



Universidad
Carlos III de Madrid

GRUPO DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA (GSEP)
DPTO. TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE

I.T.I ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

ALUMNO:
LARA AGUILERA ESCOBAR

TUTORES:
CLARA MARINA SANZ GARCÍA
CRISTINA FERNANDEZ HERRERO

Índice de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 ¿Por qué Pilas de combustible?.....	2
1.1.1 Ventajas.....	2
1.1.2 Inconvenientes.....	5
1.2 ¿Qué es una pila de combustible?.....	7
1.2.1 Funcionamiento.....	7
1.2.2 Tipos.....	11
1.3 Aplicación de las pilas de combustible en el transporte.....	15
1.4 Sistema eléctrico de un avión.....	18
2. Objetivos y especificaciones.....	20
3. Diseño de los distintos bloques del sistema.....	23
3.1. Pila de combustible.....	23
3.2. Acondicionador de la pila de combustible para generar el bus de distribución.....	34
3.3 Batería	49
3.4 Alimentación de cargas de continua desde el bus de distribución.....	52
3.5 Alimentación de cargas de alterna desde el bus de distribución.....	67
4. Diseño del sistema completo.....	79
4.1 Diseño del circuito completo con una batería ideal.....	79
4.2 Circuito completo alimentado por la pila de combustible.....	83
5. Análisis del sistema completo.....	99
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	129
7. Anexos.....	131
8. Bibliografía y referencias.....	169

1. Introducción

El creciente volumen del transporte en la sociedad actual está contribuyendo a una mayor presión sobre el medio ambiente, especialmente por lo que al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad se refiere. Las medidas adoptadas en la actualidad para contrarrestar dicha tendencia pretenden desacelerar esta tasa de crecimiento. Los progresos tecnológicos están consiguiendo reducir, pese a los crecientes volúmenes de tráfico, los niveles de contaminación atmosférica generados por diversos tipos de transporte. Son el transporte aéreo y por carretera los que crecen a mayor velocidad en la actualidad y por ello, los que mayores emisiones de CO₂ generan. Una de las principales vías de desarrollo de nuevas tecnologías en este campo son las pilas de combustible, ya que una de sus características inherentes es la emisión cero si se utiliza como combustible hidrógeno puro. Es por esto que están siendo consideradas para su futura incorporación en vehículos híbridos ultraligeros.

La finalidad de este proyecto será el diseño de un sistema **sencillo** de generación de energía basado en **pilas de combustible** que podría ser utilizado como análisis preliminar para la creación de un sistema de alimentación que proporcione energía al **sistema eléctrico de un avión**.

1.1 ¿Por qué Pilas de combustible?

Las pilas de combustible tienen muchas ventajas, pero también tienen una serie de inconvenientes a tener en cuenta [2].

1.1.1 Ventajas

- **Beneficios medioambientales**

a) *Altas eficiencias en la utilización de combustible.* El hecho de que las pilas de combustible realicen, a través de una conversión electroquímica, una conversión directa del combustible a energía, hace que estos dispositivos sean capaces de producir más energía con la misma cantidad de combustible de la que se produce en una combustión tradicional. De esta forma su eficiencia no está vinculada a su temperatura máxima de funcionamiento. Este proceso directo genera que las eficiencias puedan alcanzar valores

entre un 30-65% dependiendo del sistema de pila de combustible utilizado y que además, el calor adicional producido pueda ser aprovechado. La Fig. 1 establece una comparativa entre la eficiencia de las pilas de combustible comparada con otros sistemas de generación de energía eléctrica.

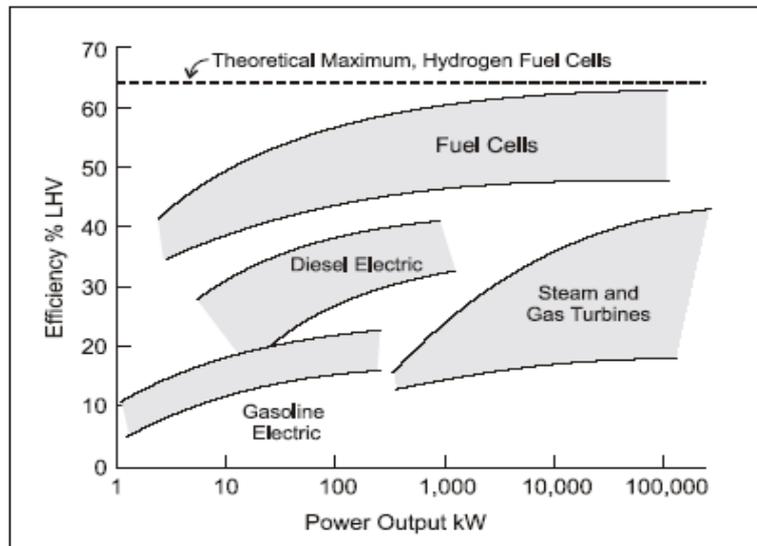


Fig. 1 Comparativa de la eficiencia de las pilas de combustible y otros sistemas de generación de energía eléctrica.

b) *Emisión cero de contaminantes.* Cuando el combustible es hidrógeno, los productos obtenidos en la reacción electroquímica catalizada de la pila de combustible son H₂O, calor y electricidad, en lugar de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y otras partículas inherentes a la combustión de combustibles fósiles. La extracción de hidrógeno puro se produce haciendo pasar a los combustibles fósiles por un reformador. Este proceso emite tan sólo una fracción de las emisiones que produciría una combustión tradicional de la misma cantidad de combustible.

c) *Reducción del peligro medioambiental inherente de las industrias extractivas.* Cuando el hidrógeno es producido a partir de fuentes renovables, las pilas de combustible no generan el deterioro ambiental asociado a la extracción de combustibles fósiles de la Tierra. Un escape de hidrógeno supone la evaporación instantánea del mismo debido a que éste es más ligero que el aire. De este modo, la utilización de hidrógeno sería una posible solución para atenuar el impacto ambiental que han generado las perforaciones petrolíferas, el transporte, el refinado y los productos de desecho asociados.

- Beneficios en la ingeniería de pilas de combustible.

a) *Admisión de diversos combustibles.* Cualquier combustible que incluya hidrógeno en su composición, puede ser reformado. De este modo, pueden emplearse para este proceso combustible como el gas natural, el gasóleo o el metanol.

b) *Altas densidades energéticas.* La cantidad de energía que puede generar una pila de combustible es dada generalmente en kWh/l. Esta capacidad aumenta conforme se realizan nuevas investigaciones y desarrollos en esta tecnología.

c) *Bajas temperaturas y presiones de operación.* Si se compara el rango de temperatura que puede alcanzar una pila de combustible (entre 80 y 1000° C dependiendo del tipo de pila) con las temperaturas que alcanza una combustión interna en un vehículo (unos 2300°C) estos dispositivos trabajan a temperaturas que pueden considerarse bajas.

d) *Flexibilidad de emplazamiento.* Las pilas de combustible pueden ser instaladas en multitud de lugares dadas sus características inherentes: operatividad sin ruidos, emisión cero y requerimientos mínimos.

e) *Capacidad de cogeneración.* El calor residual generado por la reacción electroquímica que realiza la pila de combustible puede ser reutilizado dentro del sistema alimentado por la misma. La capacidad de generación puede aumentar la eficiencia del sistema hasta el 65%.

f) *Carácter modular.* La construcción modular de las pilas de combustible supone una ventaja adicional: un cambio de escala en la potencia requerida se obtiene fácilmente mediante la interconexión de módulos.

g) *Simplicidad del dispositivo.* Las pilas de combustible carecen de partes móviles, lo que permite un diseño más simple, una mayor fiabilidad y operatividad, y un sistema menos propenso al deterioro.

- **Seguridad energética.** El hidrógeno utilizado como combustible puede ser producido a través del reformado de gas natural, electrólisis del agua o fuentes renovables (eólica o fotovoltaica). El rápido consumo de combustibles fósiles que requiera la sociedad moderna está acabando con un recurso limitado. La utilización de hidrógeno es ilimitada, y es por ello que una transición hacia una economía basada en la utilización del mismo evitaría los problemas actuales asociados al agotamiento del petróleo.
- **Independencia de la red de suministro.** Un sistema basado en pilas de combustible permite una independencia del mismo respecto a la red de suministro eléctrico. Esto evita problemas cuando existen irregularidades en dicha red, como cortes de corriente, que pueden causar daños al sistema.
- **Pilas de combustible frente a baterías tradicionales.** Las celdas de combustible ofrecen reducción en el peso y el tamaño para la misma cantidad de energía disponible frente a las baterías tradicionales. Además, un incremento de energía en las mismas tan sólo supone un aumento de la cantidad de combustible a introducir en el dispositivo. Para aumentar la energía en una batería, es necesario adicionar más baterías, con las desventajas que esto supone en incremento de coste, tamaño y complejidad. Una pila de combustible nunca se agota: produce electricidad mientras se le suministre combustible. Cuando una batería se agota debe ser sometida a un tiempo de recarga donde se reemplaza la electricidad gastada: dependiendo de donde se genere la electricidad, la contaminación, los costes y los problemas de eficiencia se transfieren de las baterías a la planta central.

1.1.2 Inconvenientes

- La producción de hidrógeno resulta costosa al no ser una fuente primaria.
- La obtención del hidrógeno puro supone un precio elevado.
- Alto coste destinado a los sistemas de almacenamiento y suministro.
- Elevado peso de las pilas de combustible para los prototipos actuales.
- Elevado gasto energético para licuar el hidrógeno.
- La producción de algunos componentes, al no ser a gran escala, aumenta el coste.

- Tecnología en desarrollo. Algunos problemas aún no resueltos afectan al funcionamiento de las pila de combustible, especialmente en lo que respecta a su vida útil. Esto repercute en su comercialización ya que cuenta todavía con una baja demanda, no pudiendo competir con tecnologías convencionales. Conforme la demanda se incrementa, los precios irán disminuyendo.
- Sensibilidad hacia los venenos catalíticos. Los electrodos de los que se componen las pilas de combustible incorporan catalizadores que favorecen el desarrollo de las reacciones electroquímicas. El contacto con los llamados venenos catalíticos (monóxido de azufre o monóxido de carbono) provocan su desactivación irreversible. En la actualidad se está estudiando la sustitución de estos catalizadores por materiales más resistentes.

1.2 ¿Qué es una pila de combustible?

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero se diferencia de ésta en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos (no requiere recarga), es decir, producirá electricidad a partir de una fuente externa de combustible y Oxígeno, en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que poseen las baterías [3].

1.2.1 Funcionamiento

El funcionamiento básico de una pila de combustible se explica, en este punto, a partir de una pila de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Cada una de las celdas que compone este tipo de pila de combustible cuenta con dos electrodos situados a ambos lados de una membrana electrolítica que permite el paso de iones pero no de electrones. La Fig. 2 muestra un dibujo esquemático de una pila de combustible tipo PEM.

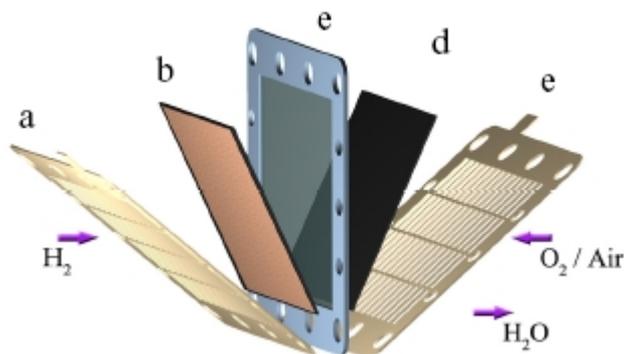


Fig. 2. Dibujo esquemático de una pila de combustible tipo PEM, donde a) placa de metal (ánodo) que se corresponde con el terminal negativo de la pila de combustible, b) capa de difusión, fabricada a base de carbono y una fina placa de platino, c) membrana electrolítica, d) capa de difusión, fabricada a base de carbono con una capa catalizadora de platino, e) placa de metal (cátodo) que se corresponde con el terminal positivo de la pila de combustible.

El funcionamiento de esta tecnología está basado en reacciones electroquímicas entre un combustible y un oxidante sin ningún ciclo de combustión intermedio. Para generar electricidad es necesario hacer pasar Oxígeno (oxidante), que a menudo proviene del

aire, a través del cátodo; e Hidrógeno (combustible), procedente de petróleos o carbones, a través del ánodo. Estimulado por un catalizador como el platino, el átomo de Hidrógeno se divide en un ión y un electrón, los cuales toman diferentes caminos hacia el cátodo: los iones, en este caso H^+ , migran a través del electrolito, mientras que los electrones (e^-) circulan a través de un circuito externo donde se produce una corriente que puede ser utilizada para alimentar dispositivos eléctricos. En el cátodo, las moléculas de Oxígeno se rompen en átomos, y se combinan con los iones de hidrógeno y los electrones para formar, también con ayuda del catalizador, moléculas de H_2O y calor. Durante todo el proceso no se emiten contaminantes. La Fig. 3 muestra el esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM.

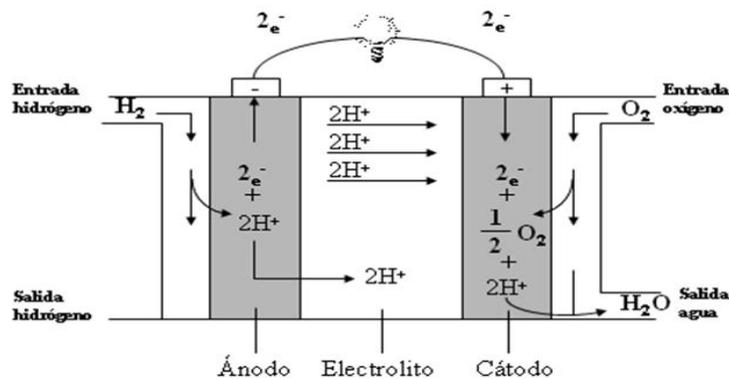


Fig. 3 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM.

La energía en las pilas de combustible es generada, por tanto, por una reducción de oxígeno Eq. (2) en el cátodo y una oxidación del hidrógeno Eq. (1) en el ánodo.



Como la reacción rédox que tiene lugar es de carácter exotérmico Eq. (3), uno de los subproductos que se generarán, además del H_2O y de la electricidad, será el calor.

Cada celda electroquímica produce aproximadamente y de forma teórica 1.3 V. La tensión real variará en un rango de 0.6 V a 0.85 V a causa de las pérdidas producidas en el interior de la celda. Para aplicaciones de potencia es necesario apilar un número determinado de celdas para formar la pila de combustible, cuyo voltaje aumenta en proporción al número de celdas apiladas [4], [13].

Para que la pila de combustible funcione correctamente, es necesaria la existencia de un sistema de control para proporcionar el aire y el combustible necesarios para suministrar la potencia requerida, eliminar los subproductos y el calor producidos en las células y convertir la potencia CC no regulada en regulada o en CA de calidad para la inyección en red.

El sistema de control de la pila de combustible se compone de los siguientes subsistemas:

- *Control de caudal de los reactivos:* mediante una válvula (Hidrógeno) y un compresor (Oxígeno) se proporcionan de forma rápida los caudales de los reactivos necesarios, asegurando una respuesta transitoria rápida y una operación segura minimizando el consumo auxiliar.
- *Gestión de las variables a controlar:* Es necesario que variables como los gases, la temperatura, la potencia y la hidratación de la membrana de la pila de combustible, estén controladas en todo momento para garantizar un correcto funcionamiento del dispositivo. Para ello, el sistema de control cuenta con elementos de refrigeración (circuito de agua con ventilador), de humidificación (bomba) o para el control de la temperatura, que garanticen que estas variables se encuentren en todo momento dentro de sus rangos válidos de actuación.

La Fig. 4 muestra el sistema auxiliar necesario para controlar el correcto funcionamiento de la pila de combustible.

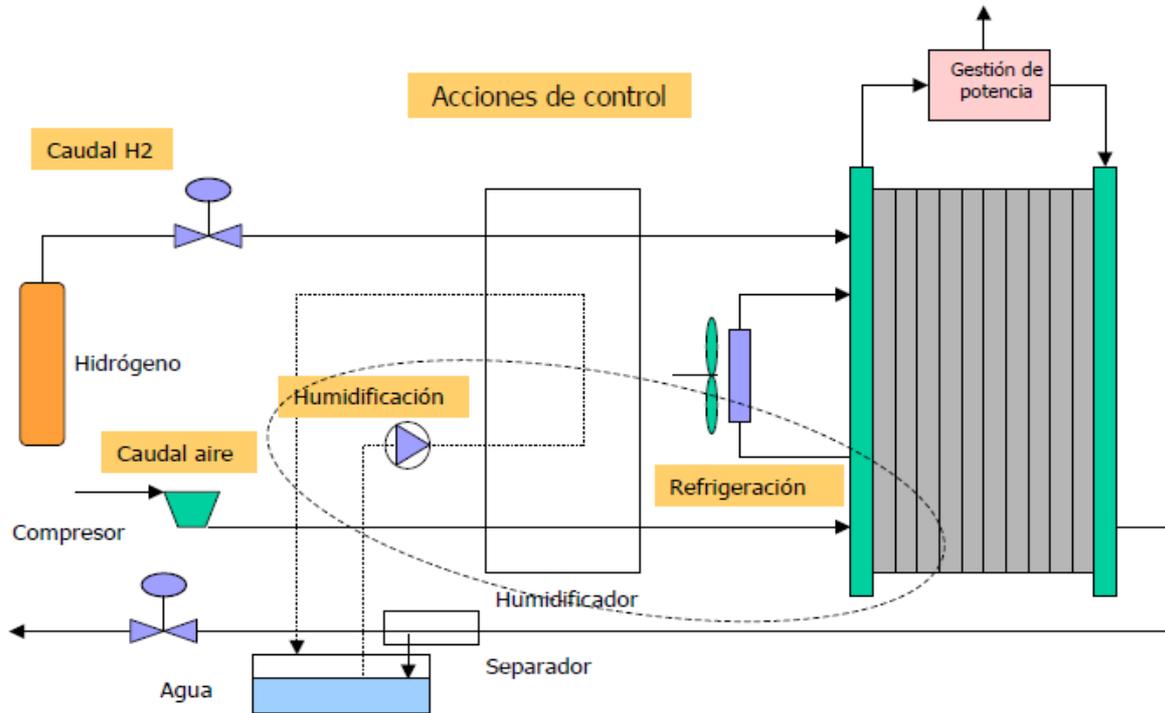


Fig. 4 .Sistema de control de la pila de combustible.

El cometido principal del sistema de control de la pila de combustible es garantizar una respuesta transitoria rápida y proporcionar al dispositivo robustez y adaptación a la potencia requerida [5].

1.2.2 Tipos

Existen diferentes tecnologías de pilas de combustible en el mercado clasificadas de acuerdo al electrolito que emplean, a su temperatura de funcionamiento, etc. La Fig. 5 muestra los segmentos del mercado donde se están introduciendo sistemas basados en pilas de combustible, el coste que implica esta incursión para cada uno de ellos y los tipos de célula de combustible competitivas en cada sector del mercado.

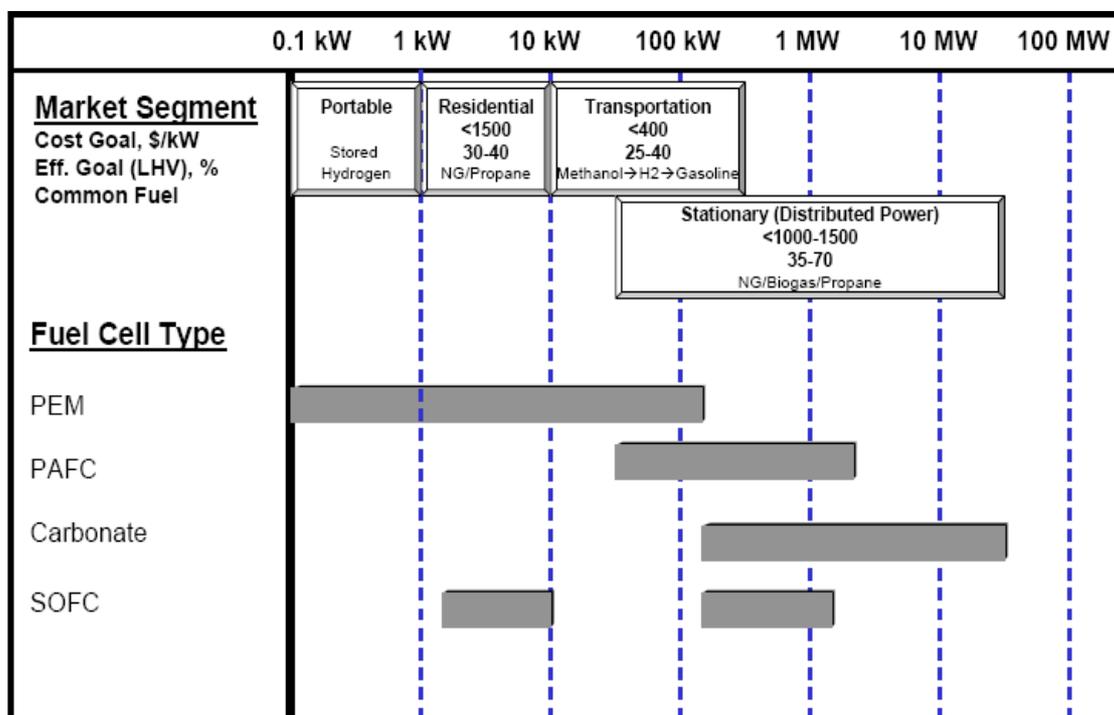


Fig. 5 Tabla resumen de la incorporación de los diferentes tipos de pilas de combustible a los distintos sectores de mercado.

Como puede observarse en la Fig. 5, las pilas de combustible de baja temperatura como las PEM (Proton Exchange Membrane) y PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) están siendo utilizadas en dispositivos portátiles, energía residencial y aplicaciones de transporte. Esto es debido a las prestaciones que esta tecnología ofrece: construcción ligera, compacta y rápida puesta en marcha. Por otro lado, las pilas de combustible de alta temperatura, como los dispositivos de carbonatos fundidos (carbonate) y los de óxido sólido (SOFC - Solid Oxide Fuel Cells), ofrecen simplicidad y un aumento en la eficiencia. Se centran en la generación estacionaria de potencia a corto plazo y en grandes plantas de generación

de energía (10-50 MW) a largo plazo. Además, los costes en las pilas de combustible de alta temperatura tienden a reducirse por el fácil procesado de combustible que éstas requieren [6], [9].

Sin embargo, es necesario realizar un estudio de cada aplicación concreta para determinar el modelo de pila de combustible más adecuado para garantizar un correcto funcionamiento. De los tipos de pilas de combustible disponibles en el mercado, las más apropiadas para la generación de energía en sistemas eléctricos, dentro del sector transporte, son las pilas de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane) y las tipo SOFC (Solid Oxide Fuel Cells). A continuación se realizará un estudio de las características más importantes de ambos tipos de pilas para determinar cuál de ellos es el más apto para el diseño del sistema que se describe en este proyecto.

Pila de combustible tipo PEM

Las pilas de combustible tipo PEM operan a temperaturas relativamente bajas y se caracterizan por tener una alta densidad de potencia y capacidad para variar rápidamente su salida a la hora de atender a cambios en la demanda de la misma. Estas características las hacen adecuadas para aplicaciones donde se requiere un arranque rápido, ya que necesitan menos tiempo de calentamiento que otros tipos de pila. Además, la utilización de un polímero sólido como electrolito evita los problemas asociados a los electrolitos líquidos, por ejemplo, reduce la corrosión, lo que supone un menor desgaste de los componentes del sistema y por tanto, una mayor durabilidad de los mismos. Es importante destacar que este tipo de pila mantiene una relación favorable entre su dimensión (pueden considerarse pequeñas y relativamente ligeras) y la energía que producen.

Las pilas de combustible tipo PEM operan con un catalizador de platino. Esto, además de encarecer el sistema, supone otra desventaja: hace a esta tecnología extremadamente sensible a la contaminación por CO, por lo que es necesario utilizar un reactor adicional para reducir el nivel del mismo en el gas combustible. Este problema se agudiza cuando el hidrógeno utilizado proviene de un combustible alcohol o hidrocarburo [2].

Pila de combustible tipo SOFC

Las pilas de combustible tipo SOFC se caracterizan por trabajar a temperaturas muy elevadas. Esto supone una serie de ventajas derivadas de dicha temperatura de trabajo: mayor eficiencia, posibilidad de utilizar catalizadores más baratos que el platino y flexibilidad a la hora de utilizar otros tipos de combustibles (incluso hidrocarburos). Además, la construcción de cerámica sólida de la celda remite el problema de corrosión característico de pilas con electrolito líquido. La ausencia de líquido también elimina el problema de movimiento de electrolito y no inunda los electrodos.

Las altas temperaturas de trabajo en las pilas de combustible tipo SOFC también suponen una serie de desventajas en su funcionamiento. Así como la utilización de un electrolito cerámico reduce la corrosión en los componentes de la pila, el rango de temperaturas a las que actúa dicha tecnología (800-1000° C) aumenta la corrosión y la ruptura de los componentes de la misma, ralentiza su arranque y hace necesaria una abundante protección para evitar fugas de calor. Las altas temperaturas afectan también a la duración de los materiales: una de las claves del reto tecnológico al que se somete a las pilas de combustible tipo SOFC es el desarrollo de materiales a bajo precio y de larga duración que soporten las temperaturas a las que funciona esta tecnología [2].

Comparativa

La Tabla 1 muestra un resumen comparativo de las principales características técnicas de las pilas de combustible tipo PEM y tipo SOFC [7].

Pila de combustible	Tª de trabajo (° C)	Tiempo de encendido (h)	Densidad de potencia (mWcm ⁻²)	Eficiencia Eléctrica (%)	Combustibles	P (kW)	Intolerancias frente al combustible reformado
PEM	60-100	<0.1	420	45-60%	Hidrogeno puro y reformado	1-10kW	CO=>↓η
SOFC	800-1000	-	120	50-65% (70% Trabajando con turbina)	Hidrógeno, gas metano y natural, CO	Más de 100kW	No hace falta reformar el combustible

Tabla 1. Características técnicas de las pilas de combustible tipo PEM y SOFC.

Partiendo de las características técnicas de ambos tipos de pila de combustible expuestas en la Tabla 1, la Tabla 2 muestra los principales campos de aplicación de las tecnologías PEM y SOFC.

Pila de combustible	Aplicaciones
PEM	Tecnologías móviles, transporte, vehículos espaciales, aplicaciones militares, sistemas de almacenamiento de energía o instalaciones estacionarias.
SOFC	Aplicaciones de alta potencia, estaciones centrales de generación de electricidad a gran escala. Algunos fabricantes extienden su uso al campo de los vehículos automotores, desarrollando unidades de potencia auxiliares (APUs). Las desventajas derivadas de las altas temperaturas de funcionamiento hacen que esta tecnología no sea demasiado adecuada para aplicaciones de transporte o generación de energía en algunos dispositivos portátiles.

Tabla 2. Aplicaciones de las tecnologías PEM y SOFC.

1.3 Aplicación de las pilas de combustible en el transporte

La pila de combustible tuvo su incursión en el sector transportes aplicándose en vehículos de tracción eléctrica terrestre. En una fase inicial de prueba, fueron integradas en autobuses y coches consiguiendo resultados exitosos. Sin embargo, aunque la pila de combustible acabe siendo el dispositivo principal de generación de energía en este tipo de transportes, otros elementos, como baterías, son necesarios para su correcto funcionamiento. Estos dispositivos, aún en fase de desarrollo, constituyen una alternativa real a los motores de combustión.

Actualmente, algunos vehículos de combustible alternativo (no dependen exclusivamente de combustibles derivados del petróleo) utilizan el hidrógeno como fuente primaria de energía para propulsarse. Pueden hacerlo mediante combustión o a partir de pilas de combustible, donde el hidrógeno se convierte en electricidad para mover motores eléctricos.

A pesar de que la principal ofensiva en este campo llega desde dos frentes industriales: Japón y EE.UU, donde Honda y General Motors avanzan en sus prototipos por delante de otros grupos industriales, la mayor parte de los fabricantes de automóviles están desarrollando prototipos basados en pilas de combustible. Por ejemplo, la compañía Ford presentó su primer vehículo de célula de combustión, el P2000 HFC, en enero de 1998. Posteriormente, en el año 2000, desarrolló el Ford Focus FCV con célula de combustible propulsado por hidrógeno directo.

Las prestaciones de este modelo no pueden competir con las ofrecidas por los vehículos de motor de combustión que ocupan la totalidad del mercado automovilístico actual. El motor de un Focus FCV tiene una potencia de 67 CV, una velocidad máxima de 128 km/h y pasa de 0 a 100 km/h en 14 segundos [8].

Los principales elementos que componen este modelo pueden observarse en la siguiente figura (Fig. 6).

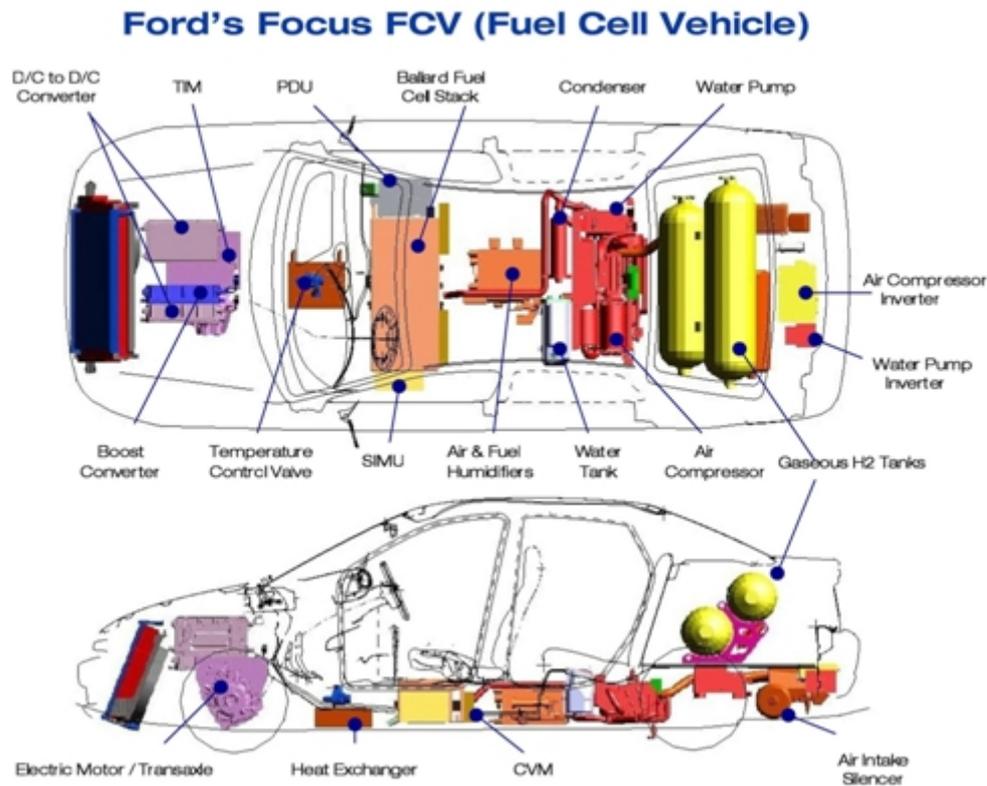


Fig. 6 Ford Focus FCV (Fuel Cell Vehicle)

Como muestra la Fig. 6, la ubicación del hidrógeno se encuentra en la parte posterior del vehículo, mientras que la pila de combustible se sitúa en la parte inferior del asiento delantero del mismo.

Estos vehículos de hidrógeno aún no se comercializan en el sector transporte por diversas causas: el todavía elevado precio de los vehículos (la demanda es pequeña por lo que no se produce masivamente y los elevados costes de almacenamiento y suministro), la necesidad de crear planes de infraestructura para construir estaciones de repostaje de combustible a lo largo de toda la geografía y el excesivo peso y volumen de los prototipos de experimentación, son algunos de los factores que contribuyen a que en la actualidad las pilas de combustible no sean competitivas en el mercado. A pesar de estos inconvenientes, esta tecnología ha obtenido significativos avances en los últimos años.

Transporte aéreo

En el transporte aéreo, la tecnología de pilas de combustible PEM ofrece la posibilidad, de propulsar vehículos aéreos pequeños. Actualmente, aunque no se considera que las pilas de combustible sean capaces de generar la energía suficiente para propulsar aviones grandes de pasajeros, se sigue trabajando en el desarrollo de su potencial como fuente alternativa de combustible que mejore el rendimiento medioambiental. Sin embargo, sí se considera que esta tecnología pueda ser aplicada en la implementación de APUs (Auxiliary Power Unit) en transporte terrestre, marítimo y aéreo; debido a su eficiencia, sus bajas emisiones (si se utiliza un combustible adecuado), su fiabilidad y su duración.

Se espera que los beneficios potenciales de las pilas de combustible en el dominio de la aviación sean numerosos, especialmente en el contexto actual de reducción de emisiones y disminución del consumo de combustible. Debido a su alta densidad de energía y a su potencial, estos sistemas son atractivos en aplicaciones eléctricas.

Las pilas de combustible ofrecen una alta producción de energía eléctrica a baja presión y temperatura, comparadas con los motores alimentados por hidrocarburos.

Los aviones consumen potencia eléctrica para el suministro de sistemas tales como la iluminación o actuadores electro-hidráulicos. En un avión convencional esta potencia eléctrica proviene de generadores que son impulsados por el eje de un motor. En tierra, cuando los motores están apagados, los aviones utilizan unidades auxiliares para el suministro de potencia. Los sistemas basados en pilas de combustible pueden ser una alternativa a la combinación de motores de generación y unidades auxiliares de potencia. Como estos dispositivos son independientes del motor, podrían generar potencia eléctrica en el aire y también en tierra.

Por tanto, el desarrollo de sistemas de generación de energía mediante sistemas alternativos como las pilas de combustible, pretende aumentar la eficiencia de los sistemas tradicionales reduciendo el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.

1.4 Sistema eléctrico de un avión.

Las tendencias en la arquitectura de los sistemas de propulsión en un avión se ven afectadas por los numerosos avances que tienen lugar en las tecnologías empleadas.

Tradicionalmente los aviones han sido impulsados por una combinación de sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos y neumáticos. A pesar de ser los más usados, no son los que proporcionan mayor rendimiento, fiabilidad y ciclo de vida. Es por esto que actualmente, se tiende cada vez más a la utilización de otros sistemas con mejores prestaciones, por ejemplo, cada vez existe una mayor utilización de la potencia eléctrica para la generación de energía en los subsistemas que forman una aeronave.

De esta tendencia cada vez mayor al uso de la potencia eléctrica como medio de propulsión de aeronaves, surgen los conceptos de avión más eléctrico (MEA) y avión totalmente eléctrico (AEA).

Los subsistemas electrificados de estas aeronaves son: control de vuelo, sistema eléctrico antihielo, sistemas ambientales, accionamiento eléctrico de frenos, aire acondicionado, bombeo de combustible... La diferencia entre ambas (MEA y AEA) reside en la cantidad de subsistemas que tiene electrificados cada una. Como su nombre indica, los aviones AEA (avión totalmente eléctrico – all electric aircraft) tienen más partes eléctricas que los aviones MEA (avión más eléctrico – more electric aircraft).

Los recientes avances en las áreas de electrónica de potencia, accionamientos eléctricos, electrónica de control y microprocesadores están proporcionando el impulso necesario para mejorar el rendimiento de las aeronaves y la fiabilidad de sus sistemas eléctricos.

Las mejoras que los sistemas MEA y AEA proporcionan, comparándolos con los sistemas tradicionales, son: menor complejidad, menores costes de mantenimiento, mayor fiabilidad, detección de fallos, mayor eficiencia, ahorro de peso y volumen

Todos estos detalles recién mencionados llevan a los aviones MEA y AEA a ser considerados la dirección hacia una nueva generación de aeronaves.

Estos nuevos sistemas de arquitectura en aeronaves para el desarrollo de aviones más/totalmente eléctricos (MEA/AEA) tienen como resultado un incremento en la demanda de potencia eléctrica. Los diferentes tipos de cargas existentes en los

subsistemas eléctricos de estos aviones, requerirán distintos suministros de potencia, que no provendrán de los generadores principales, sino de otros generadores que conviertan la potencia del eje de un motor en potencia eléctrica. Además, se dispondrá de unidades de potencia auxiliar en tierra, cuando los motores están apagados.

Esta mayor demanda de potencia conlleva un inevitable aumento de la corriente circulante o de la tensión. Un aumento de la corriente supondría la necesidad de emplear cableado de mayor sección, con el consecuente aumento de peso. El peso del sistema eléctrico es un aspecto crítico en un avión, por lo que, se hace necesario que la variable a aumentar sea el voltaje. Es por esto, que las especificaciones técnicas de un avión fijan la tensión de su bus principal en 270 Vcc. Sin embargo, determinados componentes requieren suministros de 28 Vcc o 115 Vac para su correcto funcionamiento (ver Fig. 7). Los futuros aviones necesitarán el empleo de sistemas de energía multinivel de voltaje CC y sistemas CA. En consecuencia, se hace necesario no sólo el uso de componentes que conviertan la energía eléctrica de un modo a otro, sino también de componentes que transformen el voltaje a niveles superiores o inferiores, es decir, convertidores electrónicos de potencia. De este modo, los sistemas de distribución eléctrica en MEA/AEA estarán compuestos principalmente por convertidores de potencia [9, 10, 11].

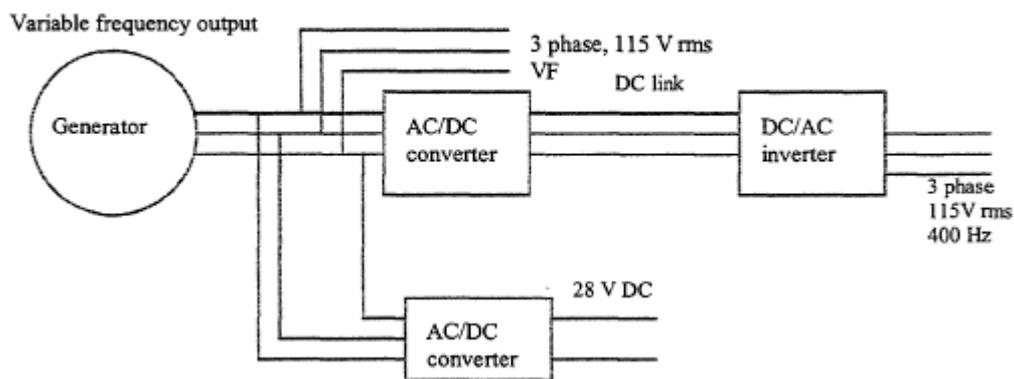


Fig. 7 Especificaciones del sistema eléctrico de un avión.

2. Objetivos y especificaciones

El objetivo principal de este proyecto es el análisis mediante simulación de un sistema de generación de energía basado en pilas de combustible. Este sistema tendrá como base alguna de las especificaciones técnicas generales con las que cuenta el sistema eléctrico de un avión.

El primer paso será determinar los distintos bloques de los que habrá de componerse el sistema para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas que se requieran. Una vez determinados, se procederá al diseño de cada uno de estos bloques individualmente. Será necesario analizar la respuesta de cada uno de ellos ante diferentes variaciones de carga con el fin de optimizar su comportamiento y comprobar que éste se ajusta a las necesidades del sistema.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de cada uno de los bloques por separado, se procederá a unirlos para formar el sistema completo. Con el fin de que éste sea capaz de satisfacer las especificaciones técnicas necesarias, se realizarán las adaptaciones oportunas al diseño individual de cada uno de los bloques, de modo que se optimice el funcionamiento del sistema completo. Llegados a este punto, se someterá al sistema a varias pruebas dinámicas que permitan determinar el comportamiento de cada uno de los bloques dentro del sistema ante diferentes demandas de potencia de las cargas.

Las conclusiones obtenidas del análisis de estas pruebas determinarán si un sistema basado en pilas de combustible, como el diseñado en este proyecto, es capaz de cumplir con las especificaciones técnicas que se proponen a continuación.

En la Fig. 8 se muestra el diagrama de bloques del sistema indicando, en cada caso, las especificaciones técnicas que cada uno de ellos, ha de cumplir.

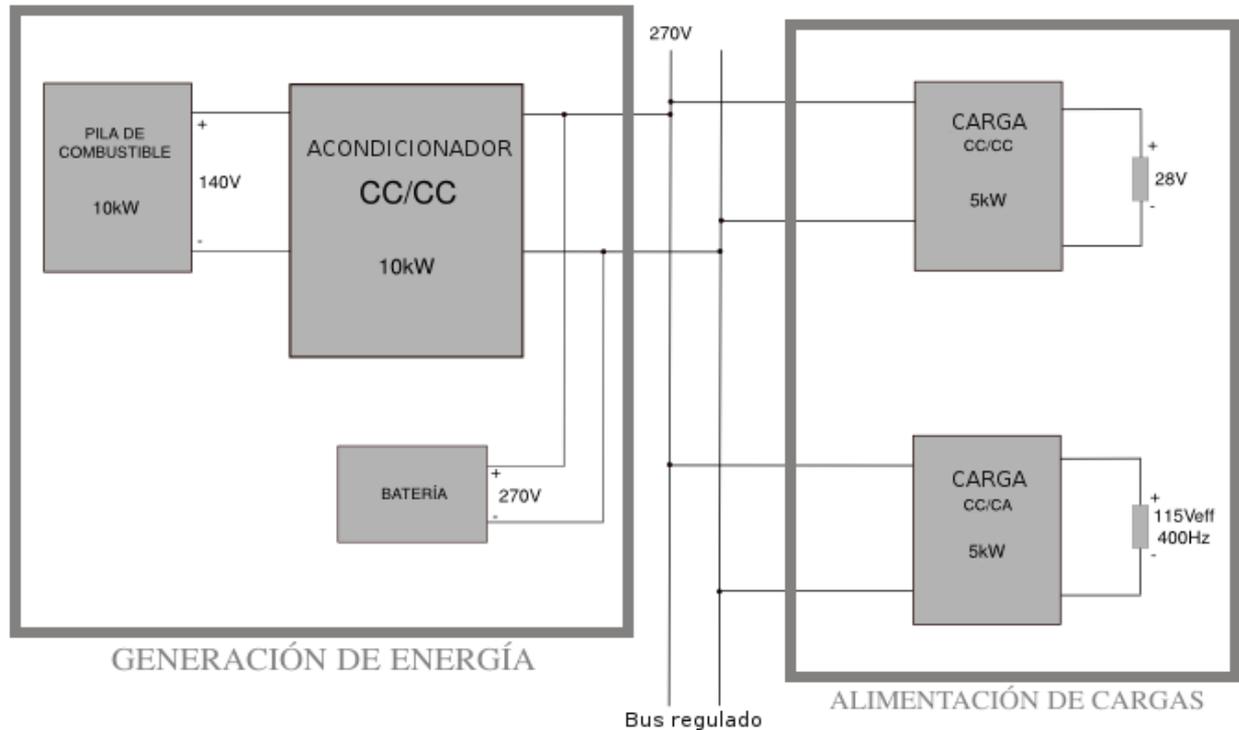


Fig. 8. Gráfico de la arquitectura.

Como muestra la Fig. 8 se ha utilizado, como fuente principal de generación de energía una pila de combustible. Las especificaciones técnicas que ha de cumplir este dispositivo es el ser capaz de suministrar 10 kW de potencia al sistema. Además, una de las limitaciones de este dispositivo es que genera una tensión en bornes dependiente de la corriente que se le solicite, por lo que no es capaz de generar una tensión regulada. Como el bus principal de distribución debe proporcionar 270 V constantes al resto del sistema, es imprescindible el uso de un acondicionador CC/CC. Éste, ha de ser capaz de elevar la tensión procedente de la pila de combustible, asegurando que la tensión del bus sea capaz de regularse ante posibles variaciones en la demanda de las cargas del sistema.

Hay que tener en cuenta que la tecnología de las pilas de combustible tiene una respuesta lenta ante variaciones rápidas de la potencia demandada por cargas así como un tiempo de arranque elevado. Para asegurar que el bus de distribución se mantenga a los 270 V que marcan las especificaciones en todo momento, es necesario que el sistema cuente con una batería auxiliar, que supla las limitaciones de la pila de combustible como sistema de generación. La pila de combustible se diseña para entregar una potencia media de 10 kW mientras que la batería debe suministrar energía al sistema en los picos de potencia demandada. Otra de las misiones del acondicionador será la de aislar la pila de combustible de la batería, ya que en caso de no existir, ambas fuentes de tensión estarían conectadas en paralelo al bus de distribución.

En la Fig. 8, puede observarse como el sistema tiene que ser capaz de alimentar cargas que demandan diferentes tipos y niveles de tensión para su alimentación a partir del bus de distribución principal. Las especificaciones fijan que determinados componentes requieren suministros de 28 Vcc ó 115 Vca a 400 Hz. Para asegurar el cumplimiento de estas especificaciones se hace necesario el uso de dos convertidores de potencia que partan de la tensión fijada en el bus principal (270 Vcc) y la transformen a los niveles y tipos que demandan las diferentes cargas del avión. Para fijar la alimentación de las cargas que requieren 28 Vcc será necesario seleccionar un convertidor CC/CC que sea capaz de reducir la tensión del bus hasta este nivel de tensión. Las cargas que exigen una alimentación de 115 Vac a 400 Hz requieren un convertidor de potencia que no sólo varíe el nivel de tensión sino que además transforme tensión continua en alterna. Por tanto, será necesario seleccionar, entre las topologías existentes, un convertidor CC/CA capaz de asegurar estas especificaciones.

3. Diseño de los distintos bloques del sistema

Se trata de identificar cada uno de los bloques que componen el sistema y obtener unos diseños que cumplan con las especificaciones de tensión y potencia para poder analizar el comportamiento del sistema completo.

3.1. Pila de combustible

El objetivo principal del proyecto gira en torno al análisis de un sistema de alimentación basado en Pilas de Combustible, que pudiera emplearse como fuente de energía alternativa para alimentar el sistema eléctrico de un avión comercial. Este dispositivo deberá ser capaz de proporcionar 10 kW de potencia. Tras el estudio de las principales características técnicas y aplicaciones de los dos modelos de pila más adecuados al sistema a diseñar (PEM y SOFC) se ha decidido que las prestaciones de la pila tipo PEM son las más adecuadas para el presente caso.

Con la elección de esta tecnología se pierden prestaciones en cuanto a potencia (ya que las pilas PEM trabajan a potencias medias (1-10 kW) mientras que las SOFC alcanzan potencias de hasta 100 kW), pero se consiguen mejoras en cuanto a rendimiento (eficacias superiores al 60%) y tiempo de encendido. Además, se evitan una serie de problemas derivados de las altas temperaturas de trabajo que alcanza la tecnología SOFC, tales como el desgaste de los componentes de la celda de combustible o las posibles fugas de calor con el consiguiente riesgo que ello supone. El electrolito polimérico sólido que compone la tecnología PEM ayuda a minimizar la corrosión y evitar problemas de gestión. Además, la baja temperatura a la que trabajan este tipo de pilas de combustible (alrededor de 80 °C) permite a estos dispositivos alcanzar rápidamente la temperatura operativa adecuada, reduciendo los tiempos de arranque, y ofrecen una economía competitiva del combustible.

Un posible inconveniente a tener en cuenta en la utilización de esta tecnología es la alta calidad que requiere en el combustible. Para evitar el envenenamiento catalítico a bajas temperaturas de funcionamiento, las pilas PEM necesitan hidrógeno con alto grado de pureza.

Llegados a este punto, se va a realizar un pequeño estudio comparativo de las características eléctricas de los modelos de pila de combustible tipo PEM que ofrecen diferentes fabricantes de esta tecnología. De este modo se pretende analizar, qué dispositivo sería más apto para la futura implementación de la aplicación diseñada en este proyecto.

Fabricante	Modelo	P (kW)	Tensión salida (V)	Corriente Máxima (A)	T ^a de trabajo Nominal (°C)	η (%)	Tiempo encendido (s)
Ballard	FCvelocity -HD6	75	220-400	325	63	-	-
Ballard	FCvelocity -9SSL	19.3	64.3	300	2-65	-	-
NedStack	P8 FC	8	36-68	> 225	65	45-60	-
NedStack	PS100	100	550-900	25-180	40	55-57	
NDCPower	Yosemite module	15	42	360	20-80		< 60
Nuvera	RL25	25	36	-400-1500	-4-35	-	-
Heliocentris	HyPM HD	16	48-76	350	-	-	-

Tabla 3. Comparativa de características eléctricas de pilas PEM ofrecidas por diferentes fabricantes.

Para el sistema que se describe en el presente documento, se requiere una pila de combustible capaz de suministrar una potencia 10 kW. Además, si su tensión es suficientemente alta, la etapa acondicionadora (ver Fig. 8) podrá ser un elevador. En caso contrario, será más fácil establecer un ciclo de trabajo centrado si la etapa acondicionadora se implementa en base a una topología con aislamiento galvánico, de forma que se introduzca el grado de libertad de la relación de transformación.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la alta tensión genera dificultades mecánicas en la pila de combustible mientras que la baja tensión implica elevadas corrientes y con ello, un bajo rendimiento del sistema. Es por ello que se ha determinado seleccionar una pila de combustible de tensión intermedia, donde existe un buen compromiso entre el rendimiento y la mecánica que une los stacks que forman la pila.

Este dispositivo actuará como fuente principal de generación de energía del sistema y responderá, en la medida de lo posible, ante variaciones en la carga. Por ello, es importante que la fiabilidad, el rendimiento y la durabilidad del dispositivo se tengan en cuenta a la hora de realizar la elección. Al tratarse de un sistema embarcado, el volumen y el peso de la pila de combustible son aspectos críticos a la hora de seleccionar el dispositivo, pero, no se considerarán en este trabajo.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente se ha considerado que el modelo P8 FC del fabricante NedStack es adecuado para la aplicación concreta. Para cubrir las necesidades del sistema con este modelo de pila, habrá que conectar en serie dos de ellas, de modo que el conjunto genere una tensión de 136 V aproximadamente en el punto de trabajo nominal, de modo que se reduzcan los niveles de corriente de la pila y, con ello, las pérdidas de conducción de la etapa acondicionadora. Este modelo de pila ofrece 8 kW individualmente, así que, al tener dos en serie, se superarán los 10 kW de potencia máximos que requiere la aplicación. Ver hoja de características en el anexo 7.2: Hoja de características de la pila de combustible.

Modelado de simulación eléctrica de la Pila de Combustible

Para diseñar el modelo que simule el comportamiento de la pila de combustible se ha de atender tanto su característica estática, como su característica dinámica.

Característica estática

La característica estática de la pila de combustible define la salida en tensión del dispositivo cuando se le solicita una determinada corriente. La tensión de operación de cada una de las celdas que forman la Pila de Combustible no se mantiene constante ante diferentes condiciones de carga. En realidad, estos dispositivos alcanzan su máximo voltaje de salida en circuito abierto y la salida en tensión disminuye con el aumento de corriente. Esto se debe a que el flujo de dicha corriente en la celda produce pérdidas de diferentes tipo:

- *Pérdidas de activación*. Se producen porque cuando se demanda baja corriente, cada una de las celdas necesita energía para producir la transferencia de electrones, quebrar y formar nuevos enlaces químicos tanto en el ánodo como en el cátodo, lo que produce una caída de tensión en ambos electrodos de la celda.

- *Pérdidas ohmicas*. Se deben tanto a la resistencia que opone la membrana a la transferencia de protones, como a las resistencias propias de electrodos. Es por eso que la caída de tensión por pérdidas ohmicas se mantiene proporcional a la densidad de corriente que atraviesa la celda.

- *Pérdidas por concentración*. Son el resultado del cambio en la concentración de los reactantes mientras son consumidos en la reacción. Debido a estas pérdidas, se produce una abrupta caída de tensión cuando la corriente es elevada.

La Fig. 9 representa la curva de polarización de una pila de combustible tipo PEM describiendo el comportamiento estático del dispositivo y señalando las diferentes caídas de tensión producidas por las pérdidas mencionadas anteriormente al aumentar la corriente en la pila.

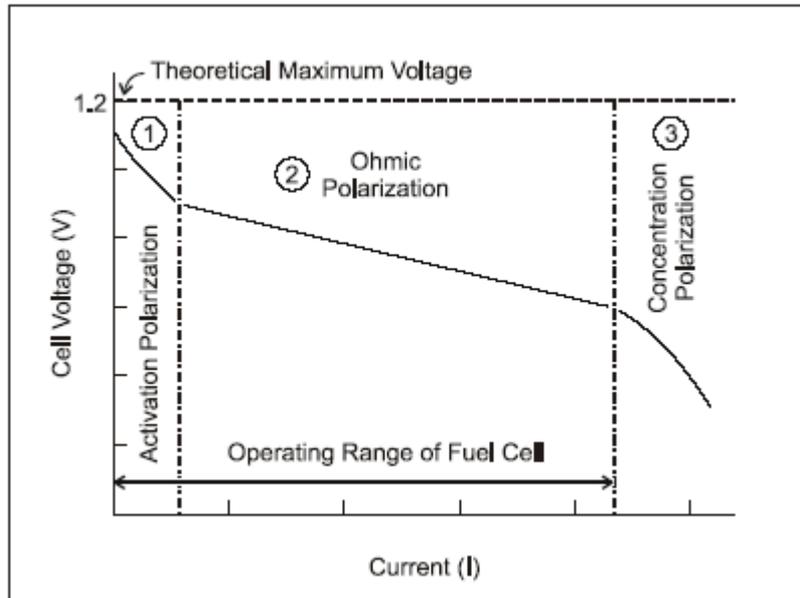


Fig. 9. Curva estática voltaje-corriente de una pila de combustible tipo PEM donde se muestra la alta no-linealidad del voltaje en las zonas activa y de concentración.

La curva de polarización anterior muestra la relación existente entre la tensión de la pila de combustible y la corriente generada por la misma para todas las condiciones de operación. Ya que la potencia que genera este dispositivo viene dada por el producto entre dicha tensión y corriente, se puede partir de la Fig. 9 para obtener la característica en potencia de las pilas de combustible.

La Fig. 10 muestra la curva que define la potencia de esta tecnología en función de la tensión de una celda de combustible.

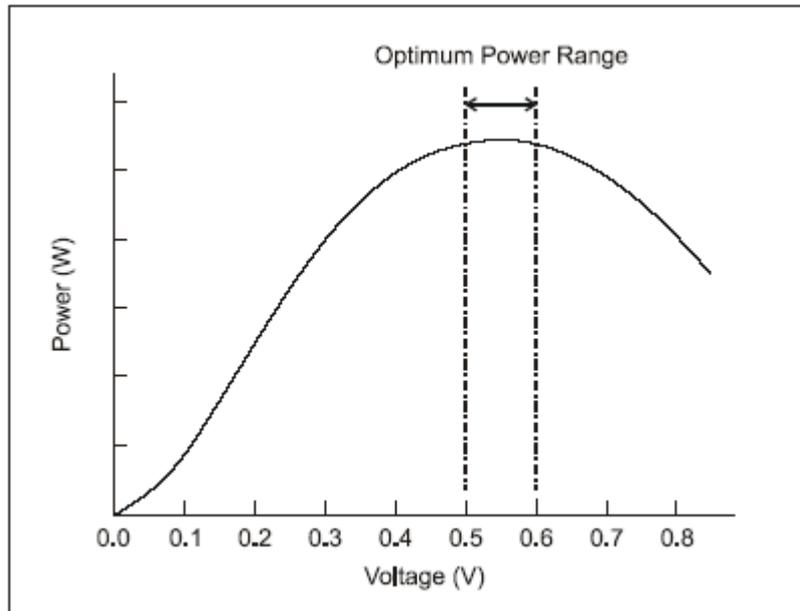


Fig. 10. Curva que define la potencia generada en función de la tensión de una celda de combustible.

Como puede observarse en la Fig. 10 el rango de potencia máximo que es capaz de generar cada una de las celdas que componen una pila de combustible, se genera en un rango de tensión de entre 0.5 V y 0.6 V. Es necesario tener en cuenta que, en una pila de combustible, la eficiencia disminuye con un aumento de la tensión, por lo que existe un compromiso entre la alta eficiencia y la alta potencia. El diseño del sistema basado en pilas de combustible debe seleccionar el rango de operación en función de si es la eficiencia o la potencia el parámetro fundamental para la aplicación concreta. En cualquier caso, nunca es conveniente operar en el rango de potencia donde ésta tiende a decrecer porque, como muestra la Fig. 9, la zona de concentración no es la zona de funcionamiento adecuado del dispositivo [14].

A continuación se muestra la característica estática (Tensión vs. Corriente) que se ha definido para que la pila de combustible sea capaz de responder correctamente a las necesidades del sistema, así como la potencia que esta tecnología ha de suministrar en cada caso.

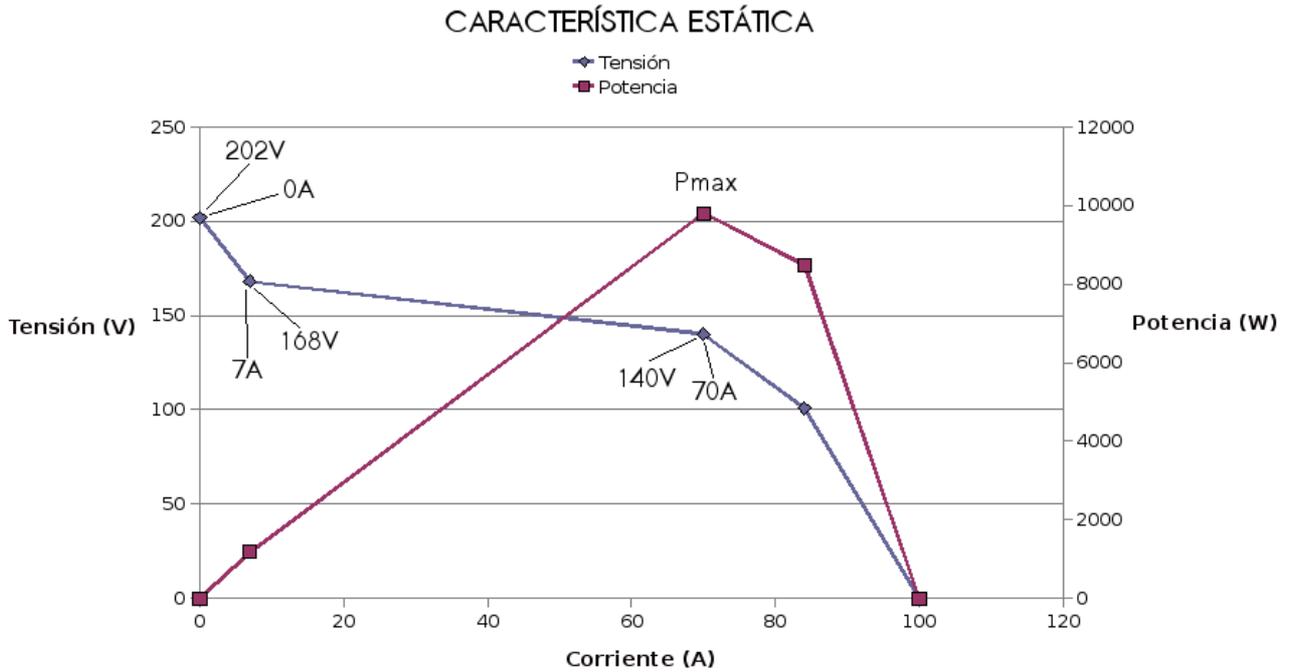


Fig. 11. Característica estática de la Pila de Combustible

Como puede observarse en la Fig. 11, la pila trabajará a una potencia máxima de 10 kW. Este valor establecerá la limitación en potencia del dispositivo, ya que no es conveniente que éste opere en el rango de valores donde la potencia suministrada por la pila de combustible tiende a decrecer. Para este caso límite, la pila de combustible suministrará 140 V a 70 A.

La Fig. 12 muestra el circuito que se ha diseñado para simular el comportamiento estático de la pila de combustible mediante la herramienta PSIM.

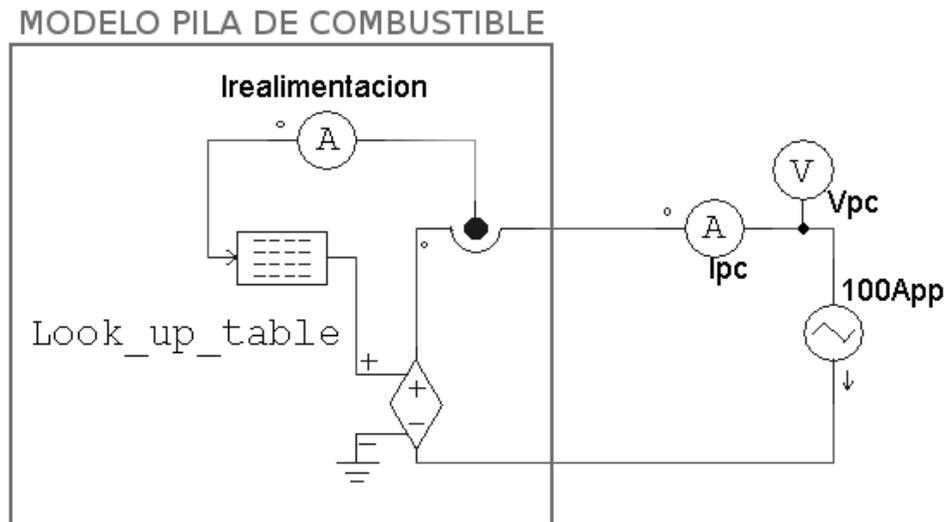


Fig. 12. Esquemático para validar el comportamiento estático del modelo de la Pila de Combustible

Como puede observarse en la Fig. 12, para generar la respuesta estática de la pila se ha utilizado el bloque “look-up-table” incluido en la herramienta de simulación PSIM. Este bloque permite generar funciones mediante la definición de un archivo .tbl en el cual se han de incluir los puntos del eje de abscisas y de ordenadas que definen cada tramo de la función. El bloque es capaz de interpolar los valores intermedios entre los puntos definidos.

Como carga, y para comprobar el correcto funcionamiento estático del modelo, se ha introducido una fuente de corriente triangular, de valor pico-pico de 100 A, coincidente con el máximo en corriente de la pila de combustible, según la Fig. 10. Así, el modelo tomará el rango de corrientes en los que puede moverse la pila de combustible introduciéndolos, mediante la realimentación mostrada en la Fig. 12, a la entrada del bloque “look-up-table”. En función de la corriente demandada en cada instante, el bloque obtendrá a su salida el correspondiente valor en tensión definido por la característica estática del dispositivo. Este valor de tensión será el que la pila genere para alimentar al sistema.

La Fig. 13 muestra la característica estática generada por el modelo de simulación, es decir, la tensión generada por la pila de combustible en función de la corriente que se le demande.

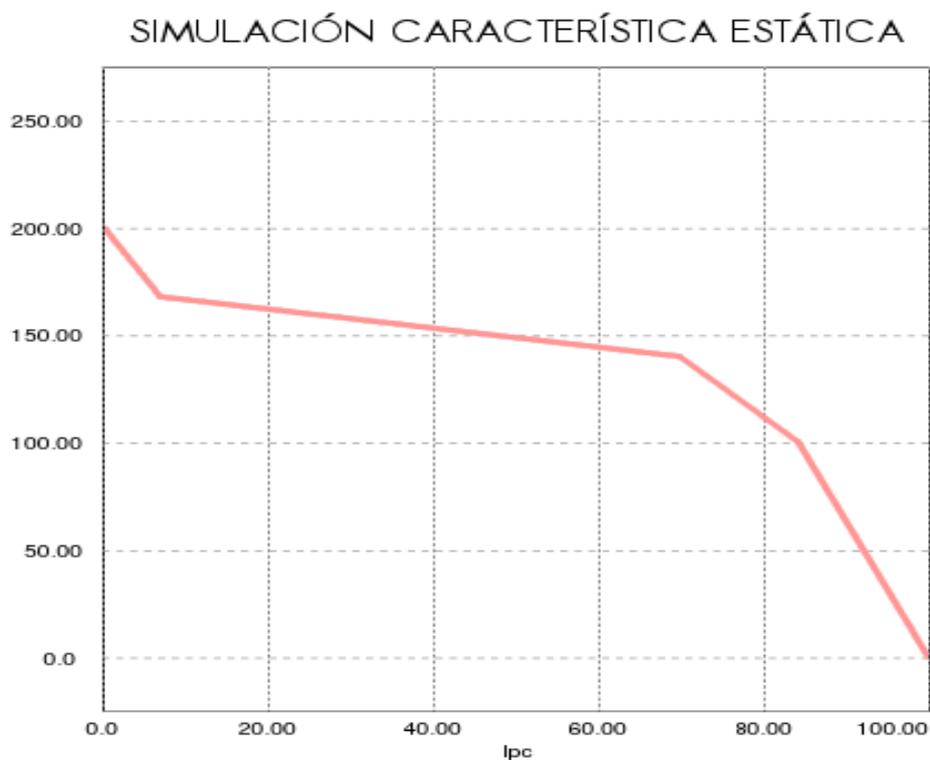


Fig. 13. Resultados de la simulación de la característica estática de la Pila de Combustible

Como puede observarse en la Fig. 13, los resultados de la simulación del modelo diseñado son exactamente los determinados por la estimación mostrada en la Fig. 10. De este modo se comprueba que el modelo eléctrico de la pila de combustible cumple con la característica estática que exige la aplicación.

Característica dinámica

La respuesta dinámica de una pila de combustible ante variaciones en la demanda de potencia, determina en cierta medida las limitaciones eléctricas de este tipo de dispositivos. El comportamiento dinámico de estas tecnologías está condicionado por el flujo de combustible (un cambio de carga eléctrica supone un cambio en el flujo de los reactantes). Teniendo en cuenta que los tiempos de respuesta del flujo de combustible pueden llegar a ser del orden de segundos, los sistemas basados en pilas de combustible requieren el uso de dispositivos de almacenamiento y generación de energía que suplan sus limitaciones de potencia. Este es el motivo por el cual ha sido necesario introducir en el sistema una batería que supliera a la pila de combustible, es decir, una batería que generara la energía que requiera el sistema cuando la pila de combustible, como generador principal de energía, no estuviera en condiciones de hacerlo [1]. Al no disponer de datos que muestren la dinámica exacta de la pila de combustible se ha introducido en el modelo un bloque adicional (filtro paso bajo) que recree algunos de los comportamientos dinámicos del dispositivo. La Fig. 14 muestra el circuito que se ha diseñado para simular ambos comportamientos (estático y dinámico) de la pila de combustible.

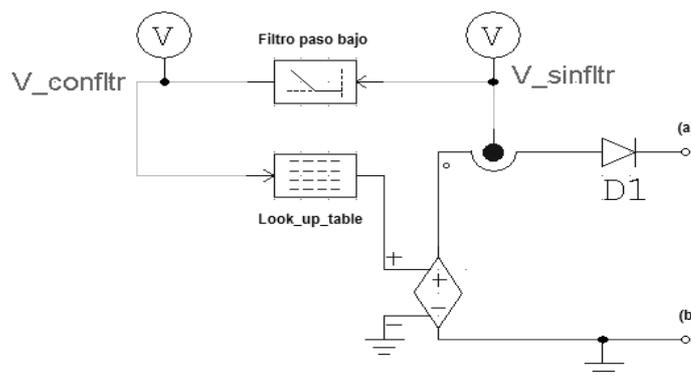


Fig. 14. Modelo completo de la Pila de Combustible

El bloque añadido al circuito para simular el comportamiento dinámico de una pila de combustible es la siguiente: se ha introducido en el lazo de realimentación del bloque "look-up-table" un filtro paso bajo de segundo orden que simula la inercia de la pila

(observar Fig. 14). Esto se traduce en que el dispositivo no es capaz de responder inmediatamente a variaciones de demanda, como sucedería en un caso real. Mediante el filtro se introduce un retardo en la reacción del dispositivo que simula este comportamiento. Cuanto más baja sea la frecuencia de corte de este filtro, más lenta será la reacción del dispositivo. Al tratarse de un modelo que simula un sistema de generación de energía, es necesario que éste incluya un diodo (D1) que garantice que la corriente sea sólo generada pero nunca absorbida por la pila de combustible. Fijando el valor de la frecuencia de corte del filtro paso bajo en 1 kHz, se han realizado una serie de simulaciones que muestran la dinámica del modelo de pila de combustible. Para ello, y partiendo del circuito mostrado en la Fig. 12, se ha ido modificando la frecuencia de la señal triangular. Las formas de onda obtenidas se muestran en la Fig 15.

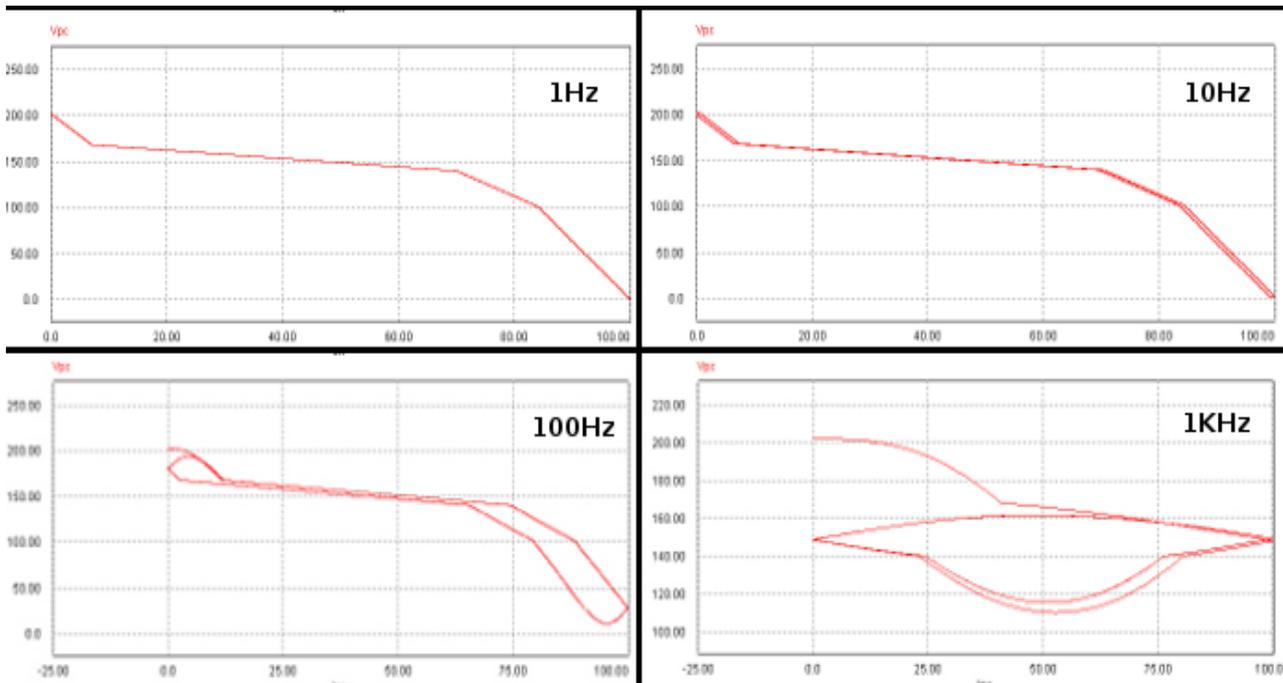


Fig. 15. Característica estática de la pila de combustible ante diferentes frecuencias.

Como puede observarse en la Fig. 15, a medida que se va aumentando la frecuencia de la señal triangular aparece un ciclo de histéresis.

3.2. Acondicionador de la pila de combustible para generar el bus de distribución.

Puesto que la máxima tensión que puede generar la pila de combustible, según se muestra en la característica estática definida anteriormente (ver Fig. 11), es de 200V (tensión en vacío), es necesario un acondicionador capaz de elevar la tensión y generar el bus de distribución de 270V. Una topología sencilla y que cumple con estos requisitos es el convertidor elevador.

El convertidor “boost” o elevador, es un convertidor de potencia que obtiene a su salida una tensión continua mayor que la que tiene a la entrada según la siguiente ecuación.

$$V_o = V_e \frac{1}{(1 - d)}$$

La Fig. 15 muestra la topología básica de un convertidor elevador.

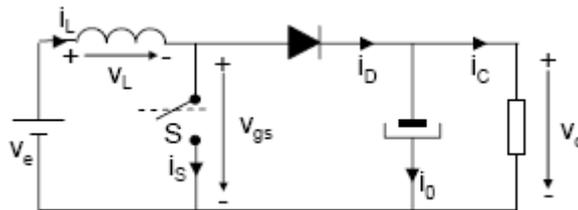


Fig. 15. Esquema básico de la topología de un convertidor elevador.

El principio básico de funcionamiento de un convertidor elevador parte de los dos estados de funcionamiento en los que puede encontrarse el mismo, dependiendo de la posición en la que se encuentre el interruptor S (ver Fig. 16).

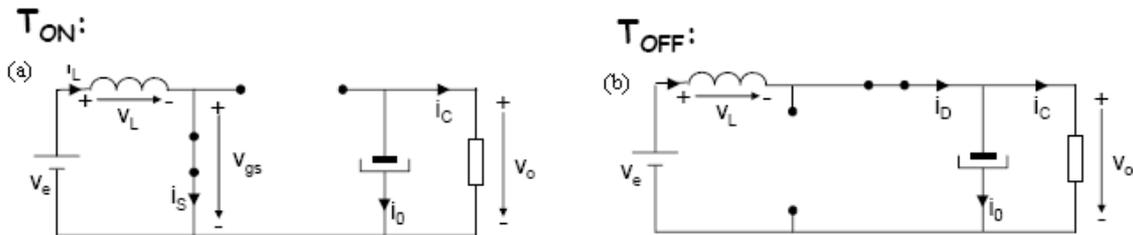


Fig. 16. Esquema del circuito equivalente de un convertidor elevador en función de la posición del interruptor S, donde: (a) circuito equivalente con el interruptor cerrado, (b) circuito equivalente con el interruptor abierto.

La Fig. 16(a) muestra el circuito equivalente del convertidor cuando el interruptor está cerrado. En esta configuración la bobina L almacena energía de la fuente, a la vez que la carga es alimentada por el condensador C .

La Fig. 16(b) muestra el circuito equivalente del convertidor cuando el interruptor está abierto. En esta configuración, el único camino de corriente es a través del diodo D . Dicha corriente circula por el condensador hasta que éste queda totalmente cargado, y por la carga.

Existen, además, dos modos de funcionamiento para estos convertidores: modo de conducción continuo (MCC), mediante el cual toda la energía se transfiere a la carga sin que la corriente por la bobina se anule en ningún momento, y modo de conducción discontinuo (MCD), mediante el cual la carga consume menos de lo que el circuito puede entregar en un ciclo.

Diseño de los componentes del elevador.

Para el correcto funcionamiento individual del elevador, ha sido necesario determinar el valor de los componentes (condensadores y bobinas) propios de esta topología. A continuación se detalla el procedimiento llevado a cabo así como los valores finales de cada uno de estos componentes.

Bobina y condensador de la planta.

Para determinar el valor de la bobina hay que tener en cuenta que ésta deberá tomar valores altos (del orden de mH) para asegurar que el rizado de corriente por la misma sea lo suficientemente pequeño como para garantizar MCC en régimen permanente. El valor de este condensador, deberá tomar valores altos que sean capaces de reducir el rizado de la tensión de salida y a su vez filtrar el rizado de corriente por la batería, limitándolo a las especificaciones del sistema. De este modo, se ha fijado el valor de la bobina en 5 mH y se ha ido variando el valor del condensador de salida del elevador (C_{out}). Para cada caso, se ha medido el valor del rizado de corriente por la batería. La Tabla 4 muestra los valores experimentales que se han ido dando al condensador para tratar de limitar el rizado de corriente por la batería.

Condensador (C_{out})	Rizado de corriente por la batería (ΔI_{bat})
250 μ F	1.8A
500 μ F	1.7A
1mF	1.4A
2mF	1.4A

Tabla 4. Diseño del condensador de salida (C_{out}) del elevador.

Como puede observarse en la Tabla 4, el condensador de salida del elevador (C_{out}) no es capaz de filtrar el rizado de corriente por la batería, ya que un aumento considerable de la capacidad del mismo, no obtiene una disminución notable del rizado. Esto se debe a que los bornes del condensador están conectados a la batería y por lo tanto fijos a la tensión de la misma. La resistencia interna de la batería no es capaz de desacoplar ambos elementos, por lo que se hará necesario diseñar un filtro que desacople el condensador de salida del elevador (C_{out}) permitiendo que éste sea capaz de filtrar el rizado de corriente al generarse una variación de tensión entre sus bornes.

Diseño de un filtro en π .

Se ha decidido que el filtro que lleve a cabo el desacople del condensador de salida del elevador (C_{out}) sea un filtro en π paso bajo, ya que este tipo de filtro es capaz de atenuar las altas frecuencias más bruscamente que un filtro de carácter resistivo o capacitivo.

La Fig. 17 muestra la topología del filtro en π .

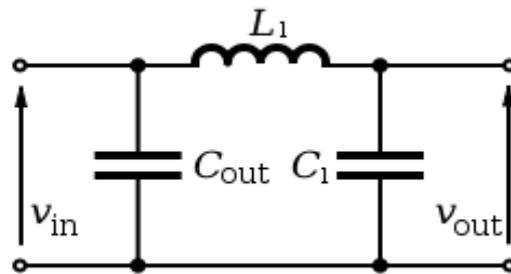


Fig. 17. Filtro en π

El diseño de los valores de los condensadores y la bobina que forman el filtro, se ha realizado fijando el valor del condensador de salida del elevador C_{out} , se ha ido variando el valor de la bobina $L1$ y del condensador $C1$, midiendo en cada caso, el valor del rizado de corriente obtenido en la batería (ΔI_{bat}). La Tabla 5 muestra un resumen de la aplicación de dicha metodología.

C_{out}	$C1$	$L1$	ΔI_{bat}
500 μ F	5 μ F	10 μ F	7.61mA
500 μ F	5 μ F	100 μ F	7.36mA
500 μ F	5 μ F	250 μ F	2.95mA
500 μ F	10 μ F	250 μ F	1.6mA

Tabla 5. Diseño del filtro en π

Como cualquiera de estos diseños proporcionan un rizado admisible de corriente por la batería se ha escogido el que está marcado en gris en la tabla anterior.

Lazo de control

En este caso, es necesario que el control del convertidor se realice en modo corriente. Esto es debido a que el nivel de tensión del bus de distribución, o lo que es lo mismo, la tensión que demandan las cargas, es constante e igual a 270V fijada por la batería. Sin embargo, es necesario garantizar el suministro de corriente que demandan las cargas en cada instante. El lazo de control en modo corriente, garantiza que el convertidor sea capaz de adaptar su salida en corriente a dicha demanda, que varía según se produzcan perturbaciones en la dinámica de las cargas.

La topología de este convertidor hace posible proporcionar una potencia de salida constante utilizando solamente el lazo de control en corriente mencionado anteriormente. Tomando como entrada la corriente media de salida del convertidor, el lazo de control genera los pulsos de puerta del MOSFET. El valor del ciclo de trabajo del interruptor vendrá determinado por la necesidad de aumentar o disminuir la corriente de salida en función de la demanda de las cargas, de modo que el conjunto pila-convertidor sea capaz de abastecer a las mismas.

Para una mejor comprensión de los aspectos descritos anteriormente, la Fig. 16 muestra el diagrama de bloques del elevador incluyendo tanto la etapa de potencia como el control de la misma. Cada uno de los bloques representa la función de transferencia de uno de los bloques funcionales del circuito.

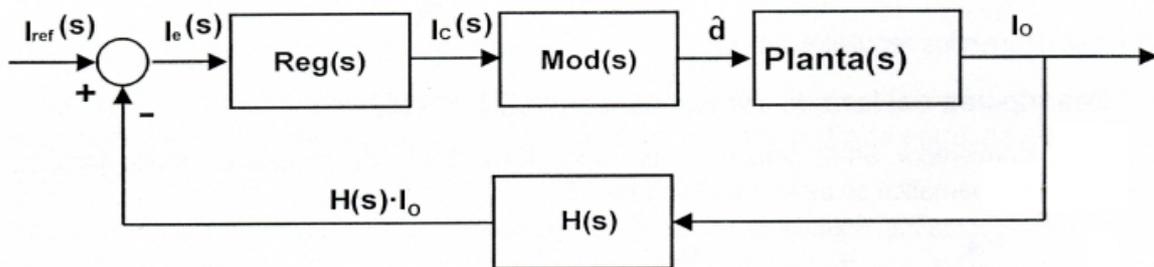


Fig. 17. Diagrama de bloques del elevador

Reg (s) Función de transferencia del regulador.

El regulador genera la señal de control a partir de la diferencia existente entre la corriente de referencia (que se corresponde, en este caso, con la corriente demandada por las cargas) y la corriente media de salida del convertidor. La corriente de salida del regulador es proporcional a la perturbación de la corriente en la carga. Para este caso se ha utilizado un regulador tipo 3 que garantice la respuesta dinámica del circuito.

Mod (s) Función de transferencia del modulador PWM.

El modulador PWM determina el ancho de los pulsos de puerta del MOSFET comparando la señal de control con una señal en diente de sierra.

Planta (s) Función de transferencia de la planta.

(s) Función de transferencia que relaciona la corriente de salida del convertidor y el ciclo de trabajo.

H (s) Ganancia del sensor de corriente.

En este caso, es necesario adaptar el nivel de la corriente de salida y de la corriente de referencia a valores adaptados al operacional que amplifica la señal de error. De este modo, es necesario determinar la ganancia de los dos sensores que miden cada una de las corrientes a adaptar. Hay que tener en cuenta a la hora de determinar dichas ganancias, que la medida de ambas corrientes ha de ser proporcional, es decir, la ganancia de los sensores que adaptan ambas corrientes ha de tener el mismo valor para que la diferencia entre las mismas (generada por el amplificador de error) no se vea afectada.

La Fig. 18 muestra el circuito de control en modo corriente que se ha diseñado para regular el comportamiento de salida del convertidor elevador.

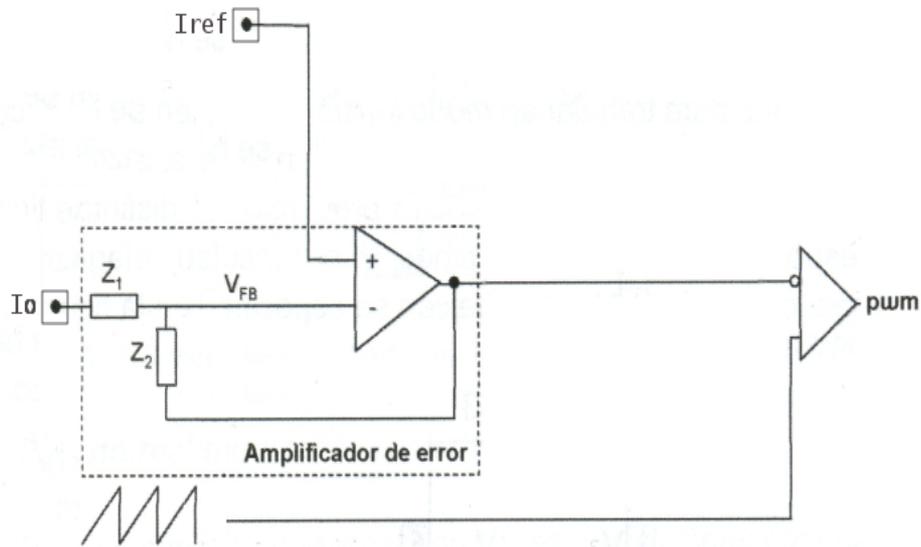


Fig. 18 Esquema del lazo de control del elevador.

Para generar la señal de control que se introduce en el modulador (ver Fig. 18) es necesario restar a la corriente de referencia (que se corresponde con la demandada por las cargas en cada instante) la corriente media de salida del convertidor. Para ello, ambos niveles de corriente tienen que ser adaptados previamente, a través de la ganancia de los sensores de corriente, a valores aptos para que el amplificador de error opere con ellos. Una vez generada, la señal de control se aplica al modulador PWM para determinar el ancho de los pulsos que se introducen a la puerta del transistor. De este modo, se consigue a la salida del convertidor una corriente regulada y adaptada a la demanda de las cargas en cada instante.

Por lo tanto, en la Fig. 18 pueden distinguirse tres etapas: sensores de corriente (encargados de medir la corriente de salida del convertidor y la corriente de referencia), amplificador de error y comparador. Para el diseño del lazo de control se ha implementado un algoritmo de cálculo mediante la herramienta MathCad que determina el valor de las impedancias Z_1 y Z_2 a partir de las especificaciones dinámicas del convertidor.

La respuesta dinámica del convertidor se verá afectada por la ganancia y el ancho de banda del lazo. Con el objeto de minimizar las perturbaciones en la corriente de salida, el lazo debe presentar una ganancia elevada a bajas frecuencias para anular el error en régimen permanente y un ancho de banda suficiente que garantice rapidez en la respuesta transitoria del convertidor. Además, es necesario definir un Margen de Fase suficiente como para garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Las especificaciones técnicas del sistema determinan que el convertidor elevador debe ser capaz de responder rápidamente ante posibles variaciones dinámicas de carga. Es por ello que se ha decidido utilizar como regulador del lazo de control un regulador tipo 3 cuyo ancho de banda garantice el cumplimiento de esta especificación.

A continuación se muestra la metodología llevada a cabo para diseñar la etapa de amplificación de error del lazo de control haciendo referencia, principalmente a la ganancia de los sensores de corriente y el diseño del regulador tipo 3.

Ganancia de los sensores de corriente

Para generar la señal de error, es necesario adaptar las corrientes de entrada de la etapa de amplificación (corriente de salida del convertidor y corriente demandada por las cargas) a niveles adaptados al comparador. Para ello, hay que determinar la ganancia de los sensores que miden ambas corrientes teniendo en cuenta que el escalado debe garantizar que el resultado de la comparación no se vea afectado. De este modo, la ganancia de ambos sensores de corriente ha de ser igual en ambos casos.

En régimen permanente, la corriente de salida del convertidor es de 37A e igual a la corriente de referencia (determinada por la corriente que demandan las cargas del sistema).

Regulador tipo3

La corriente de salida del convertidor se introduce en la entrada del amplificador de error diseñado en base a la topología de un regulador tipo3. Este regulador combina la acción proporcional (aumenta la frecuencia de corte) la acción diferencial (gran margen de fase) y la acción integral (ganancia a bajas frecuencias). Para ello, se compone de dos ceros, situados a las frecuencias f_{z1} y f_{z2} y de dos polos, situados a las frecuencias f_{p1} y f_{p2} (ver Fig. 19).

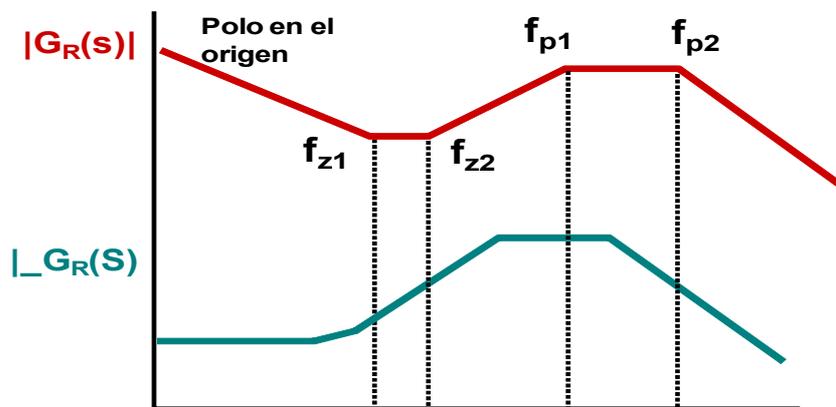


Fig. 19. Diagrama de Bode (modulo y fase) de un regulador tipo 3.

Las impedancias que definen la ganancia del amplificador que compone el regulador tipo 3, se modelan mediante el algoritmo generado en la herramienta Mathcad a tal efecto (ver *Hojas de mathcad* en el anexo 7.4). A continuación se muestra el procedimiento detallado que se ha llevado a cabo para dimensionar las resistencias y condensadores que componen las impedancias que fijan la ganancia del regulador.

La primera decisión de diseño que ha de tomarse para dimensionar la ganancia del regulador es el Margen de Fase mínimo (MF). Es necesario tener en cuenta que un MF demasiado pequeño genera oscilaciones en la respuesta del sistema en lazo cerrado acercándolo a la inestabilidad, mientras que un MF demasiado grande hace que el sistema sea muy lento. Por tanto, será necesario determinar un MF suficiente como para garantizar tanto la estabilidad del sistema en lazo cerrado como una velocidad de respuesta adecuada a las necesidades del sistema. El principal problema a la hora de compensar convertidores que tiene un cero en el semiplano positivo (como el caso del elevador) radica en que es complicado tener un MF amplio, ya que el cero aumenta el

desfase, es decir, agrega un desfase de -90° (ver Fig. 20).

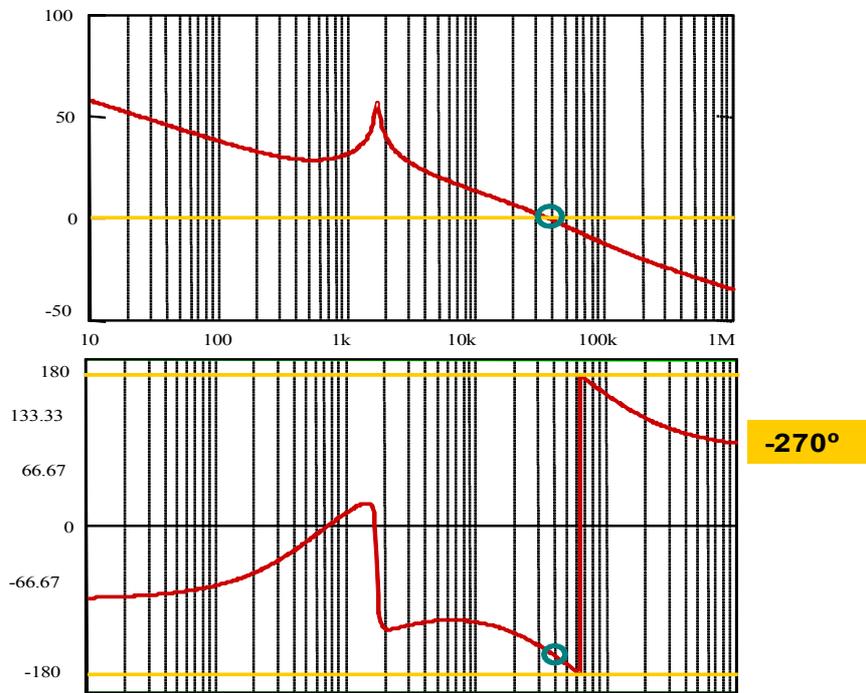


Fig. 20. Efecto de la acción de un cero en el semiplano derecho.

La segunda decisión de diseño que ha de tomarse es la elección de una frecuencia de cruce de lazo que permita una respuesta transitoria rápida del convertidor. Para garantizar un correcto funcionamiento del lazo de control, la frecuencia de cruce del regulador (f_b) que compone el lazo de control ha de ser, al menos, diez veces menor que la frecuencia de conmutación del sistema, generada por una señal triangular de 100 kHz. Colocando la frecuencia de corte del regulador al menos una década antes, se asegura que el lazo de control sea capaz de filtrar a la frecuencia de conmutación evitando que las perturbaciones se filtren hacia la salida del convertidor. A continuación se muestran los valores seleccionados para el MF y la frecuencia de cruce del regulador del lazo de control del elevador.

MF:=50 Margen de Fase mínimo. $\phi_{\text{mín}} := -\pi + \text{MF} \cdot \frac{\pi}{180}$

$f_b := 10000$ Valor supuesto para la frecuencia de cruce.

Para dimensionar correctamente el lazo de control del elevador es necesario conocer la función de transferencia de la planta del convertidor. Esta función de transferencia puede ser determinada a partir de los siguientes métodos:

Analítico

A partir de cálculos matemáticos se llegaría a una ecuación que relacionase la salida de la planta con el ciclo de trabajo. La función analítica del convertidor elevador se encuentra en los libros de electrónica de potencia, sin embargo, en este caso, el filtro en π dificultaría los cálculos a realizar.

Simulación AC del Modelo promediado.

La utilización de modelos promediados permite simular circuitos de gran señal ya que eliminan el funcionamiento no lineal del sistema. La simulación de estos modelos permite encontrar un punto estable dentro del sistema ya que elimina la alta frecuencia trabajando únicamente a partir de valores promedio.

La simulación de un modelo promediado se puede llevar a cabo en el dominio del tiempo, por lo que es posible comparar los resultados obtenidos a partir de este modelo con los obtenidos a partir del modelo conmutado y establecer su exactitud.

Simulación AC del modelo conmutado.

Una alternativa interesante a la implementación de modelos promediados para obtener la función de transferencia de la planta es ajustar la misma mediante puntos.

La herramienta PSIM permite obtener la respuesta en Frecuencia del circuito realizando un barrido en frecuencia a través del módulo AC-Sweep. De esta forma se obtiene la representación gráfica del módulo y la fase de los puntos determinados generando el diagrama de Bode del circuito. A partir del mismo se obtiene la función de transferencia deseada con la ventaja de que ésta incluye el efecto de los componentes reales que forman la planta real del sistema.

Introduciendo los puntos que componen el diagrama de Bode de la planta en el algoritmo, se determinan de forma mucho más exacta los valores de las impedancias que han de componer el regulador del lazo de control.

Por sencillez, se ha decidido determinar la función de transferencia utilizando la medida de puntos estacionarios descrita anteriormente. La Fig. 19 muestra la función de transferencia de la planta del convertidor.

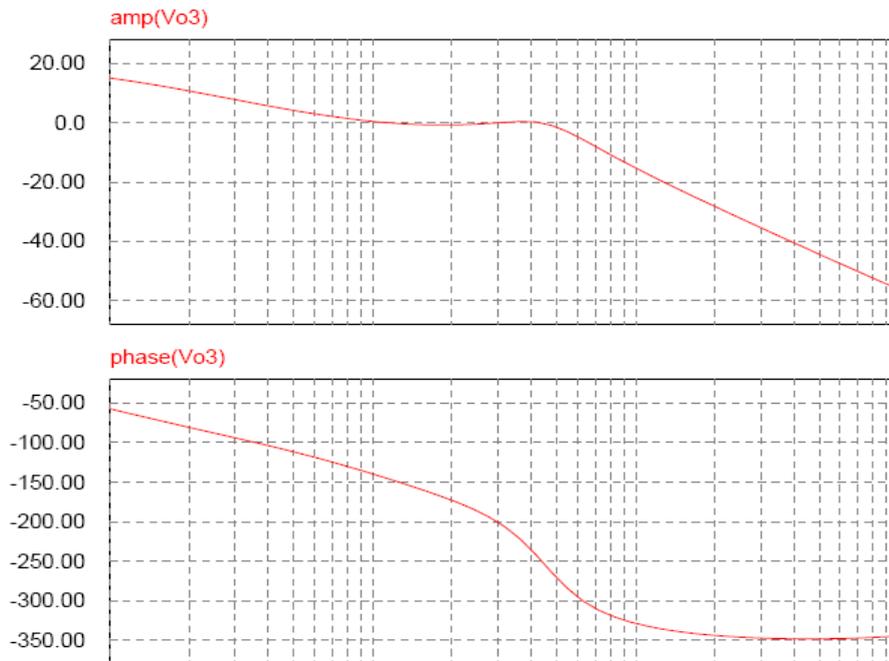


Fig. 19 Función de transferencia de la planta del elevador.

Donde:

$amp(Vo3)$ es el módulo de la función de transferencia que relaciona la corriente de salida del convertidor con el ciclo de trabajo (d) y $phase(Vo3)$ es la fase en grados de dicha función de transferencia.

Tras introducir los datos de la planta del convertidor en la hoja de cálculo el algoritmo generado mediante la herramienta Mathcad se obtienen los valores de las resistencias y condensadores que forman las impedancias $Z1$ y $Z2$ que determinan la ganancia del regulador tipo3.

A continuación se muestran los valores obtenidos para dichas resistencias y condensadores.

$$R1 = 326.97\Omega$$

$$R2 = 25.72\Omega$$

$$C1 = 8.66\text{nF}$$

$$C2 = 3.47\mu\text{F}$$

$$C3 = 113.7\text{nF}$$

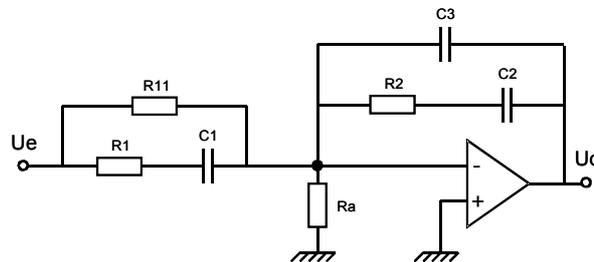


Fig. 21. Esquema de la posición de las resistencias y condensadores que componen la ganancia del regulador tipo 3.

Generador PWM

Para generar la PWM es necesario realizar una comparación entre la señal moduladora fijada en la salida del regulador, y una portadora triangular de frecuencia igual a la de conmutación. La Fig. 22 muestra el circuito que se ha diseñado para generar la PWM.

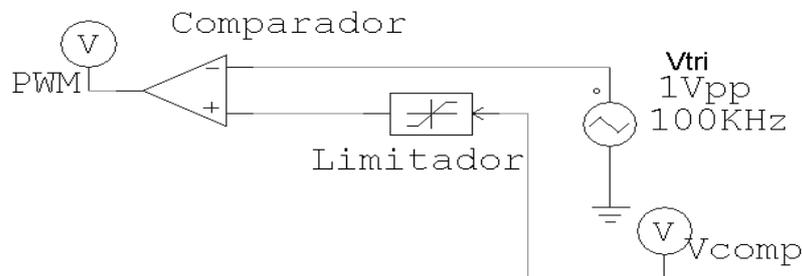


Fig. 22. Circuito para la generación de la pwm del elevador.

Como puede observarse en la Fig. 22, la portadora triangular se ha diseñado mediante una fuente de tensión triangular de 1 Vpp y 100 kHz de frecuencia de conmutación. Además ha sido necesario incluir, un limitador en la señal de error, que fija el ciclo de trabajo (d), para evitar que éste llegue a 1. Esto es especialmente importante en el caso del elevador, ya que si este ciclo de trabajo llega a uno, se genera un cortocircuito constante a la entrada del convertidor que impide la transmisión de energía hacia las cargas del sistema.

Para comprobar el correcto funcionamiento del convertidor elevador en lazo cerrado, se ha sometido al mismo a un escalón de carga que pasa de una demanda de 10 kW a una de 7 kW. Los resultados obtenidos en esta simulación se muestran en la Fig. 22.

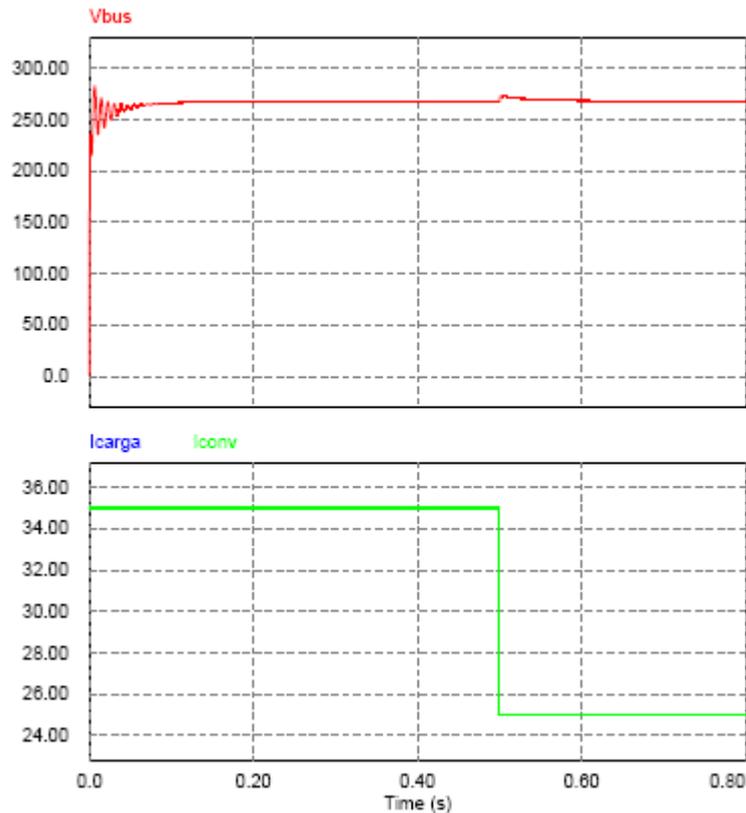


Fig. 22. Formas de onda resultado de la simulación del elevador alimentado por una fuente de tensión continua de 140 Vcc

Como muestra la Fig. 22, el elevador es capaz de regular su salida a los 270 Vcc que marcan las especificaciones cuando las cargas demandan una potencia que cambia de 10 kW a 7 kW. Se observa como la corriente que demandan las cargas (I_{carga}) es suministrada en todo momento por la corriente de salida del convertidor (I_{conv}).

Una vez detalladas todas las decisiones tomadas en el diseño del elevador se puede observar el esquemático del circuito final del mismo en la Fig. 23, y con más detalle el circuito *elevador* del anexo 7.1.

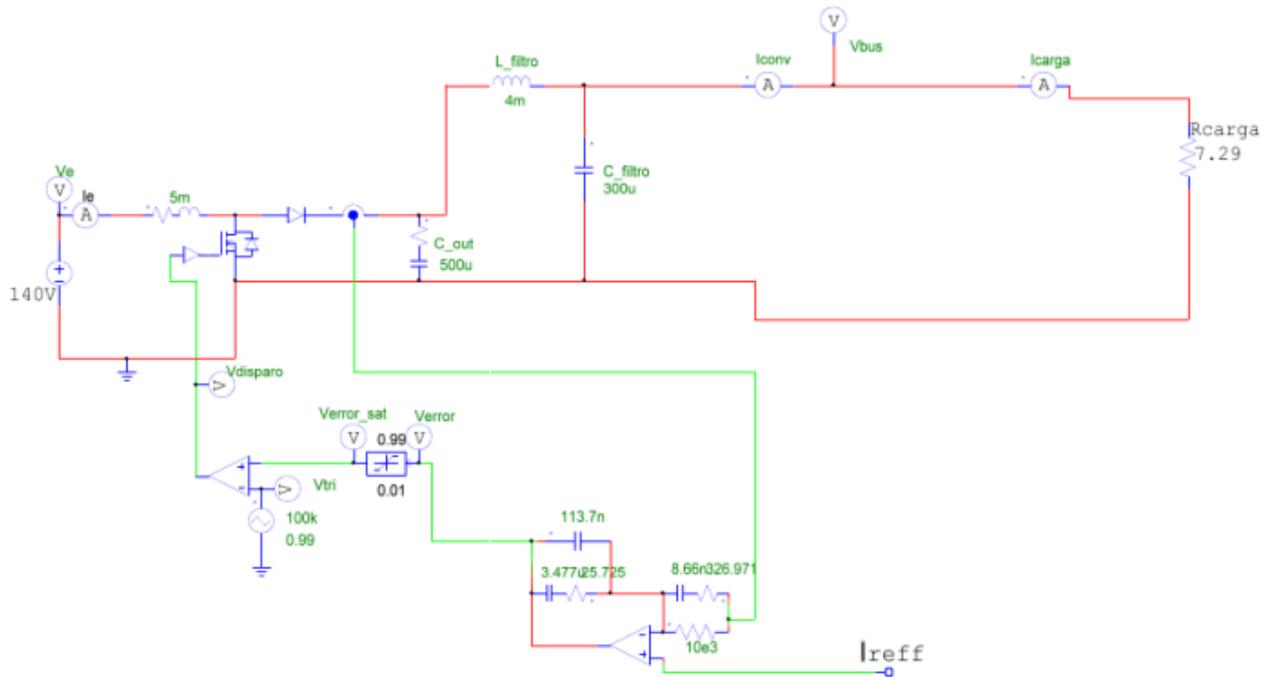


Fig. 23. Circuito final del diseño individual del elevador.

3.3 Batería

La función de la batería dentro del sistema es la de suplir a la pila de combustible, es decir, la batería generará la energía que requiera el sistema cuando la pila de combustible, como generador principal de energía, no esté en condiciones de hacerlo.

El modelo el Z5-278-ML3X-64 del fabricante ZEBRA_R Battery (ver Hoja de características en el anexo 7.3) cumple con las especificaciones requeridas por el sistema.

Este modelo de pila cuenta con un total de 216 celdas distribuidas a partes iguales en dos stacks de 108 celdas. Ambos grupos están conectados en paralelo de modo que la tensión que genere la pila sea aproximadamente de 278 V. Cada celda de combustible tiene una resistencia interna ($R_{intcelda}$) cuyo valor está comprendido en un rango que varía entre 8 m Ω y 12 m Ω . Para realizar el cálculo de la resistencia interna de la batería (R_{bat}) se ha estimado el valor de la resistencia interna de cada celda ($R_{intcelda}$) en 10 m Ω .

La Fig. 24 representa esquemáticamente la disposición de las resistencias de ambos stacks para formar la resistencia interna de la batería (R_{bat}).

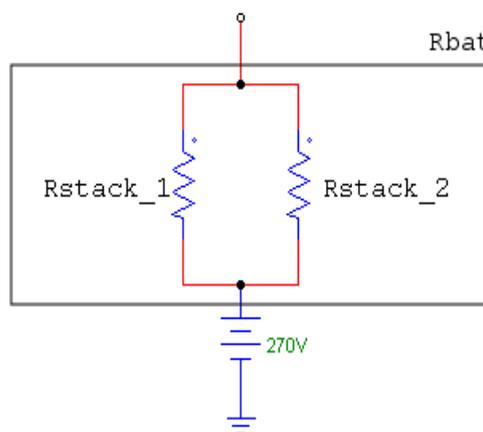


Fig. 24. Esquema de la equivalencia entre la resistencia de la batería y la de los stacks

Para obtener el valor de la resistencia interna de la batería se han realizado los siguientes cálculos:

- Se calcula la resistencia equivalente al stack (un stack está formado por 108 celdas).

$$R_{stack} = R_1 + R_2 + \dots + R_{108} = \sum_{k=1}^{108} R_{celda}$$

- Teniendo en cuenta que ambos stack son equivalentes

$$R_{stack1} = R_{stack2}$$

- Se calcula la Resistencia equivalente a la Batería

$$\frac{1}{R_{bat}} = \frac{1}{R_{stack1}} + \frac{1}{R_{stack2}} = \frac{2}{R_{stack}}$$

- Finalmente se obtiene que

$$R_{bat} = \frac{R_{stack}}{2} = 540m\Omega$$

La Fig. 25 muestra el modelo de simulación de la batería, que consiste en una fuente de tensión ideal de 270 V y la resistencia interna de la batería.

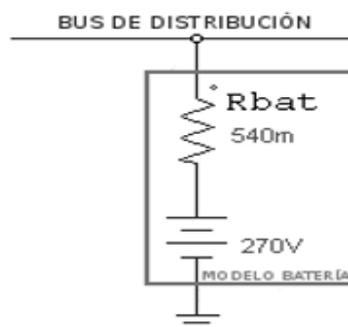


Fig. 25. Modelo de simulación de la batería

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo diseñado para la batería, se he unido ésta al conjunto pila de combustible-elevador como muestra el circuito *Elevador y batería del anexo 7.1*.

Se ha sometido al circuito mencionado a un escalón de carga que pasa de una demanda de 9 kW a una demanda de 6.5 kW (ver Fig 26).

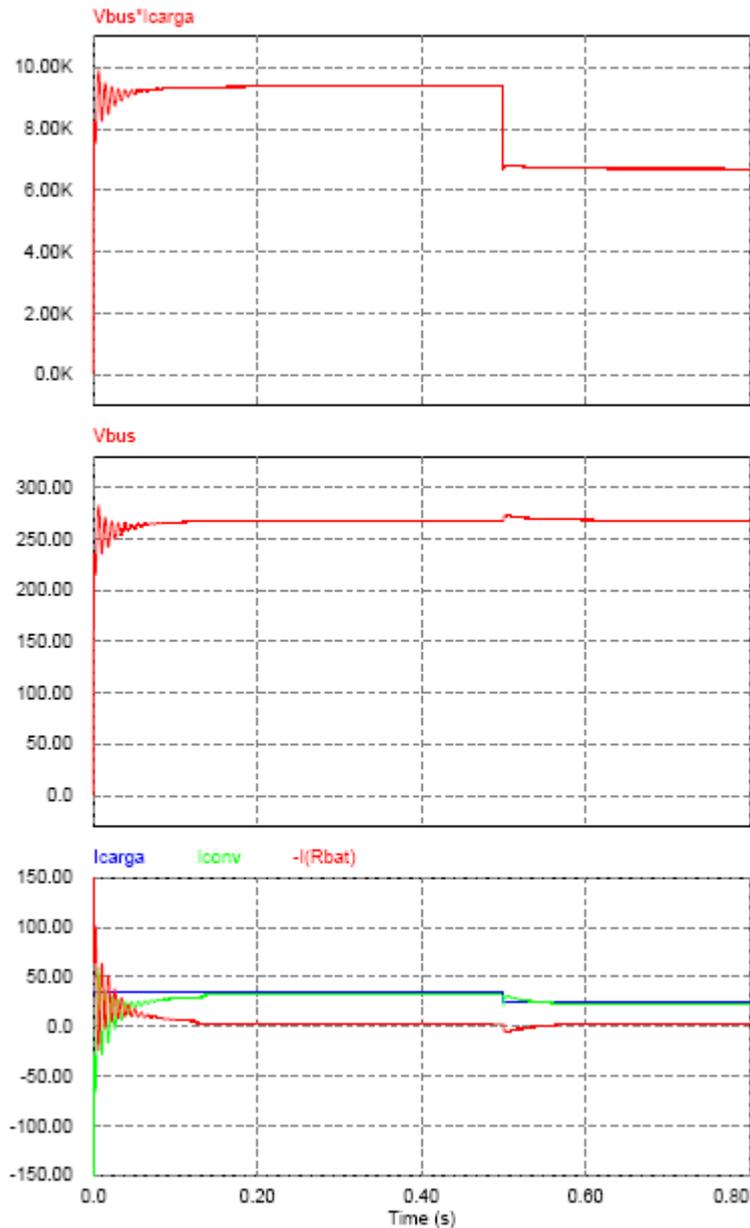


Fig. 26 Formas de onda de la simulación del elevador, la batería y la pila de combustible.

Como muestra la Fig. 26, la tensión del bus de distribución (V_{bus}) es capaz de regularse ante una variación en la demanda de potencia. El conjunto pila-elevador (I_{conv}) satisface esta demanda salvo en el arranque y en el escalón de potencia, donde es necesaria la intervención de la batería.

3.4 Alimentación de cargas de continua desde el bus de distribución.

Las especificaciones establecen que determinados componentes del sistema requieren suministros de 28 Vcc para su alimentación. Para asegurar el cumplimiento de estas especificaciones se hace necesario el uso de un convertidor de potencia CC que sea capaz de reducir la tensión de 270 V fijada en el bus principal por el convertidor elevador, hasta el nivel que requieren las cargas mencionadas anteriormente. Para asegurar el cumplimiento de estos requisitos, se ha seleccionado un convertidor forward. Ya que la variación entre la entrada y la salida del convertidor es tan elevada, el aislamiento galvánico de esta topología introduce el grado de libertad necesario para mantener el ciclo de trabajo en un valor centrado.

El convertidor forward funciona básicamente, como un convertidor reductor con aislamiento galvánico que ejerce de transformador y aísla la entrada de la salida y viceversa. Así, este convertidor obtiene a su salida una tensión continua menor que la que se introduce a su entrada. La Fig. 27 muestra un esquema de la topología básica de un convertidor forward.

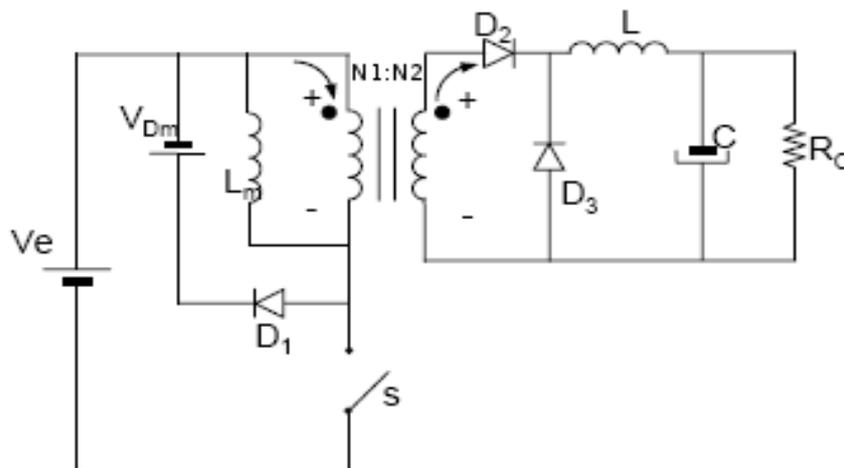


Fig. 27. Esquema básico de la topología de un convertidor forward.

Al igual que en el caso anterior, el funcionamiento básico de este convertidor parte del circuito equivalente que se obtiene dependiendo del estado en el que se encuentre el interruptor S (ver Fig. 28).

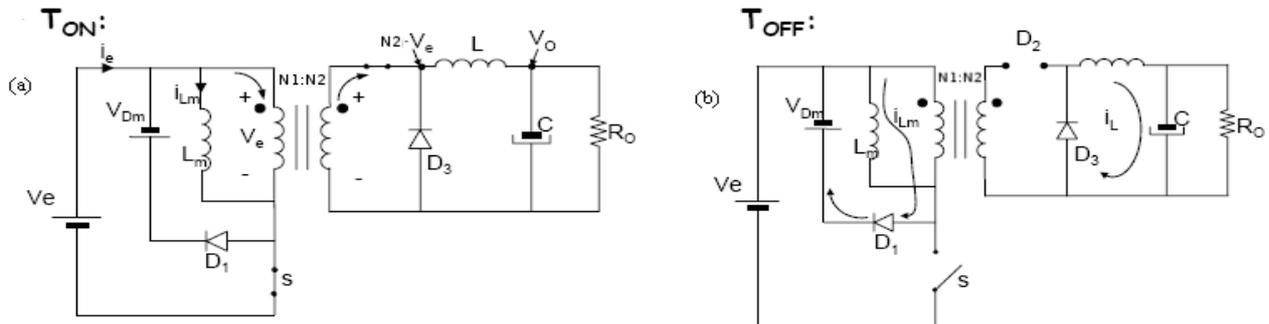


Fig. 28. Esquema del circuito equivalente de un convertidor forward en función de la posición del interruptor S, donde: (a) circuito equivalente con el interruptor cerrado, (b) circuito equivalente con el interruptor abierto.

La Fig. 28(a) muestra el circuito equivalente del convertidor cuando el interruptor está cerrado. En este caso, el secundario permite la circulación de corriente.

La Fig. 28(b) muestra el circuito equivalente del convertidor cuando el interruptor está abierto. En esta configuración la corriente le llega a la carga atravesando el diodo D3. En el primario, la corriente de la bobina magnetizante (L_m) busca un camino alternativo para realizar su descarga.

Diseño de los componentes del forward.

Para el correcto funcionamiento individual del forward, ha sido necesario determinar el valor de los componentes (condensadores y bobinas) propios de esta topología. A continuación se detalla el procedimiento llevado a cabo así como los valores finales de cada uno de estos componentes.

Transformador Ideal.

Se ha decidido diseñar la planta del convertidor idealmente de modo que el sistema sea lo más sencillo posible. Partiendo de la ecuación que relaciona el ciclo de trabajo del convertidor (D), las tensiones de entrada (U_e) y salida (U_o) y relación de vueltas del transformador (N_1/N_2) se dimensionará el valor de N_1 y N_2 de los devanados que forman el transformador del convertidor.

$$V_o = D \frac{N_2}{N_1} V_e$$

El procedimiento que se ha seguido es el siguiente:

Se ha fijado el ciclo de trabajo en $D = 0.5$ ya que un valor centrado de ciclo de trabajo asegura un mejor rendimiento del convertidor. Además se ha fijado el número de vueltas del devanado primario $N_1 = 10$. Introduciendo estos datos en la ecuación anterior se ha obtenido el valor del número de vueltas del devanado secundario N_2 . La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos.

Ciclo de trabajo (D)	Nº de vueltas del devanado primario (N1)	Nº de vueltas del devanado secundario (N2)
0.5	10	2.07

Tabla 6. Resultados intermedios de los parámetros del transformador

Como el número de vueltas de un transformador tiene que ser un número entero, se ha redondeado el número de vueltas obtenido para el devanado secundario en 2 y se ha recalculado el valor del ciclo de trabajo, obteniendo los siguientes resultados:

Ciclo de trabajo (D)	Nº de vueltas del devanado primario (N1)	Nº de vueltas del devanado secundario (N2)
0.518	10	2

Tabla 7. Resultados finales de los parámetros del transformador

Bobina y condensador de la planta.

Al igual que en el caso del elevador, se ha seleccionado una bobina lo suficientemente grande (en este caso del orden de μH) para limitar el rizado de corriente por la misma, de modo que se garantice el MCC en régimen permanente. Así mismo, el condensador ha de tomar un valor lo suficientemente elevado como para ser capaz de filtrar el rizado de tensión de salida del convertidor. A continuación se muestran los valores seleccionados para la bobina y el condensador que componen la etapa de potencia del convertidor.

Bobina (L_{forward})	Condensador (C_{forward})
900 μH	45 μF

Tabla 8. Valores de la bobina y el condensador de la planta

Lazo de control

En este caso, es necesario que el control del convertidor se realice en modo tensión. Esto es debido a que, independientemente del nivel de corriente que demanden las cargas de continua, y con ello, del nivel de corriente que proporcione el bus de distribución para abastecer a las mismas, el nivel de tensión que dichas cargas requieren para su correcta alimentación es de 28 Vcc. Realizando un control en tensión del forward, se asegura el cumplimiento de esta especificación ya que, ante variaciones dinámicas de las cargas, el convertidor será capaz de autorregular su salida en tensión para proporcionar los 28 V requeridos.

La topología de este convertidor hace posible proporcionar una tensión de salida constante utilizando solamente el lazo de control en tensión mencionado anteriormente. Para una mejor comprensión de cada una de las partes que componen el convertidor, la Fig. 29 muestra el diagrama de bloques del elevador incluyendo tanto la etapa de potencia como el control de la misma. Cada uno de los bloques representa la función de transferencia de uno de los bloques funcionales del circuito.

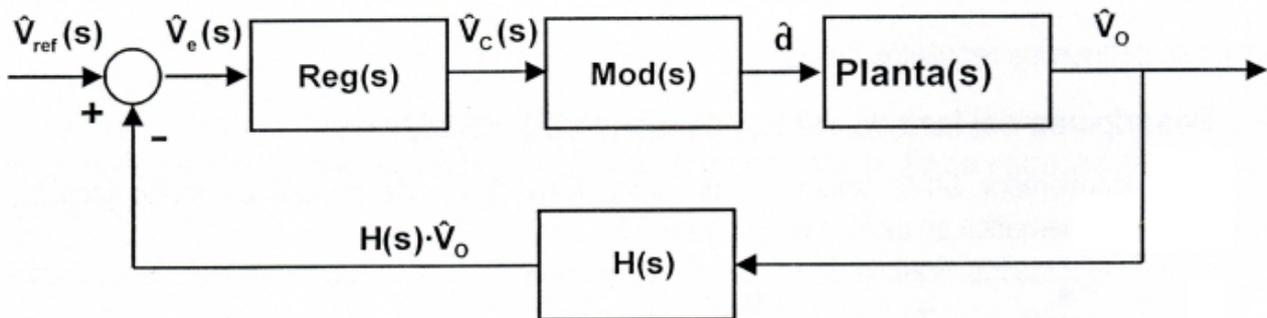


Fig. 29. Diagrama de bloques del Forward.

Reg (s) Función de transferencia del regulador.

El regulador genera la señal de control a partir de la diferencia existente entre la salida en tensión convertidor, y la tensión de referencia, fijada por el diseñador. La tensión de salida del regulador es proporcional a la perturbación de la tensión en la carga. Para este caso se ha utilizado un regulador tipo 3 que garantice la respuesta dinámica del circuito.

Mod (s) Función de transferencia del modulador PWM.

El modulador PWM determina el ancho de los pulsos de puerta del MOSFET comparando la señal de control generada por el regulador con una señal en diente de sierra.

Planta (s) Función de transferencia de la planta.

Función de transferencia que relaciona la tensión de salida del convertidor y el ciclo de trabajo.

H (s) Función de transferencia de la red resistiva de realimentación.

Se trata de un divisor resistivo que muestrea la tensión de salida de la etapa de potencia, proporcionando a la entrada del regulador una tensión de salida proporcional a la de la etapa de potencia.

La Fig.30 muestra el circuito de control en modo tensión que se ha diseñado para regular el comportamiento de la salida del convertidor forward.

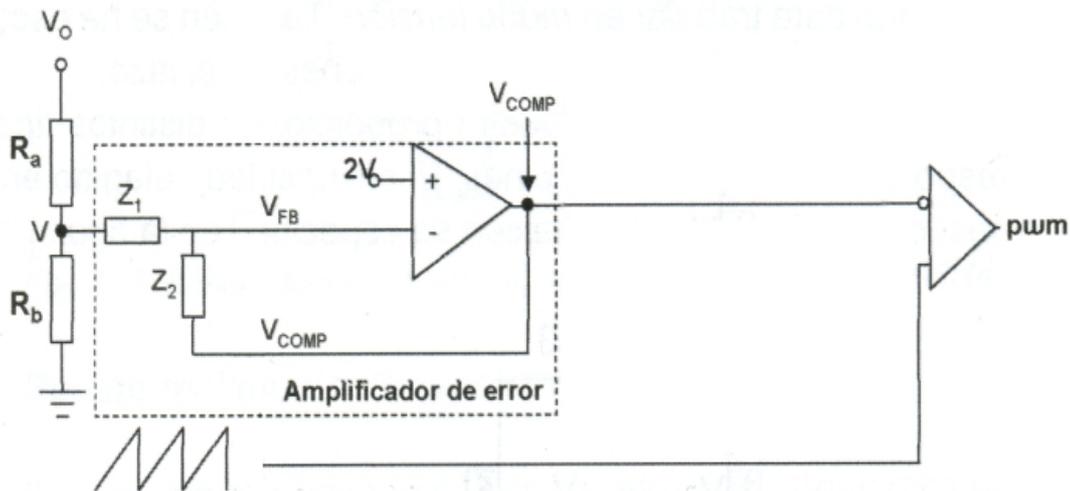


Fig. 30. Lazo de control del convertidor CC/CC Forward.

La red resistiva de realimentación (ver R_a y R_b en la Fig. 30) muestrea la salida del circuito de potencia y compara su resultado con un nivel de referencia, obteniendo una señal de control. Esta señal, al ser aplicada al modulador PWM determina el ancho del pulso que llega a la puerta de los transistores, es decir, modifica el ciclo de trabajo y como consecuencia la salida de la planta. De esta forma se obtiene a la salida, una tensión constante y bien regulada. Es importante tener en cuenta que, para garantizar una respuesta dinámica rápida del convertidor, el ancho de banda del regulador debe ser lo más grande posible.

Por tanto, en la Fig. 30 pueden distinguirse tres etapas: divisor resistivo, amplificador de error y generador PWM. Para el diseño del lazo de control se ha implementado un algoritmo de cálculo mediante la herramienta MathCad que determina el valor de las impedancias Z_1 y Z_2 a partir de determinadas decisiones de diseño. Una de las más importantes es la elección de un Margen de Fase. Es necesario tener en cuenta que un MF demasiado pequeño genera oscilaciones en la respuesta del sistema en lazo cerrado acercándolo a la inestabilidad, mientras que un MF demasiado grande hace que el sistema sea muy lento. Por tanto, será necesario determinar un MF suficiente como para

garantizar tanto la estabilidad del sistema en lazo cerrado como una velocidad de respuesta adecuada a las necesidades del sistema. La segunda decisión de diseño que ha de tomarse es la elección de una frecuencia de corte de lazo que permita una respuesta transitoria rápida del convertidor. Para garantizar un correcto funcionamiento del lazo de control, la frecuencia de corte del regulador (f_b) que compone el lazo de control ha de ser, al menos, diez veces menor que la frecuencia de conmutación del sistema, generada por una señal triangular de 100 kHz. Colocando la frecuencia de corte del regulador al menos una década antes, se asegura que el lazo de control sea capaz de filtrar a la frecuencia de conmutación evitando que las perturbaciones se filtren hacia la salida del convertidor. El procedimiento llevado a cabo así como el funcionamiento del algoritmo se detallan en este apartado. Las especificaciones técnicas del sistema determinan que el convertidor forward debe ser capaz de responder rápidamente ante posibles variaciones dinámicas de carga. Es por ello que se ha decidido utilizar como regulador del lazo de control un regulador tipo 3 cuyo ancho de banda garantice el cumplimiento de esta especificación.

A continuación se muestra la metodología llevada a cabo para obtener los valores de las impedancias Z_1 y Z_2 ; así como el diseño final del amplificador de error que forma parte del lazo de control del convertidor forward incluyendo, tanto la red resistiva como el regulador tipo 3.

Red de realimentación resistiva

En régimen permanente, la tensión de sensado (V) debe ser igual a la referencia fijada por el diseñador. Para ello, es necesario dimensionar las resistencias que componen el divisor resistivo (R_a , R_b), de modo que cuando la salida del convertidor sea de 28 V, la tensión de salida y la de referencia sean iguales, y por tanto, el error sea nulo. El divisor resistivo ha de cumplir la siguiente ecuación:

$$V = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_o$$

Para el diseño del divisor resistivo se ha fijado el valor de Rb en 10 kΩ, por lo tanto:

$$R_b = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_a = 130 \text{ k}\Omega$$

Regulador tipo 3

La tensión de sensado se introduce en la entrada del amplificador de error, diseñado en base a la topología de un regulador tipo 3. Las impedancias que definen la ganancia del amplificador se modelan mediante el algoritmo generado en la herramienta Mathcad a tal efecto (ver *Hojas de mathcad* en el anexo 7.4). A continuación se muestra el procedimiento detallado que se ha llevado a cabo para dimensionar las resistencias y condensadores que componen las impedancias que fijan la ganancia del regulador.

Como se ha comentado anteriormente, la primera decisión de diseño que ha de tomarse para dimensionar la ganancia del regulador es el Margen de Fase mínimo (MF) y la frecuencia de corte a la que va a trabajar el lazo. A continuación se muestran los valores seleccionados para ambos parámetros:

MF:=50	Margen de Fase mínimo. $\phi_{\text{min}} := -\pi + \text{MF} \cdot \frac{\pi}{180}$
fb:= 5000	Valor supuesto para la frecuencia de cruce.

Para dimensionar correctamente el lazo de control del forward es necesario conocer la función de transferencia de la planta del convertidor. Esta función de transferencia puede ser determinada, como se ha comentado anteriormente, mediante la utilización de modelos promediados o mediante el diagrama de Bode de la planta determinado a través de la herramienta de simulación PSIM.

Por sencillez, se ha determinado dicha función de transferencia utilizando el bloque AC-Sweep incluido en la herramienta PSIM. La Fig. 29 muestra el diagrama de Bode que se obtiene al simular un barrido en frecuencia de la planta de convertidor.

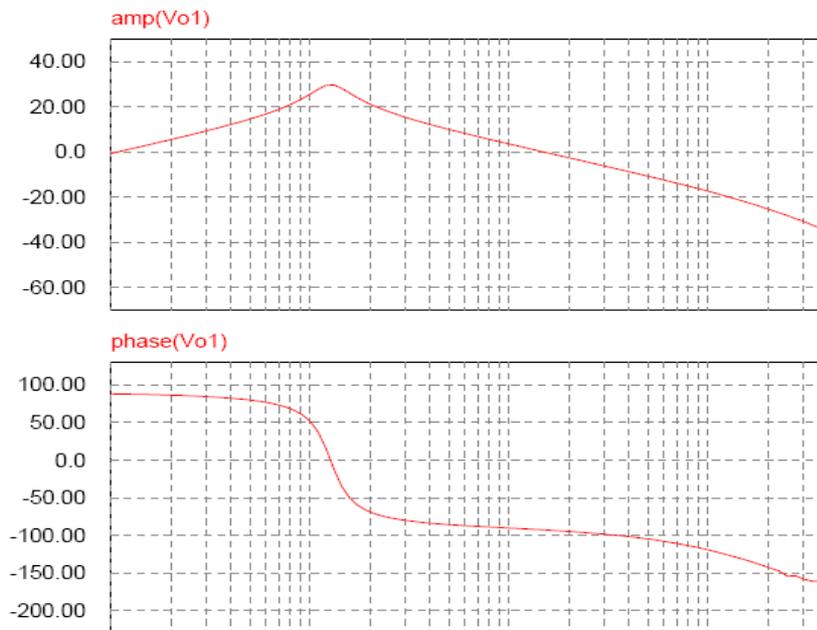


Fig. 29 Función de transferencia de la planta del forward

Para determinar, a través del algoritmo creado a tal fin mediante la herramienta Mathcad, los valores de las impedancias Z_1 y Z_2 es necesario introducir en la hoja de cálculo la función de transferencia correspondiente al modulador PWM y que se muestra en la ecuación de la siguiente ecuación

$$\text{Mod}(s) := \frac{1}{V_2 - V_{\text{off}}} \cdot \frac{T_r}{T_s}$$

Donde:

Tr: Tiempo de subida de la rampa.

Ts: Periodo de conmutación.

V2: Tensión máxima de la rampa de referencia.

Voff: Valor de offset de la rampa.

Los valores de los parámetros que determinan dicha función de transferencia son fijados por las especificaciones del circuito de control y quedan resumidos en la Tabla 9.

Tr	9.9us
Ts	10us
V2	1V
Voff	0V

Tabla 9. Resumen de los valores de los parámetros que determinan la función de transferencia del modulador pwm.

Introduciendo estos datos en la hoja de cálculo, así como la función de transferencia de la planta del convertidor, el algoritmo generado mediante la herramienta Mathcad devolverá los valores de las resistencias y condensadores que forman las impedancias Z1 y Z2 que determinan la ganancia del regulador tipo3.

$$R1 = 522.175$$

$$R2 = 2.769k\Omega$$

$$C1 = 13.68nF$$

$$C2 = 51.61nF$$

$$C3 = 2.695nF$$

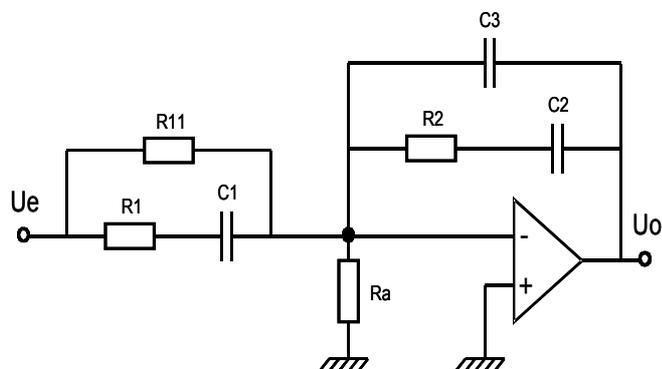


Fig. 30. Esquema de la posición de las resistencias y condensadores que componen la ganancia del regulador tipo 3.

Generador PWM

Para generar la PWM es necesario realizar una comparación entre la señal moduladora fijada en la salida del regulador, y una portadora triangular. La Fig. 31 muestra el circuito que se ha diseñado para generar la PWM.

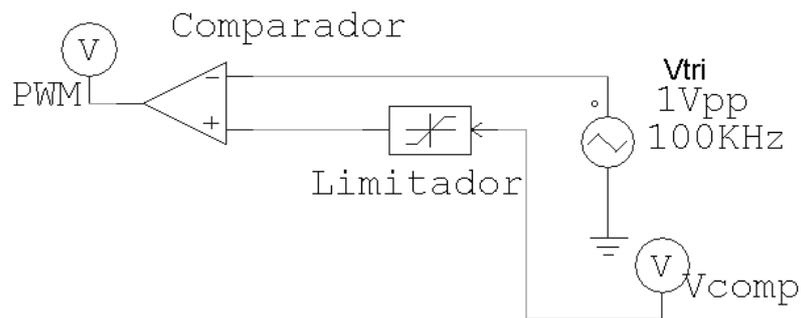


Fig. 31. Circuito de generación de la señal pwm.

Como puede observarse en la Fig. 31 la portadora triangular se ha diseñado mediante una fuente de tensión triangular de 1 Vpp y 100 kHz que fijan la frecuencia de conmutación del sistema a las especificaciones impuestas. Además ha sido necesario incluir, al igual que en el caso del elevador, un limitador en la señal Vcomp, que fija el ciclo de trabajo D, para evitar que éste llegue a 1.

Condensador de entrada

El diseño del condensador de entrada se ha realizado de modo que éste limite el rizado de corriente por la batería. Para ello, se ha conectado la entrada del convertidor directamente a la batería, como si fuese ésta quien cede la corriente al sistema en todo momento. La Fig. 32 muestra esta conexión.

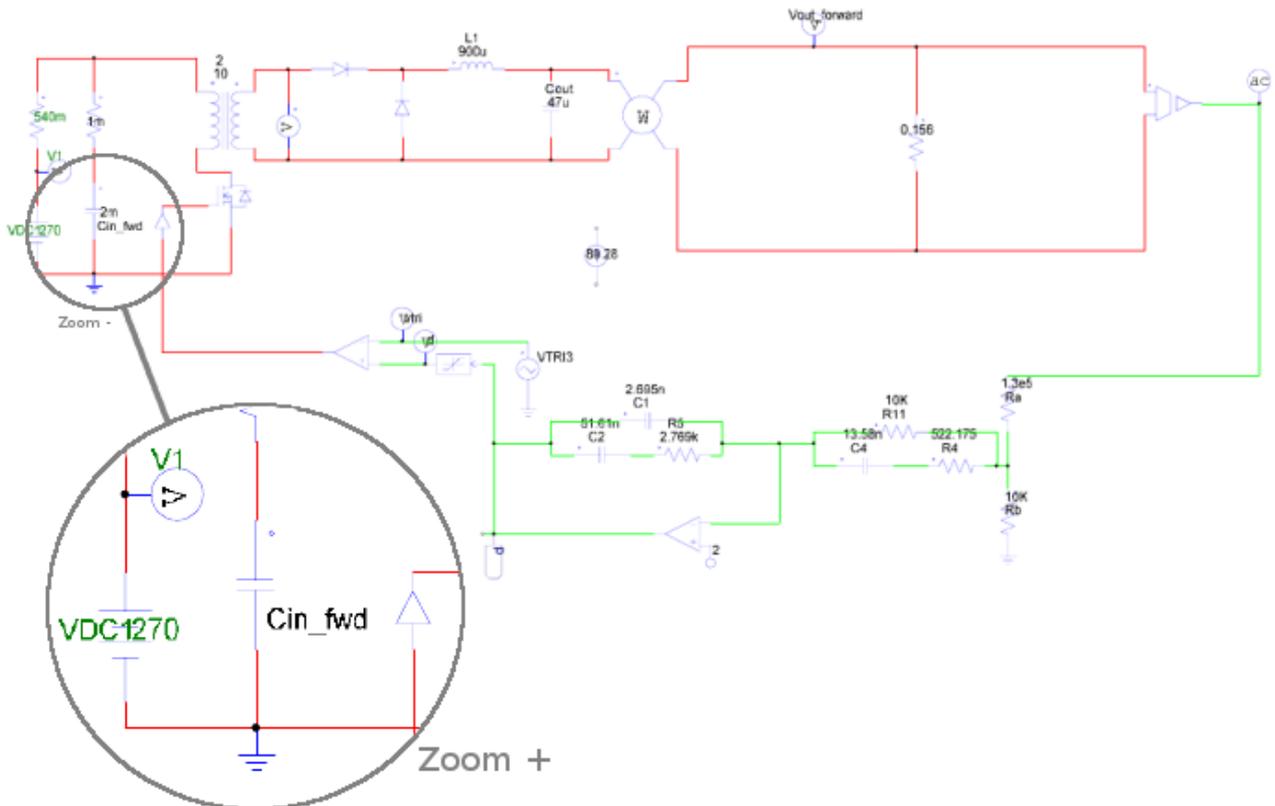


Fig. 32. Condensador de entrada del Forward.

La metodología que se ha seguido para dimensionar el condensador de entrada del filtro ha sido variar la capacidad del condensador e ir midiendo el rizado de la corriente por la batería hasta obtener valores de rizado que puedan considerarse admisibles para la batería.

La Tabla 10 muestra una serie de valores que se han ido probando hasta dimensionar correctamente el condensador de entrada del convertidor.

Condensador de entrada (C_{in_fwd})	Rizado de corriente por la batería (ΔI_{bat})
100 uF	720.2mA
250uF	597.56mA
500uF	321.8mA
1mF	192.57mA
2mF	127.91mA

Tabla 10. Ajuste del condensador de entrada del Forward.

Se considera que con el condensador de 1 mF se consigue un rizado de corriente admisible en la batería.

El circuito mediante el cual se ha diseñado el condensador de entrada del forward (C_{in_fwd}) puede verse con detalle en el circuito *Diseño C_{in} del forward* del anexo 7.1.

Para comprobar el correcto funcionamiento del convertidor forward en lazo cerrado, se ha sometido al mismo a un escalón de carga que pasa de una demanda de 5 kW a una de 7.5 kW. Los resultados obtenidos en esta simulación se muestran en la Fig. 33.

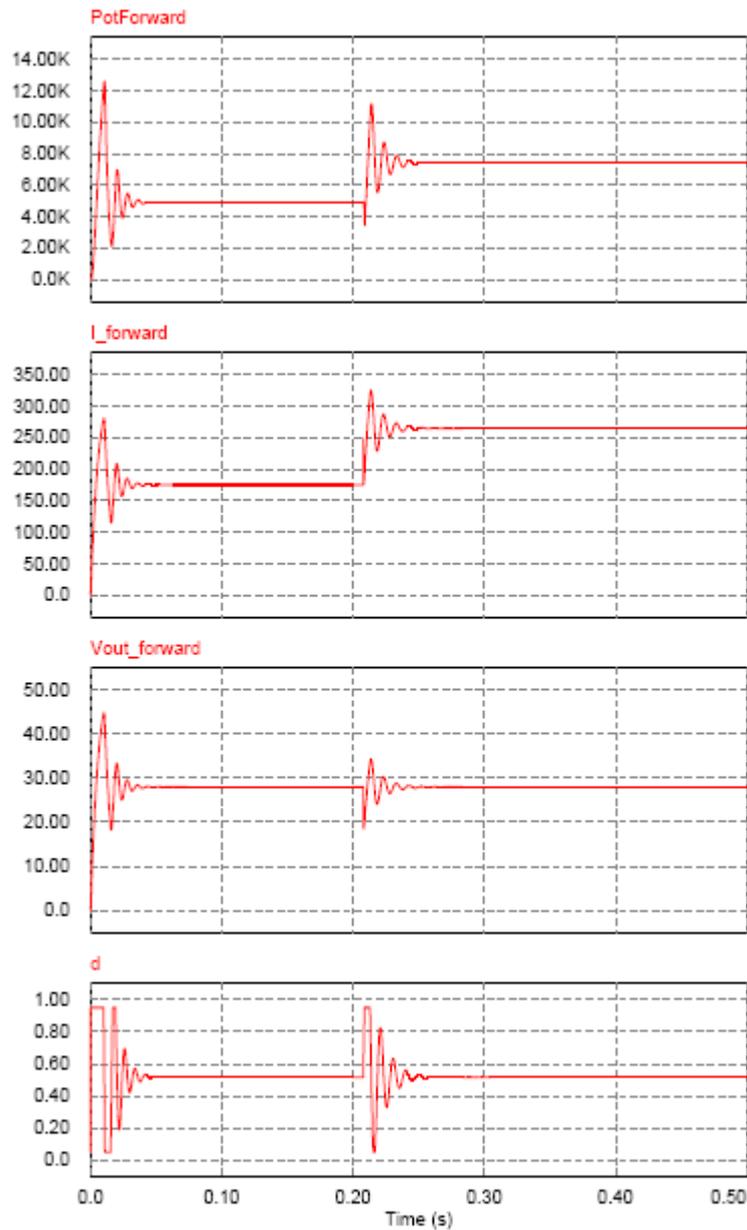


Fig. 33. Formas de onda del diseño individual del forward.

Como puede observarse en la Fig. 33, el convertidor es capaz de regular su salida a 28 Vcc ante un escalón de potencia.

Una vez detalladas todas las decisiones tomadas en el diseño del forward se puede observar el esquemático del circuito final del mismo en la Fig. 34, y con más detalle el circuito *forward* del anexo 7.1.

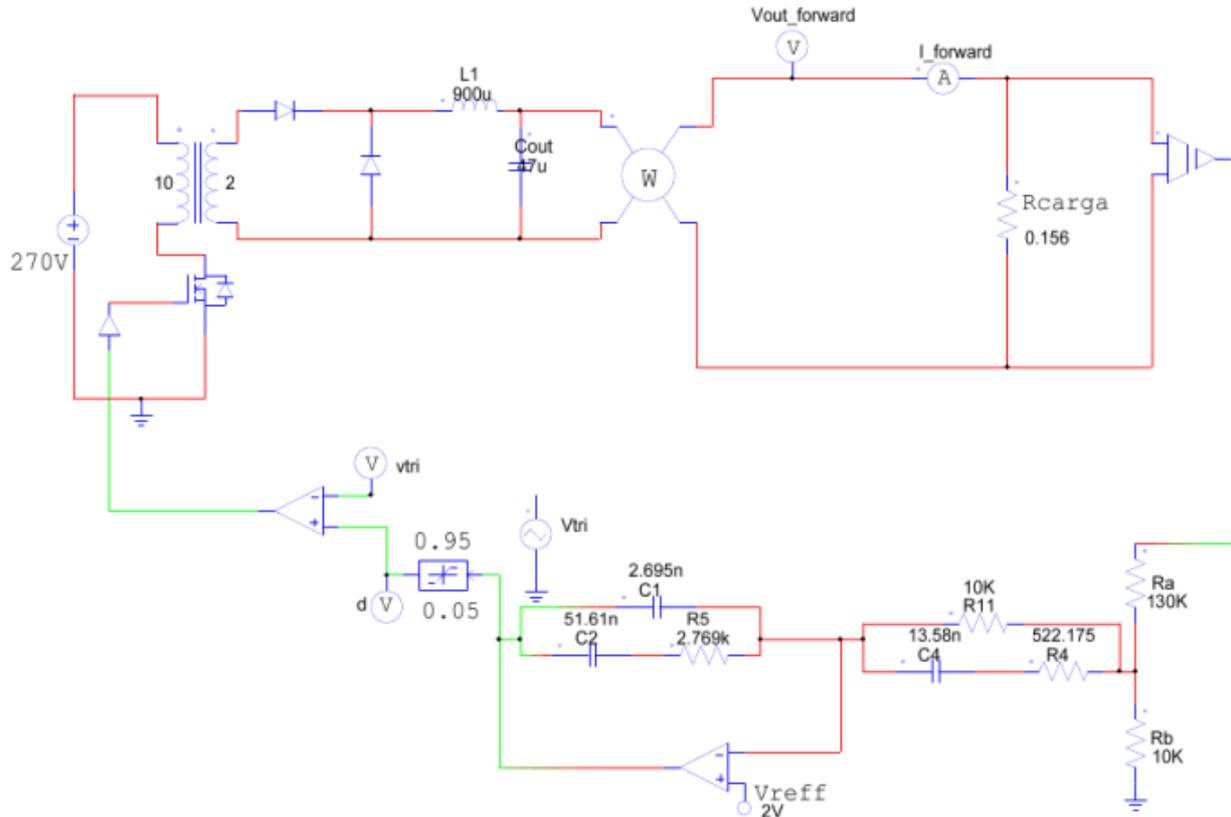


Fig. 34. Circuito final del diseño individual del forward.

3.5 Alimentación de cargas de alterna desde el bus de distribución.

Las especificaciones determinan que determinados componentes del sistema requieren suministros de 115 Vac a 400 Hz para su alimentación. Para asegurar el cumplimiento de estas especificaciones se hace necesario el uso de un convertidor de potencia CA que sea capaz de transformar la tensión de 270 V fijada en el bus principal por el convertidor elevador para garantizar el suministro que requieren las cargas mencionadas anteriormente. Para asegurar el cumplimiento de estos requisitos, se ha seleccionado un convertidor inversor en puente completo.

El inversor está diseñado para convertir la tensión continua con la que se alimenta el circuito en tensión alterna. Para conseguir variar la frecuencia, el valor eficaz de la tensión de salida y que los armónicos no deseados se generen a altas frecuencias, de modo que se facilite su filtrado, se recurre a una modulación PWM, que se genera comparando una señal moduladora sinusoidal con una portadora triangular (ver Fig. 35).

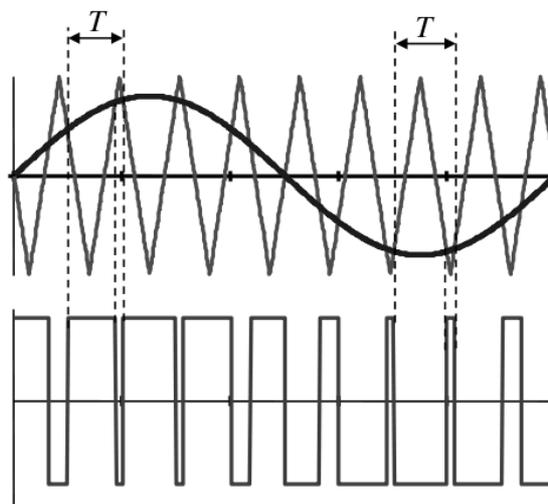


Fig. 35. Generación de una PWM a partir de la comparación de una sinusoidal (moduladora) y una triangular (portadora).

Para definir las señales moduladora y portadora, es necesario recurrir los conceptos de índice de modulación en amplitud (m_a) e índice de modulación en fase (m_f). El m_f definirá dónde situar la frecuencia a la que debe trabajar la señal portadora respecto de la señal moduladora. Así mismo, el m_a definirá la amplitud de la señal moduladora con respecto a

la triangular portadora de modo que se asegure el funcionamiento en zona lineal de la PWM.

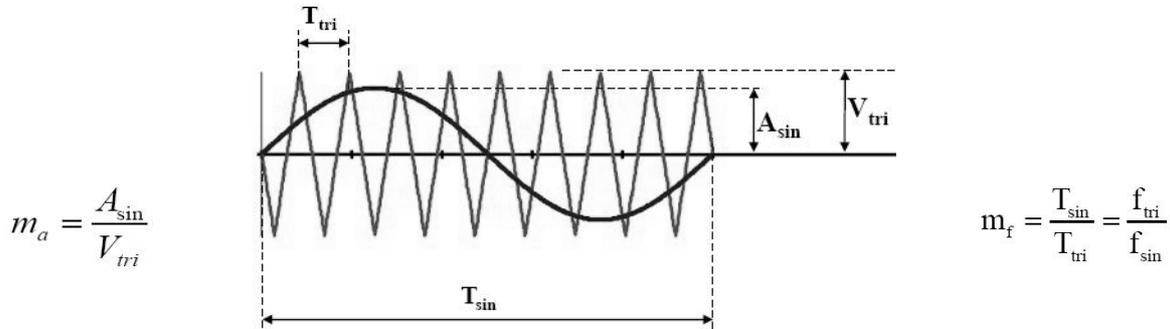


Fig. 36. Conceptos de índice de modulación en amplitud (m_a) e índice de modulación en fase (m_f).

El valor que debe tomar el índice de modulación en amplitud (m_a), dependerá de las especificaciones del sistema. Es necesario tener en cuenta que el valor de éste índice afecta a la amplitud de los armónicos de alta frecuencia. Por ejemplo, la amplitud del primer armónico es proporcional a m_a , según la siguiente ecuación:

$$V_{AB1} = m_a \cdot V_{CC}$$

Así mismo, y para garantizar que los armónicos no fundamentales que se generen se sitúen a frecuencias lo suficientemente altas como para garantizar su fácil filtrado, el índice de modulación en frecuencia (m_f) tomará valores en torno a 21. Esto es, la frecuencia de la señal portadora será 21 veces la frecuencia de la señal moduladora.

Diseño de los componentes del inversor.

La principal decisión a tomar a la hora de diseñar el convertidor inversor es si la topología adecuada a la aplicación es la unipolar o la bipolar. Para determinar cuál de las dos se adapta mejor a las necesidades del sistema se ha tenido fundamentalmente en cuenta la respuesta en frecuencia de las mismas de forma que se facilite el posterior filtrado de la señal PWM para obtener la señal sinusoidal que determinan las especificaciones del sistema. A continuación se muestra la respuesta en frecuencia de ambas topologías.

La Fig. 37 muestra la respuesta en frecuencia de un inversor con modulación bipolar.

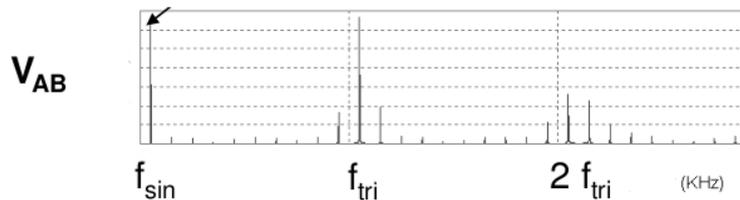


Fig. 36. Respuesta en frecuencia de un inversor con modulación bipolar.

Como puede observarse, el primer armónico de tensión se sitúa a la frecuencia de la señal portadora (f_{tri}).

La Fig. 38 muestra la respuesta en frecuencia de un inversor con modulación unipolar.

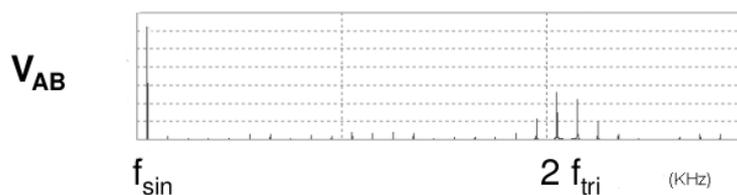


Fig. 38. Respuesta en frecuencia de un inversor con modulación unipolar.

Como puede observarse, en la topología unipolar, los armónicos de tensión se sitúan al doble de la frecuencia de la señal portadora ($2f_{tri}$). Esto supone que este tipo de modulación tenga una ventaja en cuanto a facilidad de filtrado con respecto a topología bipolar, ya que los armónicos de tensión se sitúan al doble de frecuencia que en esta última. En este caso, existía demasiado rizado de alta frecuencia, con lo que, para facilitar su filtrado, se ha elegido la topología unipolar para la planta del convertidor inversor.

Para generar la modulación PWM es necesario comparar las señales moduladoras con una portadora triangular. Antes de cerrar el lazo de control se ha procedido a fijar estas señales mediante fuentes de tensión de modo que se generara una PWM que permitiera diseñar el filtro L-C que obtiene a su salida una tensión eficaz de 115 V_{eff} y 400 Hz como marcan las especificaciones. La señal portadora triangular se ha diseñado mediante una fuente de tensión triangular de 2 V_{pp} y 50 kHz, mientras que las señales moduladoras han sido diseñadas mediante fuentes sinusoidales de 0.6 V_p y 400 Hz. Estos valores de tensión y frecuencia garantizan un funcionamiento del convertidor en zona lineal y fijan el

índice de modulación en frecuencia en un valor lo suficientemente elevado como para facilitar el filtrado de la PWM generada.

Una vez generada la señal PWM es necesario filtrar la misma para obtener a la salida una señal sinusoidal de 115 V_{eff} y 400 Hz. Para filtrar el rizado de alta frecuencia que introduce la señal portadora triangular a la salida se ha seleccionado un filtro paso bajo de segundo orden L-C (ver Fig. 39).

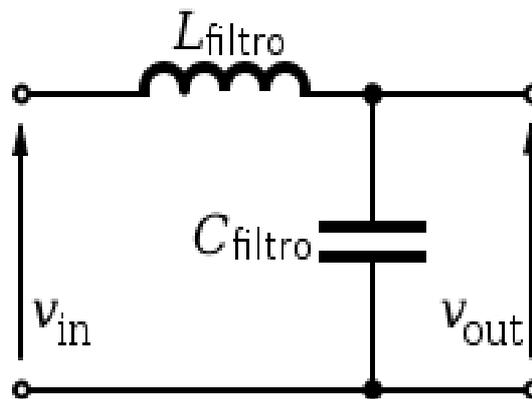


Fig. 39. Circuito de un filtro paso bajo LC.

Para determinar los valores de la bobina (L_{filtro}) y el condensador (C_{filtro}) que componen el filtro se parte de la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{filtro}} \cdot C_{\text{filtro}}}}$$

Hay que tener en cuenta a la hora de modelar el filtro, que la tensión alterna de salida debe ser, por especificaciones, de 400 Hz, es decir, de la misma frecuencia a la que trabaja la señal moduladora. Es necesario, por tanto, filtrar la frecuencia de 50 kHz que transmite la señal portadora triangular a la salida del convertidor. La clave está en fijar la frecuencia de corte del filtro L-C (f_c) en, al menos, 4 kHz, es decir, una década después de la frecuencia que se quiere transmitir a la salida. De este modo, se asegura no perder información de esta señal. A su vez, esta frecuencia de corte permite el filtrado completo de la frecuencia de 50 kHz. Las combinaciones de valores L y C que generarían una frecuencia de corte del filtro de 4 kHz son innumerables. Es necesario encontrar unos valores para los componentes del filtro que supongan un rizado de alta frecuencia admisible en la salida del convertidor y la obtención de los 115 Vac que marcan las

especificaciones. Para ello, se han ido introduciendo en la ecuación anterior, diferentes valores para el condensador del filtro. El valor del condensador ha de ser lo suficientemente elevado (del orden de μF) como para filtrar el rizado de alta frecuencia que se genera en la tensión de la salida del convertidor. Durante este proceso se ha ido midiendo el valor del rizado de tensión de alta frecuencia, así como el valor eficaz de la señal resultante a la salida del filtro L-C. La Tabla 11 muestra los valores tomados durante el diseño del filtro así como la combinación seleccionada para la bobina (L_{filtro}) y el condensador (C_{filtro}).

Condensador(C_{filtro})	Bobina (L_{filtro})	ΔV_{out} alta frecuencia	$V_{\text{out rms}}$
100 μF	1.5 μH	0.078V	102.53V _{eff}
60 μF	26 μH	0.0189V	122.26V _{eff}
10 μF	15 μH	0.136V	116.41V _{eff}
4 μF	380 μH	0.31V	115.41V _{eff}

Tabla 11. Diseño del filtro L-C.

Se considera que los valores seleccionados para el condensador (C_{filtro}) y la bobina (L_{filtro}) que muestra la Tabla 11, suponen un rizado de alta frecuencia admisible y ajustan suficientemente el valor eficaz de la tensión de salida a las especificaciones del sistema, es decir, a 115V ac.

Lazo de control

Al igual que en el caso del convertidor forward, es necesario que el control del inversor se realice en modo tensión. Esto es debido a que, independientemente del nivel de corriente que demanden las cargas de alterna, y con ello, del nivel de corriente que proporcione el bus de distribución para abastecer a las mismas, el nivel de tensión que dichas cargas requieren para su correcta alimentación es de 115 Vac. Realizando un control en tensión del convertidor, se asegura el cumplimiento de esta especificación ya que, ante variaciones dinámicas de las cargas, el convertidor será capaz de autorregular su salida en tensión para proporcionar los 115 Vac requeridos.

La topología de este convertidor hace posible proporcionar una tensión de salida constante utilizando solamente el lazo de control en tensión mencionado anteriormente.

Para una mejor comprensión de cada una de las partes que componen el convertidor, la Fig. 40 muestra el diagrama de bloques del inversor incluyendo, tanto la etapa de potencia como el control de la misma. Cada uno de los bloques representa la función de transferencia de uno de los bloques funcionales del circuito.

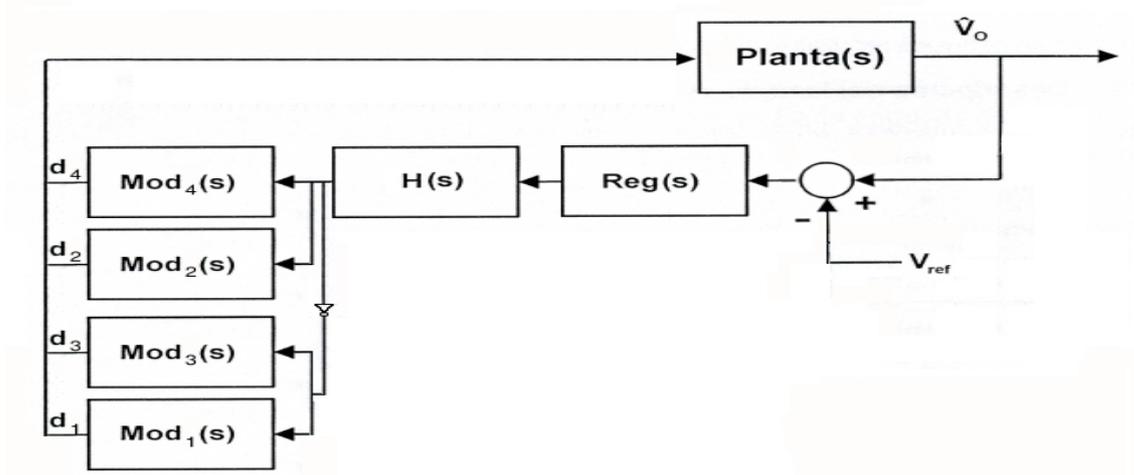


Fig. 40 Diagrama de bloques del inversor

- Planta (s)** **Función de transferencia de la planta.**
 Función de transferencia que relaciona la tensión de salida del convertidor y el ciclo de trabajo.
- Reg (s)** **Función de transferencia del regulador.**
 El regulador genera la señal de control a partir de la diferencia existente entre la tensión de salida del convertidor y la tensión de referencia fijada por el diseñador, es decir, a partir de la señal de error.
- H (s)** **Función de transferencia de la red resistiva.**
 Se trata de un divisor resistivo que muestrea la tensión de salida del regulador para fijar la amplitud de cada una de las ondas sinusoidales moduladoras.
- Mod (s)** **Función de transferencia del modulador PWM.**
 Los moduladores PWM determinan el ancho de los pulsos de puerta de cada uno de los cuatro Mosfet que componen el puente, comparando la señal moduladora correspondiente con una señal en diente de sierra.

El lazo de control muestrea la salida del convertidor una vez filtrada, obteniendo la señal de error al determinar la diferencia entre esta señal y la referencia, fijada por el diseñador. La señal de referencia se determina teniendo en cuenta que, en régimen permanente, la señal de salida del convertidor es una señal sinusoidal de $115 V_{eff}$ y 400 Hz y que además, en estas condiciones el error debe ser nulo. Por tanto, la tensión de referencia se generará a partir de una fuente de tensión sinusoidal que trabaje a dicha tensión eficaz y frecuencia.

La señal de error generada es la entrada del regulador. Los requisitos del sistema no imponen que el lazo del inversor tenga una respuesta dinámica rápida, de modo que por sencillez, se ha decidido diseñar el regulador mediante un integrador. Éste funciona como un filtro paso bajo de primer orden que cuenta con una ganancia elevada a bajas frecuencias y es capaz de eliminar el error en régimen permanente. Este nivel de ganancia a bajas frecuencias, hace que el lazo sea capaz de seguir a la tensión de referencia con más fidelidad, pero puede implicar problemas de estabilidad.

Antes de que la señal generada por el regulador llegue al modulador PWM, es necesario fijar el valor de amplitud de la misma para asegurar el funcionamiento en zona lineal de la modulación PWM. Para ello, se ha diseñado una red resistiva que fija la amplitud de la señal de salida del regulador a tal efecto. Además, la topología del circuito exige la generación de dos señales moduladoras (V_{sin_p} y V_{sin_n}) que estén desfasadas 180° entre sí, por lo que una de ellas será la señal inversa de la otra (ver Fig. 41).

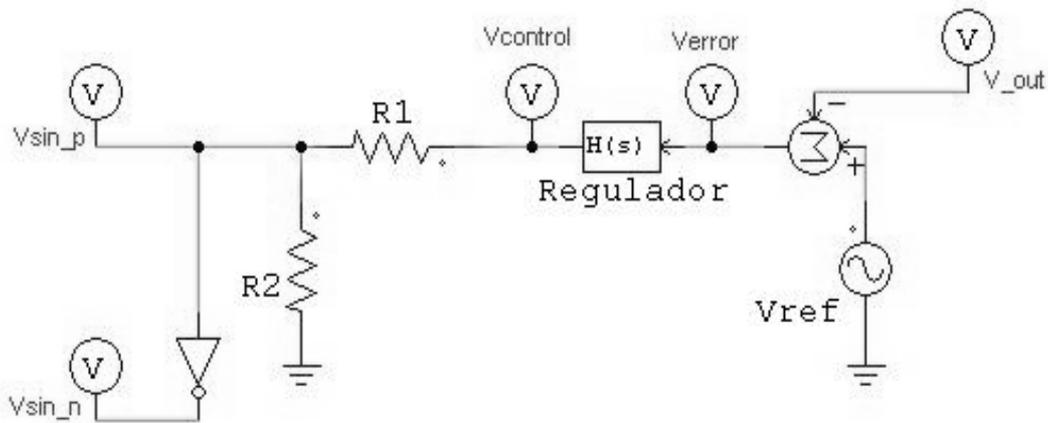


Fig. 41. Tensión de referencia, regulador y divisor resistivo del lazo de control del inversor.

La finalidad de la correcta implementación del lazo de control del inversor es obtener a la salida del mismo una tensión constante y bien regulada que siga a la tensión de referencia en caso de que existan perturbaciones en el sistema.

La metodología que se ha seguido a la hora de determinar los valores de cada uno de los bloques consiste en fijar los valores de las resistencias que componen el divisor resistivo en $R_1=10\text{ k}\Omega$ y $R_2=5\text{ k}\Omega$ e ir variando la ganancia del regulador hasta que la salida del convertidor se aproxime a 115 Veff .

La Tabla 12 muestra los resultados que han sido obtenidos en este proceso.

Ganancia del divisor resistivo	Ganancia del integrador	Salida del regulador	Salida red resistiva	Vout rms
0.33	20	1.31Vp	0.436Vp	75.40Veff
0.33	30	1.69Vp	0.563Vp	97.95Veff
0.33	40	1.85Vp	0.619Vp	111.04Veff
0.33	45	1.93Vp	0.633Vp	115.9Veff

Tabla 12. Ajuste de la ganancia del integrador del lazo de control.

Una vez fijada la ganancia del integrador en 45 se ha ajustado el valor de la tensión de salida del convertidor en 115Veff variando el valor de la R_2 . La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos durante el proceso así como los valores finales de diseño.

R1	R2	Ganancia del integrador	Vout rms
10k Ω	5k Ω	45	115.9Veff
10k Ω	4.7k Ω	45	115.3Veff
10k Ω	4.5k Ω	45	114.5Veff
10k Ω	4k Ω	45	112.9Veff

Tabla 13. Ajuste de la resistencia R2 del divisor resistivo.

Como se muestra en la Tabla 13, los valores que más ajustan la salida del convertidor a las especificaciones de diseño son:

$$R_1 = 10\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 4.7\text{ k}\Omega$$

$$\text{Ganancia del integrador} = 45$$

Condensador de entrada

El diseño del condensador de entrada se ha realizado de modo que éste limite el rizado de corriente por la batería. Para ello, se ha conectado la entrada del convertidor directamente a la batería, como si fuese ésta quien cede la corriente al sistema en todo momento. La Fig. 42 muestra esta conexión.

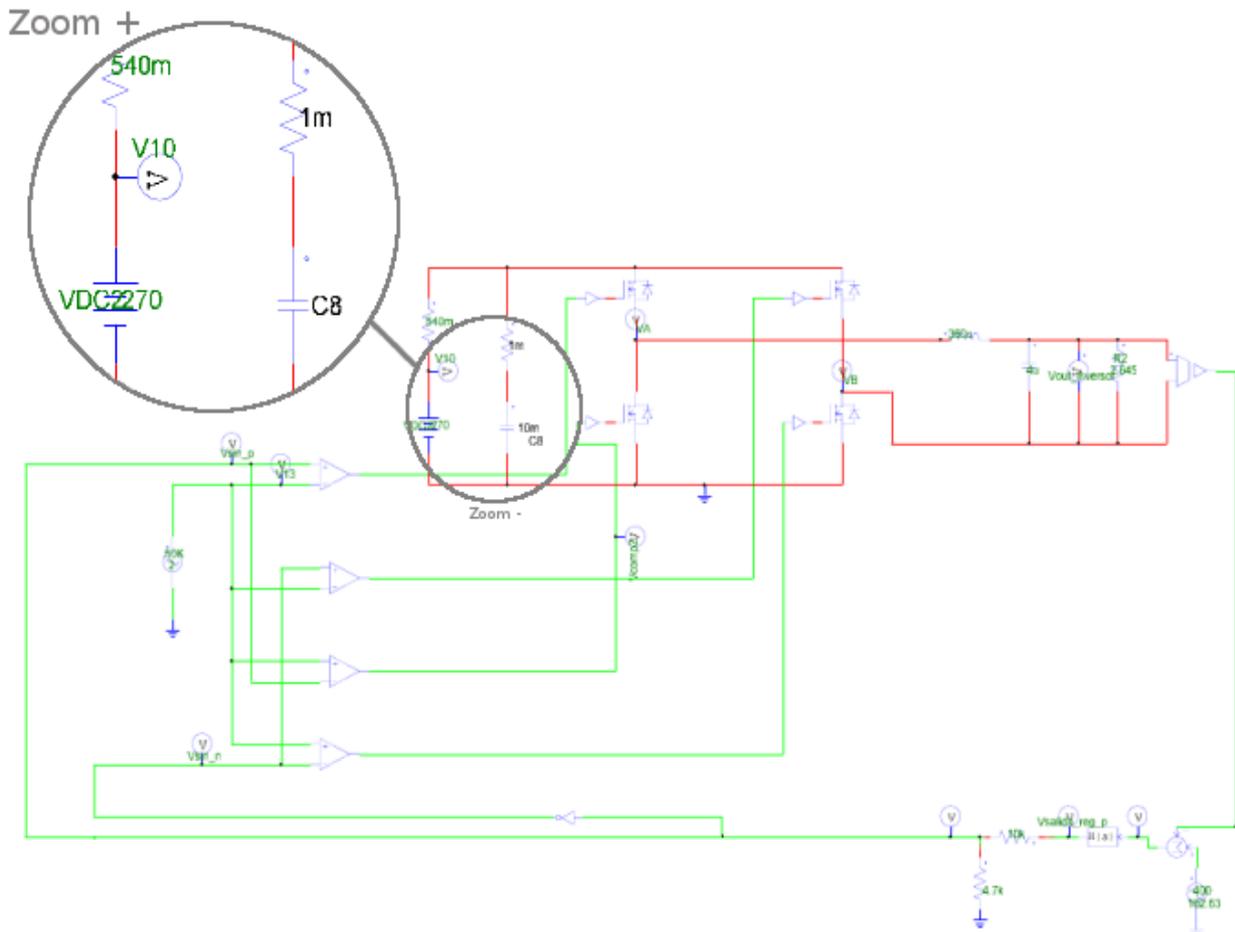


Fig. 42. Condensador de entrada del Inversor.

La metodología que se ha seguido para dimensionar el condensador de entrada del filtro ha sido variar la capacidad del condensador e ir midiendo el rizado de la corriente por la batería hasta obtener valores de rizado que puedan considerarse admisibles para la batería.

La Tabla 14 muestra una serie de valores que se han ido probando hasta dimensionar correctamente el condensador de entrada del convertidor.

Condensador de entrada (C_{in_inv})	Rizado de corriente por la batería (ΔI_{bat})
250 μ F	4.92A
500 μ F	3.58A
1mF	1.45A
3mF	1.07A
6mF	0.72A

Tabla 14. Diseño del condensador de entrada del Inversor

Se considera que con el condensador de 1mF se consigue un rizado de corriente admisible en la batería.

El circuito mediante el cual se ha diseñado el condensador de entrada del inversor (C_{in_inv}) puede verse con detalle en el circuito *Diseño C_{in} del Inversor* del anexo 7.1.

Para comprobar el correcto funcionamiento del convertidor inversor en lazo cerrado, se ha realizado una simulación cuyos resultados muestra la Fig. 43.

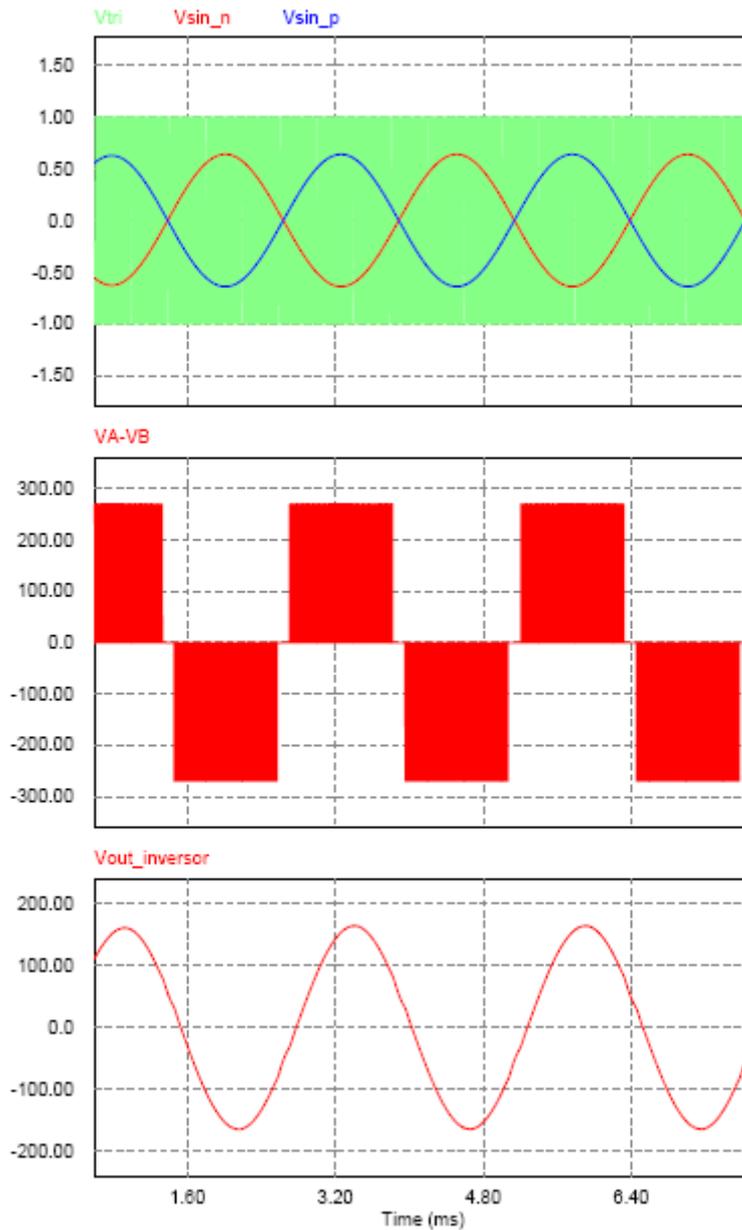


Fig. 43. Formas de onda del diseño individual del inversor.

Como muestra la Fig. 43 el inversor es capaz de obtener a su salida una tensión sinusoidal de 115 Vac a 400 Hz partiendo de una entrada de 270 Vcc generada a partir de una fuente de tensión continua.

Una vez detalladas todas las decisiones tomadas en el diseño del inversor se puede observar el esquemático del circuito final del mismo en la Fig. 44, y con más detalle el circuito *inversor* del anexo 7.1.

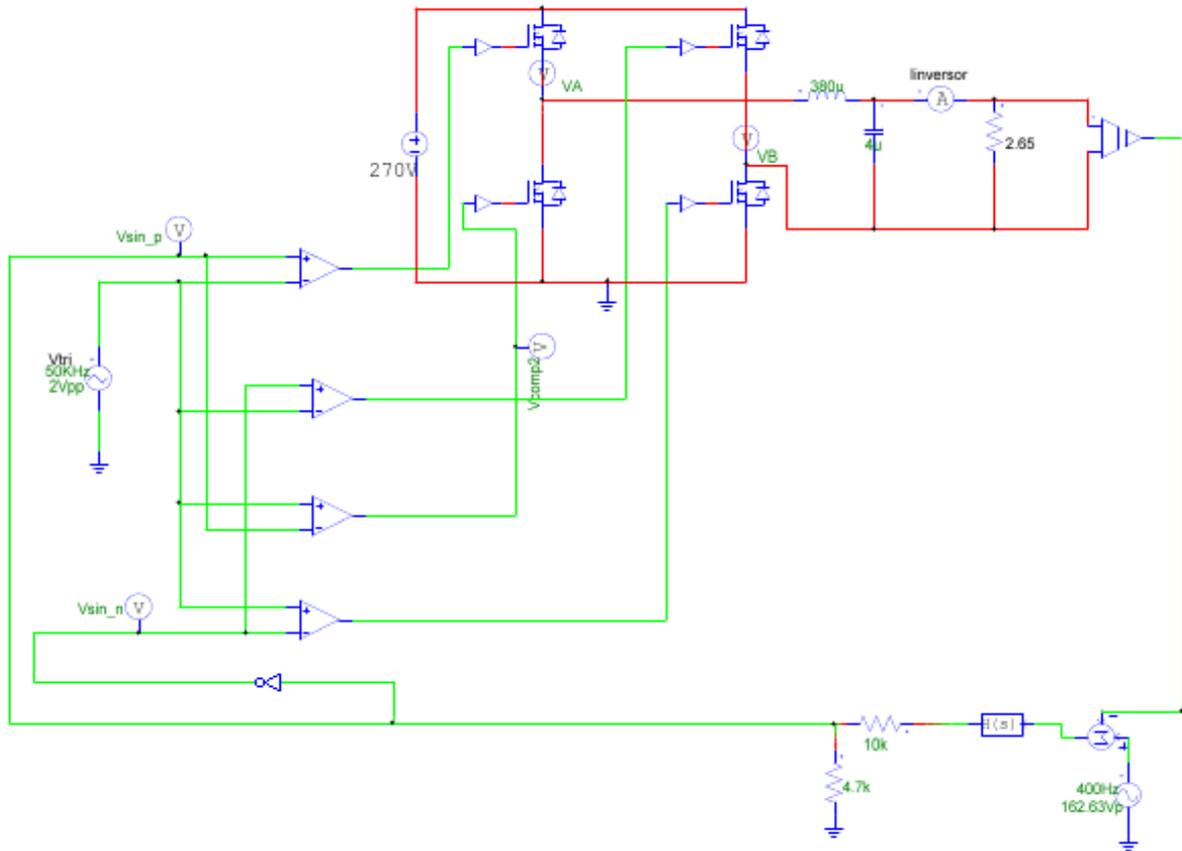


Fig. 44. Circuito final del diseño individual del inversor.

4. Diseño del sistema completo

Una vez descrito y analizado el diseño individual de cada uno de los bloques, es necesario unirlos para formar el sistema completo.

4.1 Diseño del circuito completo con una batería ideal

En este apartado, se va a alimentar el sistema mediante una fuente de tensión continua de 140 V, es decir, sin incluir el modelo que se ha diseñado en el apartado anterior para simular el comportamiento de la pila de combustible, de modo que resulte más sencillo unir el resto de bloques que forman el sistema y comprobar así, si se cumplen las especificaciones definidas en el apartado 2.

La unión de los tres convertidores afecta al rizado de corriente que se genera en la batería adicional. El inversor introduce en la misma un rizado de 800 Hz (frecuencia igual al doble de la frecuencia de salida del convertidor) que es necesario reducir hasta ser considerado admisible para la batería. Para ello, se ha modificado la frecuencia de corte del filtro π variando el valor del condensador (C_{filtro}) y la bobina (L_{filtro}) determinados en el diseño individual del convertidor elevador. El proceso que se ha seguido se muestra en la Fig.45.



Fig. 45. Proceso iterativo para obtener los valores del condensador y la bobina del filtro

Los valores finales de los parámetros que han sido modificados en el proceso de adaptación del sistema completo se resumen en la siguiente tabla:

Lfiltro	Cfiltro
4mH	300 μ F

Tabla 15. Resumen de los valores finales modificados en la adaptación del circuito completo.

El circuito final resultante puede observarse con detalle en el *Circuito completo con fuente de tensión ideal* del anexo 7.1

Para comprobar el cumplimiento de las especificaciones del sistema, se ha realizado una simulación en la que las cargas demandan al sistema una potencia de 10 kW.

La Fig. 46 muestra las formas de onda en régimen permanente obtenidas al simular el sistema completo alimentado por una fuente de tensión ideal.

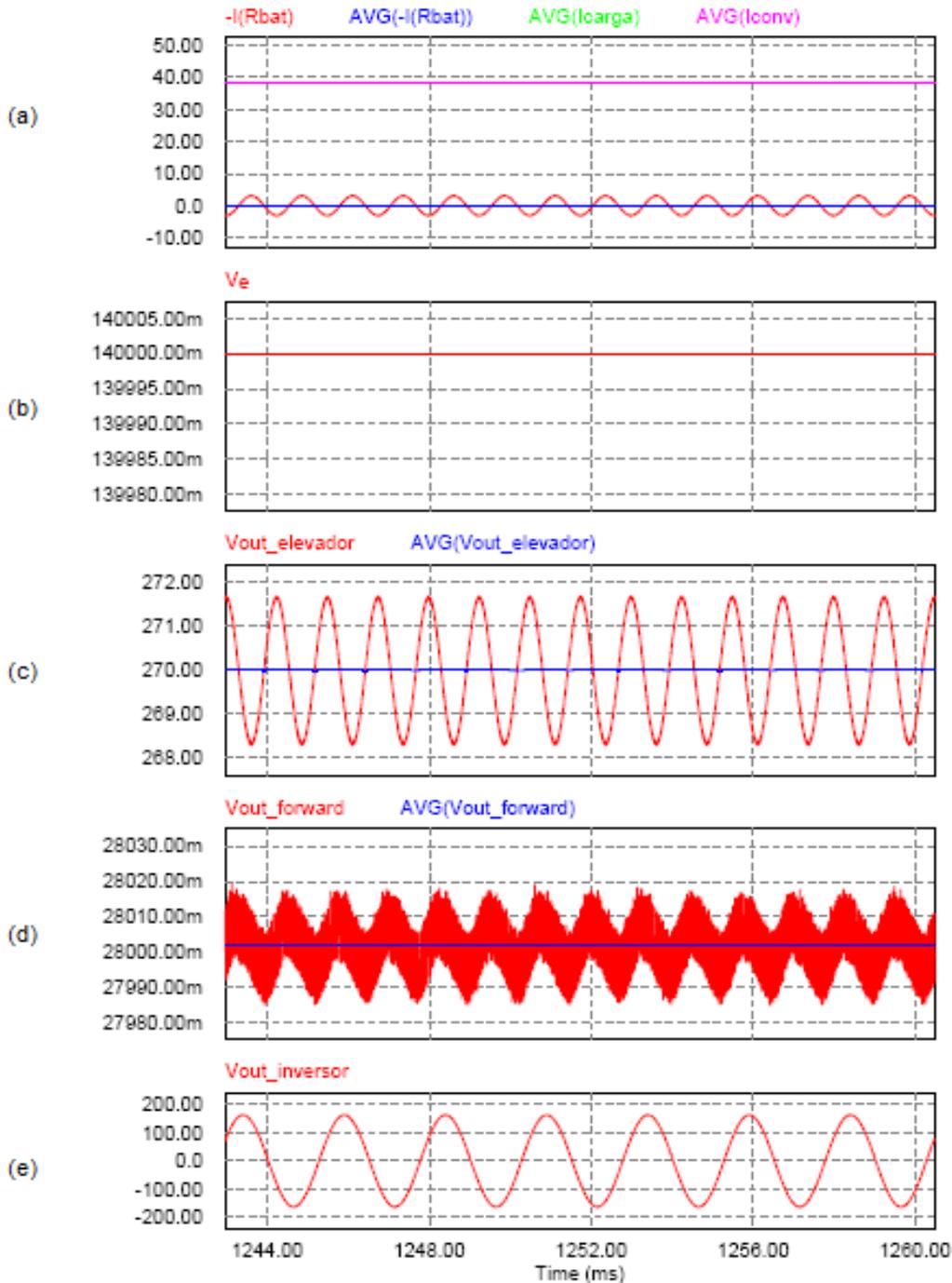


Fig. 46. Formas de onda resultado de la simulación del sistema completo alimentado mediante una fuente de tensión continua ideal.

En la Tabla.16 se especifica la nomenclatura utilizada en la Fig. 46 para su mejor comprensión.

Nomenclatura	Magnitud que representa
$-I(Rbat)$	Rizado de corriente por la batería.
$AVG(-I(Rbat))$	Corriente media saliente por la batería.
$AVG(Icarga)$	Corriente media demandada por las cargas.
$AVG(Iconv)$	Corriente media generada a la salida del elevador.
Ve	Tensión de entrada del elevador.
$Vout_elevador$	Tensión de salida del elevador o del bus principal.
$AVG(Vout_elevador)$	Tensión media de salida del elevador.
$Vout_forward$	Tensión de salida del forward.
$AVG(Vout_forward)$	Tensión media de salida del forward.
$Vout_inversor$	Tensión de salida del inversor.

Tabla. 16. Nomenclatura de la Fig. 46.

La Fig. 46(a) muestra como, ante una demanda de potencia de 10 kW, la corriente media generada por la batería $AVG(-I(Rbat))$ es nula. Además, la corriente media demandada por las cargas $AVG(Icarga)$ y la corriente media generada a la salida del convertidor $AVG(Iconv)$ son iguales. Esto es debido a que, en régimen permanente, el convertidor es capaz de generar la potencia de 10 kW que demandan las cargas, por lo que no es necesario que la batería aporte suministro al sistema. Además, se observa que el sistema es capaz de cumplir las especificaciones técnicas requeridas: la Fig. 46(c) muestra cómo la tensión del bus de distribución ($Vout_elevador$) presenta un rizado que se considera admisible y es capaz de generar 270 V; la Fig. 46(d) muestra cómo, partiendo del bus de distribución, el convertidor forward genera los 28 Vcc que requiere la alimentación de las cargas de continua del sistema; la Fig. 46(e) muestra cómo, partiendo también de la tensión del bus de distribución, el convertidor inversor genera una tensión alterna de 115 Vca y 400Hz de frecuencia.

4.2 Circuito completo alimentado por la pila de combustible.

Antes de alimentar el circuito completo con el modelo generado para simular el comportamiento de una pila de combustible se ha alimentado, por sencillez, al conjunto convertidor-batería-carga resistiva mediante este modelo con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del mismo. El circuito utilizado se muestra en *Elevador con pila de combustible y resistencia de carga* del anexo 7.1

Para modelar la inercia de la pila de combustible ha sido necesario introducir, como se ha comentado en el apartado de diseño del modelo de la pila de combustible, un filtro paso bajo de segundo orden (ver Fig. 13). Mediante el filtro se introduce un retardo en la reacción del dispositivo que simula cómo éste no es capaz de responder inmediatamente a variaciones de demanda, como sucedería en un caso real. Cuanto más baja sea la frecuencia de corte de este filtro, más lenta será la reacción del dispositivo. Por lo tanto, es necesario determinar la frecuencia de corte del filtro paso bajo para modelar la inercia de la pila de combustible. En este caso, no es necesario que el dispositivo actúe con rapidez ante las variaciones que puedan producirse en la demanda de las cargas, por lo que no se ha sido demasiado exigente con la velocidad de respuesta de la pila. De este modo, la frecuencia de corte del filtro se ha fijado en 1 kHz.

Además, se ha incluido a la entrada del elevador un condensador de 1 mF. Las pilas de combustible son dispositivos muy sensibles a los picos de corriente: éstos pueden reducir la vida útil de estos dispositivos, por lo que éste condensador se encargará de proteger el dispositivo limitando el rizado de corriente de la misma. El proceso que se ha seguido a la hora de diseñar este condensador es el mismo que se ha utilizado a la hora de diseñar los condensadores de entrada del forward y del inversor (ver Pag. 59).

La Tabla 17 muestra el rizado de corriente por la pila de combustible que se produce al introducir este condensador a la entrada del elevador.

Condensador de entrada (C_{in_elev})	Rizado de corriente por la pila de combustible (ΔI_{pc})
1 mF	300 mA

Tabla 17. Valores finales del condensador de entrada del elevador (C_{in_elev}) y del rizado de corriente de la pila de combustible (ΔI_{pc}).

Para comprobar el correcto funcionamiento de la unión de la pila de combustible y el elevador, se sometió al conjunto a un escalón de carga (la demanda de potencia inicial, 10 kW, pasa a ser 7.5 kW a los 300 ms) como se muestra en *Limitación del ciclo del elevador en $d_{max} = 0.9$* en el anexo 7.1.

Las formas de onda obtenidas en esta simulación se muestran en la Fig. 47.

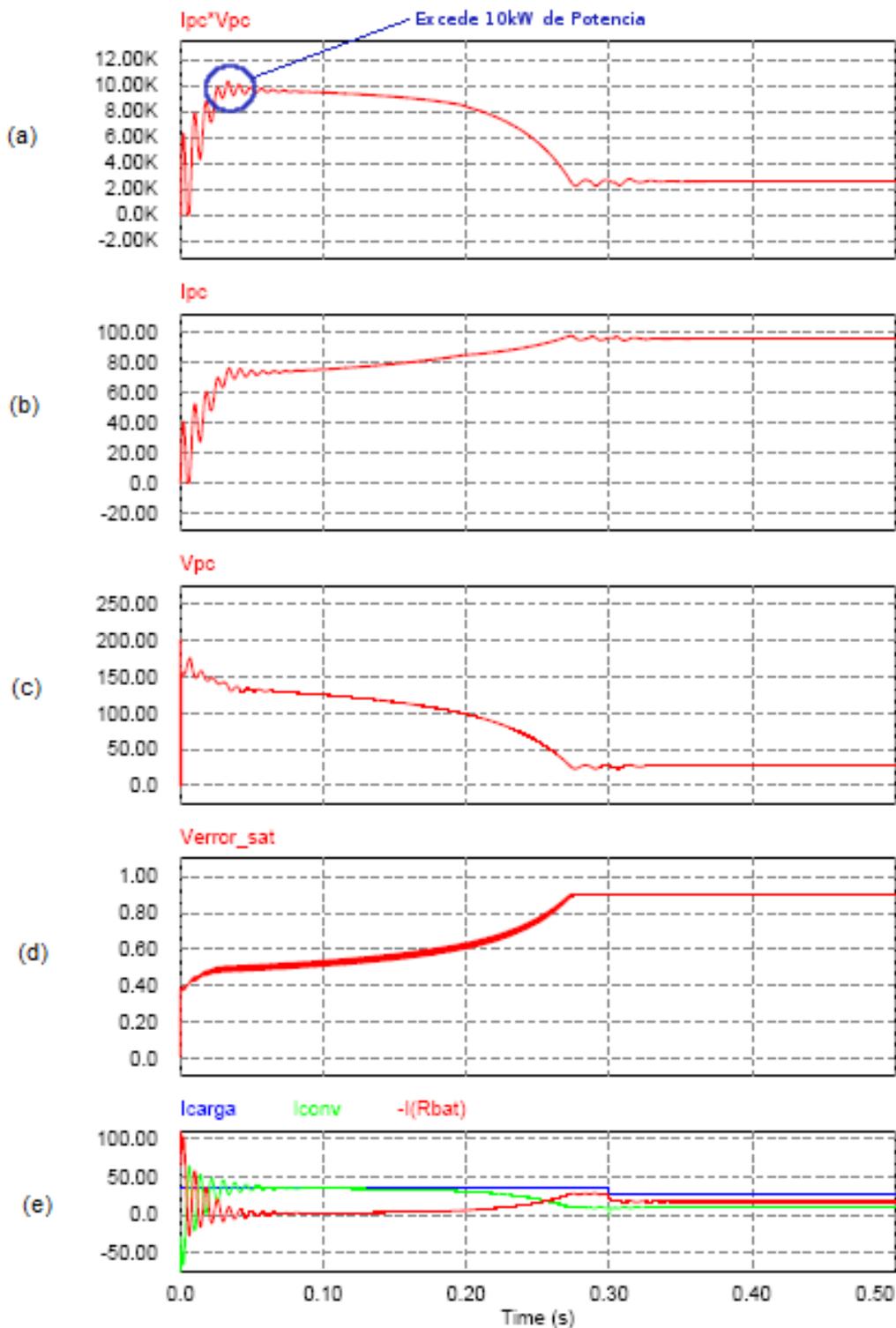


Fig. 47. Formas de onda resultado de la simulación de la pila de combustible y el elevador con un ciclo máximo de trabajo de 0.9.

En la Tabla 18 se especifica la nomenclatura utilizada en la Fig. 47 para su mejor comprensión.

Nomenclatura	Magnitud que representa
$I_{pc} \cdot V_{pc}$	Potencia generada por la pila de combustible.
I_{pc}	Corriente generada por la pila de combustible.
V_{pc}	Tensión generada por la pila de combustible.
V_{error_sat}	Ciclo de trabajo del elevador.
I_{carga}	Corriente demandada por las cargas.
I_{conv}	Corriente generada a la salida del elevador.
$-I(R_{bat})$	Corriente generada por la batería.

Tabla 18. Nomenclatura de la Fig. 47.

En los resultados de la simulación (ver Fig. 47) se puede observar que el ciclo de trabajo del elevador (V_{error_sat}) satura a 0.9 independientemente de la potencia que se le solicite. Esto sucede porque el modelo generado para simular el comportamiento de la pila de combustible tiene fijada su limitación en potencia a 10 kW, es decir, el modelo es incapaz de generar una potencia superior a este límite. Si se observa la Fig. 47, puede comprobarse cómo en el arranque, existe un instante en el que el dispositivo supera los 10 kW de potencia generados. Esto supone que, según la característica estática que sigue el comportamiento del dispositivo (ver Fig. 48), la pila de combustible salga de su zona óptima de operación y entre en una zona de concentración.

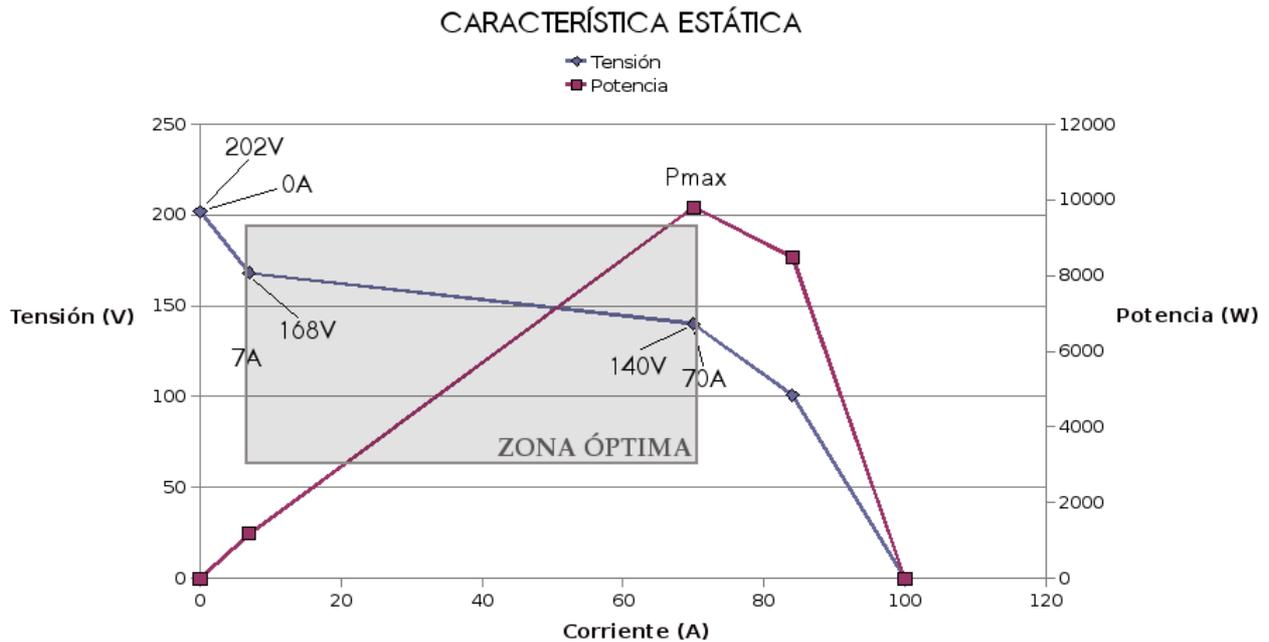


Fig. 48. Característica estática de la pila de combustible. Marcando la zona óptima de funcionamiento de la misma.

Consecuentemente, y como muestra la Fig. 47(b), la corriente generada por la pila de combustible (I_{pc}) aumenta a medida que el valor del ciclo de trabajo se acerca a ese punto de saturación ($d=0.9$). Puede además comprobarse como la tensión generada por la pila de combustible (V_{pc}) mostrada en la Fig. 47(c) sigue la característica estática típica de estos dispositivos y disminuye a medida que aumenta la corriente generada (I_{pc}). De este modo, a medida que el ciclo de trabajo del elevador aumenta, la potencia que entrega la pila de combustible es menor, por lo que la diferencia entre la corriente demandada por las cargas (I_{carga}) y la que es suministrada a la salida del elevador (I_{conv}) es mayor y, por tanto, esta diferencia de suministro tendrá que ser cedida por la batería al sistema ($-I(R_{bat})$).

Al llegar a la saturación del ciclo de trabajo ($d=0.9$) del elevador, la pila de combustible se encuentra en el punto de trabajo mostrado en la Fig. 49.

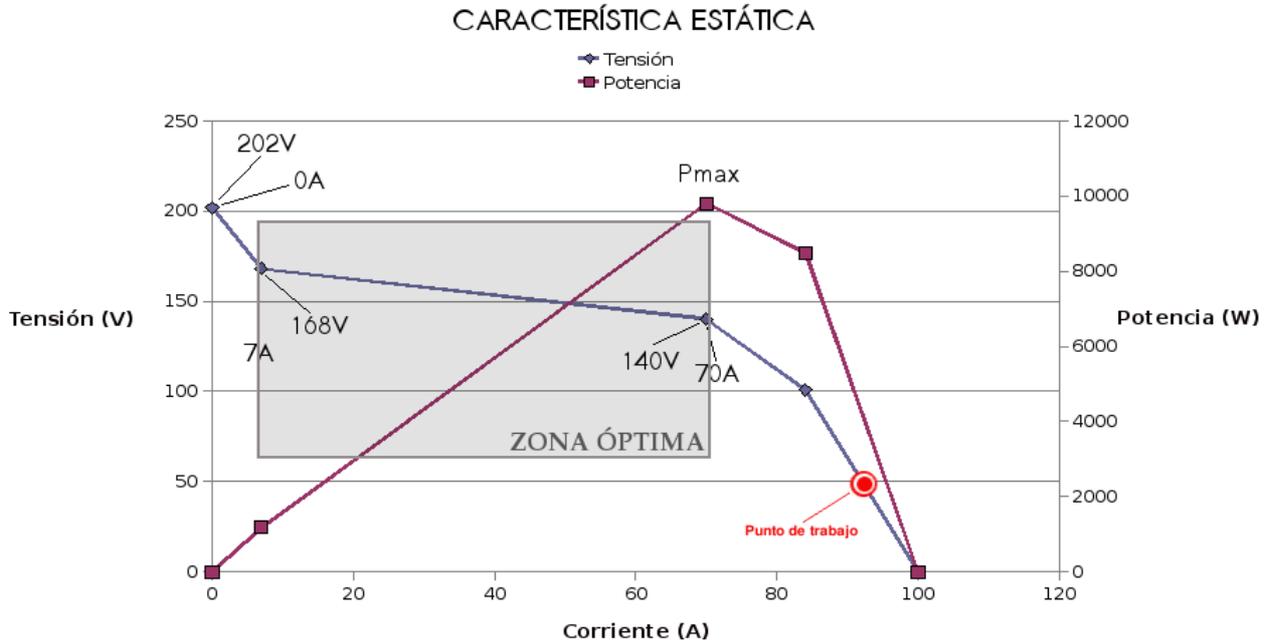


Fig. 49. Punto de trabajo que alcanza la pila de combustible al no limitar el ciclo de trabajo máximo del elevador.

Para limitar el funcionamiento de la pila de combustible a la zona óhmica, es decir, que éste no superase el punto de trabajo que genera 10 kW de potencia, es necesario a su vez, limitar el valor máximo (d_{max}) del ciclo de trabajo del elevador. La Fig. 49 muestra gráficamente dónde debería situarse el valor máximo del ciclo de trabajo del elevador (d_{max}) para garantizar el control del funcionamiento del dispositivo.

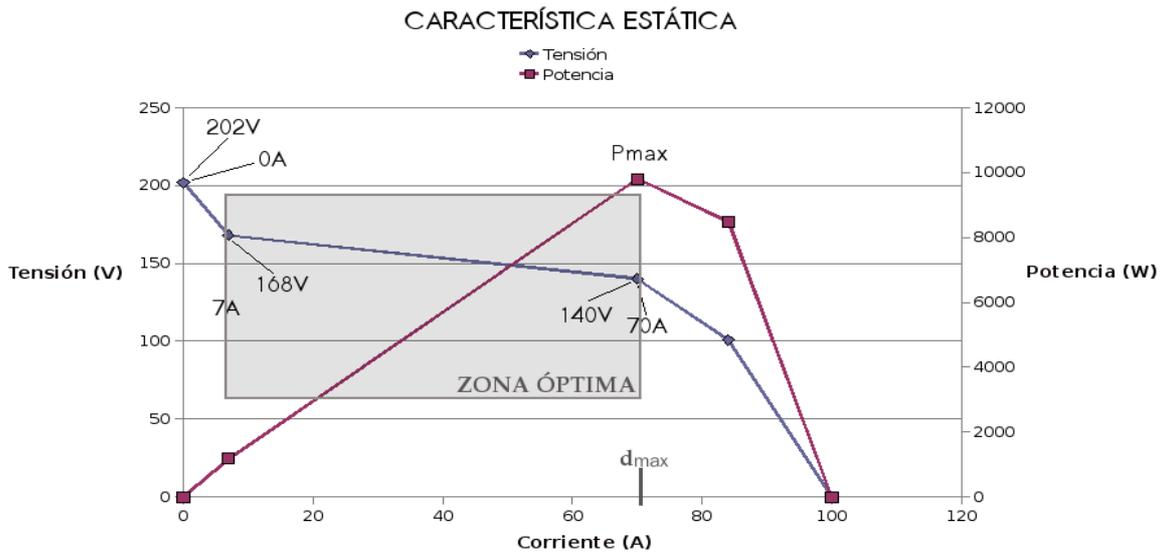


Fig. 50. Característica estática de la pila de combustible. Marcando la zona óptima de funcionamiento de la misma, así como el ciclo de trabajo máximo del elevador para trabajar en dicha zona.

La Fig. 51 muestra la tensión de entrada en función del ciclo de trabajo del elevador para una tensión de salida constante, es decir, cómo evoluciona la tensión de la pila, y también la potencia que ésta entrega, al variar el ciclo de trabajo manteniendo 270 V en el bus de distribución.

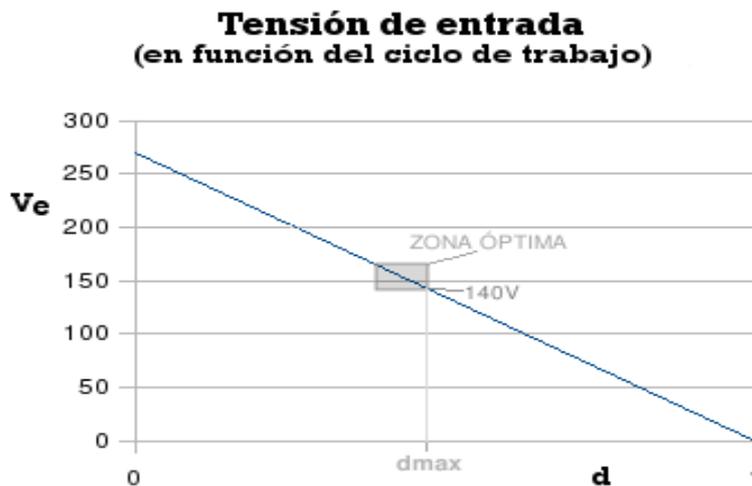


Fig. 51. Tensión de entrada en función del ciclo de trabajo del elevador. Marcando la zona óptima de funcionamiento de la pila de combustible, así como el ciclo de trabajo máximo para trabajar en dicha zona

Para calcular el ciclo de trabajo máximo del elevador:

$$U_s = \frac{U_e}{1 - d} \qquad U_e = (1 - d)U_s = U_s - dU_s$$
$$d = \frac{U_s - U_e}{U_s} \qquad d = \frac{270 - 140}{270} = 0.48$$

Tras aproximar el ciclo de trabajo del elevador a un valor de 0.5 (ver *Limitación del ciclo del elevador en $d_{max} = 0.5$* en el anexo 7.1), se ha sometido al sistema de nuevo a la misma prueba que se realizó anteriormente.

Los nuevos resultados de forma de onda son los siguientes (ver Fig. 52).

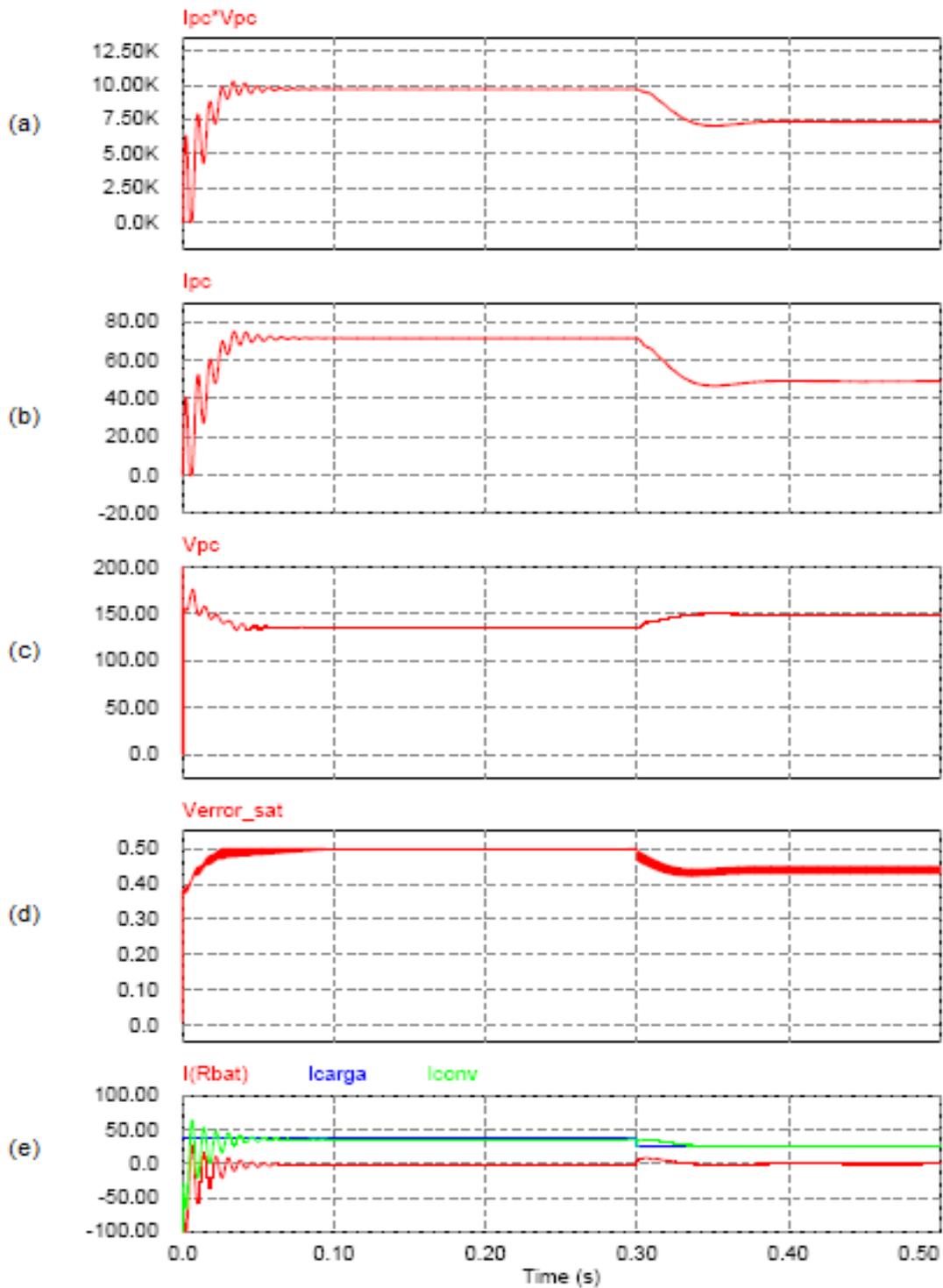


Fig. 52. Formas de onda resultado del modelo de simulación original de la pila de combustible tras modificar el valor del ciclo de trabajo del elevador a un valor de $d_{max}=0.5$

En la Tabla 19 se especifica la nomenclatura utilizada en la Fig. 52 para su mejor comprensión.

Nomenclatura	Magnitud que representa
$I_{pc} * V_{pc}$	Potencia generada por la pila de combustible.
I_{pc}	Corriente generada por la pila de combustible.
V_{pc}	Tensión generada por la pila de combustible.
V_{error_sat}	Ciclo de trabajo del elevador.
I_{carga}	Corriente demandada por las cargas.
I_{conv}	Corriente generada a la salida del elevador.
$-I(R_{bat})$	Corriente generada por la batería.

Tabla 19. Nomenclatura de la Fig. 52.

En la Fig. 52 se muestra como, para una demanda de 10 kW, el ciclo máximo de trabajo del elevador queda saturado en su nuevo valor límite ($d_{max}=0.5$). De este modo, la pila de combustible se mantiene siempre dentro de la zona de trabajo óhmica, por lo que el ciclo de trabajo será capaz de autorregularse para que el conjunto pila de combustible y elevador sea capaz de proporcionar al sistema cualquier demanda de potencia por debajo de la máxima que es capaz de proporcionar la pila de combustible, es decir, 10 kW. Por ejemplo, en la Fig. 52(d) puede observarse como, al someter al sistema a un escalón de carga (a los 300 ms se pasa de 10 kW a 7.5 kW) el ciclo de trabajo del elevador (V_{error_sat}) se autoregula para ajustarse a la nueva demanda de potencia. Además, si se observa la Fig. 52(e), puede apreciarse como la corriente generada a la salida del elevador (I_{conv}) coincide con la demandada por las cargas (I_{carga}) en régimen permanente.

Una vez se ha limitado el ciclo de trabajo máximo del elevador (d_{max}), cabría plantearse la posibilidad de limitar el ciclo de trabajo mínimo del elevador (d_{min}) y comprobar si esta limitación supondría alguna ventaja en el funcionamiento del sistema.

La Fig. 53 muestra la tensión de entrada en función del ciclo de trabajo del elevador para una tensión de salida constante (manteniendo la tensión del bus de distribución en 270 V).

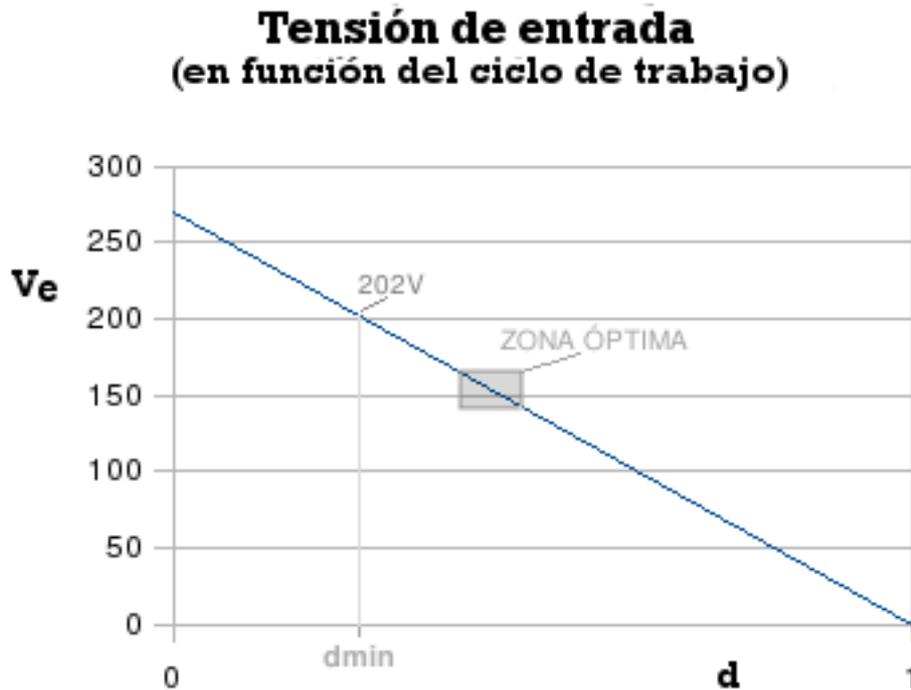


Fig. 53. Tensión de entrada en función del ciclo de trabajo del elevador. Marcando la zona óptima de funcionamiento de la pila de combustible, así como el ciclo de trabajo mínimo del elevador (coincidente con el valor en tensión de la pila de combustible a 0A, es decir, en el arranque de la misma).

El valor del ciclo de trabajo mínimo del elevador que corresponde a una tensión generada por la pila de 202V a 0A, se calcula de la siguiente forma:

$$U_s = \frac{U_e}{1 - d} \qquad U_e = (1 - d)U_s = U_s - dU_s$$

$$d = \frac{U_s - U_e}{U_s} \qquad \boxed{d = \frac{270 - 202}{270} = 0.25}$$

Se realizará una misma simulación (un escalón de potencia que pase de 7.5 kW a 10 kW a los 300 ms) con el ciclo de trabajo mínimo sin limitar y otra con este valor limitado ($d_{min}=0.25$). En ambas pruebas, el valor del ciclo de trabajo máximo (d_{max}) estará limitado a un valor de 0.5, tal y como se obtuvo anteriormente. Comparando los resultados de ambas pruebas podrá determinarse si esta limitación es ventajosa o perjudicial para el funcionamiento del conjunto pila + elevador.

Ciclo de trabajo mínimo sin limitar

Los resultados de la simulación de un escalón de potencia de 7.5 kW a 10 kW, sin limitar el ciclo de trabajo mínimo del elevador son los siguientes (ver Fig. 54). El circuito utilizado para realizar esta prueba se muestra en *Limitación del ciclo del elevador en $d_{min} = 0.01$* del anexo 7.1.

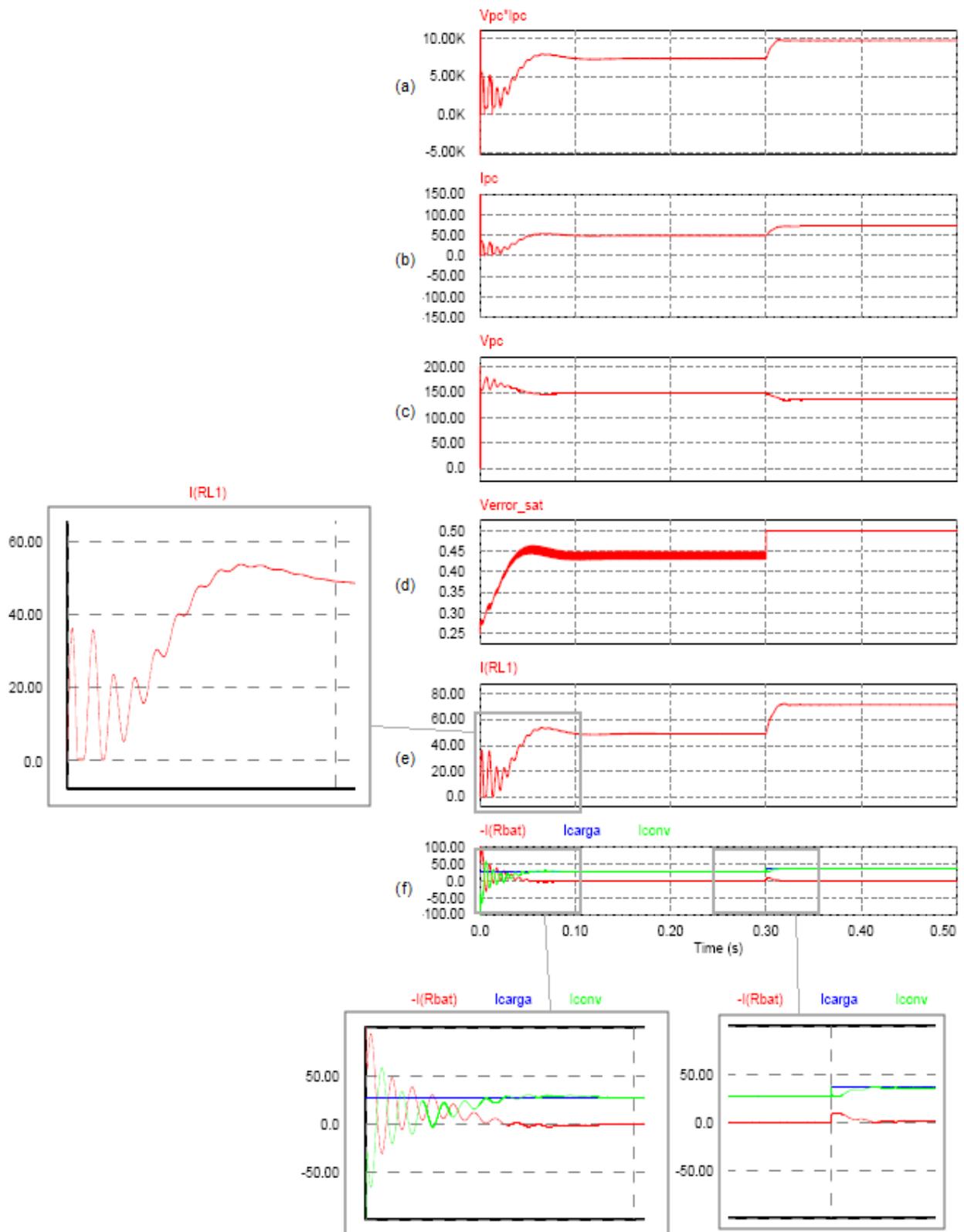


Fig. 54. Formas de onda resultado del modelo de simulación original de la pila de combustible tras modificar el valor del ciclo de trabajo del elevador a un valor de $d_{max}=0.5$ y un d_{min} sin limitar.

En la Tabla 20 se especifica la nomenclatura utilizada en la Fig. 54 para su mejor comprensión.

Nomenclatura	Magnitud que representa
$I_{pc} \cdot V_{pc}$	Potencia generada por la pila de combustible.
I_{pc}	Corriente generada por la pila de combustible.
V_{pc}	Tensión generada por la pila de combustible.
V_{error_sat}	Ciclo de trabajo del elevador.
$I(RL1)$	Corriente por la bobina del elevador.
I_{carga}	Corriente demandada por las cargas.
I_{conv}	Corriente generada a la salida del elevador.
$-I(Rbat)$	Corriente generada por la batería.

Tabla 20. Nomenclatura de la Fig. 54.

Si se observa el Zoom realizado a la corriente por la bobina del elevador ($I(RL1)$) puede comprobarse cómo esta abandona el modo de funcionamiento oscilatorio (que pasa de discontinuo a continuo) para trabajar en modo de funcionamiento continuo permanentemente. El tiempo que la corriente por la bobina tarda en realizar este cambio es de 13 ms. Esto permite que la tensión y la corriente de la pila dejen de oscilar tan bruscamente en el momento en el que se produce el cambio definitivo de modo de conducción de la corriente por la bobina del elevador ($I(RL1)$).

Ciclo de trabajo mínimo limitado a $d_{min} = 0.25$

Los resultados de la simulación de un escalón de potencia de 7.5 kW a 10 kW, con una limitación del ciclo de trabajo mínimo del elevador a un valor de $d_{min} = 0.25$, son los siguientes (ver Fig.55). El circuito utilizado para realizar esta prueba se muestra en *Limitación del ciclo del elevador en $d_{min} = 0.25$* del anexo 7.1.

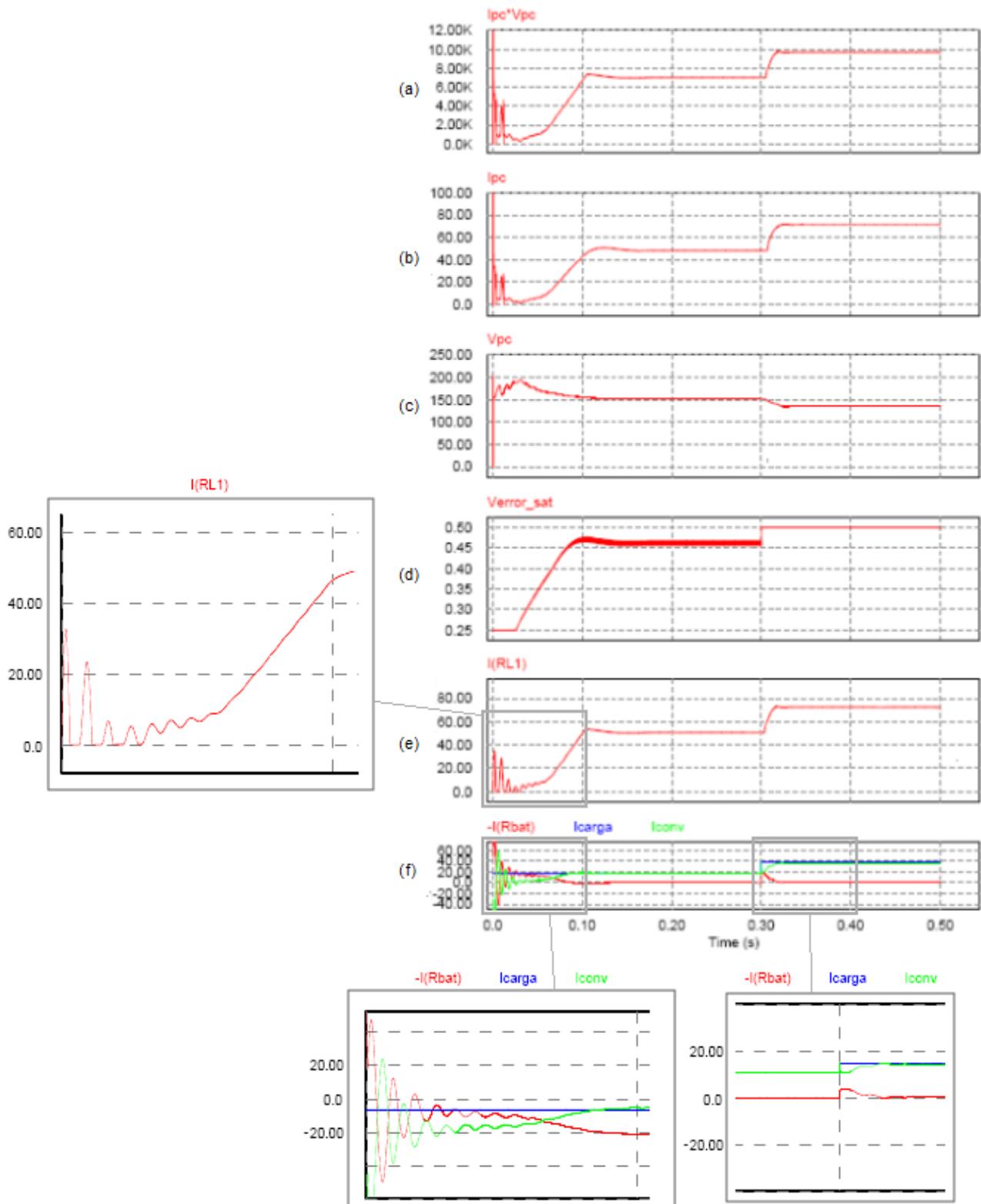


Fig. 55. Formas de onda resultado del modelo de simulación original de la pila de combustible tras modificar el valor del ciclo de trabajo del elevador a un valor de $d_{max}=0.5$ y $d_{min}=0.25$.

En la Tabla 21 se especifica la nomenclatura utilizada en la Fig. 55 para su mejor comprensión.

Nomenclatura	Magnitud que representa
$I_{pc} \cdot V_{pc}$	Potencia generada por la pila de combustible.
I_{pc}	Corriente generada por la pila de combustible.
V_{pc}	Tensión generada por la pila de combustible.
V_{error_sat}	Ciclo de trabajo del elevador.
$I(RL1)$	Corriente por la bobina del elevador.
I_{carga}	Corriente demandada por las cargas.
I_{conv}	Corriente generada a la salida del elevador.
$-I(R_{bat})$	Corriente generada por la batería.

Tabla 21. Nomenclatura de la Fig. 55.

Si se limita el ciclo de trabajo mínimo del elevador en un valor de $d_{min} = 0.25$, el tiempo que tarda la corriente de la bobina del elevador ($I(RL1)$) en abandonar definitivamente el modo de conducción discontinuo aumenta considerablemente estableciéndose en 30 ms (ver Fig. 55). Esto repercute, como es lógico, en el tiempo en el que el sistema tarda en alcanzar el régimen permanente. Puede observarse cómo el tiempo que tardan en estabilizarse la corriente (I_{pc}) y la tensión (V_{pc}) de la pila se incrementa. El retardo que supone acotar inferiormente el ciclo de trabajo del elevador en el arranque de la pila ha determinado que se trabaje eliminando esta limitación.

Llegados a este punto, ya se está en disposición de unir todos los elementos que se han descrito a lo largo de este proyecto. El resultado de esta unión es el circuito completo que puede verse en *Circuito completo con pila de combustible* en el anexo 7.1.

5. Análisis del sistema completo.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento estático del circuito completo, se van a realizar una serie de pruebas dinámicas que determinen el comportamiento del sistema ante diferentes demandas de potencia. Para ello, se fijará la potencia demandada por el inversor en 5 kW y será *en el forward* donde se diseñarán diferentes escalones dinámicos en la demanda de potencia. Con ello se pretende comprobar si el sistema realizado responde como debe a variaciones en la demanda de las cargas, y así poder valorar las limitaciones de una pila de combustible como generador principal de energía de un sistema. A continuación se muestran los perfiles de simulación que van a realizarse y qué se pretende con cada uno de ellos.

Pruebas 1 y 2. Perfil de simulación escalón de potencia descendente/escalón de potencia ascendente.

Las dos primeras pruebas a las que se va a someter al sistema, parten de un nivel de potencia demandada por las cargas de continua para pasar, en el instante t1, a un nivel de potencia demandada inferior (escalón descendente de potencia). En el instante t2, esta demanda pasará de nuevo a un nivel superior de potencia, generando un escalón ascendente en dicha demanda.

Se han generado dos perfiles de simulación diferentes que puedan proporcionar información útil respecto a la respuesta del sistema ante este tipo de variaciones en la demanda de potencia de las cargas.

La Fig. 56 muestra el primer perfil de simulación que va a realizarse. En él se muestra la potencia demandada por las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

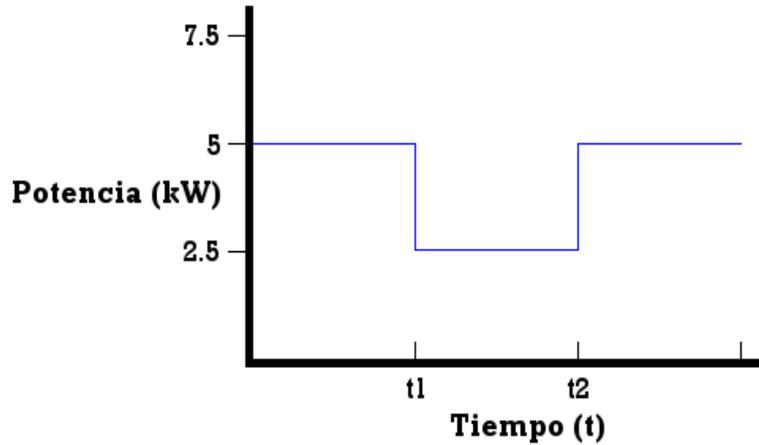


Fig. 56. Perfil de simulación prueba 1. Demanda de potencia de las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

Como puede observarse en la Fig. 56, la demanda de potencia de las cargas de continua en la primera prueba a la que se va a someter al sistema, parte de 5 kW para pasar, en el instante t_1 , a la mitad de demanda (2.5 kW). En el instante t_2 , dichas cargas volverán a demandar 5 kW al sistema de alimentación. La potencia total que demande el sistema en cada tramo, será la que muestra el perfil de simulación en cada tramo, más los 5 kW continuos que demandan las cargas de alterna del sistema. Con esta prueba se pretende analizar cómo responde el sistema ante escalones de potencia simétricos.

La Fig. 57 muestra el segundo perfil de simulación que va a realizarse. En él se muestra la potencia demandada por las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

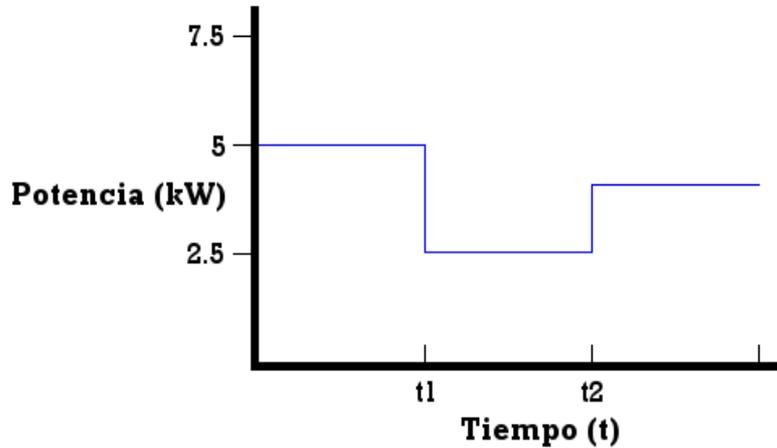


Fig. 57. Perfil de simulación prueba 2. Demanda de potencia de las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

Como puede observarse en la Fig. 57, la demanda de potencia de las cargas de continua en la segunda prueba a la que se va a someter al sistema, parte de 5 kW para pasar, en el instante t1, a 2.5 kW, de modo que el escalón de demanda descendente es idéntico al del caso anterior. Sin embargo, en el instante t2, dichas cargas demandarán al sistema de alimentación una potencia intermedia entre los 2.5 kW y los 5 kW, en este caso, 3.5 kW. La potencia total que demande el sistema en cada tramo, será la que muestra el perfil de simulación en cada tramo, más los 5 kW continuos que demandan las cargas de alterna del sistema. Con este escalón de potencia se pretende analizar cómo responde el sistema ante un escalón de potencia no simétrico, y si existen diferencias en el comportamiento del mismo respecto al caso anterior.

Prueba 3. Perfil de simulación escalón de potencia ascendente/escalón de potencia descendente.

La Fig. 58 muestra el primer perfil de simulación que modela la tercera prueba a la que se va a someter al sistema. En él se muestra la potencia demandada por las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

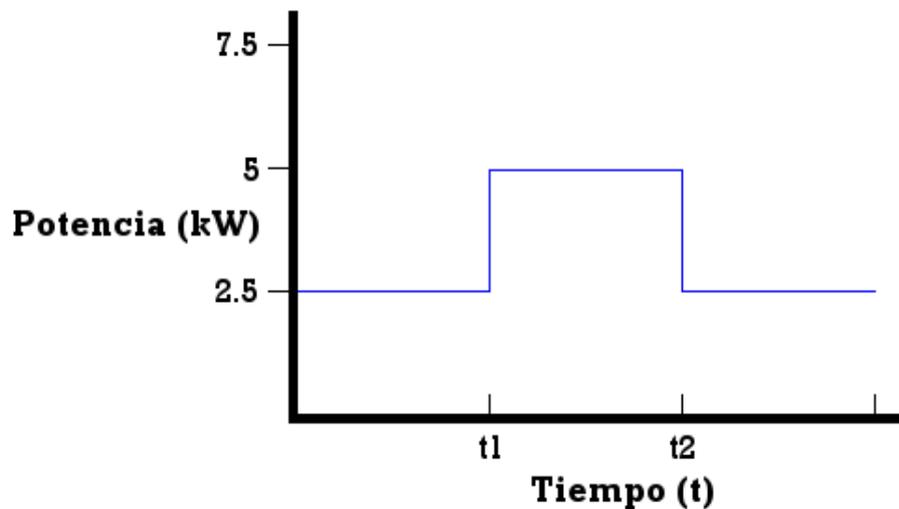


Fig. 57. Perfil de simulación prueba 3. Demanda de potencia de las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

En este caso, la demanda de potencia del forward parte de 2.5 kW para pasar, en el instante t1, a un nivel superior, en este caso 5 kW, generando un escalón ascendente en la potencia demandada por las cargas de continua del sistema. En el instante t2, esta demanda pasará de nuevo a demandar 2.5 kW de potencia, generando un escalón descendente en dicha demanda. La potencia total que demande el sistema en cada tramo, será la que muestra el perfil de simulación en cada tramo, más los 5 kW continuos que demandan las cargas de alterna del sistema. Con esta prueba se pretende comprobar cómo responde el sistema ante una variación simétrica de potencia de este tipo.

Prueba 4. Arranque de la pila de combustible.

Esta prueba consiste mantener desconectada la pila de combustible durante un tiempo (t) representativo dentro de la simulación y conectar la misma como fuente principal de energía del sistema pasado ese tiempo. Durante toda la simulación, las cargas demandarán el máximo de potencia que puede suministrar la pila de combustible, es decir, 10 kW. Con esta simulación se pretende analizar la respuesta del sistema ante una falta de suministro de potencia por parte de la pila de combustible como fuente primaria de alimentación, y la repercusión que tiene en el comportamiento de cada bloque el que la pila comience a suministrar energía al sistema tras ese periodo de tiempo.

Prueba 5. Perfil de simulación escalón de potencia a una demanda superior a la máxima que puede suministrar la pila de combustible.

Esta prueba consiste en que la demanda total del sistema pase de ser inferior al máximo que puede suministrar la pila de combustible, es decir, 10 kW, a superar este límite. Para ello, se ha generado un perfil de simulación que muestra la demanda de las cargas de continua del sistema en cada instante (ver Fig. 48).

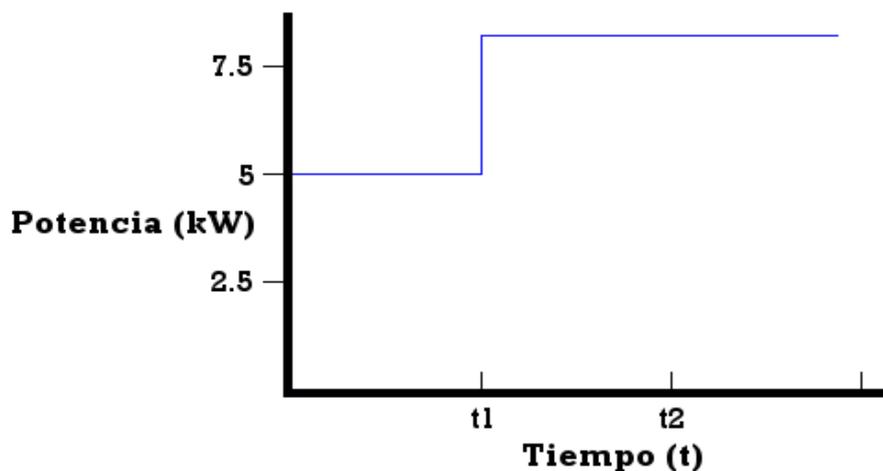


Fig. 58. Perfil de simulación prueba 5. Demanda de potencia de las cargas de continua del sistema en función del tiempo.

Como muestra la Fig. 58, la demanda de las cargas de continua pasa de 5 kW a 8 kW en el instante t1. De este modo, la demanda total de las cargas al sistema de alimentación,

teniendo en cuenta que el inversor demanda constantemente 5 kW al sistema, pasará de 10 kW a 13 kW. Con esta prueba se pretende analizar cómo responde el sistema ante una demanda que excede la potencia máxima que puede suministrar la pila de combustible.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las pruebas definidas anteriormente, así como el análisis de la respuesta del sistema ante cada una de las diferentes pruebas.

Pruebas 1 y 2. Resultados de simulación escalón de potencia descendente/escalón de potencia ascendente.

Escalón de potencia simétrico (5 kW - 2.5 kW - 5 kW)

Para realizar esta prueba es necesario definir los tiempos (t_1 y t_2 , mostrados en la Fig. 56) en los que se produce un cambio en la demanda de potencia de las cargas de continua. La condición que han de cumplir estos tiempos es que permitan al sistema alcanzar el régimen permanente en el tramo anterior. El primer escalón de potencia pasa de 5 kW a 2.5 kW a los 450 ms y de nuevo a 5 kW en $t_2 = 1$ s. Si se une esta potencia a la demandada por el inversor (constante e igual a 5 kW durante toda la prueba), la potencia total que demandan las cargas al sistema de alimentación cambia de 10 kW (potencia máxima que puede generar la pila de combustible) a 7.5 kW a los 450 ms y de nuevo a 10 kW en un tiempo de 1 s. El circuito que se ha utilizado para realizar esta prueba se muestra con detalle en *Prueba 1 - Escalón de potencia 5 kW - 2.5 kW - 5 kW* en el anexo 7.1.

Las formas de onda obtenidas en esta simulación se muestran en la Fig. 59.

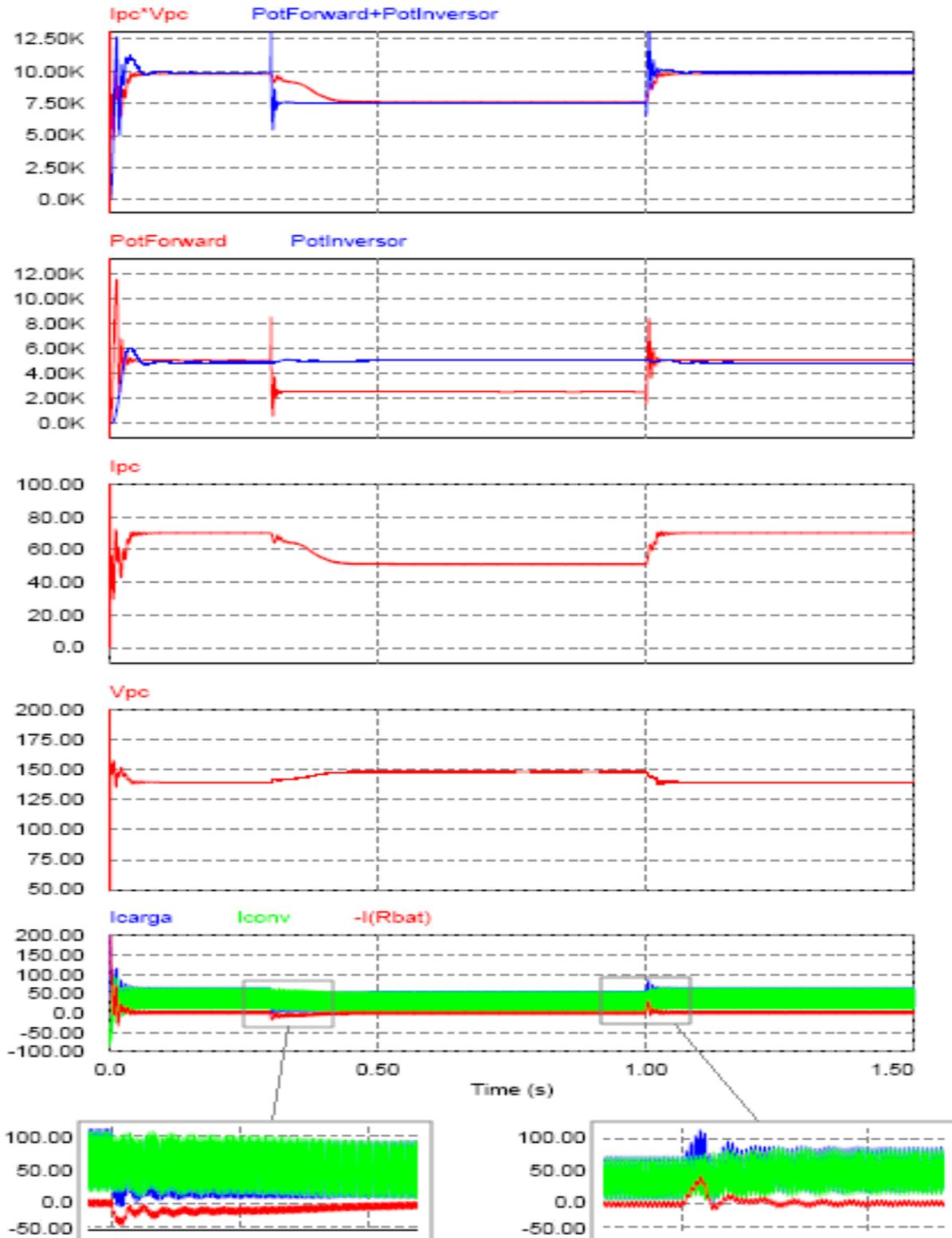


Fig. 59. Formas de onda de la simulación del escalón de demanda de potencia (10 kW-7.5 kW-10 kW).Perfil 1.

Como puede observarse en la Fig. 59, el primer escalón de potencia genera una variación total en la demanda de la misma que pasa de 10 kW a 7.5 kW a los 450 ms. La potencia que hasta ese instante está generando la pila de combustible cubre totalmente la demanda de 10 kW de potencia, a partir de una corriente (I_{pc}) de 70 A y una tensión (V_{pc}) de 139 V (ver Fig. 59) por lo que, en la primera transición, al pasar de esa demanda a una inferior de forma instantánea, la pila de combustible genera una potencia mayor en todo momento de la que demanda el escalón de potencia. Es por este motivo por lo que durante la primera transición, la pila de combustible cede energía suficiente como para abastecer a la carga. Por el contrario, cuando el escalón de potencia es positivo (se pasa de una demanda de potencia inferior (7.5 kW) a una superior (10 kW)), la potencia demandada por las cargas ($I_{forward}+I_{inversor}$) supera la que es capaz de generar la pila de combustible ($I_{pc}\cdot V_{pc}$). Esto ocurre porque, aunque ambas demandas se encuentran dentro de la potencia que es capaz de generar la pila de combustible, la potencia que genera el dispositivo crece de forma gradual por debajo de la variación instantánea de potencia que demandan las cargas, por lo que es la batería quien ha de suministrar la diferencia entre la demanda de potencia y el suministro de la pila de combustible (ver Fig. 59) hasta que el sistema vuelve a alcanzar el régimen permanente. El tiempo que tarda la pila de combustible en ser capaz de generar los 10 kW que demandan las cargas a partir del segundo de simulación es de 57 ms.

Además, puede observarse que el dispositivo actúa más rápidamente ante variaciones crecientes en la demanda de potencia de las cargas que ante variaciones decrecientes de la misma. Esto se debe al efecto del condensador de entrada del elevador (C_{in_elev}).

Este efecto se observa en la Fig. 60.

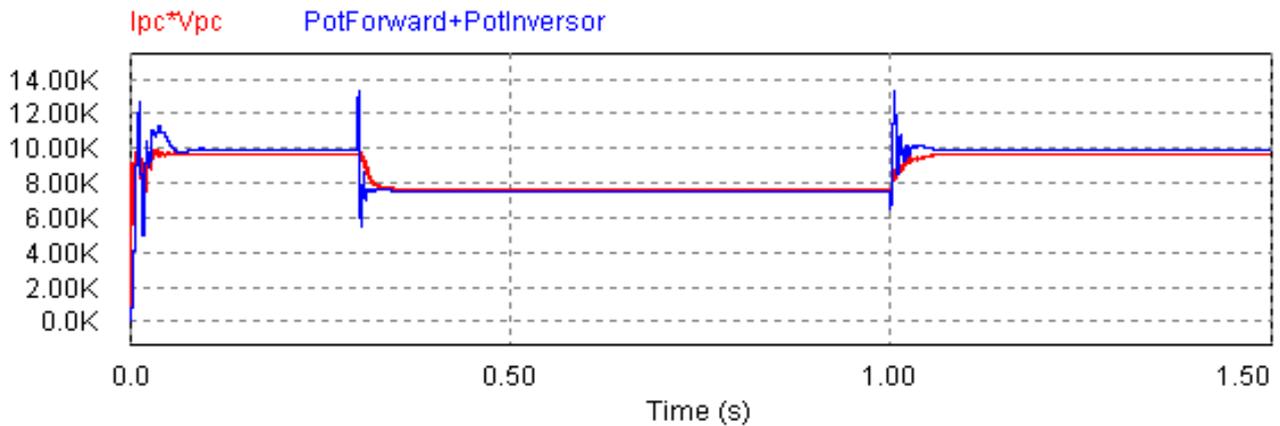


Fig. 60. Formas de onda de la potencia generada por la pila de combustible ($I_{pc} \cdot V_{pc}$) y de la potencia generada por las cargas al eliminar el condensador de entrada del elevador (C_{in_elev}).

En la Fig. 60, puede observarse cómo el eliminar el condensador de entrada del elevador aumenta la velocidad de respuesta de la pila de combustible ante demandas de potencia decrecientes. Esto ocurre porque, en este caso, el elevador no tiene que cargar el condensador al tiempo que abastece la demanda de potencia de las cargas, de modo que la generada por la pila de combustible ($I_{pc} \cdot V_{pc}$) se adapta más rápidamente a la potencia inferior que demandan las cargas.

La Fig. 61 muestra qué ocurre durante esta simulación con la tensión de salida del elevador (V_{bus}) y las respectivas salidas de tensión del forward y el inversor ($V_{out_forward}$ y $V_{out_inversor}$).

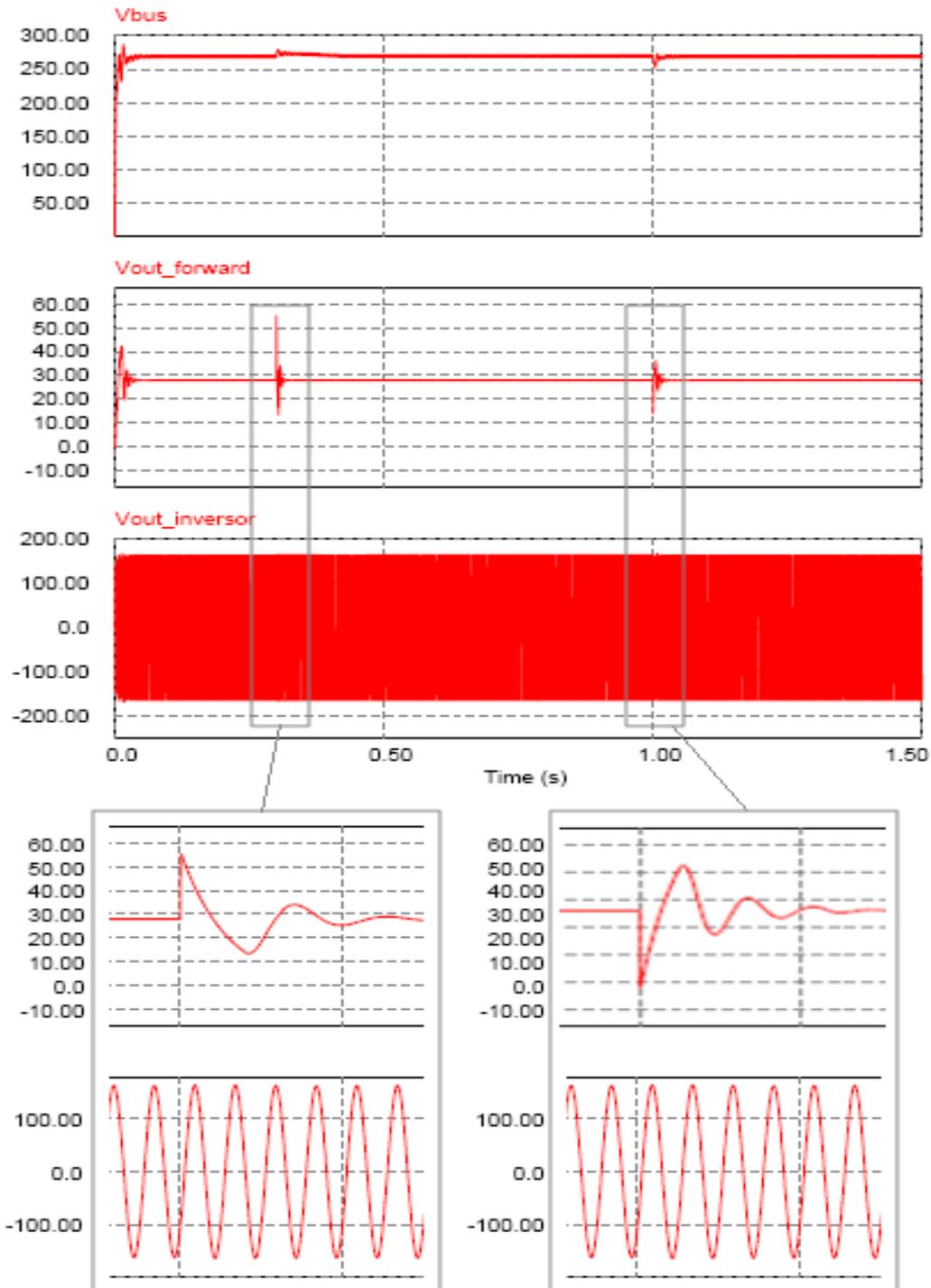


Fig. 61. Formas de onda de las tensiones de salida de los convertidores generadas mediante la simulación del escalón de demanda de potencia (10 kW-7.5 kW-10 kW)

Como puede observarse en la Fig. 61 los tres convertidores son capaces de autorregular su salida, mediante el lazo de control, ante variaciones en la demanda de potencia del sistema. Los picos de tensión que se generan en la tensión de salida del elevador (V_{bus}) en cada uno de los escalones de potencia, alcanzan valores máximos de 279 V (en el primer escalón de potencia producido a los 450 ms) y de 268 V (en el segundo escalón de potencia producido al segundo de simulación), por lo que cumplen la norma MIL-STD-704F. El elevador tarda 40 ms en regular su comportamiento y volver a tener 270 V de salida en ambos escalones de potencia. Del mismo modo, y como muestra la Fig. 61, el forward se ajusta a 28 V. Este convertidor es bastante más rápido que el elevador, ya que tarda en ajustarse 10 ms al primer escalón de potencia, y 8ms al segundo. La salida del inversor se ajusta a las especificaciones del sistema presentando, para cada tramo, valores de 115.11 Vac a 400 Hz por lo que, como se muestra en la Fig. 61, al inversor no le afecta la variación de la tensión de entrada.

Escalón de potencia asimétrico (5 kW - 2.5 kW - 3.5 kW)

Al igual que en el caso anterior, para realizar esta prueba es necesario definir los tiempos (t_1 y t_2 , mostrados en la Fig. 57) en los que se produce un cambio en la demanda de potencia de las cargas de continua asegurando que éstos permitan al sistema alcanzar el régimen permanente en el tramo anterior. El primer escalón de potencia se genera mediante la variación de la demanda de potencia del convertidor forward, que pasa de 5 kW a 2.5 kW a los 450 ms y a una potencia intermedia de 3.5 kW en $t_2 = 1$ s. Si se une esta potencia a la demandada por el inversor (constante e igual a 5 kW durante toda la prueba), la potencia total que demandan las cargas al sistema de alimentación cambia de 10 kW (potencia máxima que puede generar la pila de combustible) a 7.5 kW a los 450 ms y de este valor a 8.5 kW en un tiempo de 1 s. El objetivo de esta prueba es comprobar si existe algún tipo de variación en la respuesta del sistema con respecto al caso anterior. El circuito que se ha utilizado para realizar esta prueba se muestra con detalle en *Prueba 2 - Escalón de potencia 5 kW - 2.5 kW - 3.5 kW* en el anexo 7.1.

La Fig. 62 muestra las formas de onda resultado de esta simulación.

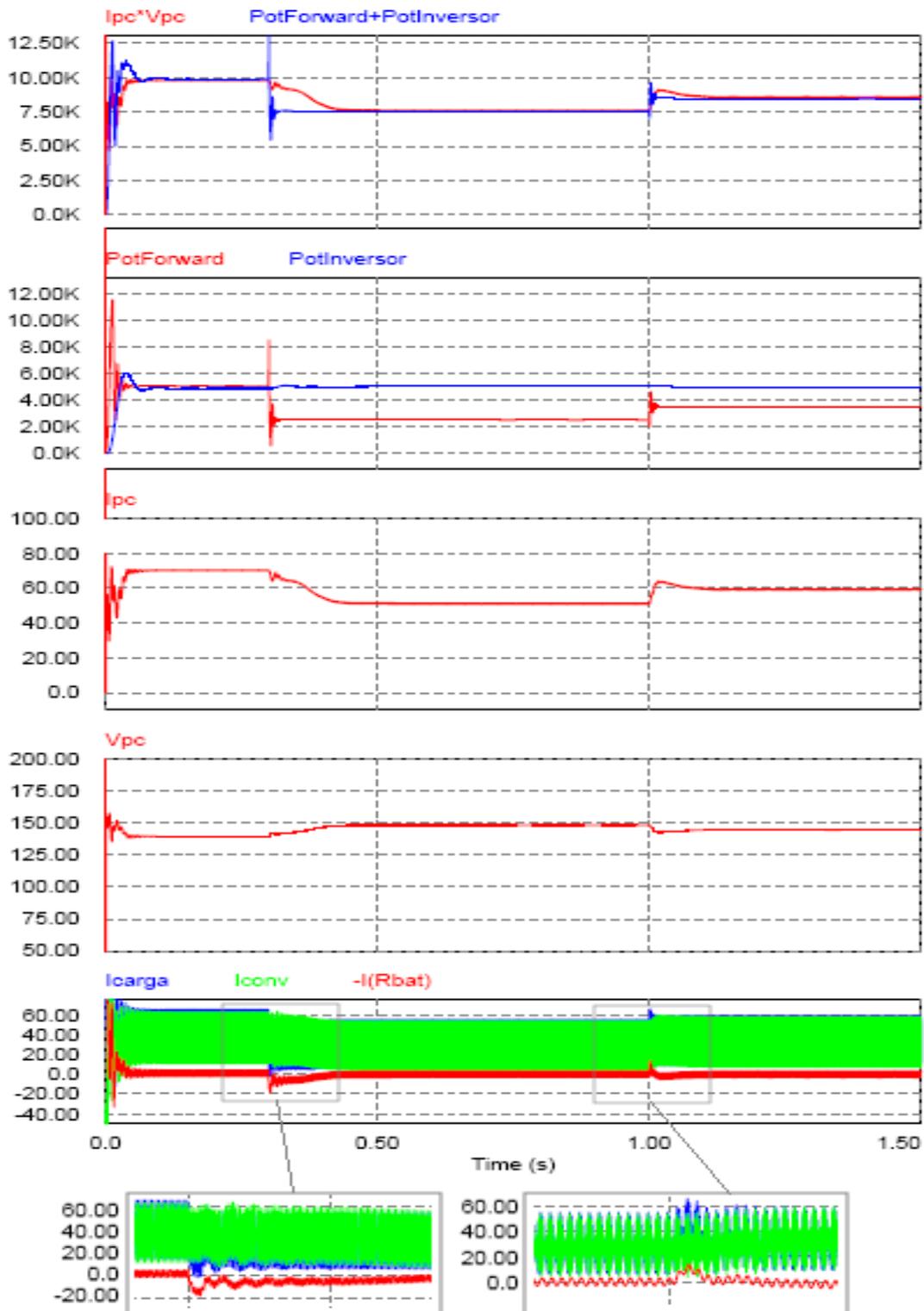


Fig. 62. Formas de onda de la simulación del escalón de demanda de potencia (7.5 kW-10 kW-8.5 kW). Perfil 2.

El primer escalón de potencia es idéntico al primer escalón generado en la primera prueba (en la que la demanda de potencia pasa de 10 kW a 5 kW para establecerse definitivamente en 10 kW de nuevo). Es por esto, que la respuesta del sistema ante este escalón es la misma que la descrita anteriormente en el primer apartado.

Al segundo de simulación se produce el segundo escalón de potencia, que genera una demanda total del sistema que pasa de 7.5 kW a 8.5 kW (ver Fig. 62). En este caso, y al igual que sucedía en el segundo escalón de la prueba uno, la demanda de las cargas varía instantáneamente a un valor superior al demandado instantes antes. La dinámica de la pila es demasiado lenta como para responder a esa demanda, por lo que es la batería quien ha de suministrar la diferencia entre la potencia que demandan las cargas y la que es capaz de suministrar la pila. La batería suministra energía al sistema durante los 14 ms posteriores al segundo escalón de potencia. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurría en el caso anterior (donde la potencia que demandan las cargas del sistema en el segundo escalón pasa a ser la máxima que puede suministrar la pila, es decir, 10 kW), la pila de combustible es capaz de generar tras estos 14 ms, una potencia superior a la que le está siendo demandada por las cargas, por lo que es capaz de cargar la batería. Además, si comparamos este resultado con el obtenido durante la primera prueba, donde la batería cedía energía al sistema durante los 57 ms posteriores al segundo escalón de potencia, se puede comprobar que, como es lógico, el conjunto pila-elevador responde más rápidamente cuanto menor es la variación en la demanda de potencia de las cargas.

La Fig. 63 muestra qué ocurre durante esta simulación con la tensión de salida del elevador (V_{bus}) y las respectivas salidas de tensión del forward y el inversor ($V_{out_forward}$ y $V_{out_inversor}$).

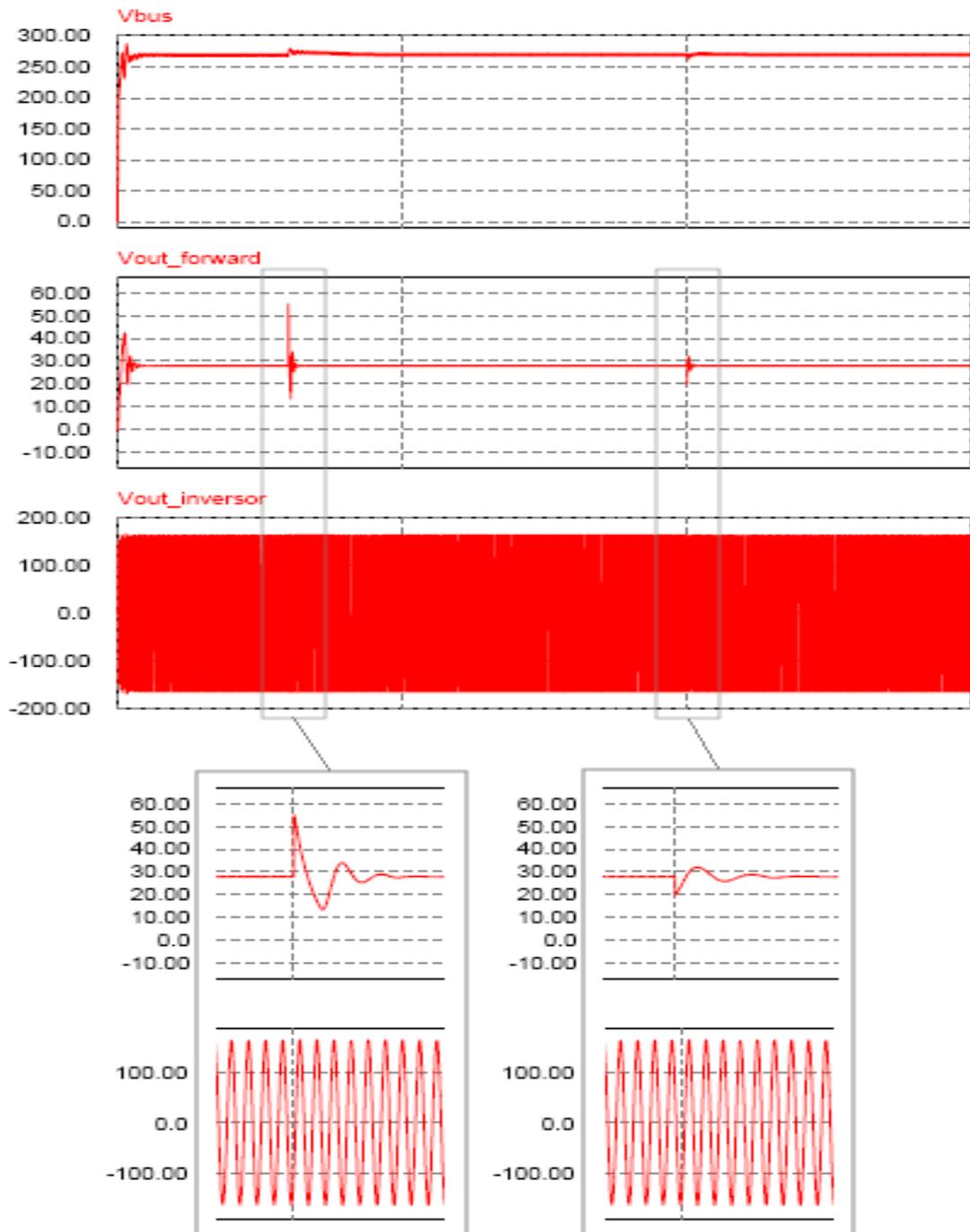


Fig. 63. Formas de onda de las tensiones de salida de los convertidores generadas mediante la simulación del escalón de demanda de potencia (7.5 kW-10 kW-3.5 kW)

La salida en tensión de los convertidores se regula, también en este caso, tras cada uno de los escalones de potencia que se han generado, estableciéndose en los valores que requieren las especificaciones en cada caso. Las tensiones máximas de pico que se generan en el bus principal son de 279 V (en el caso del escalón 10 kW-7.5 kW) y de 262 V (en el caso del escalón 7.5 kW-8.5 kW). El elevador es capaz de regular su salida a los 40 ms tras el primer escalón de potencia y a los 30 ms tras el segundo escalón. Del mismo modo, y como muestra la Fig. 63, el forward se ajusta a 28 V. Este convertidor es bastante más rápido que el elevador, ya que tarda en ajustarse 10 ms en el primer escalón de potencia, y 8ms en el segundo. El inversor presenta una tensión de 115 Vca a 400 Hz.

Si se comparan los datos obtenidos en esta prueba con los que se obtuvieron en la primera prueba (en la que la demanda de potencia pasaba de 10 kW a 7.5 kW y posteriormente a 10 kW de nuevo), se puede concluir que el sistema responde de forma similar ante cualquier escalón positivo (que pasa de una potencia a otra de mayor valor). De igual modo, el sistema responde de manera semejante ante escalones negativos. En ambos casos, además, cabe destacar la pila de combustible es capaz de responder más rápidamente ante escalones de potencia creciente que ante escalones de potencia decrecientes.

Prueba 3. Resultados de simulación escalón de potencia ascendente/escalón de potencia descendente.

En este caso, el primer escalón de potencia se genera mediante la variación de la demanda de potencia del convertidor forward, que pasa de 2.5 kW a 5 kW a los 450 ms y de nuevo a 2.5 kW en $t_2 = 1$ s. Si se une esta potencia a la demandada por el inversor (constante e igual a 5 kW durante toda la prueba), la potencia total que demandan las cargas al sistema de alimentación cambia de 7.5 kW a 10 kW (potencia máxima que puede generar la pila de combustible) a los 450 ms y de nuevo a 7.5 kW en un tiempo de 1 s. El circuito que se ha utilizado para realizar esta prueba se muestra con detalle en *Prueba 3 - Escalón de potencia 2.5 kW - 5 kW - 2.5 kW* en el anexo 7.1.

En la Fig. 64 se muestran las formas de onda obtenidas en esta simulación.

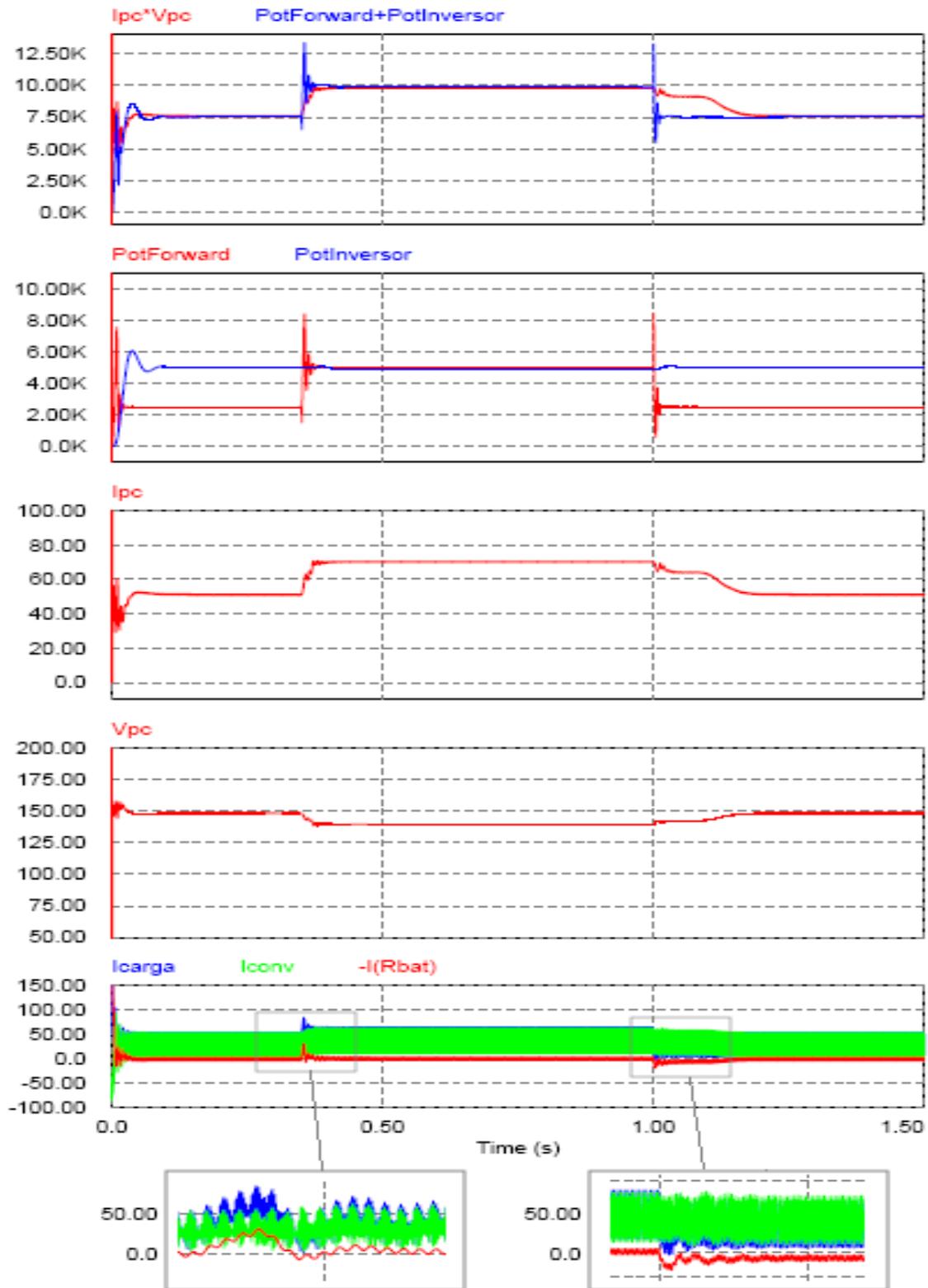


Fig. 64. Formas de onda de la simulación del escalón de demanda de potencia (7.5 kW-10 kW-7.5 kW). Perfil 3.

Inicialmente la demanda de potencia de las cargas es de 7.5 kW. Tras el arranque, la pila de combustible cede toda la energía al sistema generando una corriente (I_{pc}) de 50 A y una tensión (V_{pc}) de 150 V (ver Fig. 64). En este caso, el primer escalón de potencia pasa de demandar 7.5 kW a 10 kW a los 450 ms. La pila de combustible no es capaz de responder instantáneamente a esta variación en la demanda de potencia, por lo que es la batería la que tendrá que suministrar la diferencia entre la potencia demandada por las cargas y la potencia suministrada por la pila. El tiempo que tarda la pila de combustible en poder generar la potencia total que demandan las cargas a partir de los 450 ms es de 56ms. A partir de este instante y hasta que se produzca un nuevo escalón de carga, la pila de combustible genera toda la energía del sistema (a partir de una corriente (I_{pc}) de 70 A y una tensión (V_{pc}) de 139 V).

Al segundo de simulación la demanda de potencia de las cargas pasa de ser 10 kW a 7.5 kW. Como puede observarse en la Fig. 64, la potencia generada por la pila de combustible disminuye paulatinamente durante un periodo de tiempo de 150 ms hasta adaptarse a la demanda de potencia del sistema. Durante esta adaptación, el nivel de potencia generado por la pila de combustible es siempre mayor que la demanda de potencia del sistema, por lo que la diferencia de energía será utilizada para cargar la batería.

La Fig. 65 muestra qué ocurre durante esta simulación con la tensión de salida del elevador (V_{bus}) y las respectivas salidas de tensión del forward y el inversor ($V_{out_forward}$ y $V_{out_inversor}$).

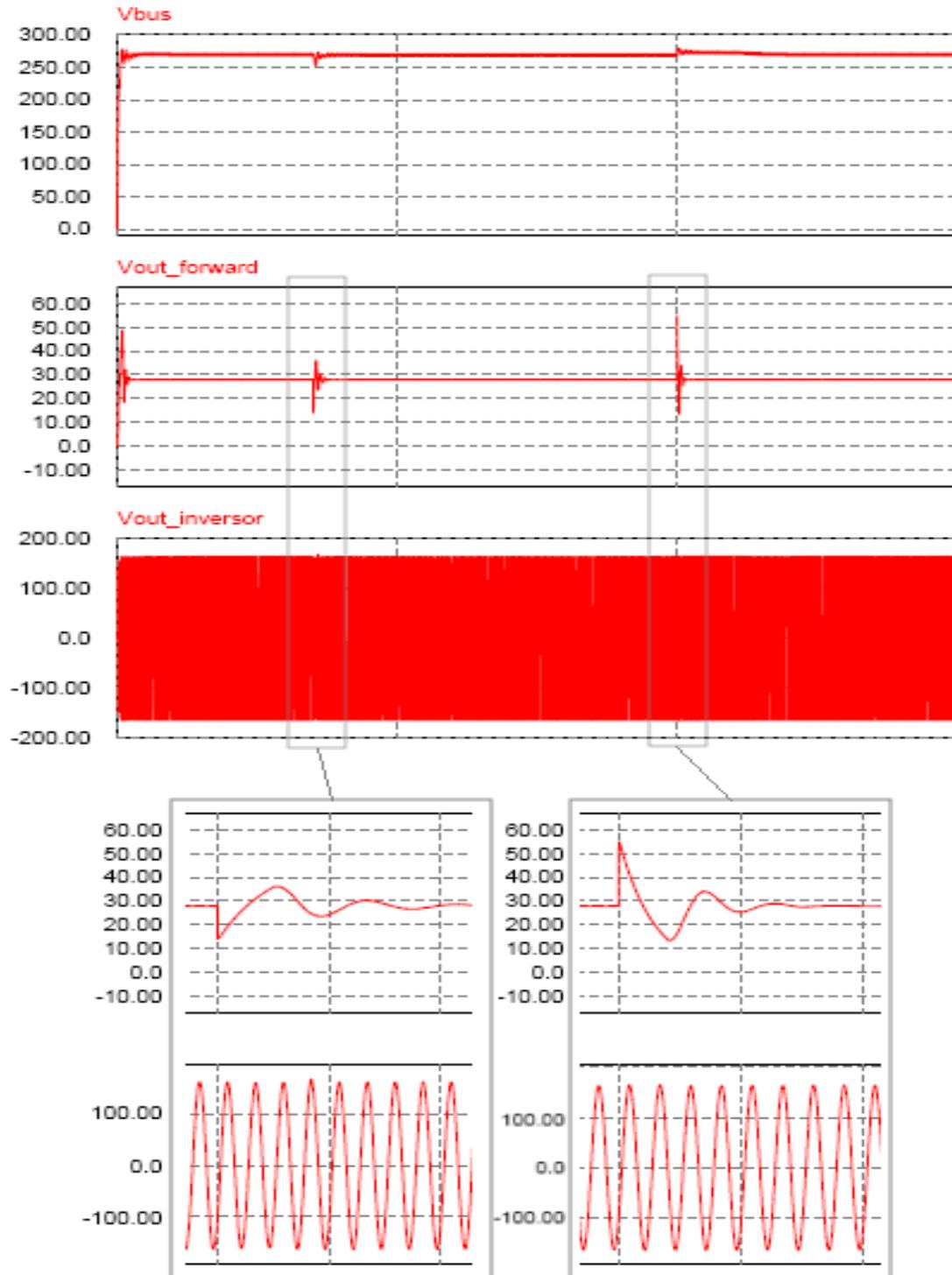


Fig. 65. Formas de onda de las tensiones de salida de los convertidores generadas mediante la simulación del escalón de demanda de potencia (7.5 kW-10 kW-7.5 kW)

Como puede observarse en la Fig. 65, en este caso los tres convertidores también son capaces de regular su salida, mediante el lazo de control, ante variaciones en la demanda de potencia del sistema. Los picos de tensión que se generan en la tensión de salida del elevador (V_{bus}), para cada uno de los escalones de potencia, alcanzan valores máximos de 267 V (en el primer escalón de potencia producido a los 450 ms) y de 279 V (en el segundo escalón de potencia producido al segundo de simulación), por lo que cumplen la norma MIL-STD-704F. El elevador tarda 40 ms en regular su comportamiento y volver a tener 270 V de salida en ambos escalones de potencia. Del mismo modo, y como muestra la Fig. 65, el forward se ajusta a 28 V. Este convertidor es bastante más rápido que el elevador, ya que tarda en ajustarse 10 ms al primer escalón de potencia, y 8 ms al segundo. La salida del inversor se ajusta a las especificaciones del sistema presentando, para cada tramo, un valor de 115.11 Vca a 400 Hz.

Los escalones que en la primera prueba eran ascendentes, son descendentes en esta simulación y viceversa, pero demandan la misma potencia. El sistema responde igual independientemente del orden en el que se hagan los escalones en la demanda de potencia.

Prueba 4. Resultados arranque de la pila de combustible.

Como se ha comentado anteriormente, esta prueba consiste en analizar cómo responde el sistema si la pila de combustible se conecta, como fuente principal de generación de energía del sistema, un tiempo (t) posterior al arranque del resto del sistema. El tiempo de conexión de la pila de combustible ha de ser significativo dentro del tiempo de simulación y, además, ha de permitir que el sistema alcance el régimen permanente antes de la conexión de la pila de combustible. Se ha decidido por tanto, conectar la pila a los 100 ms de simulación. Para ello, se ha conectado un interruptor (int_1), normalmente abierto, en la unión de la pila de combustible al circuito (ver *Prueba 4 - Circuito del arranque retardado de la pila de combustible* en el anexo 7.1). Durante toda la prueba, el conjunto de cargas demandará la potencia máxima que es capaz de generar la pila, es decir, 10 kW. El circuito que se ha utilizado para realizar esta prueba se muestra con detalle en *Prueba 4 - Arranque retardado de la pila de combustible* en el anexo 7.1.

En la Fig. 66 se muestran las formas de onda obtenidas en esta simulación.

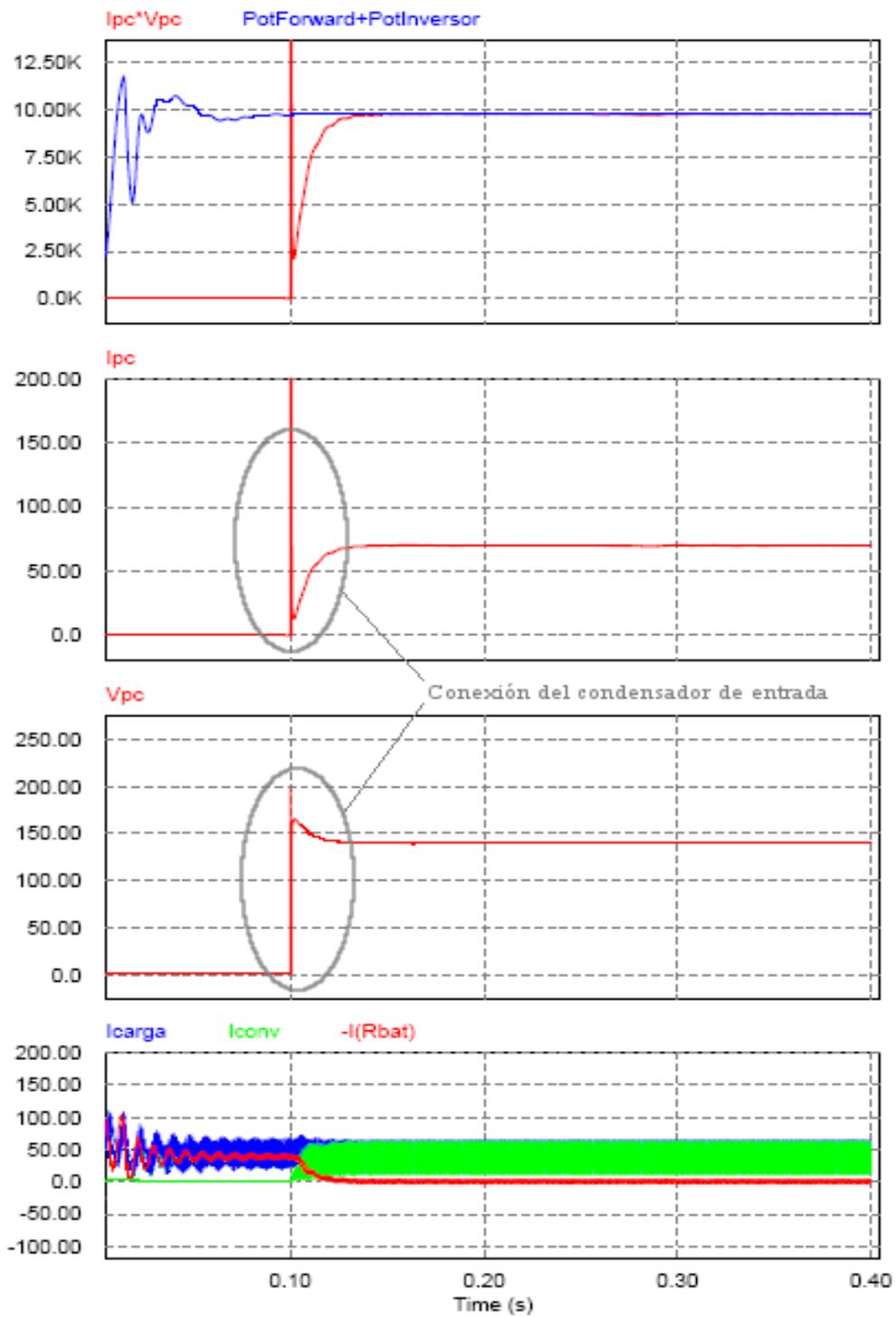


Fig. 66. Formas de onda de la simulación del arranque de la pila de combustible.

Perfil 4.

Como puede observarse en la Fig. 66 durante los primeros 100 ms de simulación, la pila de combustible está desconectada, por lo que no cede energía al sistema. Durante este tramo, tanto la corriente generada por la pila de combustible (I_{pc}) como la tensión del dispositivo (V_{pc}) son nulas. Debido a ello, los 10 kW que demandan las cargas del sistema ($PotForward+PotInversor$) son cedidos en su totalidad por la batería. A los 100 ms, se conecta la pila de combustible. En la Fig. 66 se muestra el efecto que produce la conexión del condensador de entrada del elevador, que actúa protegiendo a la pila de combustible. Desde que se produce esta conexión hasta que la pila de combustible es capaz de ceder toda la energía al sistema transcurren 32 ms. Durante este período de tiempo, la batería cede al sistema la diferencia entre lo que demandan las cargas, y la potencia que es capaz de suministrar la pila de combustible. Transcurridos los 32 ms, la pila de combustible genera la potencia total que demandan las cargas (su corriente (I_{pc}) toma un valor de 70 A y su tensión (V_{pc}) de 140 V, por lo que la potencia suministrada por la pila es de 10 kW). La Fig. 66 muestra que, a partir de ese instante, la corriente cedida por la batería ($-I_{Rbat}$) es nula en valor medio mientras que la corriente demandada por las cargas (I_{carga}) es igual a la cedida por el conjunto pila-elevador (I_{conv}), que toman un valor medio de 37 A.

La Fig. 67 muestra qué ocurre durante esta simulación con la tensión de salida del elevador (V_{bus}) y las respectivas salidas de tensión del forward y el inversor ($V_{out_forward}$ y $V_{out_inversor}$).

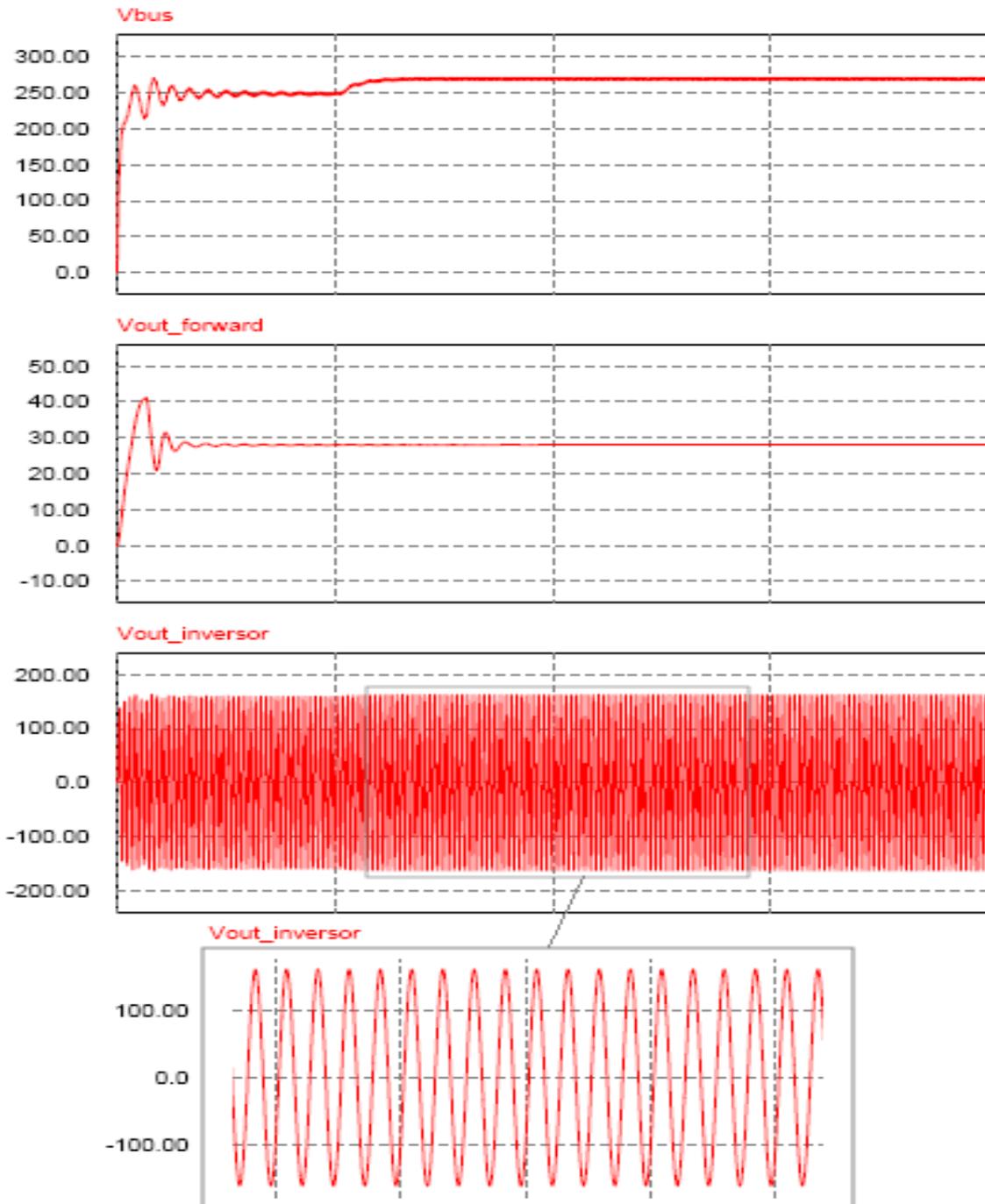


Fig. 67. Formas de onda de las tensiones de salida de los convertidores generadas mediante la simulación del arranque de la pila de combustible.

La Fig. 67 muestra cómo, durante el tiempo en el que la pila de combustible está desconectada, la tensión del bus principal (V_{bus}) se sitúa en 250 V. Esto es debido a la caída de tensión que se produce en la resistencia interna de la batería al generar la corriente que demandan las cargas del sistema. La Fig. 68 representa esquemáticamente el modelo de la batería.

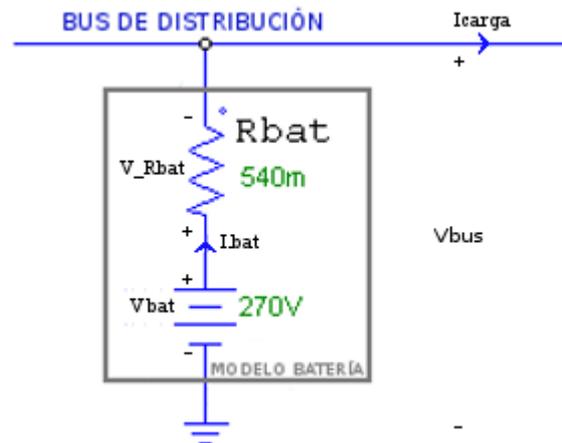


Fig. 68. Dibujo esquemático de la batería.

A partir de la Fig. 68 se deduce que:

$$I_{carga} = \frac{P_{demandada}}{V_{bat}} = \frac{10kW}{270V} = 37A$$

$$V_{Rbat} = I_{carga} \cdot R_{bat} = 37A \cdot 540m\Omega = 20V$$

$$V_{bus} = V_{bat} - V_{Rbat} = 270V - 20V = 250V$$

Aunque este valor no llegue a los 270 V que por especificaciones ha de tener el bus principal del sistema, es suficiente para cumplir con la norma MIL-STD-704F. Durante este periodo de tiempo, los convertidores forward e inversor, son capaces de regular su salida generando 28 V y 115 Vca a 400 Hz respectivamente. Tras conectar la pila de combustible a los 100 ms de simulación, la tensión del bus (V_{bus}) tiende a crecer, alcanzando los 270 V a los 56 ms.

Prueba 5. Resultado simulación escalón de potencia a una demanda superior a la máxima que puede suministrar la pila de combustible.

En esta prueba se pretende analizar el comportamiento del sistema cuando las cargas demandan potencias superiores a la máxima que es capaz de generar la pila de combustible (10 kW). Para ello, se ha partido de una demanda total de las cargas del sistema de 10 kW, elevando la misma hasta 13 kW a los 300 ms. Este tiempo permite que el sistema se encuentre en régimen permanente en el instante en el que se produce la variación de potencia demandada por las cargas. Posteriormente se ha elevado la demanda de potencia hasta 13 kW. El circuito que se ha utilizado para realizar esta prueba puede observarse con detalle en el circuito *Prueba 5 - Demanda de potencia superior a la Potencia máxima de la pila de combustible* en el anexo 7.1.

En la Fig. 69 se muestran las formas de onda obtenidas en esta simulación.

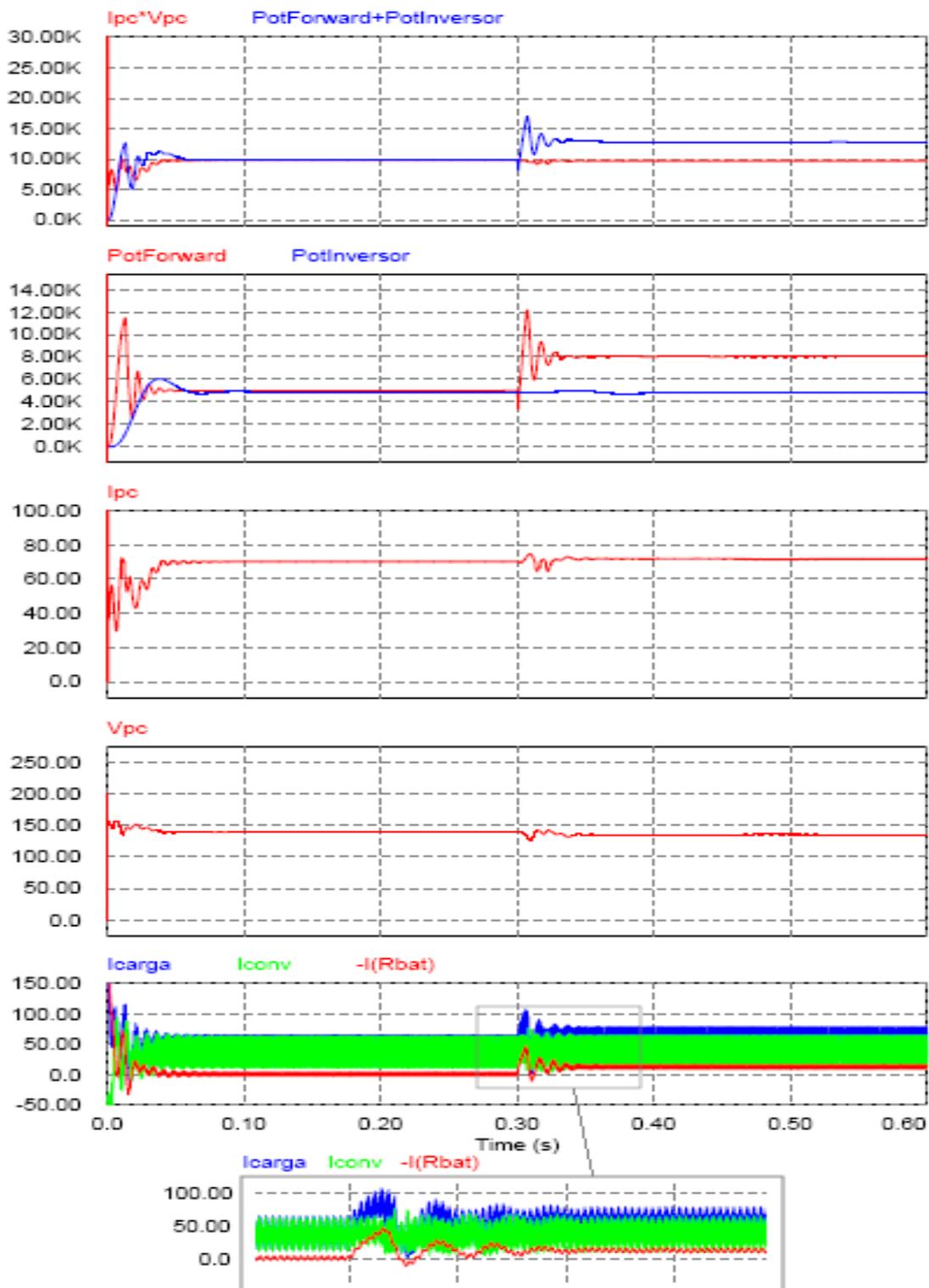


Fig. 69. Formas de onda de la simulación del escalón de potencia (10 kW-13 kW).

Perfil 5.

Inicialmente, las cargas demandan al sistema una potencia de 10 kW. Tras el arranque, donde la intervención de la batería es inevitable (ya que ésta es mucho más rápida que la pila de combustible más el convertidor elevador y por ello genera parte de la energía que demanda el sistema hasta que el conjunto pila-elevador está en condiciones de garantizar el suministro completo), el conjunto pila-elevador es capaz de suministrar toda la potencia que requiere el sistema. Durante este tramo, la corriente de la pila de combustible (I_{pc}) alcanza un valor de 68 A mientras que la tensión del dispositivo es de 135 V, generando los 10 kW que demandan el conjunto de cargas formado por el forward y el inversor. Como puede observarse en la Fig. 69, durante este período de tiempo, la corriente suministrada por la batería ($-I_{Rbat}$) toma un valor medio nulo, de modo que la corriente generada por el conjunto pila-elevador (I_{conv}) es igual a la demandada por las cargas (I_{carga}) tomando un valor medio de 37 A. A los 300 ms, se produce un escalón de potencia en el que la demanda de las cargas crece hasta situarse en 13 kW. La pila de combustible está diseñada para generar un máximo de 10 kW de potencia, por lo que es imposible que el conjunto pila-elevador sea capaz de cubrir las necesidades totales de suministro de potencia. Durante la intersección (ver Zoom Fig. 69), la batería suministra al sistema la diferencia entre la demanda de potencia y la potencia generada por la pila de combustible.

Una vez alcanzado el régimen permanente, la batería tiene que suministrar al sistema los 3 kW que el conjunto pila de combustible-elevador no puede generar. La Fig. 70 representa esquemáticamente el modelo de la batería y señala las caídas de tensión que se producen en él.

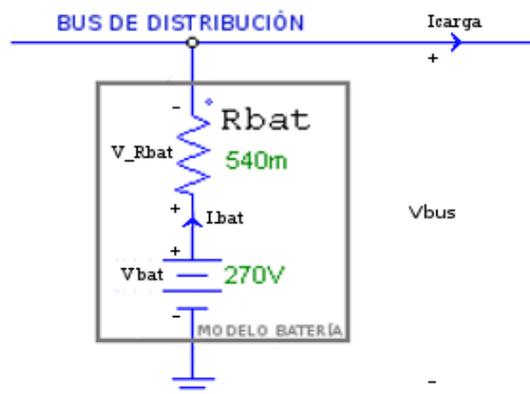


Fig. 70. Dibujo esquemático de la batería.

La corriente que suministra la batería al sistema (I_{bat}) cuando éste demanda 13 kW es de 11 A (ver Fig. 69) ya que:

$$I_{bat} = \frac{P_{demandada} - P_{pila}}{V_{bat}} = \frac{13kW - 10kW}{270V} = 11A$$

De este modo, en el segundo tramo de la simulación, la resistencia interna de la batería provoca una caída de tensión en sus terminales (V_{Rbat}) que, a su vez, reduce la tensión del bus de distribución como se muestra a continuación:

$$V_{bus} = V_{bat} - V_{Rbat} = 270V - (11A \cdot 540m\Omega) = 264V$$

Si se tiene en cuenta la función de transferencia del convertidor elevador y que la tensión del bus de distribución coincide con la tensión de salida del elevador ($V_{bus} = V_s$), esta caída de tensión produce a su vez, una disminución de la tensión de entrada del elevador. Esta tensión de entrada coincide, en este caso, con la tensión generada por la pila de combustible (V_{pc}) que se muestra en la Fig. 69. Por lo tanto:

$$U_e = U_s \cdot (1 - d) = 264V \cdot (1 - 0.5) = 132V$$

Como consecuencia de la disminución de la tensión suministrada por la pila de combustible, la corriente generada por este dispositivo, siguiendo su característica estática, aumenta su valor hasta alcanzar 70 A (ver Fig. 69).

La Fig. 71 muestra qué ocurre durante esta simulación con la tensión de salida del elevador (V_{bus}) y las respectivas salidas de tensión del forward y el inversor ($V_{out_forward}$ y $V_{out_inversor}$).

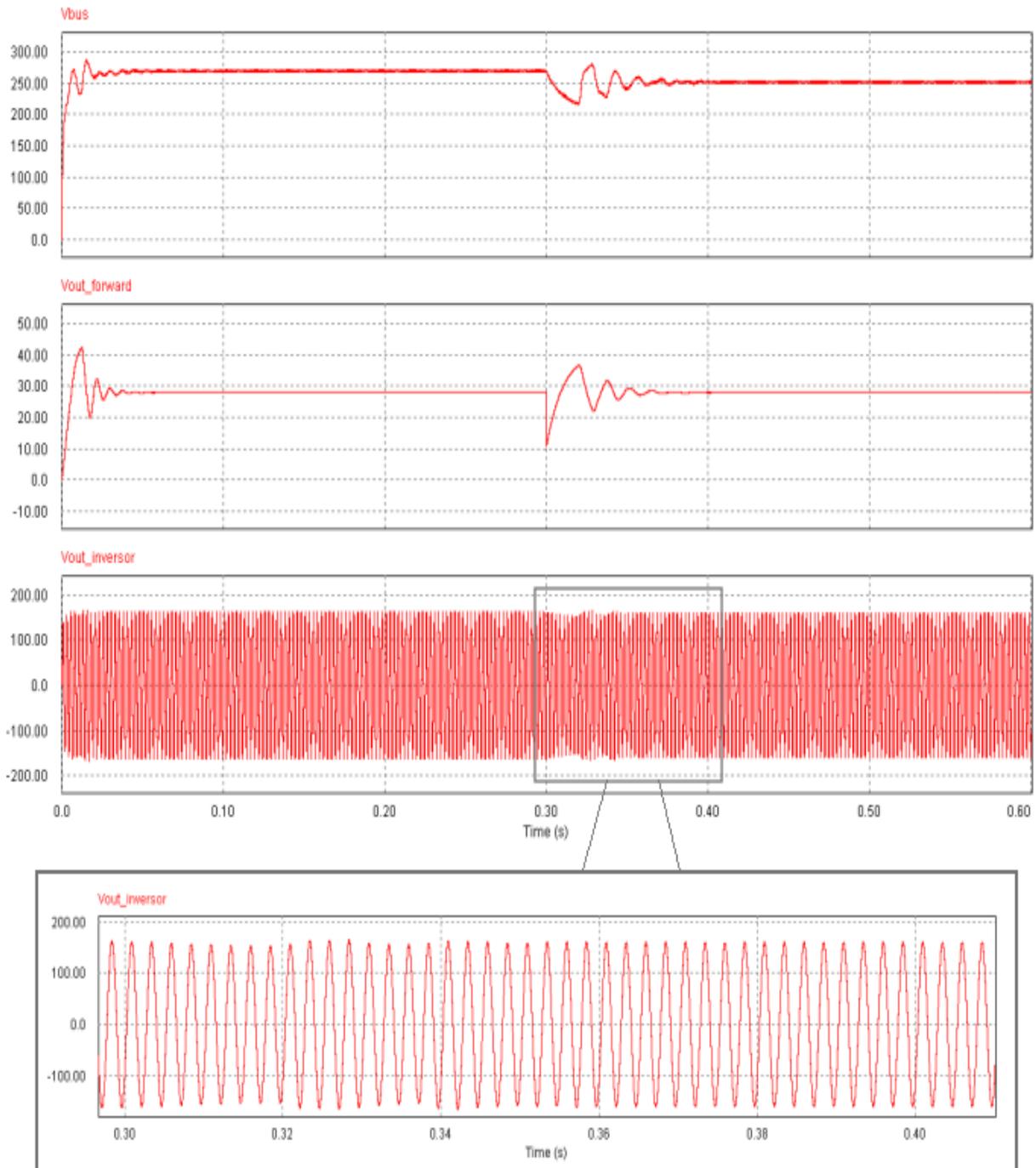


Fig. 71. Formas de onda de las tensiones de salida de los convertidores generadas mediante la simulación del escalón de potencia (10 kW-13 kW).

En la Fig. 71 se muestra como, también en este caso, los tres convertidores son capaces de regular su salida para adaptarse a las especificaciones técnicas que requiere el sistema. El valor máximo que alcanza el bus (V_{bus}) de distribución es de 282 V, recuperando los 270 V que marcan las especificaciones a los 90 ms. El convertidor forward también adapta su salida ($V_{out_forward}$) a las necesidades de alimentación de las cargas de continua del sistema, suministrando de nuevo 28 Vcc a los 70 ms de simulación. Así mismo, la salida del inversor ($V_{out_inversor}$), es capaz de suministrar los 115 Vac a 400 Hz que requiere la alimentación de las cargas de alterna del sistema a partir de la tensión que le proporciona el bus de distribución principal (V_{bus}).

6. Conclusiones y trabajos futuros.

Tras someter al sistema a las pruebas analizadas en el apartado 5. *Análisis del sistema completo*, puede concluirse que en este proyecto se ha logrado diseñar un sistema de generación de energía basado en **pilas de combustible** que podría ser utilizado como base de conocimiento para la creación de un sistema de alimentación que pueda proporcionar energía, por ejemplo, al **sistema eléctrico de un avión**.

Se ha partido de un buen diseño individual de cada uno de los convertidores que forman el sistema, ya que todos y cada uno de ellos han superado las pruebas a las que han sido sometidos para asegurar el cumplimiento de las especificaciones del sistema completo. Posteriormente, se han unido, alimentados por una fuente ideal, para verificar el correcto funcionamiento conjunto. Aquí se ha podido comprobar que el **rizado de 800Hz** que filtra el inversor a su entrada, tiene una gran repercusión en el rizado de la corriente por la batería. Para intentar disminuir al máximo su valor, ha sido necesario realizar un buen diseño tanto de los filtros como de los condensadores de entrada de los convertidores forward e inversor.

El modelo de simulación de la pila de combustible ha recreado correctamente la característica estática de este tipo de dispositivos. Una vez que este modelo ha sido conectado al sistema completo como fuente principal de generación de energía se ha sometido al mismo a una serie de pruebas dinámicas con el fin de determinar su comportamiento ante diferentes demandas de potencia. Es importante tener en cuenta que:

- Es imprescindible que el sistema cuente con un sistema de almacenamiento de energía que garantice el suministro de energía demandada por las cargas cuando la pila de combustible no esté en condiciones de suministrarla. Esto ocurre en varios casos: en el arranque, ya que la dinámica de la pila en conjunto con el elevador es demasiado lenta como para abastecer la demanda de potencia de las cargas; en variaciones **ascendentes** de la potencia demandada, ya que la potencia suministrada por la pila aumenta paulatinamente hasta alcanzar el nivel demandado por las cargas (siempre que éste sea inferior al nivel máximo de potencia que puede suministrar la pila de combustible), sin

embargo, durante este proceso, el nivel de potencia suministrada es inferior al que demandan las cargas, por lo que la batería deberá suministrar la diferencia entre la demanda de potencia de las cargas y lo que es capaz de suministrar la pila en cada instante; cuando la demanda de potencia de las cargas es superior a la máxima que puede generar la pila de combustible. En este caso la batería deberá suministrar la diferencia entre la potencia demandada por las cargas y los 10 kW de potencia máxima que es capaz de suministrar el conjunto pila-elevador al sistema.

- Es importante limitar el ciclo de trabajo del elevador para asegurar que la pila de combustible trabaje en zona óhmica.

- No ha sido conveniente limitar el ciclo de trabajo mínimo, ya que esto no produciría ventaja alguna, pero por el contrario, provocaría una respuesta retardada en la respuesta de la pila de combustible, es decir, el conjunto pila-elevador tardaría más tiempo en abastecer la demanda de las cargas del sistema en caso de limitar el ciclo de trabajo mínimo del elevador. De este modo, la batería tendría que suministrar potencia al sistema durante más tiempo, lo que produciría una descarga más acelerada de la misma.

A continuación se exponen algunas de las mejoras que podrían realizarse en el sistema para mejorar el comportamiento del mismo:

- Comparar distintas arquitecturas de distribución eléctrica.

- Uno de los posibles trabajos futuros sería el dimensionamiento y modelado adecuado del sistema para una aplicación concreta.

- Como se ha comentado anteriormente, el rizado de corriente de 800 Hz que filtra el inversor en la corriente por la batería supone un problema que sería conveniente mejorar. Para ello, sería interesante diseñar un convertidor adicional que controlase el rizado de corriente por la batería para asegurar que éste no perjudique al dispositivo.

- Además podría ser útil diseñar otros sistemas de almacenamiento que permitieran al sistema almacenar energía para abastecer la demanda de las cargas sin depender exclusivamente de la pila de combustible o de la batería.

- Modelado adecuado de la dinámica de la pila de combustible.

- Validación experimental.

7. Anexos

7.1 Circuitos

Elevador

Elevador y batería

Forward

Diseño Cin del Forward

Inversor

Diseño Cin del Inversor

Circuito completo con una fuente de tensión ideal

Elevador con pila de combustible y resistencia de carga

Limitación del ciclo del elevador en $d_{max} = 0.9$

Limitación del ciclo del elevador en $d_{max} = 0.5$

Limitación del ciclo del elevador en $d_{min} = 0.01$

Limitación del ciclo del elevador en $d_{min} = 0.25$

Circuito completo con pila de combustible

Prueba 1 – Escalón de potencia 5kW – 2.5kW – 5kW

Prueba 2 – Escalón de potencia 5kW – 2.5kW – 3.5kW

Prueba 3 – Escalón de potencia 2.5kW – 5kW – 2.5kW

Prueba 4 – Circuito conexión retardada de la pila de combustible

Prueba 5 - Demanda de potencia superior a la Potencia máxima de la pila de combustible

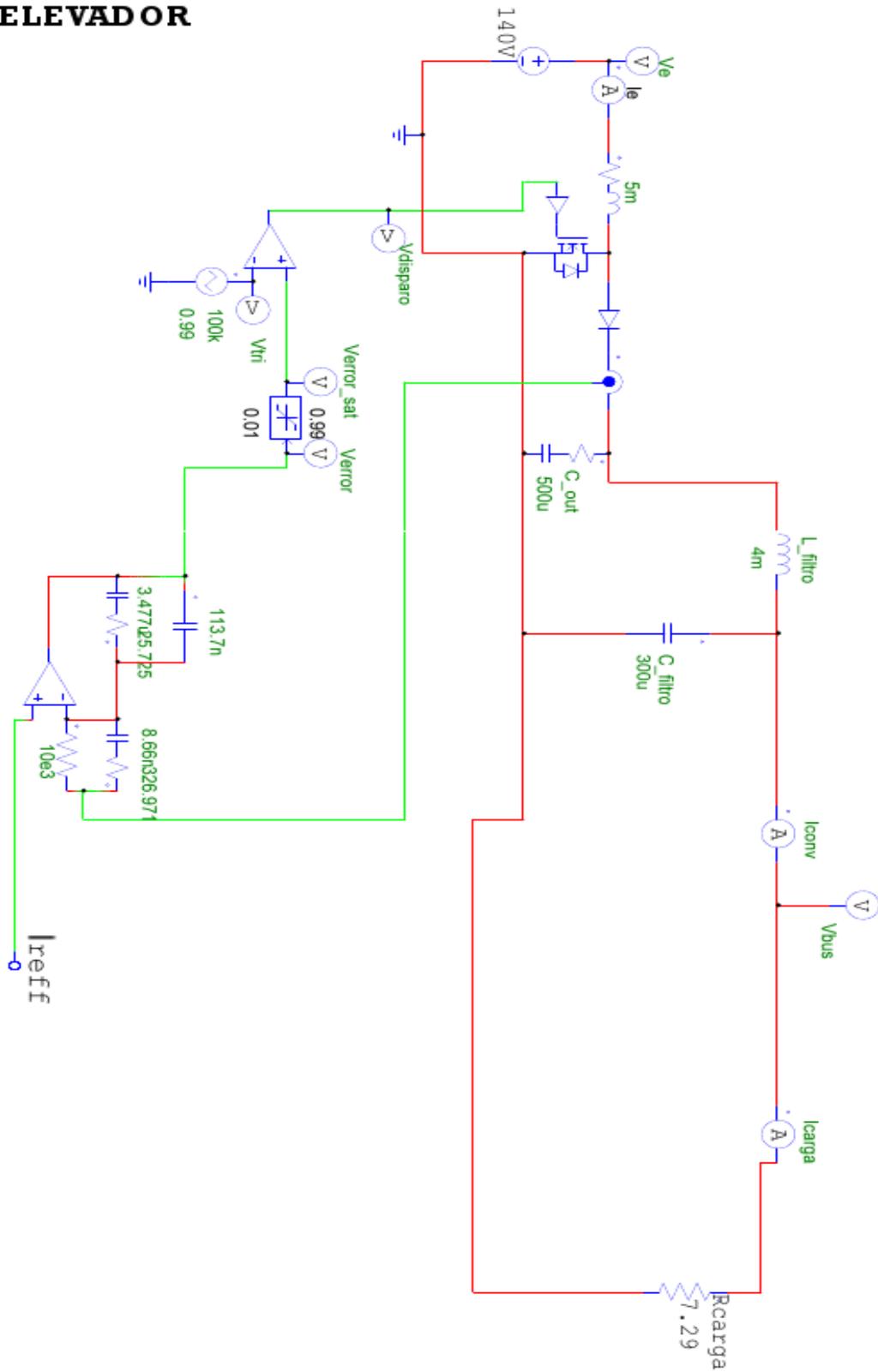
7.2 Hoja de características de la Pila de Combustible

7.3 Hoja de características de la batería

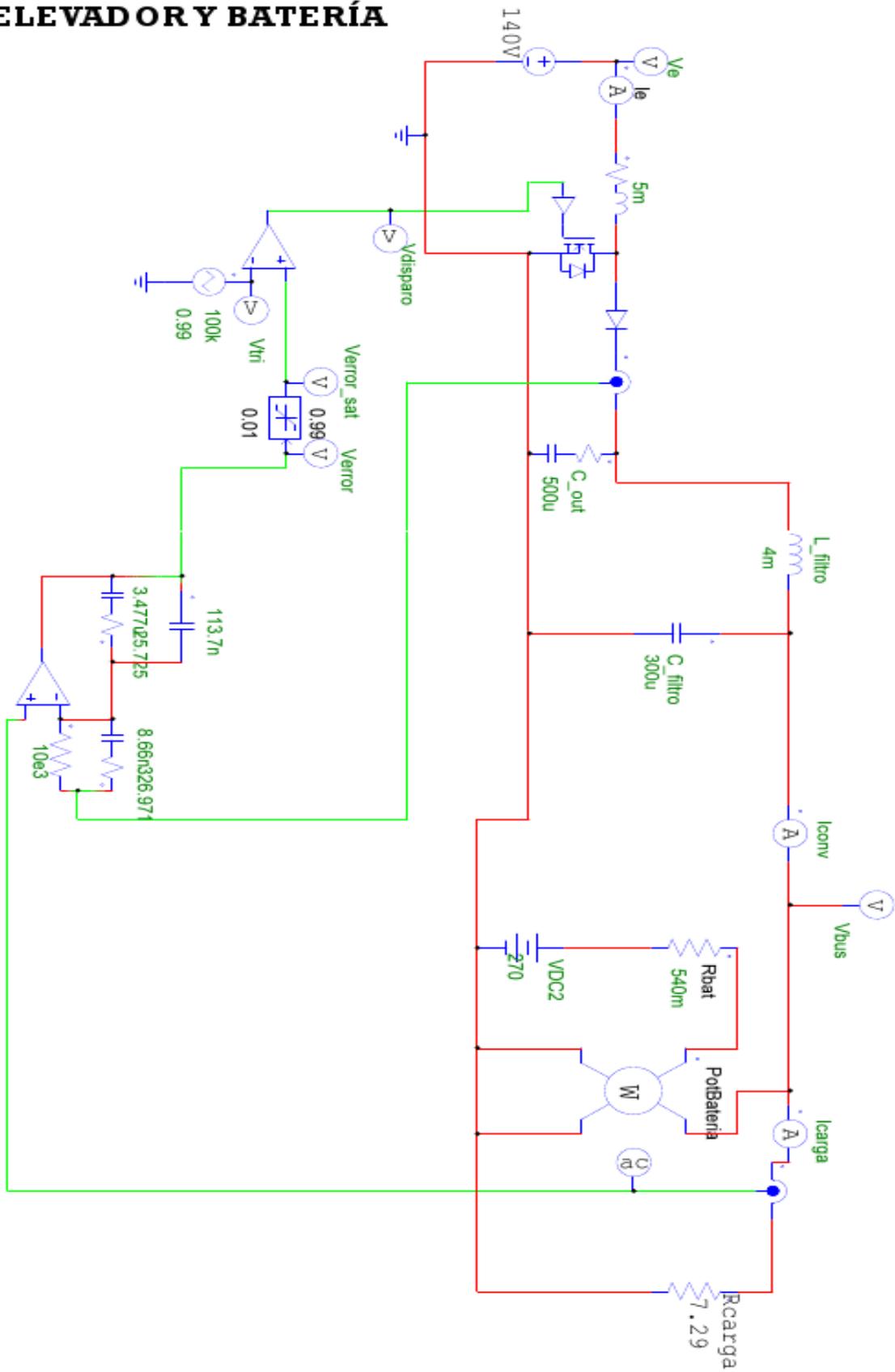
7.4 Hojas de Mathcad

7.1 Circuitos

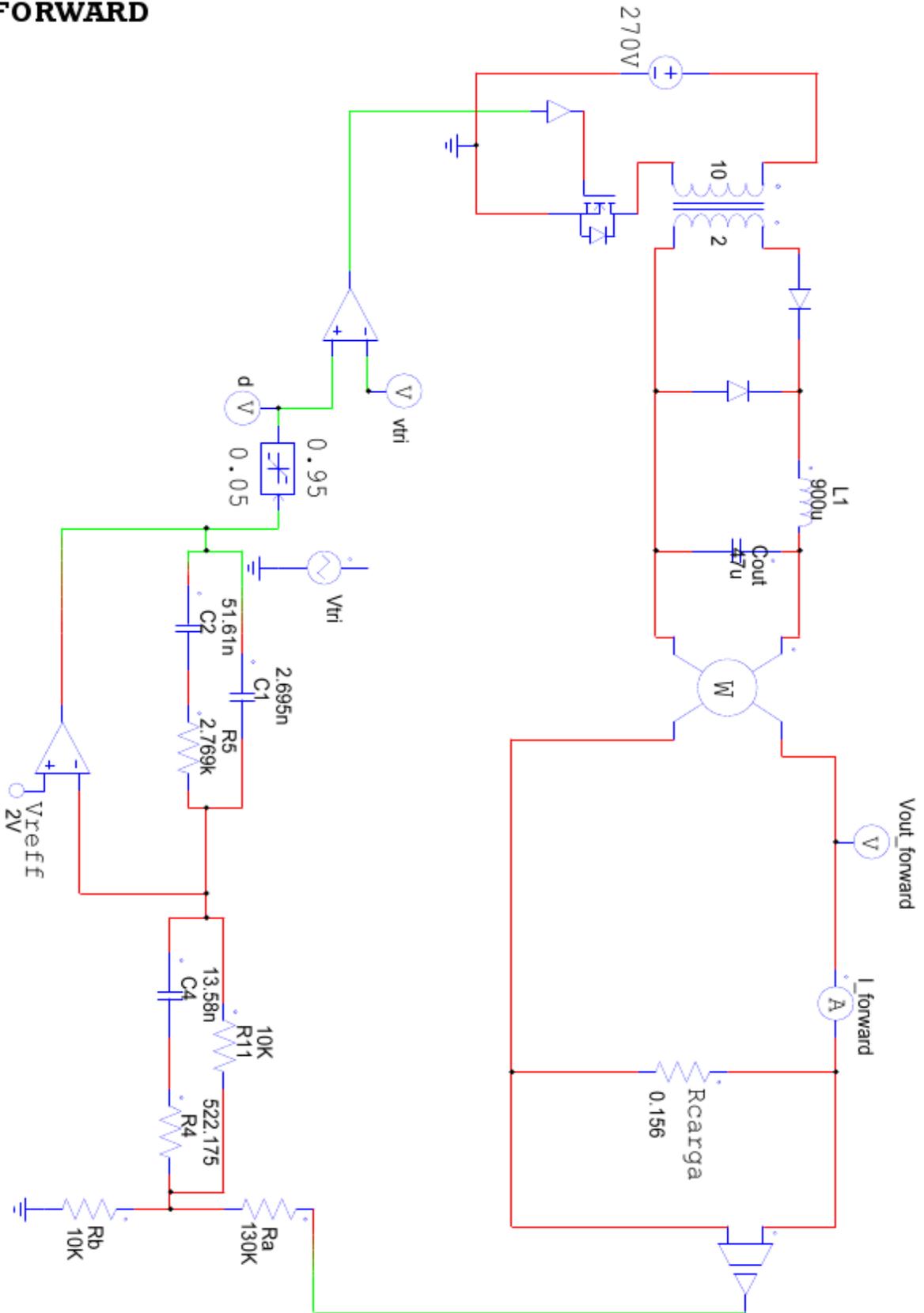
ELEVADOR



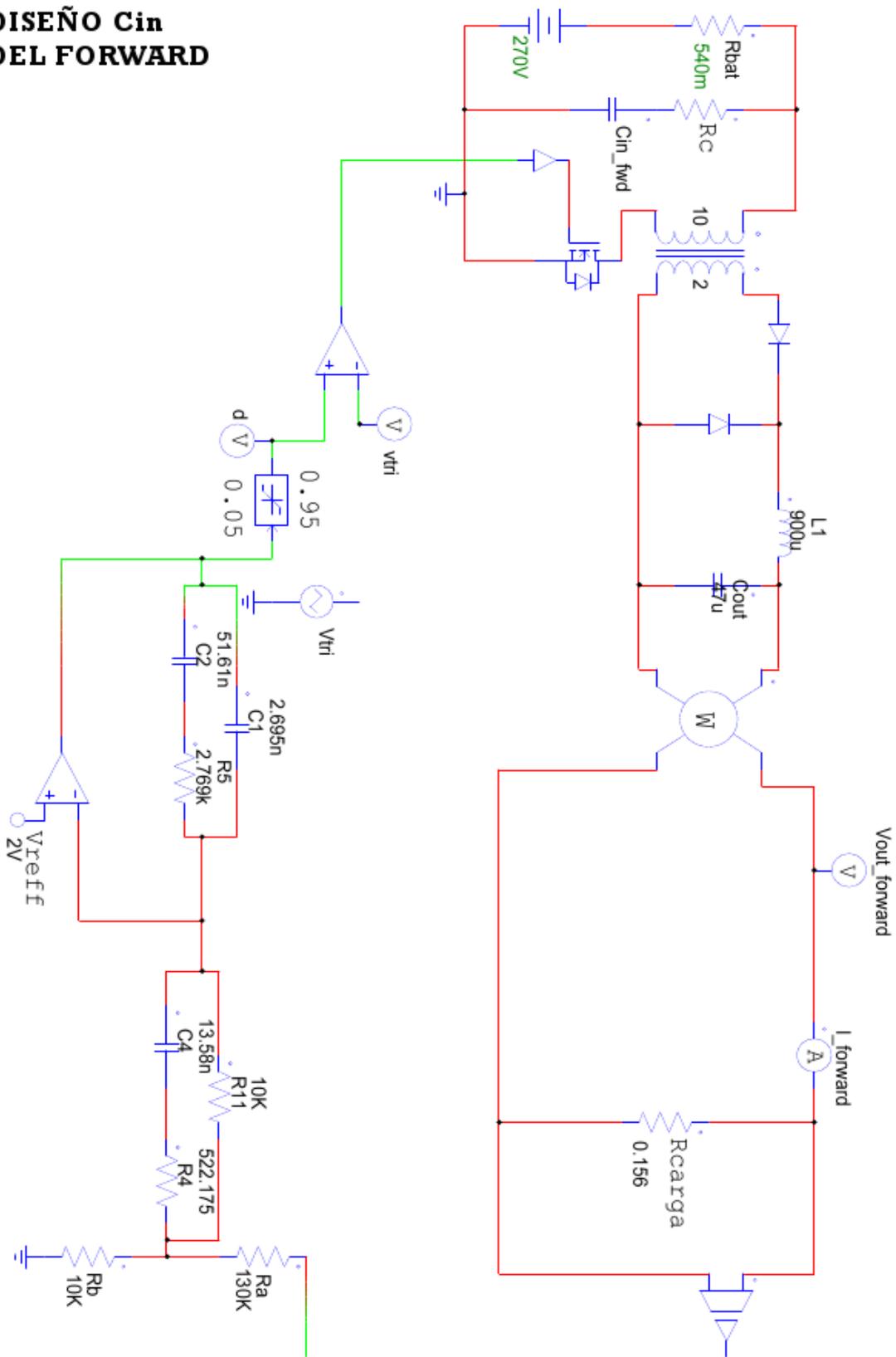
ELEVADOR Y BATERÍA



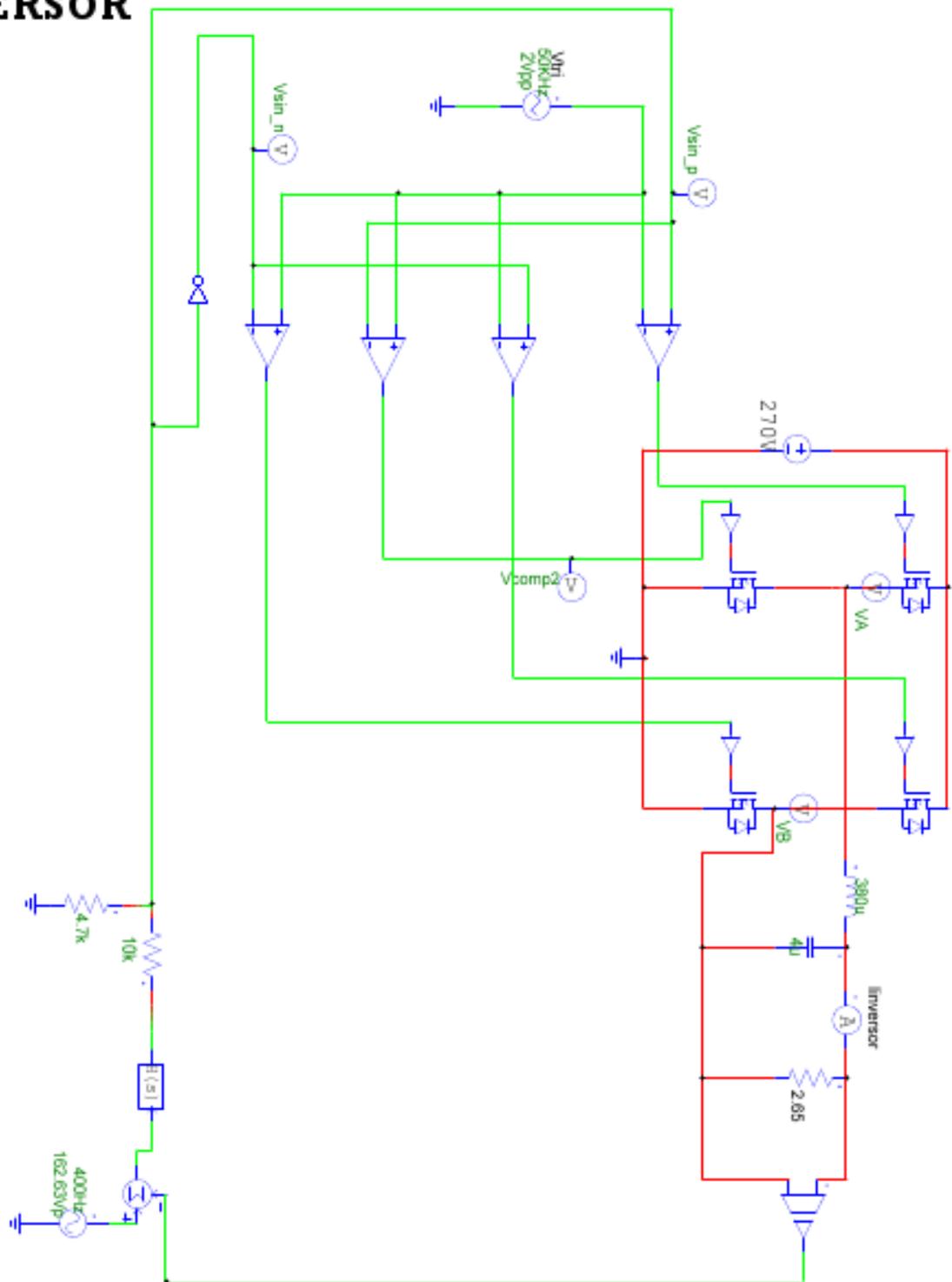
FORWARD



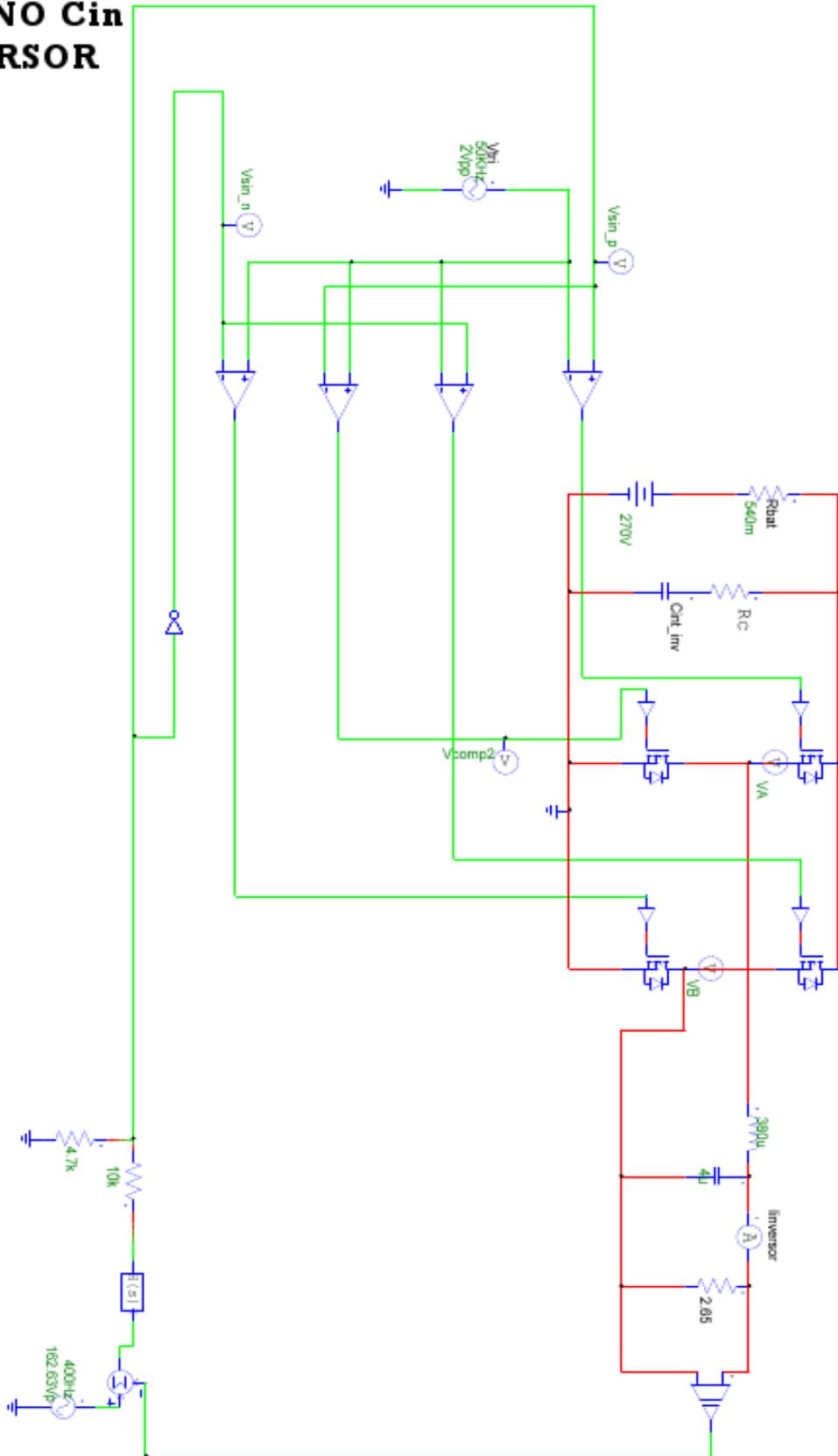
**DISEÑO Cin
DEL FORWARD**



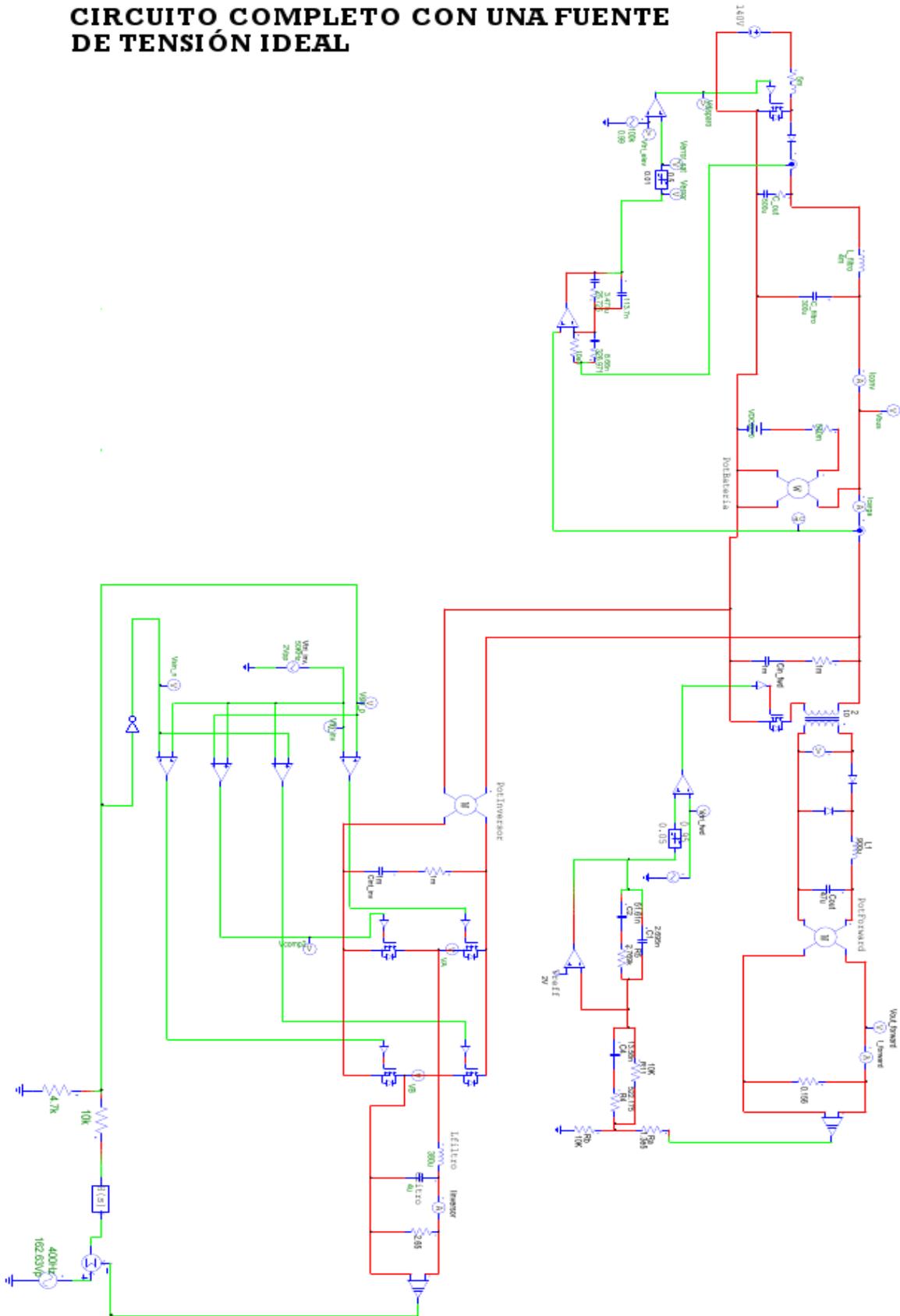
INVERSOR



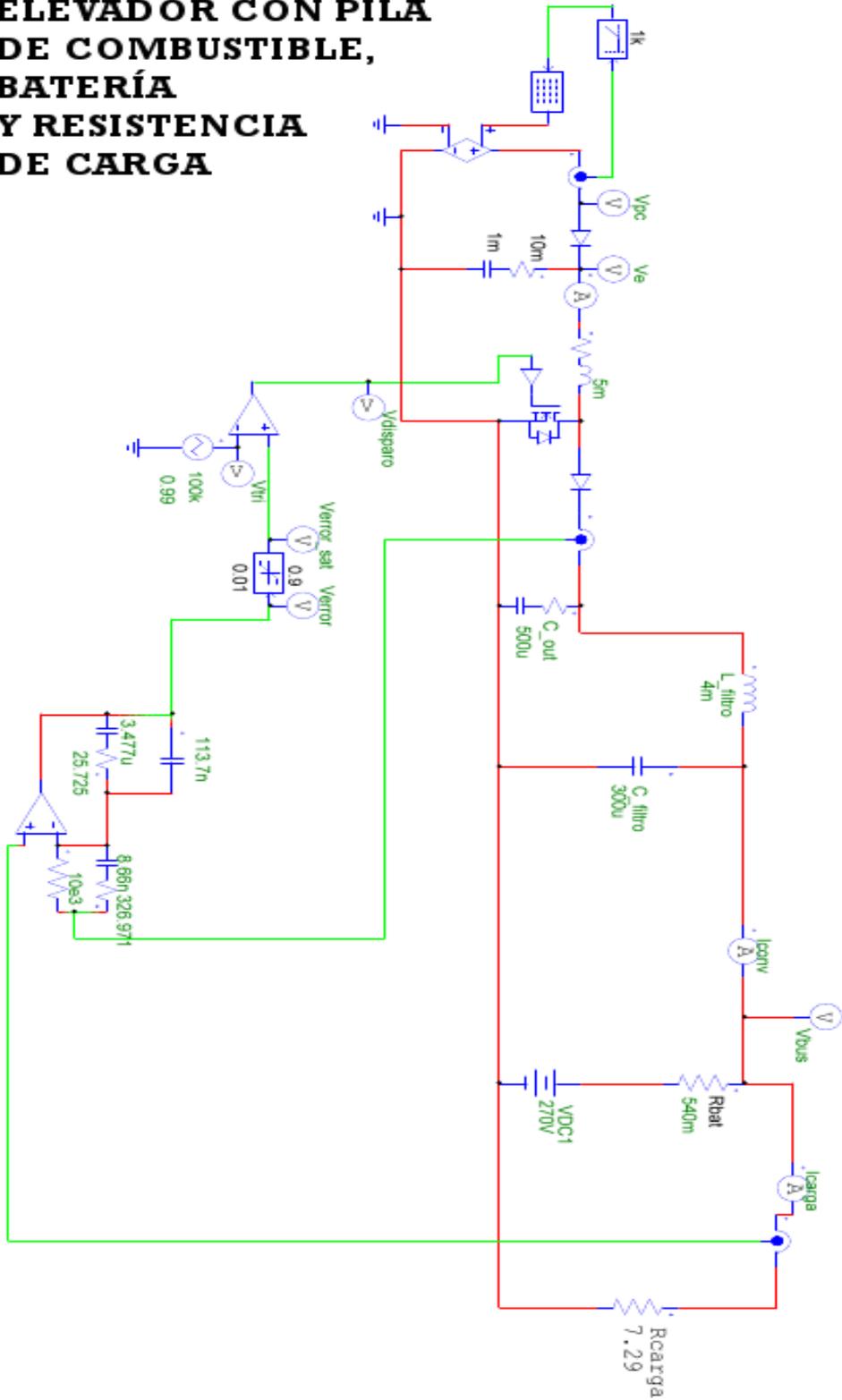
DISEÑO Cin INVERSOR



CIRCUITO COMPLETO CON UNA FUENTE DE TENSION IDEAL

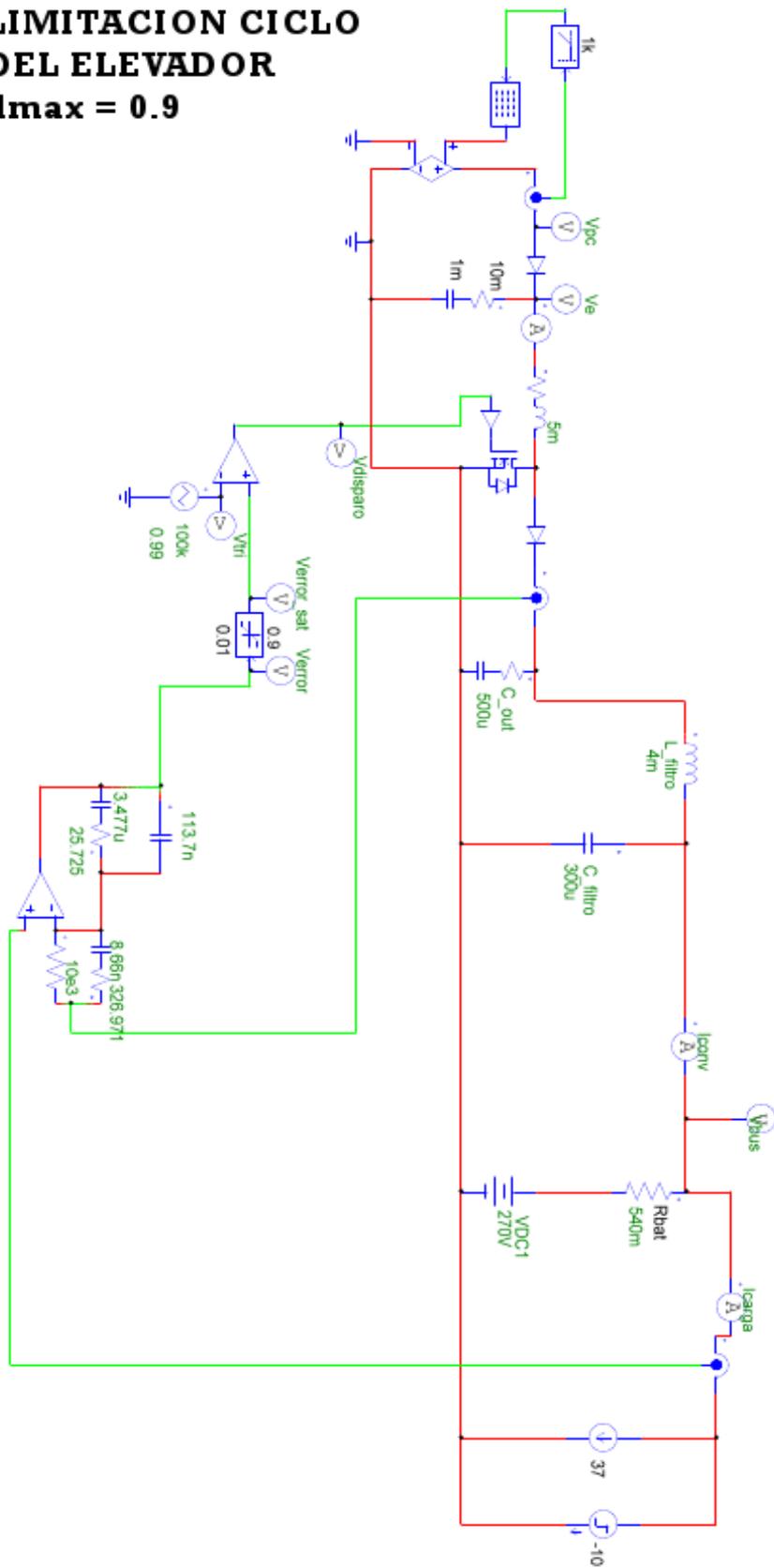


ELEVADOR CON PILA DE COMBUSTIBLE, BATERÍA Y RESISTENCIA DE CARGA



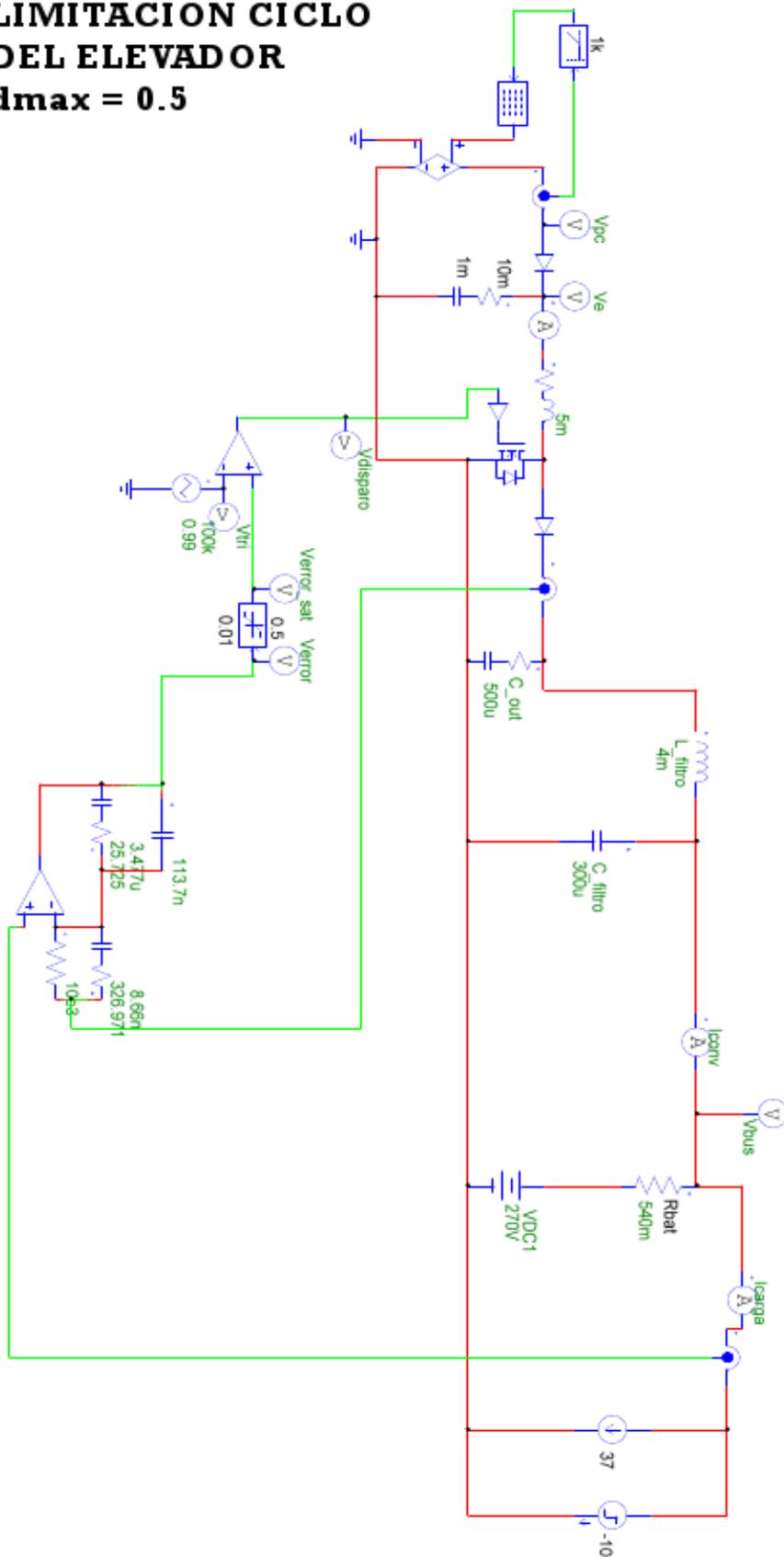
LIMITACION CICLO DEL ELEVADOR

$d_{max} = 0.9$

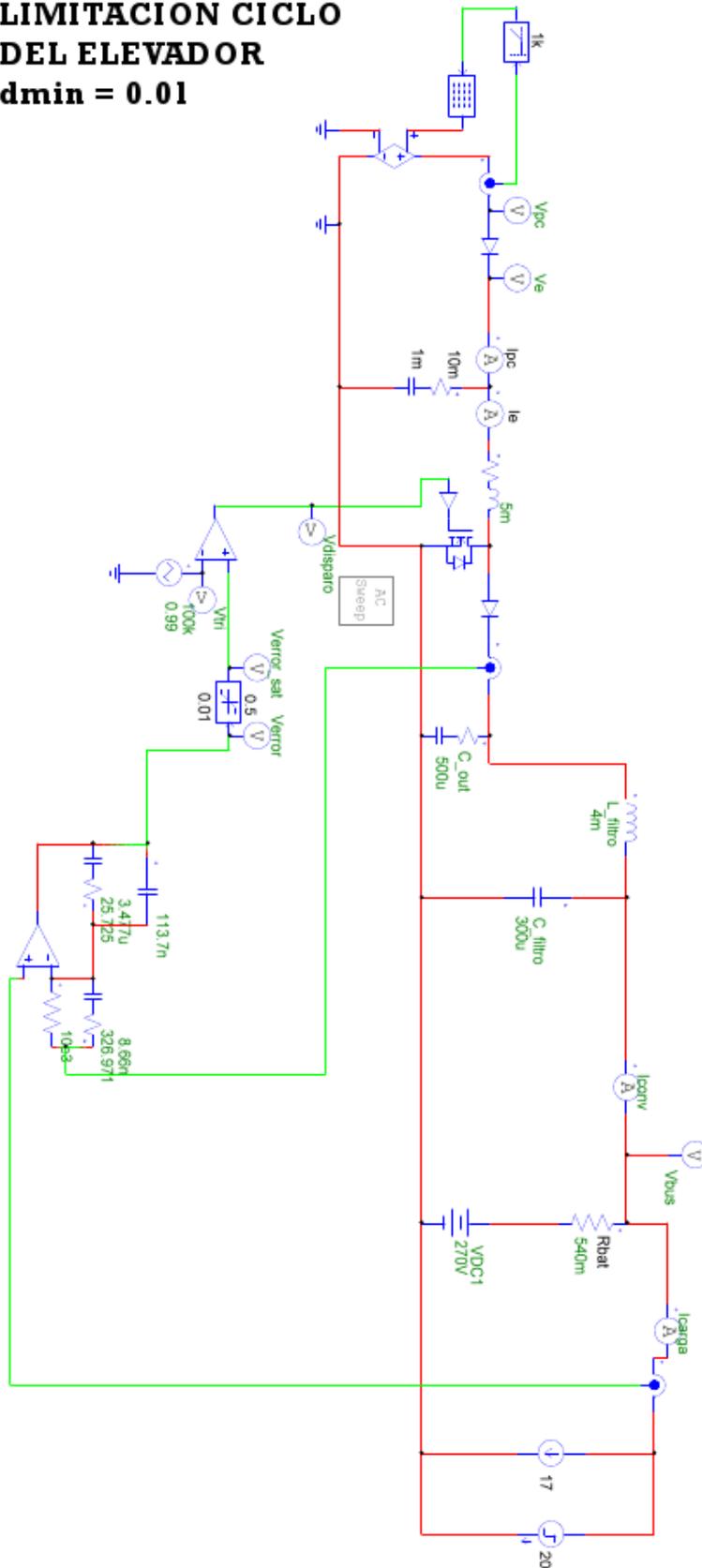


LIMITACION CICLO DEL ELEVADOR

$d_{max} = 0.5$

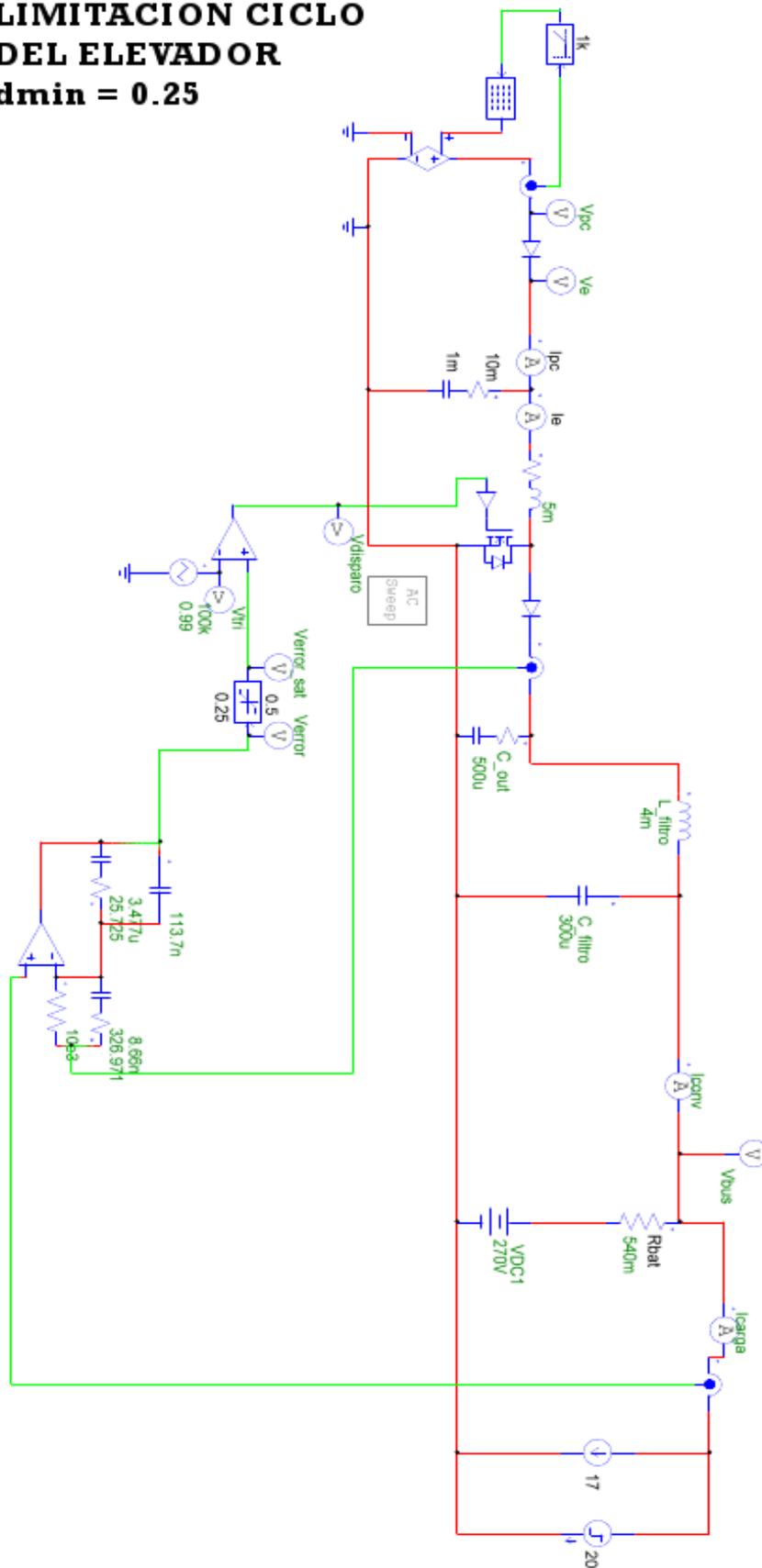


LIMITACION CICLO DEL ELEVADOR $d_{min} = 0.01$

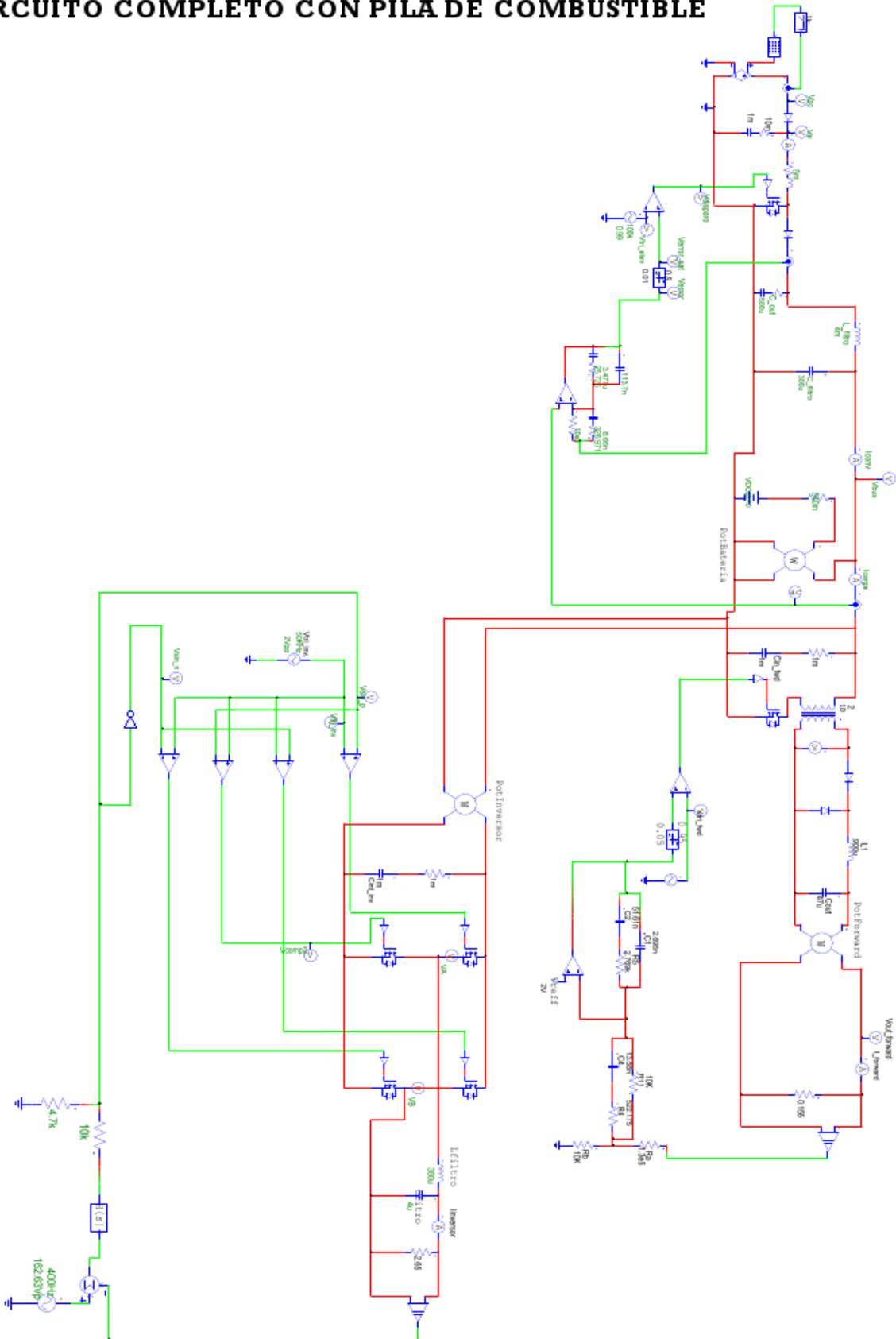


LIMITACION CICLO DEL ELEVADOR

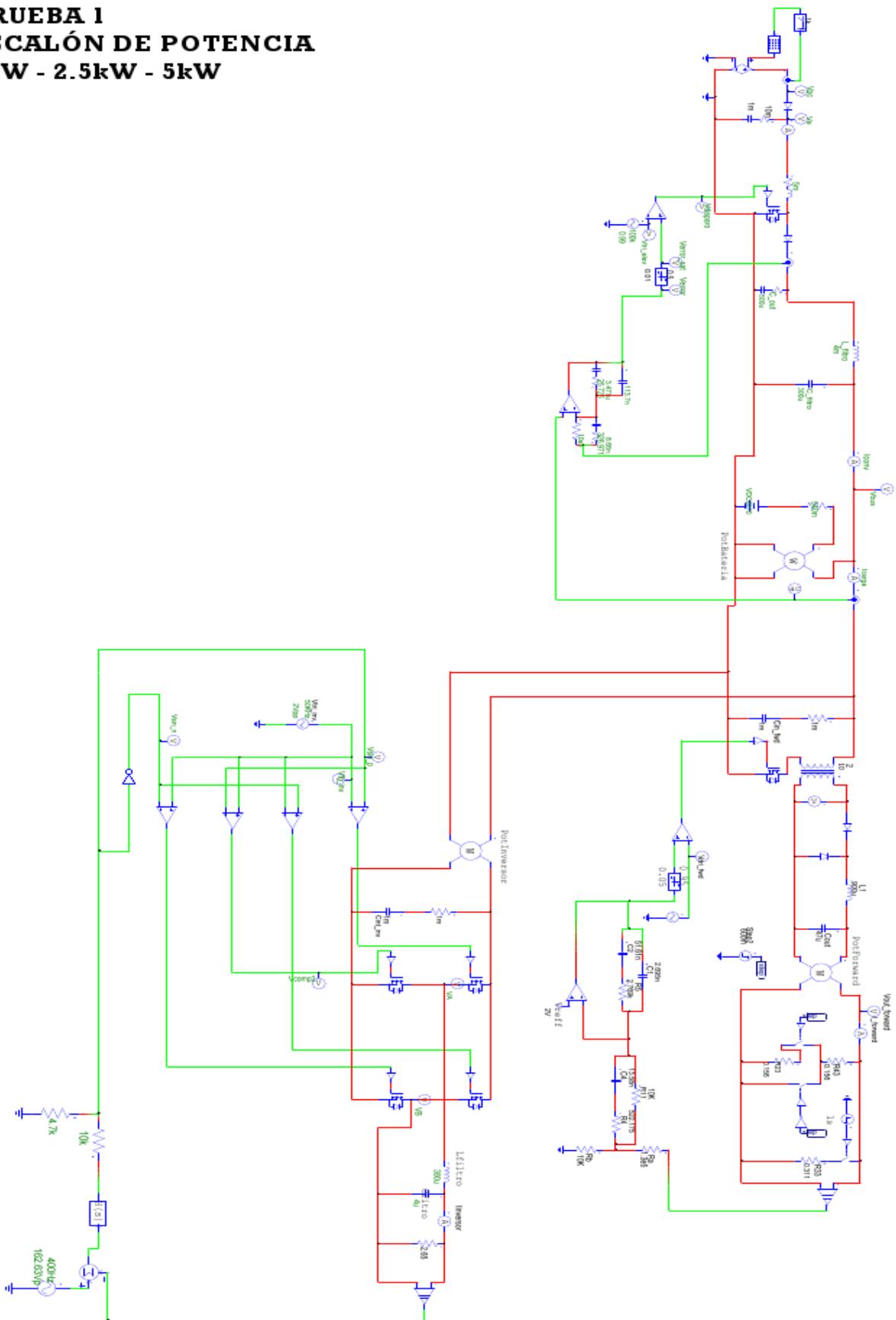
$d_{min} = 0.25$



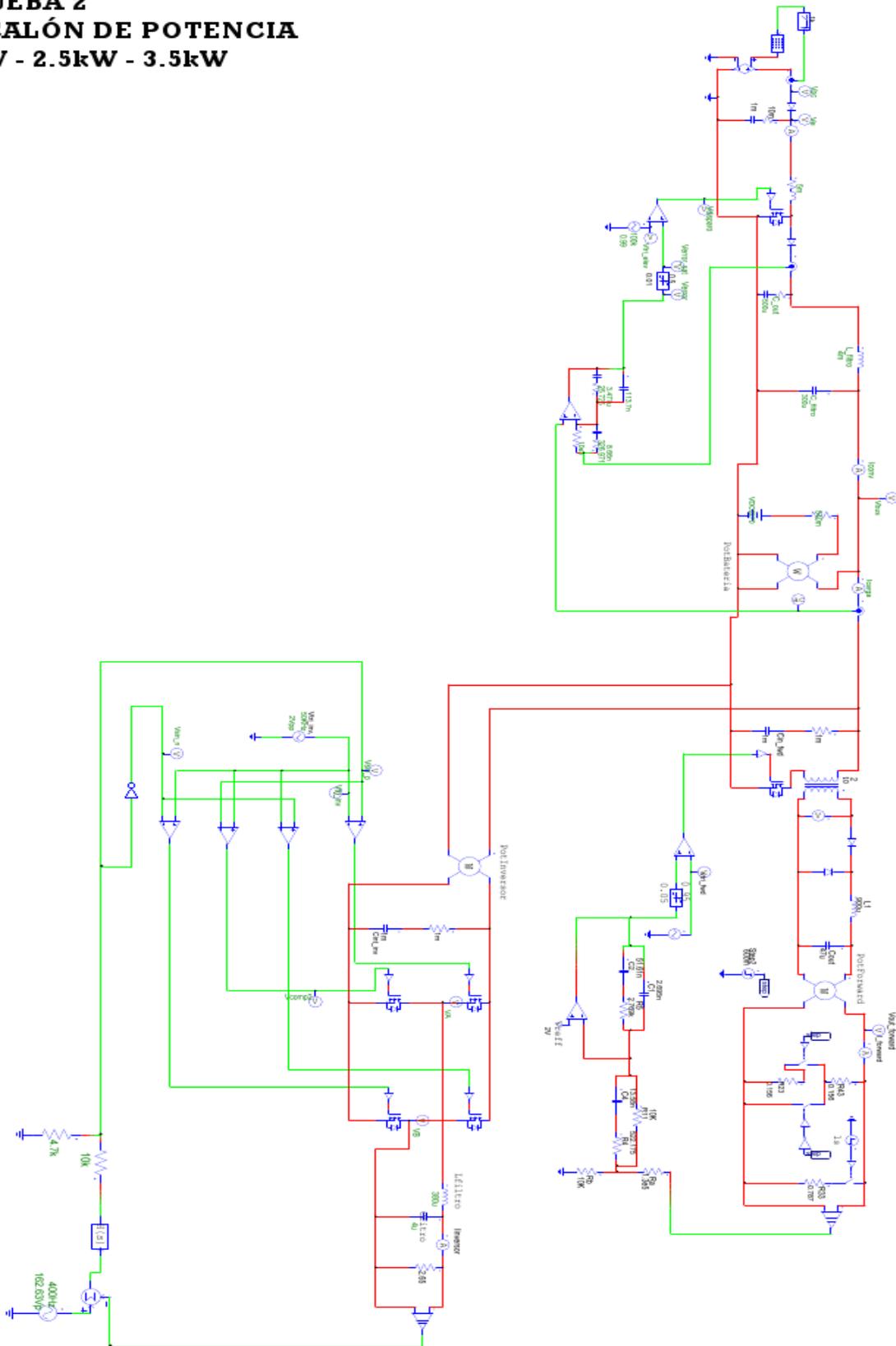
CIRCUITO COMPLETO CON PILA DE COMBUSTIBLE



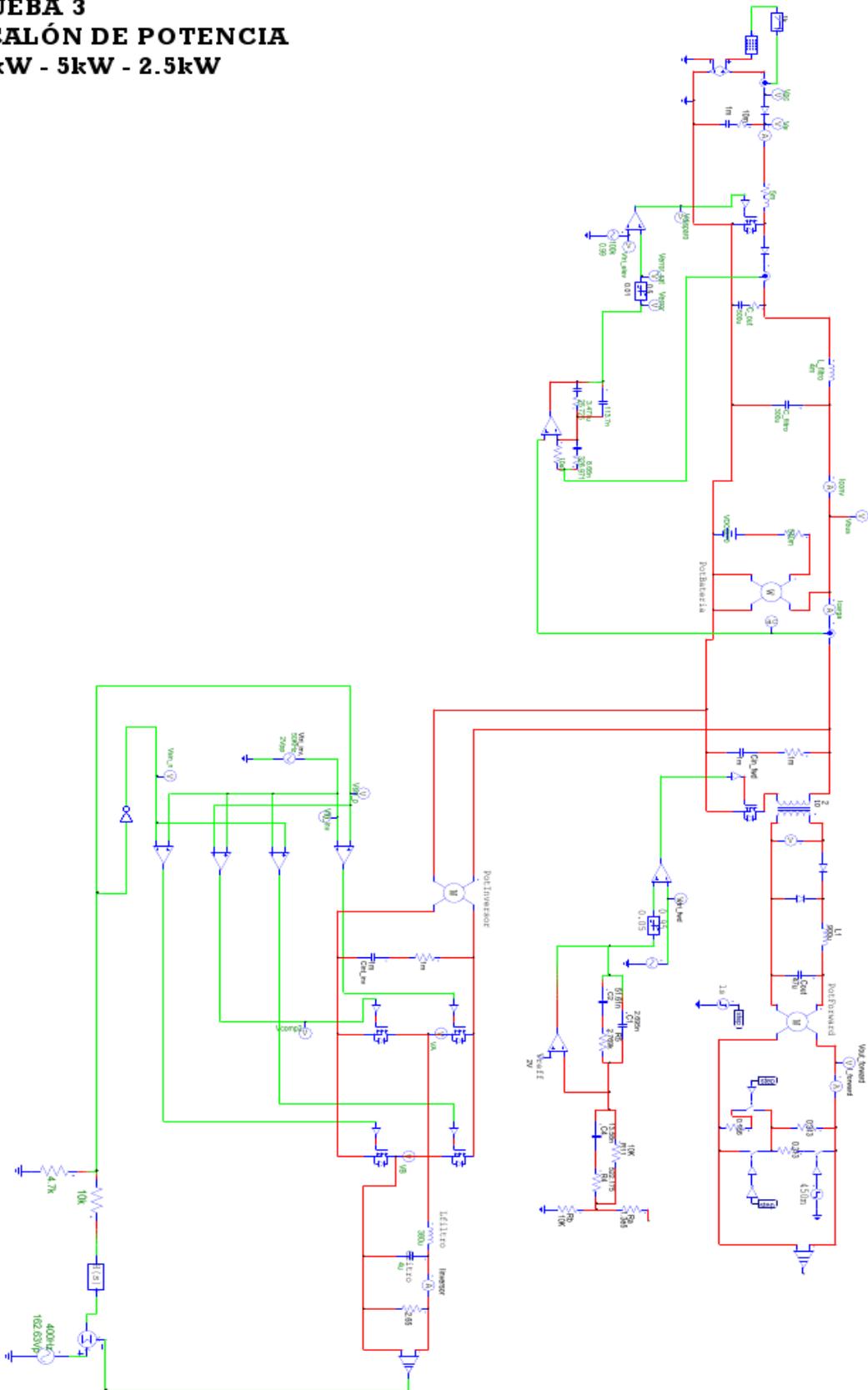
PRUEBA I ESCALÓN DE POTENCIA 5kW - 2.5kW - 5kW



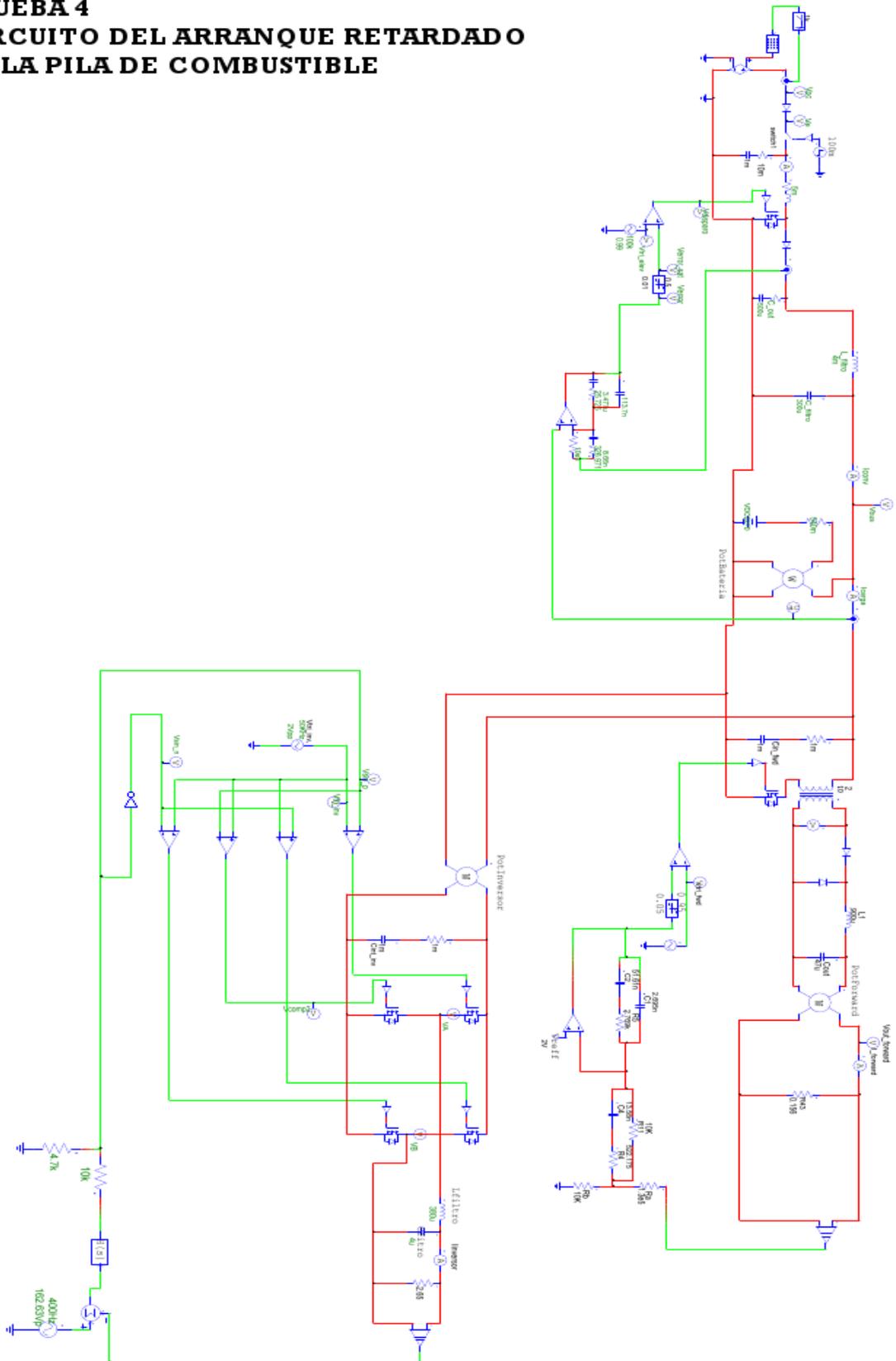
PRUEBA 2
ESCALÓN DE POTENCIA
5kW - 2.5kW - 3.5kW



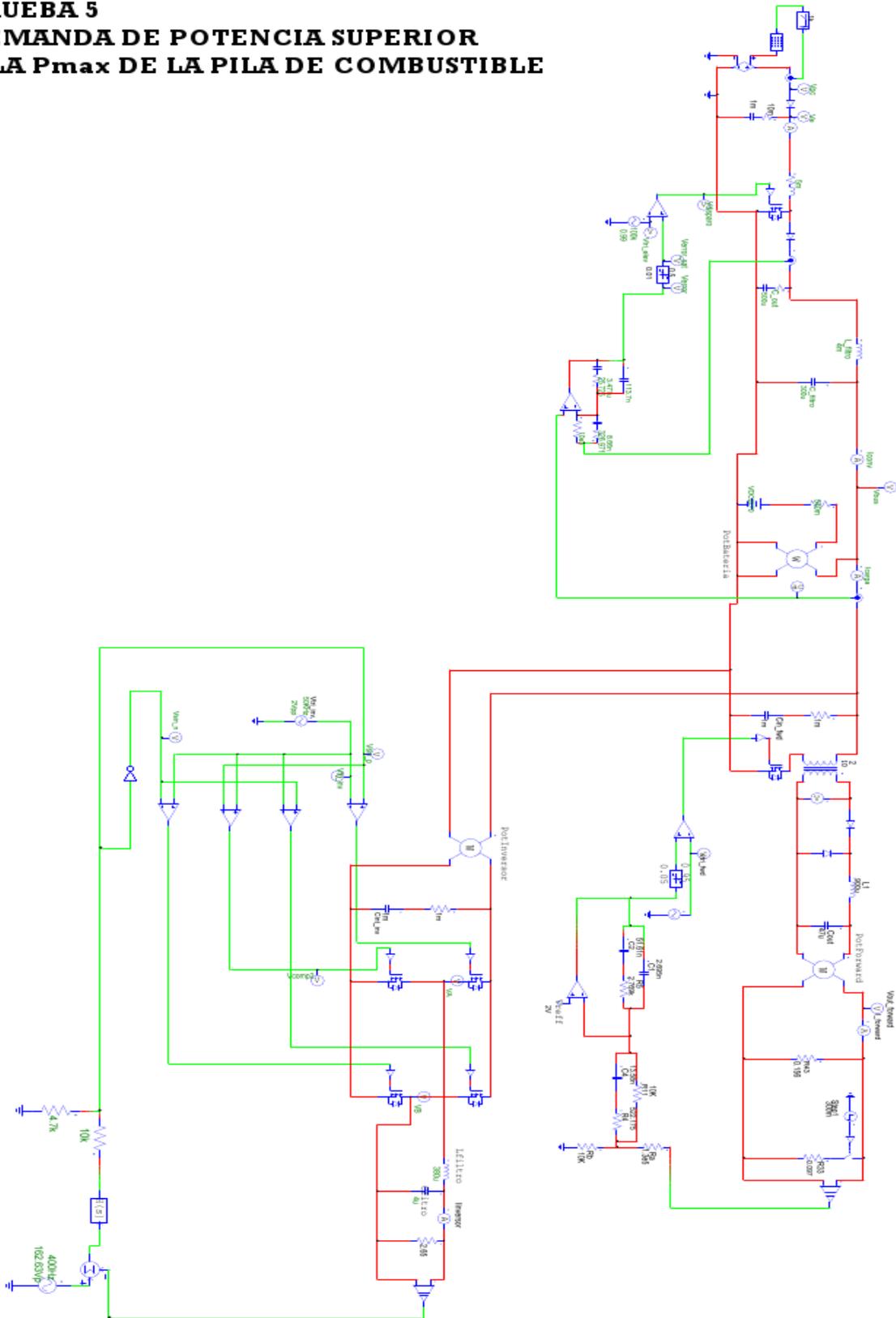
PRUEBA 3
ESCALÓN DE POTENCIA
2.5kW - 5kW - 2.5kW



PRUEBA 4 CIRCUITO DEL ARRANQUE RETARDADO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE



PRUEBA 5 DEMANDA DE POTENCIA SUPERIOR A LA P_{max} DE LA PILA DE COMBUSTIBLE



7.2 Hoja de características de la pila de combustible.

NedStack P8 (PEM FC stack of 8 kW peak)

NedStack sells a limited number of standard stacks and power supply systems. Dedicated stacks are designed according to customer specifications, using Nedstack's fuel cell simulation software. Next to the fuel cell stacks, NedStack offers as an option its integrated cathode gas humidifier, based on membrane technology. With one click you can print our preliminary specifications sheet of our following commercially available products

Nedstack is primarily a producer and supplier of stacks. The accumulated system design know-how enables NedStack to design better stacks, and helps to support its customers.

Small stationary

Telecom and IT industrial companies, utility project developers, generator manufacturers become more and more convinced that PEM fuel cell stacks and systems are the solution to their nowadays power demands. In answer to these demands NedStack has developed several products for the following types of small stationary applications.

APU

Auxiliary Power Unit is used as secondary power source next to the primary drive. Application of APU is typically in transport vehicles and shipping, and the APU systems are mainly used to provide power when the primary drive is not in operation (typically hotel functions of ships, lorries or aeroplanes). A fuel cell system used as zero emission power supply is the solution in locations where environmental restriction (NO_x, particle and noise emission) makes zero emission operation compulsory.

Fuel Cell Generator

Generator systems are used to provide electrical power when the mains current is not present or not available in the required amount. Our PEM-FC systems are the reliable,

high efficient and zero-emission solutions for these applications. Several fueling options are available giving flexibility in operation.

Back-up power

Back-up powering device is used to power electronic devices during mains failure. It provides reliable electric power with zero emission. Compared to the lead-acid battery power back-up devices, our PEM fuel cell system gives excellent scalability for the hours to be overcome by the back-up device. The cost for power storage is low, hence it is a cost effective solution to overcome long periods of mains failure.

UPS

Uninterrupted Power Supply (UPS) is a more sophisticated device providing back-up power and instantaneous take-over of power supply from mains in case of failure. UPS functionality is crucial for any operations where any interruption must be avoided at all times (for example important computer systems and complex production processes).

For all these applications there are the following hydrogen supply options:

- Hydrogen storage tanks or cylinders (delivery by hydrogen distributors such as Air Products, Linde Gas, Air Liquide, etc.)
- Reforming of LNG, Alcohol, Ammonia, Gasoline or Diesel
- Electrolysis (Wind/Solar to hydrogen)

Advantages:

- Zero emissions such as CO, CO₂, NO_x
- Zero fine dust
- Stacks are recyclable
- High system efficiency (atmospheric operation) - High power density of fuel cells

- Economic use of by-product hydrogen
- Significant decrease of power demand from grid
- Long maintenance-free lifetime
- Modules are replaceable without interruption
- No limitation in start and stop cycles
- Scalable system, optimized to local situation
- Low noise

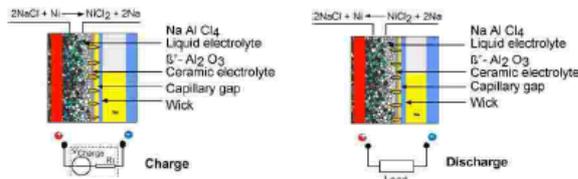
Specifications

Type		NedStack P8 FC stack
Performance	rated peak power	8 kW
	current	>225 A
	output voltage	68~36 V (DC)
	efficiency	45~60 %
Fuel	hydrogen	dry or humidified
	reformat	80~20 mixture, others on request
Oxidant	ambient air	
Operating conditions	temperature	65 °C
	fuel pressure	atmospheric
	air pressure	atmospheric
Physical	dimensions	520 × 190 × 270 mm
	weight	36 kg
Operating lifetime	expected	>20.000 hrs

7.3 Hoja de características de la batería

THE ZEBRA CELLS

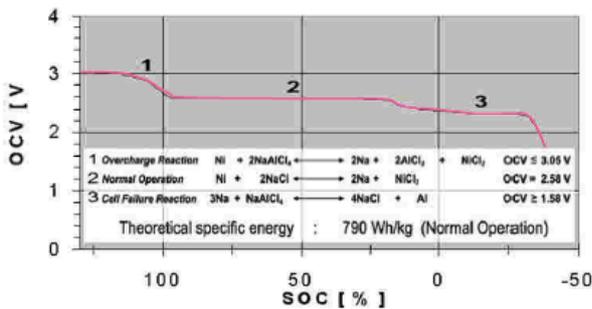
During charge salt (NaCl) and nickel (Ni) are transformed into nickelchloride (NiCl₂) and sodium (Na). The discharge runs in the opposite direction. There are no chemical side reactions, so that the Ah-efficiency is 100%.



Each cell has a stable steel case. The electrodes are separated by a ceramic wall that is conductive for sodium ions but an isolator for electrons. Therefore the cell reaction can only occur if outside the cell an electron current flows equal to the sodium-ion-current.

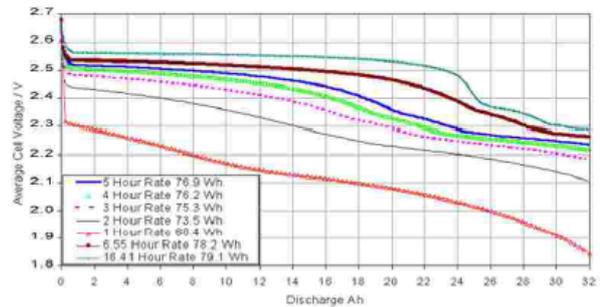
The porous solid cathode of NiCl₂ is impregnated with a Na⁺-ion conductive salt (NaAlCl₄) that provides the conductivity between the inside wall of the separator and the reaction zone. A metal-ceramic seal closes the cell hermetically. There is no maintenance life long.

The open circuit voltage (OCV) of ZEBRA® cells is 2,58V/cell and nearly constant over the complete discharge with an overcharge and overdischarge margin.



OCV vs SOC at 300°C (ML3)

The internal cell resistance is 8mΩ at high SOC and ca. 20mΩ at the end of discharge dependent on temperature and current profile.

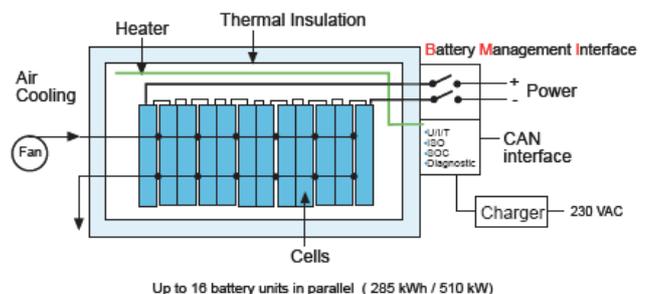


Constant Current Discharge ML3C

The dynamic resistance is relevant in car operation and amounts 8mΩ to 12mΩ independent from SOC. The resistance is lower with higher temperature with ca. 0,5%/K. The cells are normal charged with 2,67 V/cell within 6-8 h and fast charged with a 1h-rate and 2,85V/cell up to 80%SOC. The regenerative charge voltage is 3.1V/cell.

THE ZEBRA® BATTERY SYSTEM

Any geometrically reasonable number of ZEBRA cells can be connected in series and in parallel in order to generate the desired voltage and capacity. They are vertically assembled in the battery box with or without aircooling (ca 10W/cell cooling power).



Up to 16 battery units in parallel (285 kWh / 510 kW)
ZEBRA® Battery System

The double walled vacuum isolated battery box follows the principle of a thermo bottle with very efficient isolation made out of foamed SiO₂ material. It provides the very low heat conductivity of only 0,006 W/mK and is stable for any worst case safety condition up to above 1000° C.

An ohmic heater inside the battery box provides the operation temperature and is controlled by the BMI (Battery Management Interface).

The internal temperature of 270°C to 350°C causes thermal losses but provide the more important advantages of:

- ambient temperature independent life and performance
- simple and efficient cooling
- inactive battery if cold for infinite shelf life

The BMI with integrated main circuit breaker is the “brain” of the battery system and provides:

- the temperature control
- the measurement of the actual SOC
- the counter of nameplate cycles
- the measurement of the isolation resistance between “plus”, “minus” and ground
- the supervision of current and voltage limits
- the Life-Data-Memory like a “black box”
- the charger control
- the CAN communication with vehicle and drive system

THE ZEBRA® BATTERY SAFETY

The ZEBRA® Battery has passed all safety tests defined by the European Automotive Industry and USABC as there are the crash test with 50 km/h, overdischarge test, short circuit test, vibration test, external fire test and submersion under water.

A CD with all relevant reports is available.



ZEBRA crash test

RELIABILITY AND BATTERY LIFE

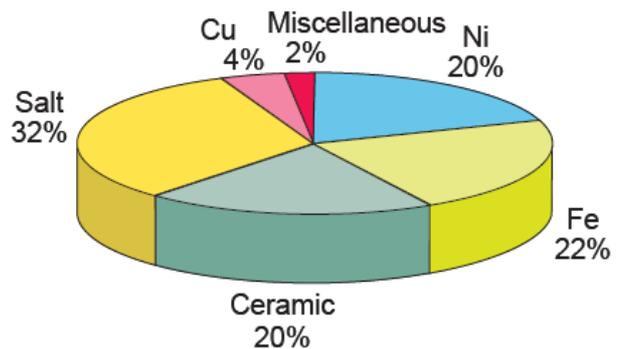
The ZEBRA® Battery technology has shown in laboratory tests that it provides a calendar life of more than 10 years and a cycle life of 1000-2000 nameplate cycles.

All components are designed for this duration. The extrapolation of real world operation results support this.

ZEBRA® cells fail low resistive so that the battery is cell failure tolerant, it can be operated with up to 10% of failed cells.

RECYCLING

ZEBRA® Batteries are 100% recycled. The recycling is included in the price. The battery material is used for stainless steel production, the nickel and iron content become part of the product and the salt and ceramic form the slag in a process consistent way.



Material of ZEBRA Cell Type ML3

APPLICATIONS

ZEBRA® Batteries are well suited for pure electric cars, vans and buses as well as for range extender type hybrid cars, hybrid vans and hybrid buses with ZEV range.

windgenerators and for load levelling.

Recently work is started to replace Lead acid batteries by **ZEBRA**[®] Batteries in submarines.

Data sheet of available battery types and accessories like chargers, display, multi battery server etc. are available.

LITERATUR

Cord-H. Dustmann, Roy C. Galloway: ZEBRA Battery Material Cost, Availability and Recycling. EVS-20, Long Beach, CA – Nov. 2003

A.v. Zyl, C.-H. Dustmann: Safety Aspects of ZEBRA High Energy Batteries evt95, Paris – Nov. 1995 p. 57

D. Tickett: Current Status of Health and Safety Issues of Sodium/Metal Chloride (ZEBRA) Batteries, National Renewable Energy Laboratory Report TP-460-25553 – 1998

Battery Technology Handbook, 2. Edition Ang 2003 Marcel Dekker mc ISBM 0-8247-4249-4,

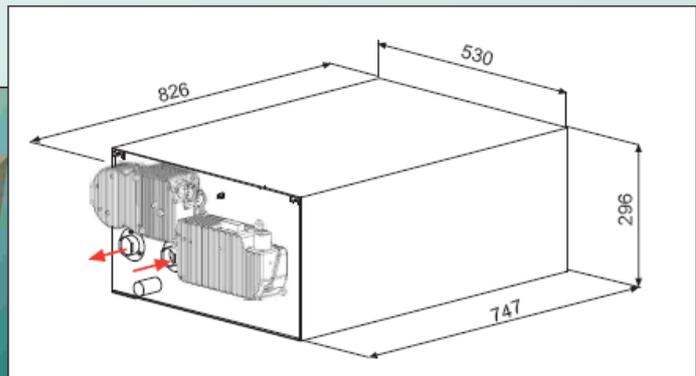
Cord -H. Dustmann: Advances in ZEBRA batteries Journal of Power Sources, 2003-09.039 ELSevier B.V.

ZEBRA Batteries are designed for electric and hybrid vehicles.
They use salt and nickel for electrode materials with a ceramic electrolyte.

Technical data Type	ZEBRA® Battery Z5				
		Z5-278-ML3X-64 <i>Id. No. 30x00006</i>	Z5-557-ML3X-32 <i>30x00007</i>	Z5-278-ML3X-76 <i>30x00129</i>	Z5-557-ML3X-38 <i>30x00131</i>
Capacity	Ah	64	32	76	38
Rated Energy	kWh	17.8	17.8	21.2	21.2
Open circuit voltage					
0 - 15% DOD	V	278	557	278	557
Max. regen. voltage	V	313	626	335	670
Min. op. voltage	V	186	372	186	372
Max. discharge current	A	224	112	224	112
Cell Type / N° of cells		ML3X / 216		ML3X/216	
Weight with BMI	kg	182		182	
Specific energy without BMI	Wh/kg	100		119	
Energy density without BMI	Wh/l	152		181	
Energy 2 h discharge	kWh	16		18.0	
Specific power	W/kg	179		169	
Power density	W/l	273		257	
Peak power	kW	30		30	
2/3 OCV, 30s, 335°C		80% DOD		70% DOD	
Ambient temperature	°C	-40 to +50		-40 to +50	
Thermal loss	W	< 105		< 105	
at 270°C internal temperature					
Cooling		air		air	
Heating time	h	24 h at 230 VAC BMI, Fan		24 h at 230 VAC BMI, Fan	
Periphery		HEV Application		EV Application	
On board generator					
MAX voltage, up to 70%SOC	V/Cell	2.7		n.a.	

System design recommendation:

- MES-DEA Charger
- Min. discharging time: 120 min.
- Max. degree of discharge: 80%



7.4 Hojas de Mathcad

Elevador

DATOS GENERALES

▶ **LAZO INTERNO DE CORRIENTE**

DEFINICIÓN DE LA PLANTA

▼ **BOOST LAZO DE CORRIENTE**

$V_e := 140$	Voltaje de entrada en voltios
$R_L := 0 \cdot 10^{-3}$	Resistencia de la inductancia en ohmios
$L_{\omega\omega} := 5 \cdot 10^{-3}$	Inductancia en Henrios
$R_C := 10 \cdot 10^{-3}$	Resistencia de la capacidad en ohmios
$C_{\omega\omega} := 500 \cdot 10^{-6}$	Capacidad en Faradios
$V_o := 270$	Voltaje de salida en voltios
$P_o := 10000$	Potencia de salida en vatios
$f_{sw} := 100 \cdot 10^3$	Frecuencia de switched
	Resistencia de salida en ohmios

$R_{\omega\omega} := \frac{V_o^2}{P_o}$	$T_c := \frac{1}{f_{sw}}$
$R = 7.29$	

$K_{modo} := \frac{2 \cdot L \cdot f_{sw}}{R}$	$K_{critica} := \left(1 - \frac{1}{\frac{V_o}{V_e}}\right) \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\frac{V_o}{V_e}}\right)\right]^2$
--	---

$K_{modo} = 137.174$ $K_{critica} = 0.129$

$$\omega_p := \frac{\left(2 \cdot \frac{V_o}{V_e} - 1\right)}{R \cdot C \cdot \left(\frac{V_o}{V_e} - 1\right)}$$

$$Deqboost := 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_o}{V_e}\right)}$$

$$Leqboost := \frac{L}{(1 - Deqboost)^2}$$

$$RLeqboost := \frac{RL}{(1 - Deqboost)^2}$$

$Deqboost = 0.481$

Si $K_{modo} > K_{critica}$ estamos en modo continuo
 En caso contrario estamos en modo discontinuo

Definición del módulo y la fase de G_{vd} en función de la frecuencia

$$MG_{id}(f) := 20 \cdot \log(|G_{id}(2i \cdot \pi \cdot f)|)$$

$$FG_{id}(f) := \begin{cases} \arg(G_{id}(2i \cdot \pi \cdot f)) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } \arg(G_{id}(2i \cdot \pi \cdot f)) < 0 \\ \arg(G_{id}(2i \cdot \pi \cdot f)) \cdot \frac{180}{\pi} - 0 & \text{if } \arg(G_{id}(2i \cdot \pi \cdot f)) > 0 \end{cases}$$

DEFINICIÓN DEL SENSOR

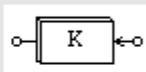
HALL EFFECT CURRENT SENSOR

GainK := 1

fpK := 500·10⁹

$$K(s) := \frac{\text{GainK}}{\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot \text{fpK}} + 1}$$

El usuario introducirá la ganancia del sensor de corriente, y en caso de utilizar un sensor de efecto hall, también indicará la posición del polo fpk.

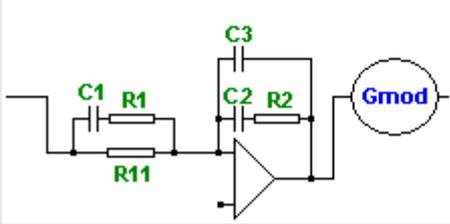


DEFINICIÓN DEL REGULADOR

TIPO 3

Gmod(s) := 1

R11 := 10·10³



La resistencia R11 será introducida por el usuario. Por defecto, se le dará un valor de 10000

CÁLCULO DEL LAZO ABIERTO SIN REGULADOR



$$A(s) := G_{\text{mod}}(s) \cdot G_{\text{id}}(s) \cdot K(s)$$

Definición del módulo y la fase de A en función de la frecuencia

$$f_{\text{mg}} := \sqrt{f_{\text{min}} \cdot f_{\text{max}}}$$

$$f_{\text{mg}} = 3.162 \times 10^3$$

$$A_f(f) := A(2i \cdot \pi \cdot f)$$

$$MA(f) := 20 \cdot \log(|A_f(f)|)$$

$$FA(f) := \begin{cases} \arg(A_f(f)) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (f < f_{\text{mg}}) \text{ En grados} \\ \arg(A_f(f)) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \leq 0) \\ \arg(A_f(f)) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \leq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \leq 0) \\ (-2 \cdot \pi + \arg(A_f(f))) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \leq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \geq 0) \\ (-2 \cdot \pi + \arg(A_f(f))) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (f > f_{\text{mg}}) \\ (-2 \cdot \pi + \arg(A_f(f))) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{if } (\text{Re}(A_f(f)) \geq 0) \cdot (\text{Im}(A_f(f)) \leq 0) \cdot \left(f > \frac{f_{\text{max}}}{2}\right) \end{cases}$$

ESPECIFICACIONES DEL REGULADOR



$$f_c := 10000$$

Frecuencia de corte en Hz

$$mf_{\text{min}} := \begin{cases} \frac{180}{\pi} \cdot \left(\arg(A(2i \cdot \pi \cdot f_c)) + \frac{\pi}{2} \right) & \text{if } \left(\arg(A(2i \cdot \pi \cdot f_c)) + \frac{\pi}{2} \right) > 0 \\ 0 & \text{if } \left(\arg(A(2i \cdot \pi \cdot f_c)) + \frac{\pi}{2} \right) \leq 0 \end{cases}$$

$$mf_{\text{min}} = 0$$

$$mf := 50$$

CÁLCULO DEL REGULADOR

TIPO 3 POR EL MÉTODO DE LA K

$$K_j := \tan \left[\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{mf \cdot \pi}{180} - \frac{FA(fc) \cdot \pi}{180} \right) \right]$$

$$C2_3 := \left| \frac{A(2i \cdot \pi \cdot fc)}{2 \cdot \pi \cdot fc \cdot (R11)} \cdot K_j^2 \right| \quad C3 := \frac{C2_3}{K_j^2} \quad C2 := C2_3 - C3 \quad C23 := \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}$$

$$R2 := \frac{K_j}{2 \cdot \pi \cdot fc \cdot C2} \quad R1 := \frac{R11}{K_j^2 - 1} \quad C1 := \frac{K_j}{2 \cdot \pi \cdot (R1 + R11) \cdot fc}$$

$$K_j = 5.62 \quad R1 = 326.971 \quad C1 = 8.661 \times 10^{-9}$$

$$R11 = 1 \times 10^4 \quad R2 = 25.725 \quad C2 = 3.477 \times 10^{-6}$$

$$C3 = 1.137 \times 10^{-7}$$

$$fz1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C2} \quad fp1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C23} \quad fi := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (C2 + C3) \cdot R11}$$

$$fz2 := fz1$$

$$fp2 := fp1$$

$$fz1 = 1.779 \times 10^3$$

$$fp1 = 5.62 \times 10^4$$

$$fi = 4.432$$

Forward

1. Datos y Función de transferencia de la Planta.

1.1. Etapa de potencia

$V_i := 270$		Tensión de entrada	
$V_o := 28$		Tensión de salida	$N1 := 10$
$L_f := 500 \cdot 10^{-6}$		Inductancia reductora	
$P_o := 5000$			
$R_c := \frac{V_o^2}{P_o}$	$R_c = 0.157$	Resistencia de carga	$N2 := 2$
$C_o := 47 \cdot 10^{-6}$		Condensador de salida	
$R_o := 0$		Resistencia serie equivalente del condensador	
$f := 990$	$I_o := \frac{28}{R_c} = 178.571$	Relacion de vueltas	
		Frecuencia de red	

1.2. Circuito de Control

$f_s := 100 \cdot 10^3$	$T_s := \frac{1}{f_s}$	Frecuencia de conmutación	
$V2 := 1$		Tensión máxima de la rampa de referencia	Cambiamos el valor de pico de la rampa
$V_{off} := 0$		Valor de offset de la rampa	
$T_r := 9.9 \cdot 10^{-6}$		Tiempo de subida de la rampa	Cambiamos el tiempo de subida de la ramapa
$K_{err} := 1995$		Ganancia máxima (Escala natural)	
$R_{op} := 100 \cdot 10^3$		Resistencia polo	$\frac{1}{T_r} = 1.01 \times 10^5$
$C_{op} := 1600 \cdot 10^{-12}$		Condensador polo	
$V_{ref} := 2$		Tensión de referencia	

2. Punto de trabajo

Corriente media en la bobina del reductor y tensión de salida

$$V_o = 28$$

$$I_l := \frac{V_o}{R}$$

$$I_l = 178.571$$

Ciclo de trabajo

$$D := \frac{V_o \cdot N1}{V_i \cdot N2}$$

$$D = 0.519$$

Tensión de salida del regulador, V_{comp}

$$V_{comp} := V_{off} + \frac{(V2 - V_{off}) \cdot T_s \cdot D}{T_r}$$

$$V_{comp} = 0.524$$

$$V_{pwm} := \frac{V_{comp}}{V2 - V_{off}} \cdot \frac{T_r}{T_s}$$

$$V_{pwm} = 0.519$$

Condición inicial para el condensador C11

$$I_{C_C11} := V_{ref} - V_{comp} \left(1 + \frac{1}{K_{err}} \right)$$

$$I_{C_C11} = 1.476$$

3. Funciones de transferencia

3.1. DEFINICIÓN DE IMPEDANCIAS

Condensador de salida

$$Z_{co}(s) := R_o + \frac{1}{s \cdot C_o}$$

Inductancia del reductor

$$Z_f(s) := s \cdot L_f$$

Impedancia conectada a la salida

$$Z_o(s) := \frac{1}{\frac{1}{Z_{co}(s)} + \frac{1}{R}}$$

3.2 BARRIDO EN FRECUENCIA

$$f_{min} := 10$$

$$f_{max} := 1000 \cdot 10^3$$

$$N_p := 100$$

Nº de puntos

$$i := 0..N_p$$

$$f_i := f_{min} \cdot 10^{\frac{i}{N_p} \cdot \log\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)}$$

Barrido logarítmico de N_p puntos entre $f_{mín.}$ y $f_{máx.}$

3.3 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

3.3.1 Planta modelo promediado

$$FDT(s) := V_i \frac{N_2}{10} \cdot \left(\frac{R}{s^2 \cdot R \cdot L_f \cdot C_o + s \cdot L_f + R} \right)$$

$$M_FDT(f) := 20 \cdot \log(|FDT(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)|)$$

$$F_FDT(f) := \arg(FDT(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

3.3.2 Modulador PWM

Función de transferencia señal pwm respecto de V_{comp} (salida del regulador)

$$Mod(s) := \frac{1}{V_2 - V_{off}} \cdot \frac{T_r}{T_s}$$

+

3.3.3 Amplificador de error

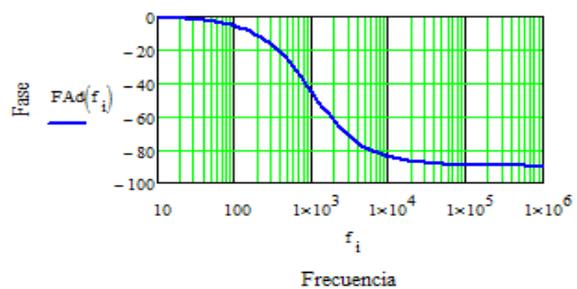
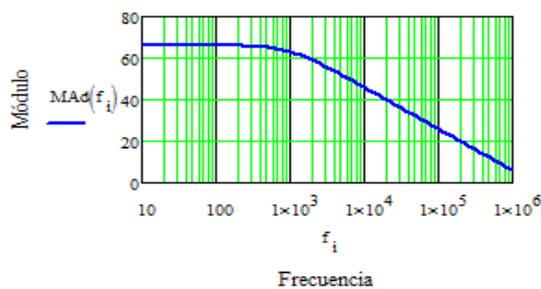
$$Ad(s) := \frac{K_{err}}{1 + s \cdot R_{op} \cdot C_{op}}$$

Función de transferencia

$$MAd(f) := 20 \cdot \log(|Ad(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)|)$$

$$FAd(f) := \arg(Ad(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Amplificador de error



3.3.3 Función de Transferencia de todo el lazo sin el regulador.

Divisor resistivo para el sensado de la tensión

$$R_b := 10 \cdot 10^3$$

$$R_b = 1 \times 10^4$$

$$R_a := \frac{(V_o - V_{ref}) \cdot R_b}{V_{ref}}$$

$$R_a = 1.3 \times 10^5$$

$$K_v := \frac{R_a}{R_b + R_a}$$

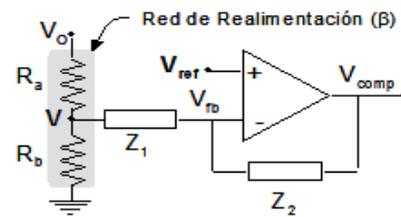
$$K_v := -1$$

$$A(f) := \text{FDT}(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) \cdot \text{Mod}(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) \cdot K_v$$

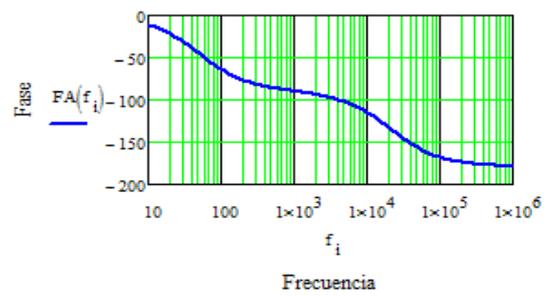
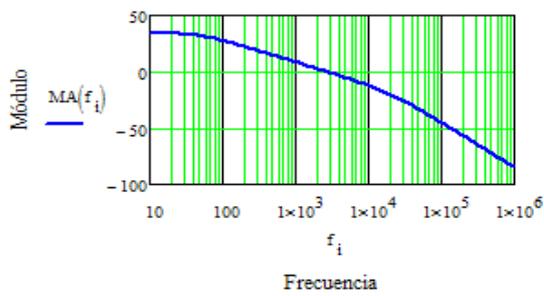
$$MA(f) := 20 \cdot \log(|A(f)|)$$

$$FA(f) := \arg(A(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Fase en grados



Función de transferencia de todo el lazo sin el regulador



3.4 CÁLCULO DEL REGULADOR TIPO 3.

MF := 50	Margen de Fase mínimo	$\phi := -\pi + MF \cdot \frac{\pi}{180}$
fb := 5000	Valor supuesto para la frecuencia de cruce	
T_fb := -20		
T_fed := 50		
fb = 1 × 10⁵		+
R11 := 10 · 10³		

3.4.1 Obtención de los valores iniciales para la iteración, mediante método de la "K"

Relación de frecuencias

(Criterio fz=fc/k, fp2=fc.K)

$$K := \tan \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{MF \cdot \pi}{180} - \frac{FA(fb) \cdot \pi}{180} \right) \right]$$

K = 1.776

Cálculo de las capacidades y resistencias

$$C2_3 := \left| \frac{A(fb)}{2 \cdot \pi \cdot fb \cdot R11} \cdot K^2 \right| \quad C3 := \frac{C2_3}{K^2} \quad C2 := C2_3 - C3 \quad C23 := \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}$$

$$R2 := \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot fb \cdot C2} \quad R1 := \frac{R11}{K^2 - 1} \quad C1 := \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot (R1 + R11) \cdot fb}$$

$$f1k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot (R1 + R11)} \quad f2k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C2} \quad f1k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1} \quad f2k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C23} \quad f1k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R11 \cdot C2_3}$$

$$f1k = 2.815 \times 10^3 \quad f2k = 2.815 \times 10^3 \quad f1k = 8.882 \times 10^3 \quad f2k = 8.882 \times 10^3 \quad f1k = 3.041 \times 10^3$$

3.4.3 Soluciones para el regulador que proporcionan los tres métodos.

Funciones para el regulador calculado con los métodos "k", "α y β"

Método de la "K".

$$Tk(f) := T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})$$

$$dB Tk(f) := 20 \cdot \log(|Tk(f)|)$$

$$FTk(f) := \begin{cases} \left(FT(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k}) \cdot \frac{180}{\pi} \right) & \text{if } (\operatorname{Re}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \geq 0) \cdot (\operatorname{Im}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \leq 0) \\ \left(FT(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k}) \cdot \frac{180}{\pi} \right) & \text{if } (\operatorname{Re}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \leq 0) \cdot (\operatorname{Im}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \leq 0) \\ \left(FT(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k}) \cdot \frac{180}{\pi} - 360 \right) & \text{if } (\operatorname{Re}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \leq 0) \cdot (\operatorname{Im}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \geq 0) \\ \left(FT(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k}) \cdot \frac{180}{\pi} \right) & \text{if } (\operatorname{Re}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \geq 0) \cdot (\operatorname{Im}(T(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})) \geq 0) \end{cases}$$

$$Rk(f) := R(f, \xi_k, \zeta_{1k}, \zeta_{2k}, \phi_{1k}, \phi_{2k})$$

$$dB Rk(f) := 20 \cdot \log(|Rk(f)|)$$

$$FRk(f) := \arg(Rk(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Regulador de tipo 3 obtenido, método K.

$$Z2(s) := \frac{(1 + s \cdot R2 \cdot C2)}{(C2 + C3) \cdot s \left(1 + s \cdot R2 \cdot \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3} \right)}$$

$$C2 = 3.575 \times 10^{-9}$$

$$Z1(s) := \frac{R11 \cdot (1 + R1 \cdot C1 \cdot s)}{1 + (R11 + R1) \cdot C1 \cdot s}$$

$$Y(s) := \frac{Z1(s)}{Z2(s) + Z1(s)}$$

$$G2(s) := \frac{Z2(s)}{Z1(s)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Ad(s)} \cdot \frac{1}{Y(s)}}$$

$$G1(s) := \left(1 + \frac{Z2(s)}{Z1(s)} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Ad(s)} \cdot \frac{1}{Y(s)}}$$

$$R1 = 522.175 \quad R2 = 2.769k\Omega$$

$$C1 = 13.68nF \quad C2 = 51.61nF \quad C3 = 2.695nF$$

8. Bibliografía y referencias

Libros

[1] Nigel Sammes, "Fuel Cells Technology: reaching towards comercializacion", Springer, 2006.

Artículos

[2] Sergio Hontiyuelo García, "Especial pilas de combustible de hidrógeno", Tecnociencia, 2005. (<http://www.tecnociencia.es/especiales/hidrogeno/introduccion.htm>)

[3] Pila de combustible (http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible)

[4] Pedro Gomez Romero, "Pilas de Combustible. Energía sin Humos" , Mundo científico, p.66, 2002. (<http://www.cienciateca.com/fuelcells.html>)

[5] Carlos Bordóns Alba, "Modelado y control de sistemas basados en pilas de combustible", Jornadas de Ingeniería de Control, 2007.

[6] M. Farooque and H.C. Maru , "Fuel Cells. Clean and efficient Power Generators" , FuelCel Energy, 2006.

[7] Luis Navedo, "Biogas fuel cells". Congreso Nacional del Medio Ambiente (Conama) (http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/SDs/SD24/SD24_ppt_Luis_Navedo.pdf)

[8] Carlos Sousa, "Vehículos eléctricos de pila de combustible", Ageneal, Agencia Municipal de Energía de Almada, 2006.

- [9] N. Bundschuh, J. Dollmayer, U. B. Carl, "A comparison of solid oxide fuel cell designs as energy source for the all electric aircraft", Aerospace Science and Technology, 2006
- [10] Joe Breit and Joanna Szydlo-Moore, "Fuel cells for Commercial Transport Airplanes. Needs and Opportunities", Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.
- [11] A. Emadi and M. Ehsani , "Aircraft Power Systems", Vehicular Electric Power Systems, 2004.
- [12] Dr. Mohamad H. Taha , "Power Electronics for aircraft application", Issue , 2006.
- [13] P.J.H. Wingelaar, J.L. Duarte and M.A.M , "Dynamic characteristics of PEM fuel cells. Hendrix. Eindhoven University of Technology" Electrical Engineering, 2006.
- [14] Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy.
(<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>)