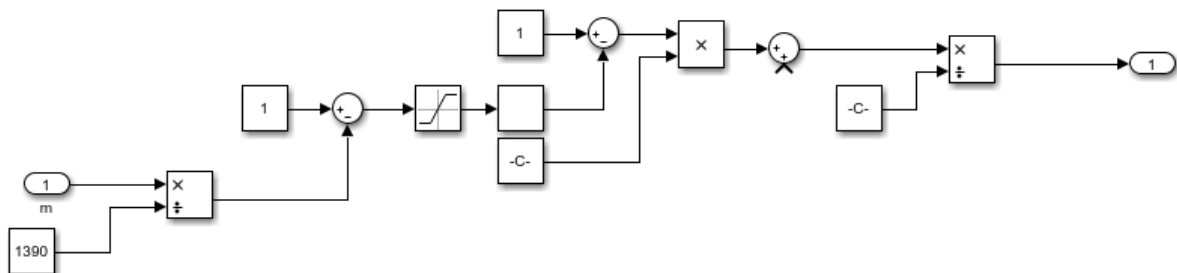


Figura 6.8.3: Lazo de control de potencia implementado en SIMULINK.

La *Figura 6.8.4* muestra el control del lazo de tensión implementado en SIMULINK, con el regulador discretizado, cuya variable de entrada es la tensión de referencia, que se compara con la tensión medida, y la variable de salida es la potencia que llega al bloque Phase-Shift PWM, donde se encuentra el lazo de control de potencia.

El motivo principal, por el cual, se ha trasladado la parte de control al entorno de SIMULINK ha sido facilitar un posterior control del sistema mediante la herramienta Toolbox C2000, para la generación automática de código, con la intención futura de implementar la simulación en Hardware In The Loop.

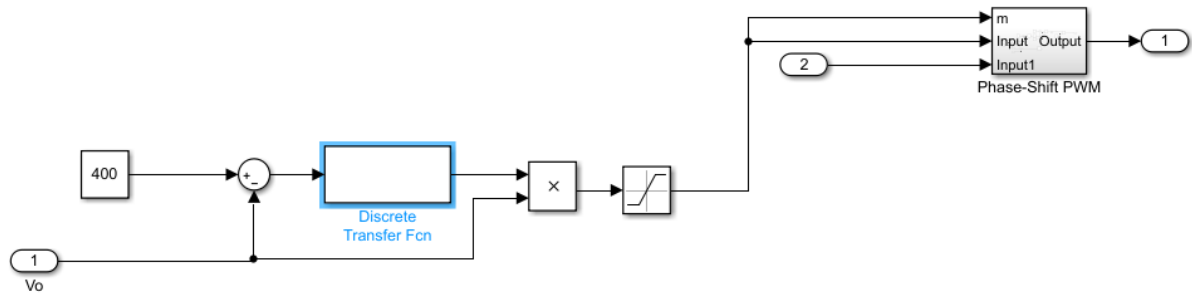


Figura 6.8.4: Lazo de control de tensión implementado en SIMULINK, con regulador discretizado.

7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1.- CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados obtenidos en anteriores apartados, se concluye de forma satisfactoria que se han conseguido los objetivos iniciales del trabajo, bajo las especificaciones marcadas. Se ha logrado dimensionar las baterías para el Battery Pack, así como realizar un control del convertidor bidireccional DAB, tanto de tensión, como de potencia, y a través de diferentes métodos de control, en base a los cálculos realizados de cada componente de la planta y su comportamiento estático y dinámico. Por último, se ha estudiado e implementado el control del sistema en diferentes entornos, como PLECS y SIMULINK, en los cuales se han obtenido los resultados deseados y se ha abierto un interesante camino de desarrollo para este Battery Pack.

Se ha concluido también que estas estaciones de carga son una salida viable ante la crisis energética que se está viviendo en estas zonas sin acceso a red eléctrica. Especialmente, gracias a este Battery Pack, el cual, permite llevar la electricidad a cada hogar, para cubrir las necesidades más básicas.

7.2.- TRABAJOS FUTUROS

La pobreza energética es un reto difícil de abordar en la región del África subsahariana. Diecinueve de cada veinte países con la menor tasa de electrificación en el mundo se encuentran en esta zona geográfica [8].

Proveer de electricidad a comunidades remotas de cualquier zona rural en estos país supone una tarea, hoy por hoy, imposible. Las líneas de distribución pueden llegar a costar alrededor de 20000 € por kilómetro construido [9]. Debido a la baja población y la escasa densidad de carga, el retorno de esta inversión no sería aceptable para ninguna empresa. Por este motivo, las soluciones fuera de la red, como este Battery Pack, ofrecen una alternativa a la extensión de la red. Estos Kits de baterías pueden ser instalados en una amplia variedad de arquitecturas para proveer con energías renovables, de un servicio de electricidad modesto a comunidades remotas.

Para poder controlar este Battery Pack, es necesario un control que sea capaz de satisfacer una serie de condiciones: de fiabilidad, velocidad e, incluso, manejabilidad.

Recientemente, se están produciendo grandes mejoras en la electrónica de potencia, con el uso también creciente de las energías renovables. Estos avances son fruto de una evolución enorme del control digital, el cual cada vez adquiere más relevancia en comparación con el control analógico. Esto se debe a que el control digital permite diseñar algoritmos de mayor complejidad, con capacidad de reprogramación y con mucha más fiabilidad que el control analógico.

Así pues, como en multitud de proyectos de ingeniería, pero especialmente debido a la gran cantidad de energía que puede manejarse, un regulador de un convertidor de potencia, como en este caso, el convertidor bidireccional de puente completo, debe sufrir simulaciones exhaustivas antes de ser probado en una planta real. No obstante, este control digital, ligado a la naturaleza analógica de la planta, da lugar a un sistema híbrido y difícil de simular. Debido a esto, tradicionalmente, han existido algunas opciones de simulación, en las cuales premia una simulación conjunta, usando simuladores que soportan modelos esquemáticos y código digital, pero cuyo rendimiento es muy bajo[10].

Una alternativa, que está ganando una gran popularidad en los últimos años, es el control mediante técnicas HIL (Hardware In The Loop), que se fundamentan en incluir simuladores en tiempo real que imiten el comportamiento de la planta a simular. De esta manera, el simulador HIL emulará el convertidor de potencia y el usuario podrá probar su control digital con dicha planta emulada. Cada vez reciben mejor acogida este tipo de técnicas, pues se están llegando a lograr simulaciones en tiempo real en tiempos realmente bajos, entorno a las centenas de nanosegundos [11], [12].

Una de las múltiples ventajas de esta tecnología HIL, es que con ella se puede emular en software el convertidor de potencia para que el usuario tenga la posibilidad de probar el controlador digital en tiempo real. Es más, una característica aún más importante es que permiten depurar el controlador en su implementación final, ya que dicho regulador previamente implementado puede ser conectado físicamente al hardware de emulación, independientemente del lenguaje o tecnologías empleadas. Todo esto es posible ya que el sistema HIL es un dispositivo externo con las mismas entradas y salidas que tiene el convertidor real [13].

El esquema de la simulación mediante Hardware In The Loop sería el mostrado en la *Figura 7.2.1*:

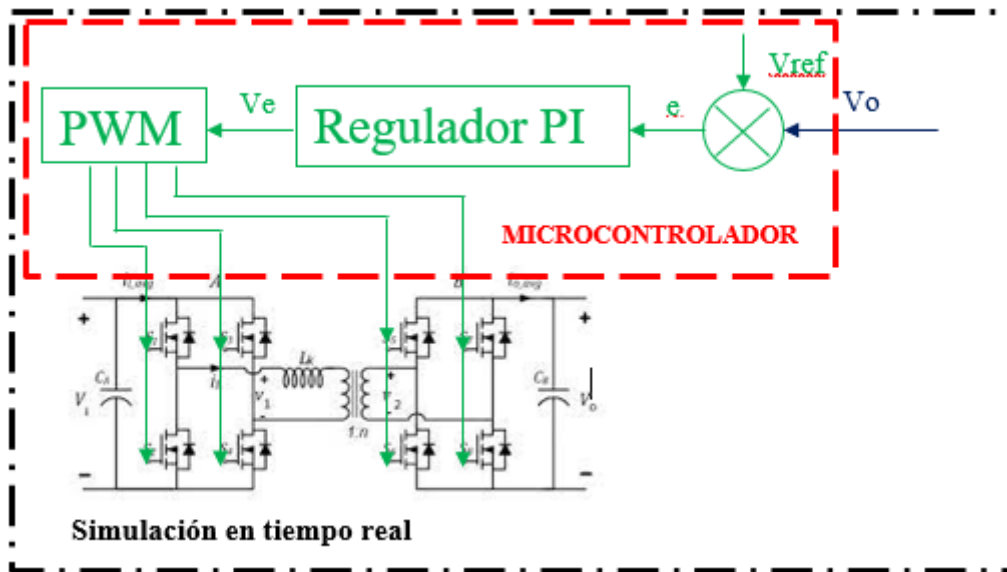


Figura 7.2.1: Esquema de la simulación mediante Hardware In The Loop.

Mediante esta implementación será mucho más sencillo y económico, la creación y puesta en marcha de un prototipo en el laboratorio.

8. Bibliografía

- [1] H. Louie, M. Shields, S. J. Szablya, L. Makai, and K. Shields, “Design of an off-grid energy kiosk in rural Zambia,” *Proc. 5th IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. GHTC 2015*, no. November, pp. 1–6, 2015.
- [2] M. Shields, H. Louie, B. Blainedavis, G. Goldsmith, and D. Nausner, “Technical design of Off-grid energy kiosks,” *GHTC 2016 - IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. Technol. Benefit Humanit. Conf. Proc.*, pp. 387–394, 2016.
- [3] H. Louie, *Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries*. 2018.
- [4] “Consumo básico de electrodomésticos | Argentina.gob.ar.” [Online]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/enre/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>. [Accessed: 15-Jul-2022].
- [5] I. Eurostat, Ministerio de Industria Energía y Turismo, “Consumos del Sector Residencial en España. Resumen de Información Básica,” *1*, vol. 1, pp. 1–16, 2016.
- [6] S. Saeed and H. Gerges, “Design and Construction of an Isolated DC to DC Switching Converter for Integration of Energy Storage Systems in Power Electronic Applications,” 2015.
- [7] J. A. G. Moreno, “Control de Puentes Activos Duales (DABs) en Sistemas Bidireccionales de Alimentación con Alta Densidad de Potencia,” p. 206, 2015.
- [8] S.G. Banerjee *et al.*, “Global Tracking Framework,” *Sustain. Energy All, World Bank.*, vol. 3, no. WASHINGTON D.C., p. 289, 2013.
- [9] “Alliance for Rural Electrification: ‘Hybrid mini-grids for rural electrification: lessons learned’ [Online]. Available: <http://www.ruralec.org/38.0.html>(Accessed May 2015).” .
- [10] Á. de C. Martín, “Aplicación del Control Digital Basado en Hardware Específico para Convertidores de Potencia Conmutados,” 2003.
- [11] M. Matar and R. Iravani, “FPGA implementation of the power electronic converter model for real-time simulation of electromagnetic transients,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 852–860, 2010.

- [12] X. Yang, C. Yang, T. Peng, Z. Chen, B. Liu, and W. Gui, “Hardware-in-the-Loop Fault Injection for Traction Control System,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 696–706, 2018.
- [13] A. Sanchez, A. De Castro, and J. Garrido, “Parametrizable Fixed-Point Arithmetic for HIL with Small Simulation Steps,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 7, no. 4, pp. 2467–2475, 2019.