

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Diseño, mediante simulación, de un sistema de carga de batería embarcada en un vehículo eléctrico basado en energía fotovoltaica

Autor: Jesús Vergara Falcón

Tutores: Sergio Vázquez Pérez, Juan Manuel Carrasco Solís

**Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño, mediante simulación, de un sistema de carga de batería embarcada en un vehículo eléctrico basado en energía fotovoltaica

Autor:

Jesús Vergara Falcón

Tutor:

Juan Manuel Carrasco Solís

Sergio Vázquez Pérez

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo de Fin de Grado: Diseño, mediante simulación, de un sistema de carga de batería embarcada en un vehículo eléctrico basado en energía fotovoltaica

Autor: Jesús Vergara Falcón

Tutores: Juan Manuel Carrasco Solís,
Sergio Vázquez Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mis padres, por haber hecho posible lo que ellos una vez soñaron para mí.

A todos aquellos que me enseñaron a descubrir el mundo y me ayudaron a no perder la curiosidad.

Agradecimientos

A todo el profesorado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

A mis tutores, Juan Manuel Carrasco Solís y Sergio Vázquez Pérez, por ser mis guías desde que empecé a desarrollar este proyecto de fin de carrera. También por la paciencia y apoyo que me han prestado durante la realización de este trabajo.

A mis familiares, por todo el apoyo emocional que me han proporcionado desde el primer instante.

Jesús Vergara Falcón

Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Sevilla, 2022

Resumen

Como parte de la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles y ante la inevitable electrificación de vehículos a motor que se avecina en las próximas décadas, se ha investigado un sistema de carga de baterías incorporado en el propio vehículo que emplea energía solar fotovoltaica.

Para desarrollar las simulaciones, se ha partido de una serie de artículos de investigación, que resumen la investigación desarrollada por diferentes organismos públicos y privados, en los que se abordan una serie de retos y características propios de un sistema de carga mediante energía fotovoltaica, generada directamente en el vehículo. Este sistema, compuesto de paneles fotovoltaicos y convertidores de potencia, realiza una carga de la batería a partir de varios paneles fotovoltaicos.

El sistema, que tiene una pareja de convertidores en cascada, uno elevador y otro flyback, se ha diseñado para minimizar las pérdidas, con un rendimiento superior al 90%. Cada panel dispone de su propia pareja de convertidores, y todos se unen en el nodo de la batería. Esto se ha hecho para evitar que la célula fotovoltaica más débil arrastre su corriente al resto del sistema, con el fin de reducir las pérdidas de potencia en caso de sombreado parcial.

Se han analizado las magnitudes fundamentales a la hora de estudiar un sistema de generación eléctrica, como son las tensiones o voltajes, las corrientes o la potencia medida en cada uno de los nodos de entrada y salida, que se han impuesto como especificaciones. Además de estas, se ha tomado en cuenta el rizado de tensión y de corriente que se da en el sistema. También se ha diseñado una máquina de estados con el fin de que la batería cargue con una técnica mixta CC-CV y los convertidores puedan funcionar correctamente, ya que es necesario arrancarlos previamente.

Una vez analizado el sistema y obtenidos los resultados, se comparan ciertos valores medidos en los experimentos con los valores teóricos obtenidos en el apartado de diseño, para decidir si el sistema cumple o no las especificaciones dadas.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | IX |
| Resumen | XI |
| Índice | XIII |
| Índice de Tablas | XV |
| Índice de Figuras | XVII |
| Notación | XXXV |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Tecnologías fotovoltaicas</i> | 2 |
| 1.2 <i>Baterías</i> | 3 |
| 1.3 <i>Convertidores de potencia</i> | 4 |
| 1.4 <i>Posibles usos del sistema panel-convertidor-batería</i> | 5 |
| 2 Estado del arte..... | 7 |
| 2.1 <i>Estudio de la extensión de la autonomía de un EV utilizando energía fotovoltaica</i> | 8 |
| 2.1.1 <i>SPV1020 y su uso para control MPPT</i> | 12 |
| 2.2 <i>Vehículo eléctrico de alimentación por batería y energía fotovoltaica</i> | 13 |
| 2.3 <i>Estrategia CC-CV de carga de baterías</i> | 18 |
| 2.4 <i>Cargador de baterías para un EV con alto factor de potencia</i> | 21 |
| 2.5 <i>Información sobre la carga de celdas paralelas de baterías y su protección</i> | 24 |
| 2.6 <i>Estudio del rendimiento de células fotovoltaicas con sombreado parcial o total</i> | 26 |
| 2.6.1 <i>Modelado del sombreado en el techo de un vehículo</i> | 26 |
| 2.6.2 <i>Cómo afectan las sombras parciales a la potencia generada por un panel fotovoltaico</i> | 28 |
| 3 Descripción del sistema | 35 |
| 3.1 <i>Panel fotovoltaico</i> | 35 |
| 3.1.1 <i>Control MPPT</i> | 36 |
| 3.2 <i>Batería</i> | 38 |
| 3.3 <i>Convertidores</i> | 39 |
| 3.3.1 <i>Diseño del convertidor elevador</i> | 40 |
| 3.3.2 <i>Diseño del convertidor flyback</i> | 42 |
| 3.4 <i>Estados de funcionamiento del sistema</i> | 45 |
| 3.5 <i>Controladores de los convertidores</i> | 48 |
| 3.5.1 <i>Convertidor elevador</i> | 48 |
| 3.5.2 <i>Convertidor Flyback</i> | 51 |
| 3.6 <i>Resumen de características del sistema</i> | 52 |
| 4 Pruebas del sistema..... | 53 |
| 4.1 <i>Pruebas del convertidor elevador</i> | 53 |
| 4.1.1 <i>Pruebas con tensión de entrada fija</i> | 53 |
| 4.1.2 <i>Pruebas del convertidor elevador con referencia fija de corriente</i> | 57 |
| 4.2 <i>Prueba del convertidor flyback para tensión de entrada fijada a 35 V</i> | 64 |
| 4.3 <i>Conclusiones</i> | 68 |
| 5 Simulaciones del sistema | 69 |
| 5.1 <i>Condiciones de las pruebas del sistema paneles-convertidores-batería</i> | 69 |
| 5.2 <i>Pruebas de carga de la batería CC-CV</i> | 70 |
| 5.2.1 <i>Irradiancia de 1000 W/m²</i> | 70 |
| 5.2.2 <i>Irradiancia de 800 W/m²</i> | 83 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.3 | Irradiancia de 500 W/m ² | 95 |
| 5.2.4 | Irradiancia de 300 W/m ² | 108 |
| 5.3 | <i>Pruebas del control a tensión constante</i> | 120 |
| 5.3.1 | Irradiancia de 1000 W/m ² | 121 |
| 5.3.2 | Irradiancia de 800 W/m ² | 130 |
| 5.3.3 | Irradiancia de 500 W/m ² | 140 |
| 5.3.4 | Irradiancia de 300 W/m ² | 150 |
| 6 | Conclusiones | 161 |
| 6.1 | <i>Rendimiento del sistema</i> | 161 |
| 6.2 | <i>Potencia máxima generada vs potencia máxima de carga</i> | 162 |
| 6.3 | <i>Cumplimiento de las especificaciones del sistema</i> | 164 |
| 6.4 | <i>Tensiones y corrientes de estrés</i> | 166 |
| 6.5 | <i>Conclusión</i> | 168 |
| | Referencias | 169 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1-1. Eficiencia de tecnologías fotovoltaicas basadas en silicio. | 2 |
| Tabla 1-2. [3] Especificaciones de las baterías de distintos modelos de vehículos eléctricos. | 4 |
| Tabla 2-1. Datos del panel fotovoltaico del modelo del proyecto de la Universidad de Surrey. | 9 |
| Tabla 2-2. Datos del circuito integrado SPV1020, que implementa un convertidor elevador. | 12 |
| Tabla 2-3. Características de distintos elementos del circuito | 14 |
| Tabla 2-4. Características de los elementos que forman parte del convertidor flyback anterior. | 18 |
| Tabla 2-5. [5] Características de una célula fotovoltaica Blue Chip empleada para el estudio. | 28 |
| Tabla 2-6. [5] Ángulo respecto a la horizontal de la hilera central de cada una de las filas de células PV (β) | 30 |
| Tabla 2-7. [5] Área efectiva de cada célula fotovoltaica para los ángulos de incidencia entre 38° y 44° | 31 |
| Tabla 2-8. [5] Potencia generada por cada célula fotovoltaica para los ángulos de incidencia entre 38° y 44° | 31 |
| Tabla 2-9. [5] Potencia calculada para el supuesto de conexión en serie total y en paralelo total de células PV y diferencia en las pérdidas existentes por las sombras debidas a la incidencia de radiación. | 32 |
| Tabla 3-1. Características de una célula fotovoltaica SunPower C60 | 36 |
| Tabla 3-2. Características de un panel fotovoltaico formado por las células fotovoltaicas anteriores. | 36 |
| Tabla 3-3. [17] Características de una celda de batería Panasonic CGR18650CG | 39 |
| Tabla 3-4. Resumen de las características del sistema de carga de baterías mediante paneles fotovoltaicos. | 52 |
| Tabla 6-1. Rendimiento de los convertidores en una rama del sistema, hallado a partir de las medidas de potencia generada y potencia de carga en los experimentos del apartado anterior. | 162 |
| Tabla 6-2. Tensión de máxima potencia calculada en los experimentos mediante algoritmo MPPT y rizados de tensión de panel PV en valor absoluto y relativo, según la irradiancia. | 164 |
| Tabla 6-3. Resultados experimentales del valor medio y rizados de la corriente de entrada del convertidor elevador, según la irradiancia. | 165 |
| Tabla 6-4. Resultados experimentales del valor medio y rizados de la corriente de entrada del <i>flyback</i> . | 166 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1. [1] Evolución de la eficiencia de diferentes tecnologías fotovoltaicas hasta el año 2010. 2
- Figura 1-2. [2] Evolución de la eficiencia alcanzada por diferentes tecnologías fotovoltaicas hasta 2020. Destaca la tecnología multiunión con concentración de rayos solares, con una eficiencia del 46%, aunque por razones de coste se va a emplear silicio monocristalino de alta eficiencia. 3
- Figura 2-1. [4] Fotografía del Sono Sion, uno de los prototipos de BEV propulsado por energía fotovoltaica. Como se deja ver en la fotografía, buena parte de la superficie de este automóvil está cubierta de paneles fotovoltaico, que sirven de fuente de energía para alimentar los sistemas del vehículo, cuando sea posible. 7
- Figura 2-2. [5] Este Toyota Prius ha sido modificado con paneles fotovoltaicos con el fin de investigar el alcance que podría tener esta tecnología para sortear algunas limitaciones propias de los vehículos eléctricos. 8
- Figura 2-3. [6] Este es el panel fotovoltaico instalado en el Nissan Leaf, pensado más como un extra que como un sistema de generación de energía para la alimentación del motor y/o batería principal. Su fin es generar electricidad para mantener en funcionamiento sistemas auxiliares del vehículo, conectados a una batería de reserva de 12V que entraría en funcionamiento si la batería principal estuviera desconectada. 8
- Figura 2-4. Esquema del sistema de alimentación fotovoltaica de la batería de este EV experimental. Como todas las células fotovoltaicas han sido conectadas en serie, cada panel se conecta a su convertidor de forma independiente. El controlador de cada uno aplica el algoritmo MPPT y el control de tensión y corriente de la batería, según el modo de carga. 9
- Figura 2-5. Resultados del estudio de la extensión de la autonomía para distintos escenarios y meses del año. El número de kilómetros adicionales es mayor en los meses de verano que en los de invierno, pasando de apenas 6 o 7 km en diciembre a los más de 30 km adicionales del mes de julio, si se toma en cuenta el escenario A. El escenario A corresponde al vehículo estacionado sin sistemas auxiliares activados, con el panel trasero desplegado, el B igual que el A, pero sin panel trasero. El escenario C representa los que puede realizar el vehículo circulando con el panel trasero desplegado, con los sistemas auxiliares activados. Finalmente, el D representa el vehículo circulando con solo tres paneles generando electricidad, en las mismas condiciones de consumo que el escenario C. 10
- Figura 2-6. Curvas de eficiencia calculadas en función de la potencia generada, para un panel sin sombra, con 1000 W/m^2 de irradiancia, y otro con sombra parcial, con una irradiancia aproximada de 500 W/m^2 . Se puede observar que, en la mayoría de los casos, el valor de la eficiencia queda comprendido entre el 85% y el 90%. 10
- Figura 2-7. Validación experimental del modelo de paneles fotovoltaicos. La mayor diferencia entre el modelo teórico y el experimental se da para irradiancias inferiores a 800 W/m^2 y esto ocurre, sobre todo, para tensiones cercanas al valor de circuito abierto. 11
- Figura 2-8. Resultados de la potencia generada en las simulaciones y en las pruebas reales. La potencia generada en las simulaciones es mayor que la de las pruebas, con unos 160 W de máximo valor para las simulaciones con efectos de la temperatura. En los experimentos esta apenas llega a un máximo de 130 W. 11
- Figura 2-9. Resultados del estado de carga de la batería para las simulaciones y para la prueba real. El resultado de la simulación con efectos térmicos es similar al de la prueba. La carga llega al 66% al final de la prueba real, un valor que no queda muy lejos del casi 70% de la simulación en condiciones estándar. 11
- Figura 2-10. Esquema del circuito SPV1020. Emplea transistores MOSFET y MPPT P&O, como el sistema de convertidores que se va a diseñar. El esquema de este integrado es similar al de un convertidor elevador. 12

Figura 2-11. Esquema del circuito de este EV experimental con un sistema de alimentación eléctrica híbrida por batería y generación fotovoltaica. El convertidor empleado que une los sistemas eléctricos con la batería es del mismo tipo que el que los conecta con el grupo de paneles fotovoltaicos, de tipología elevadora, pero bidireccional. Esto permite la carga de la batería con la potencia generada sobrante, si el balance es positivo. Los transistores empleados son, nuevamente en este segundo desarrollo, transistores MOSFET. 14

Figura 2-12. Sistema de control de los sistemas eléctricos de este vehículo. Se diferencian dos etapas en los controladores, una de supervisión de la generación de energía y otra de control de corriente, realizada a partir de controladores PI. La etapa de gestión de energía genera dos referencias de corriente, para el panel PV y la batería a partir de los datos de tensión y corriente medidos en varios nodos de entrada y salida del sistema. 15

Figura 2-13. Esquema de la etapa de gestión de energía, que, a partir de las corrientes $i_{Sources}$ e i_{PV} medidas, determina el peso de la corriente de la batería o de la generada por panel PV según el parámetro K_R , así como el modo de funcionamiento de la batería, en carga o descarga según la corriente que demande el sistema. 16

Figura 2-14. Esquema del controlador MPPT por lógica difusa. Este controlador da directamente la corriente de referencia de salida del panel fotovoltaico calculada buscando maximizar la potencia generada. La entrada se calcula mediante la potencia generada y la tensión del panel fotovoltaico. 17

Figura 2-15. Resultados de uno de los experimentos realizados con este sistema. En (a) se muestra la potencia generada por el panel fotovoltaico, que varía según la irradiancia. En (b) se compara esta potencia con la de la batería y con la demandada por el sistema. En (d) y (e), se observa la corriente del panel y de la batería carga, respectivamente. En (b) se confirma que, si la potencia generada es mayor que la consumida, la batería carga. 17

Figura 2-16. Esquema del circuito estudiado, formado por dos fuentes de tensión y un convertidor flyback. La fuente de tensión de la derecha es la celda de la batería que se va a cargar en estos experimentos. 18

Figura 2-17. Esquema del controlador PI implementado en el sistema, mostrado con forma paralela. En este esquema, e es el error, K_p es la constante proporcional y K_i la constante integral. Estos parámetros se fijarían con un algoritmo PSO. 19

Figura 2-18. En este esquema se muestran las dos zonas diferenciadas de la estrategia de carga CC-CV. En verde, se muestra la corriente de carga de la batería, que permanece constante en el modo CC hasta que se alcanza la tensión de referencia en el modo CV, luego disminuye progresivamente hasta que esta se llena. La tensión se muestra en rojo, y es ascendente, desde un valor mínimo, durante el modo de carga CC. 19

Figura 2-19. Esquema del circuito con el controlador. Ambos modos de carga emplean controladores PI, con la diferencia de que el controlador de CC emplea el error de la corriente medida en la salida y el controlador CV emplea el error de tensión. Las condiciones del PWM están invertidas en ambos controladores. 20

Figura 2-20. Resultados del experimento de carga con la técnica de carga CC-CV. A la izquierda se observan los valores de tensión y corriente de la entrada, mientras que a la derecha se observan los valores de tensión y corriente de la salida. Las gráficas inferiores representan las tensiones de estrés para los semiconductores. 20

Figura 2-21. Gráficas de tensión y corriente de la batería, a la salida del convertidor. A la izquierda, gráfica de la tensión de carga de la batería, donde se diferencian una zona ascendente (modo CC) y otra constante (modo CV). La tensión en la zona creciente no es lineal. A la derecha, la gráfica representa la corriente, que fuera de la zona constante (modo CC) desciende progresivamente (modo CV) hasta que se finaliza el experimento cuando la carga llega al máximo. 21

Figura 2-22. Esquema general del circuito, conformado por un convertidor reductor-elevador y un flyback. El flujo de energía iría de la red eléctrica a la batería, que puede tener una tensión menor a esta. Los controladores de tensión y corriente mostrados abajo son de tipo PI, ya controlen tensión o corriente. 21

- Figura 2-23. Arriba, los tres estados de funcionamiento en régimen permanente del convertidor reductor-elevador. Este, a diferencia del proyectado para la carga de baterías de EV, funciona en modo de conducción discontinua, por lo que tiene una tercera fase, aparte de la de carga y la de descarga de la bobina, en la que no circula corriente por la bobina ni por los elementos de conmutación. Abajo, se detallan las gráficas propias de un convertidor reductor-elevador funcionando en este modo de conducción. 22
- Figura 2-24. Resultados de las tensiones y corrientes de entrada del convertidor reductor-elevador y salida del flyback en la izquierda. Estos resultados corresponden a: Tensiones y corrientes de la red eléctrica, en los canales 1 y 2, y tensión y corriente de batería en los canales 3 y 4 (a), y tensiones y tensión del DC-link en la derecha, medida en el canal 3 en (b). 23
- Figura 2-25. Detalle de las tensiones y corrientes de estrés de diodos y transistores del convertidor *Buck-Boost*. Las tensiones alcanzan los 580V en el MOSFET, mientras que se alcanza una corriente de 35 A en los diodos. 23
- Figura 2-26. De esta gráfica, únicamente importan las corrientes de pico del inductor, en el canal 3, de 25 A. Para el inductor del convertidor que rectifica y reduce/aumenta las tensiones negativas, en el canal 4 se observan valores similares a los vistos para el canal 3. 24
- Figura 2-27. Sistema de carga de baterías mediante paneles fotovoltaicos, con una fase de control que fija el duty cycle mediante algoritmo MPPT, que toma tensión y corriente de salida de los paneles fotovoltaicos y fija una corriente de referencia para la bobina. Las baterías son celdas en paralelo con elementos de protección. 24
- Figura 2-28. Esquema de n baterías en paralelo, que puede servir para representar la distribución de las hileras de celdas en paralelo de una batería de vehículo eléctrico. La tensión de cada batería puede ser la de varias baterías en serie. 25
- Figura 2-29. Esquema del algoritmo MPPT de Hill-Climbing con degradación en caso de alcanzarse una corriente en la salida del convertidor con un valor mayor que la máxima que aguanta la batería. Este algoritmo tiene un diagrama de flujos similar al que se encontraría en cualquier MPPT, se ejecutaría en bucle y en cada iteración realiza la carga de variables anteriores y calcula errores, con el fin de compararlos y generar un incremento en la referencia o un decremento para acercar los valores al punto de máxima potencia. 25
- Figura 2-30. [13] Modelo 3D de ejemplo del techo de un automóvil de turismo. El estudio de las sombras se ha realizado para una superficie de 2,04 m² planos, 1,82 m² proyectados y un factor de corrección de curvatura de 0,782. Este último concepto se desarrollará más adelante. 26
- Figura 2-31. [14] Modelo de ejemplo del entorno inmediato al vehículo. Se suele tener en cuenta para esto numerosas variables y datos, como la incidencia de radiación directa, la reflectividad del material y la proyección de sombras, entre otros. 27
- Figura 2-32. [13] Perfil de radiación de una superficie curva, en azul, comparado con el de una plana, en verde. La radiación incide en una superficie convexa con más frecuencia si el ángulo de incidencia queda comprendido entre 20° y 45°, mientras que, para ángulos de incidencia superiores a 60°, la frecuencia de incidencia desciende respecto a la de una superficie plana. 27
- Figura 2-33. [14] Comparación del factor de curvatura con los valores del factor de corrección. Este se ha calculado para el entorno urbano de cuarenta y siete capitales de provincia de Japón, en función de parámetros como la reflexión de la luz o longitudes y ángulos de la sombra proyectada. 27
- Figura 2-34. [14] Ejemplo de experimento para modelado de incidencia de la luz en el techo de un EV. Este experimento se emplea para cuantificar la incidencia de radiación luminosa sobre la superficie para distintos ángulos y orientaciones de esta. Se obtendrían un total de diez puntos de operación al incluir luz cenital. 28
- Figura 2-35. [5] Esta es la disposición habitual de las células fotovoltaicas en el techo del vehículo. Estas células fotovoltaicas son flexibles y se adaptan a la forma de la superficie donde se instalan. Dado el limitado espacio existente, se han instalado un total de cuarenta y cinco celdas, organizadas en nueve filas y cinco hileras. La superficie no puede aprovecharse en su totalidad. 29

- Figura 2-36. [15] Este esquema muestra la distribución típica de las sombras en un panel fotovoltaico curvado de forma convexa. Únicamente se está teniendo en cuenta la incidencia de radiación directa, con la fuente de luz situada en una de las esquinas. Como resultado, una de las esquinas se sombreará inevitablemente, dejando sombras, totales y parciales, sobre parte del conjunto de paneles. 29
- Figura 2-37. [5] Gráfica que compara el área efectiva estudiada (porcentaje de área expuesta a la radiación) de cada una de las células fotovoltaicas en función del ángulo de incidencia de los rayos solares (α). Como se observa, para ángulos de incidencia cercanos a 0° o a 180° , algunas células fotovoltaicas no reciben radiación o reciben muy poca, mientras que los ángulos de incidencia más altos (situados en el centro con una ligera desviación por la inclinación del techo) suponen una mayor llegada de radiación a todas las células fotovoltaicas, especialmente las que están en el centro. 30
- Figura 2-38. [5] Esquema simplificado del entorno del experimento realizado en las inmediaciones de la Universidad de Oulu. Se diferencia claramente la zona arbolada de la zona con edificaciones, que tienen menor influencia en la variación de la irradiancia, pero también contribuyen a su reducción. 32
- Figura 2-39. [5] Resultados del experimento de medida de la irradiancia en un entorno real realizado por la Universidad de Oulu. Los valores aquí mostrados son los valores máximo y mínimo de la irradiancia tomados durante el experimento en condiciones reales, y confirma que el entorno es el más importante de los factores que afectan negativamente a un sistema de generación de electricidad a partir de energía fotovoltaica. Las mayores diferencias de irradiancia son del 85%, algo que se observa especialmente durante los 20 primeros segundos, correspondientes a la zona comprendida entre la Universidad y el Estacionamiento. 33
- Figura 3-1. Esquema completo del sistema paneles-convertidores-batería. Los datos de este circuito, que son las capacidades de los condensadores, las inductancias de las bobinas y las características de tensión y corriente se definen en este apartado. 35
- Figura 3-2. Diagrama de flujos del algoritmo P&O. El incremento de tensión es siempre fijo, por lo que este algoritmo da lugar a oscilaciones en cuanto el punto de máxima potencia se alcanza, ya que la tensión resultante quedará siempre por encima o por debajo de este. 37
- Figura 3-3. Esquema de los convertidores, con sus respectivos esquemas descriptivos de los controladores, de una rama del circuito, con la batería en la salida. Los controladores se verán con más detalle en este apartado. 39
- Figura 3-4. Esquema del circuito de un convertidor elevador, tal como se muestra en Simulink. 40
- Figura 3-5. Circuito eléctrico del convertidor flyback, tal como se muestra en Simulink. 43
- Figura 3-6. Diagrama de flujos de la máquina de estados del sistema de carga de baterías PV. Cada estado habilita o deshabilita el sistema de control de los convertidores según sea necesario. 45
- Figura 3-7. En este diagrama de flujos se representa la carga de los valores iniciales de tensión umbral de salida del convertidor elevador, a partir de la cual el control de tensión del convertidor boost, que se explicará posteriormente, comienza a funcionar, así como la tensión inicial de circuito abierto. Hay cuatro puntos de operación específicos empleados, que son para las irradiancias que se verán posteriormente en el experimento. 46
- Figura 3-8. Esquema general del controlador del convertidor elevador. Se diferencian tres partes. Al principio, entre la fase del algoritmo MPPT y el control de corriente, según el modo de carga se genera, mediante controladores PI, una referencia de potencia a partir del error de tensión en la entrada para el modo CC y a partir del error de tensión de la salida para el modo CV. Esta referencia de potencia se pasa al segundo bloque, de control de corriente, que, mediante PWM, genera la secuencia de conmutación. Finalmente, un tercer bloque, el inferior, se encarga de controlar la tensión de salida del convertidor elevador durante la fase de arranque, en la que no circula corriente controlada por el convertidor. 48
- Figura 3-9. Esquema del lazo externo del controlador del convertidor elevador. Esta parte del controlador se encarga de generar una potencia de referencia para hallar una referencia de corriente que aplicar a la corriente del inductor del convertidor elevador, tanto para los modos de CC como CV. 49
- Figura 3-10. Esquema del controlador de corriente del inductor del convertidor elevador y generador de Duty Cycle y pulsos para el MOSFET del convertidor elevador. El PI obtiene, a partir del error de corriente, una tensión que sirve para calcular el duty cycle del convertidor. 49

- Figura 3-11. Esquema del controlador de arranque del convertidor boost, que controla la tensión V_{boost} de este. 50
- Figura 3-12. Esquema del controlador del convertidor flyback. Este controlador es muy similar al visto para el convertidor elevador, ya que posee una fase que genera una referencia de corriente a partir del error de tensión. 51
- Figura 3-13. Generador de referencia de corriente de salida para el convertidor flyback. La parte superior corresponde a la parte de control de carga a corriente constante, mientras que la parte inferior corresponde a la parte de carga a tensión constante. La potencia de referencia generada por el controlador PI discreto se divide entre la tensión de salida del *flyback* para obtener la corriente de referencia a la salida. 51
- Figura 3-14. Controlador de la corriente de salida I_o del convertidor flyback. 51
- Figura 4-1. Tensión de entrada durante la prueba con carga resistiva y tensión impuesta. Esta se impone mediante una fuente de tensión continua definida por el usuario. 54
- Figura 4-2. Tensión a la salida del convertidor elevador con carga resistiva de prueba, definida en $14,88 \Omega$. 54
- Figura 4-3. Corriente a la entrada del convertidor elevador durante la prueba con parámetros fijos. La potencia generada es de $82,27 \text{ W}$ de potencia, valor basado en las características del panel fotovoltaico. 55
- Figura 4-4. Rizado de la corriente a la entrada del convertidor elevador durante esta primera prueba con parámetros fijos a $82,27 \text{ W}$ de potencia. 55
- Figura 4-5. Corriente a la salida del convertidor elevador, con carga resistiva de prueba para estudiar el comportamiento del convertidor a una determinada potencia. 56
- Figura 4-6. Potencia medida a la entrada del convertidor elevador para una tensión fija de prueba. Este valor es constante e igual a $81,76 \text{ W}$, porque la tensión tiene un valor fijo. 56
- Figura 4-7. Curvas características del panel fotovoltaico. Se detallan la tensión y corriente para los puntos de máxima potencia a 1000 y 300 W/m^2 , que son los que se van a usar en estas pruebas. 57
- Figura 4-8. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000 W/m^2 y referencia fija. Tras un transitorio de un segundo, aproximadamente, se alcanza la referencia, con un rizado conformado por los dos valores de pico mostrados en la parte derecha de la gráfica. 57
- Figura 4-9. Corriente de salida del panel fotovoltaico para la prueba de 1000 W/m^2 . 58
- Figura 4-10. Corriente de bobina para la prueba con irradiancia de 1000 W/m^2 . Los valores mostrados a la derecha son los utilizados para calcular el rizado, que permanece en el $2,11\%$, relativo a la corriente medida. 58
- Figura 4-11. Potencia generada en el panel fotovoltaico para $5,9 \text{ A}$ y 1000 W/m^2 . Esta potencia es ligeramente superior a 80 W , pero se ajusta al valor teórico mencionado. 59
- Figura 4-12. Tensión de salida del convertidor elevador para $5,9 \text{ A}$ y 1000 W/m^2 de irradiancia durante las primeras pruebas. El rizado de 500 mV aprox. es pequeño si se compara con la tensión medida, de 35 V . 59
- Figura 4-13. Valor medio de la corriente a la salida del convertidor boost, medida para $5,9 \text{ A}$ de corriente de salida del panel. Esta es de $2,206 \text{ A}$. 60
- Figura 4-14. Tensión de salida del panel para $1,774 \text{ A}$ de corriente de referencia para el panel PV. El rizado es más irregular que para $5,9 \text{ A}$. A pesar de lo anterior, los valores máximo y mínimo de la tensión de entrada del convertidor boost se pueden medir y son las dos etiquetas de la derecha. 60
- Figura 4-15. Corriente de salida del panel fotovoltaico para 300 W/m^2 . La corriente se ajusta a la medida teóricamente con la curva de la gráfica inferior. 61
- Figura 4-16. Curvas características del panel fotovoltaico. Se especifica la corriente, como valor teórico obtenido mediante estas curvas, para la irradiancia de 300 W/m^2 . La potencia calculada, realizando el producto de los datos marcados de la gráfica, sería de $24,20 \text{ W}$. 61

- Figura 4-17. Valores máximo y mínimo de la corriente en la bobina en el régimen permanente, para una irradiancia de 300 W/m^2 . 62
- Figura 4-18. Potencia generada a 300 W/m^2 . Su valor experimental, de $24,18 \text{ W}$, se ajusta perfectamente al valor teórico calculado con los datos de la figura 4-16 62
- Figura 4-19. El valor medio de la tensión de salida permanece igual a 300 W/m^2 , en los 35 V de referencia, con un rizado menor que se debe a que la corriente, en este caso, es menor que la vista para el caso anterior. 63
- Figura 4-20. Valor de régimen permanente de la corriente medida a la salida del elevador para 300 W/m^2 . 63
- Figura 4-21. Tensión a la entrada del convertidor flyback. Esta prueba se ha hecho para una tensión fija y un *duty cycle* de $0,5$. 64
- Figura 4-22. Corriente media de entrada en el convertidor flyback para tensión fija de entrada y *duty cycle* $0,5$. 64
- Figura 4-23. Rizado de la corriente de la bobina de magnetización para un *duty cycle* de $0,5$ y $82,27 \text{ W}$ de potencia. Este rizado realmente se mediría en la entrada del flyback, por lo que estos datos serían ficticios. 65
- Figura 4-24. Potencia instantánea medida a la entrada del convertidor flyback para *duty cycle* de $0,5$ y potencia de $82,27 \text{ W}$ a la salida. 65
- Figura 4-25. Potencia media de entrada, calculada a partir de la tensión y corriente que entran en el convertidor flyback, para la prueba con *duty cycle* de $0,5$. 66
- Figura 4-26. Corriente medida a la salida del convertidor flyback, filtrada, para $0,5$ de *duty cycle* y $82,27 \text{ W}$ de potencia. 66
- Figura 4-27. Detalle de la tensión medida a la salida del flyback, con rizado de tensión debido a la presencia de un condensador a la salida. Prueba realizada a $82,27 \text{ W}$ de potencia y *duty cycle* de $0,5$. 67
- Figura 4-28. Corriente que soporta el diodo del convertidor flyback para 1000 W/m^2 . 67
- Figura 4-29. Tensión que soporta el IGBT del convertidor flyback para 1000 W/m^2 . 68
- Figura 5-1. Curvas características de los paneles fotovoltaicos. En la gráfica superior se especifican la tensión y corriente de los puntos de máxima potencia para las irradiancias entre 300 y 1000 W/m^2 . La gráfica inferior muestra la potencia generada para las irradiancias comprendidas entre 300 y 1000 W/m^2 . 69
- Figura 5-2. Estados de funcionamiento del sistema del proyecto en el primer experimento, con 1000 W/m^2 de irradiancia. Ambas gráficas corresponden a los estados de funcionamiento de cada uno de los paneles. En general, hasta $0,1 \text{ s}$ no entra en funcionamiento todo el sistema, que se para una vez se ha llenado la batería en torno a $0,6 \text{ s}$ de simulación. 71
- Figura 5-3. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000 W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre $0,1 \text{ s}$ y $0,2 \text{ s}$, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en $0,2 \text{ s}$ aprox. Desde $0,5 \text{ s}$ hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. 72
- Figura 5-4. Tensión a la salida del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de $0,5 \text{ s}$, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante. 72
- Figura 5-5. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador. A partir de $0,1 \text{ s}$ se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en $0,2 \text{ s}$, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están barajando. 73
- Figura 5-6. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 1000 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 74

- Figura 5-7. Corriente de la bobina del convertidor boost a 1000 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente solo se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a corriente constante, la corriente alcanza los 6 A por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,6 s la carga de la batería se corta. 74
- Figura 5-8. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 800 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 75
- Figura 5-9. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,47 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,6 s. 75
- Figura 5-10. Duty cycle del convertidor elevador a 1000 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,6 s el duty cycle oscila en torno a 0,6 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,5 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor. En rojo está dibujado el duty cycle teórico, 0,602, mientras que en azul está el duty cycle medido. 76
- Figura 5-11. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 1000 W/m^2 . Entre 0,1s y 0,5s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, cercano a los 82 W nominales. En rojo, están dibujados los 80 W teóricos para esta irradiancia. 76
- Figura 5-12. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,2 s y 0,5 s, esta corriente supera los 4 A. Entre 0,5 s y 0,6 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte. 77
- Figura 5-13. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 1000 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente. 77
- Figura 5-14. Corriente de la batería durante la carga a 1000 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,5 s. Entre 0,5 s y 0,6 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte. 78
- Figura 5-15. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 1000 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,5 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,5 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,6 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el azul la corriente medida. 79
- Figura 5-16. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,4 y 0,6 segundos. 79
- Figura 5-17. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a corriente constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,5 s, el valor de la potencia se sitúa por encima de 70 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería. Esta potencia calculada a la salida, en azul, se compara con la teórica de 80 W para este valor de irradiancia. 80
- Figura 5-18. Duty cycle del convertidor flyback para 1000 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,4 y 0,65 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 0,5 s y 0,6 s, el valor presenta un rizado poco apreciable. 81
- Figura 5-19. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 1000 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo menos de 0,5 s, el estado de carga crece hasta un 95%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,6 s, es del 99,08%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 1000 W/m^2 durante toda la prueba. 81

Figura 5-20. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 1000 W/m^2 la carga va en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,3 s, cuando la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería. 82

Figura 5-21. Estados de funcionamiento del sistema en el segundo experimento, con la irradiancia ajustada en 800 W/m^2 . Tanto las gráficas de la izquierda como las de la derecha corresponden a los estados de funcionamiento de cada uno de los paneles. De media, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a 0,62 s. 83

Figura 5-22. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 800 W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1s y 0,53s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,17 s aprox. Desde 0,53s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. 84

Figura 5-23. Tensión a la salida del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 0,53 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante. 85

Figura 5-24. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Desde el principio se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están empleando. 85

Figura 5-25. Detalle de la tensión de salida del panel (en azul) y referencia (en rojo) para 800 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 86

Figura 5-26. Corriente de la bobina del convertidor boost a 800 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente llega casi a 5 A, por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,63 s la carga de la batería se corta. 87

Figura 5-27. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 800 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. La línea azul representa la corriente medida en la bobina y la línea naranja representa la referencia de corriente generada mediante el control MPPT. 87

Figura 5-28. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,55 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,63 s. 88

Figura 5-29. Duty cycle del convertidor elevador a 800 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,53 s, antes de la transición, el duty cycle oscila en torno a 0,7 durante el control MPPT. Tras el transitorio en 0,55 s, el duty cycle se hace más cercano a 0,6 en el modo de control a tensión constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,53 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor. 89

Figura 5-30. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre 0,1s y 0,53s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 65 W. 89

Figura 5-31. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,16 s y 0,55 s, esta corriente casi alcanza los 3,5 A. Entre 0,55 s y 0,62 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte. 90

Figura 5-32. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 800 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente. 90

Figura 5-33. Corriente de la batería durante la carga a 800 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,55 s. Entre 0,55 s y 0,6 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte. 91

Figura 5-34. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,55 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,55 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,62 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el color azul representa la corriente medida. 92

Figura 5-35. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,55 y 0,62 segundos. 92

Figura 5-36. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a corriente constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,53 s, el valor de la potencia se sitúa alrededor de 62,88 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería para este valor de irradiancia. El color rojo representa la potencia de referencia de 80 W tomada en el artículo, mientras que la línea azul es la potencia calculada a la salida. 93

Figura 5-37. Duty cycle del convertidor flyback para 800 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,45 y 0,6 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 0,55 s y 0,63 s, el valor presenta un rizado poco apreciable. 93

Figura 5-38. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 800 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo más de 0,53 s, el estado de carga crece hasta un 97,12%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,62 s, es del 99,03%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 800 W/m^2 durante toda la prueba. 94

Figura 5-39. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 800 W/m^2 la carga está en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,32 s, a partir de los que la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia para el voltaje de salida del flyback la tensión máxima de la batería. 95

Figura 5-40. Estados de funcionamiento del sistema para el tercer experimento, con una irradiancia de 500 W/m^2 . Tanto la izquierda como la derecha corresponden a la activación de los estados de ambos paneles. De media, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a 0,88 s. 96

Figura 5-41. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 500 W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1 s y 0,82 s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,15 s aprox. Desde 0,84 s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. 97

Figura 5-42. Tensión a la salida del convertidor elevador para 500 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 0,8 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante. 97

Figura 5-43. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante la prueba a 500 W/m^2 de irradiancia. A partir de 0,1 s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15 s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están barajando. 98

- Figura 5-44. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 500W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 99
- Figura 5-45. Corriente de la bobina del convertidor boost a 500 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente oscila alrededor de 3 A, por el algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,88 s la carga de la batería se corta. 99
- Figura 5-46. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 500W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 100
- Figura 5-47. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 500 W/m^2 . Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,82 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,88 s. 100
- Figura 5-48. Duty cycle del convertidor elevador a 500 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,83 s el duty cycle oscila en torno a 0,7 mientras dure el control a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,83 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor y el duty cycle toma un valor de 0,6 de media. En rojo está dibujado el duty cycle teórico, 0,602, mientras que en azul está el duty cycle medido. 101
- Figura 5-49. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 500W/m^2 . Entre 0,1s y 0,82s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 40,74 W. En la parte de control a tensión constante, el valor de potencia cae a menos de la mitad al principio de esta fase. 101
- Figura 5-50. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,15 s y 0,82 s, esta corriente supera los 2 A. Entre 0,82 s y 0,88 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte. 102
- Figura 5-51. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 500 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente. Los valores señalados son el máximo y el mínimo de la corriente del MOSFET en estado de conducción. 103
- Figura 5-52. Corriente de la batería durante la carga a 500 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,82 s. Entre 0,82 s y 0,88 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte. 103
- Figura 5-53. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 500 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,82 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,82 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,88 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el color azul la corriente medida. 104
- Figura 5-54. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,82 y 0,88 segundos. 104
- Figura 5-55. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,82 s, el valor de la potencia se sitúa en 38,93 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería para este nivel de irradiancia. 105
- Figura 5-56. Duty cycle del convertidor flyback para 500 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,5 y 0,58 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 0,82 s y 0,88 s, el valor presenta un rizado poco apreciable. 106

Figura 5-57. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 500 W/m². Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo más de 0,8 s, el estado de carga crece hasta un 97,78%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,88 s, es del 99,34%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 500 W/m² durante toda la prueba. 106

Figura 5-58. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 500 W/m² la batería se carga en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,4 s, cuando la tensión pasa a crecer de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería. 107

Figura 5-59. Estados de funcionamiento del sistema durante el experimento con irradiancia de 300 W/m². Las gráficas de la izquierda y de la derecha corresponden a los estados de funcionamiento de los dos paneles. De media, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a 1,42 s. 108

Figura 5-60. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 300W/m² y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,15s y 1,4s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que se alcanza a los 0,1 s aprox. Desde 1,4s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. 109

Figura 5-61. Tensión a la salida del convertidor elevador para 300 W/m². Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 1,4 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante. 110

Figura 5-62. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador en el experimento para 300 W/m². A partir de 0,1s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están empleando. 110

Figura 5-63. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 300W/m² y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 111

Figura 5-64. Corriente de la bobina del convertidor boost a 300 W/m² de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente casi alcanza los 2 A, por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 1,42 s la carga de la batería se corta. 112

Figura 5-65. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 300W/m² y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. 112

Figura 5-66. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 300 W/m². Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 1,4 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 1,42 s. 113

Figura 5-67. Duty cycle del convertidor elevador a 300 W/m². Entre 0,1 s y 1,42 s el duty cycle oscila en torno a 0,7 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 1,4 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor. 113

Figura 5-68. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 300W/m². Entre 0,1s y 1,4s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 24 W. 114

Figura 5-69. Corriente de instantánea entrada del convertidor flyback para 300 W/m² de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,15 s y 1,4 s, esta corriente supera los 4 A. Entre 1,4 segundos y 1,42 segundos se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte. 114

Figura 5-70. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 300 W/m² y control a corriente constante en régimen permanente. 115

Figura 5-71. Corriente de la batería durante la carga a 300 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 1,4 s. Entre 1,4 s y 1,42 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte. 116

Figura 5-72. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 300 W/m^2 . Entre 0,1 s y 1,4 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 1,4 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 1,42 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. 116

Figura 5-73. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 1,4 y 1,42 segundos. 117

Figura 5-74. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,1 s hasta los 1,4 s, el valor de la potencia se sitúa por encima de 20 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería para esta irradiancia. 118

Figura 5-75. Duty cycle del convertidor flyback para 300 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,52 y 0,57 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 1,4 s y 1,42 s, el valor presenta un rizado poco apreciable. La línea roja de la gráfica representa el duty cycle teórico y la azul representa el duty cycle medido. 118

Figura 5-76. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para una irradiancia de 300 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y 1,4 s, el estado de carga crece hasta un 98%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 1,42 s, es cercano al 99%. Los porcentajes máximos se podrán observar en una futura prueba. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 300 W/m^2 durante toda la prueba. 119

Figura 5-77. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 300 W/m^2 la carga es lineal desde los 0,1 s hasta los 0,6 s, cuando la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería. 120

Figura 5-78. Estados de funcionamiento del sistema durante los experimentos de carga CV. Ambos paneles fotovoltaicos pasan por las mismas fases. Hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema completo, que mantiene durante el resto del experimento, a partir de los 0,12 s, la carga a tensión constante. 121

Figura 5-79. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000 W/m^2 . Desde que se aplica el control CV en el sistema a partir de 0,12 s el control MPPT permanece desactivado. La tensión es inferior a la de circuito abierto, por lo que el sistema está activo. 122

Figura 5-80. Tensión a la salida del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V de referencia para la tensión a los 0,4 s, desde que entra en funcionamiento el control CV a los 0,12 s. 123

Figura 5-81. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador para 1000 W/m^2 en control CV. A partir de 0,12s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,4 s, cuando la referencia de tensión y la tensión a la salida del convertidor coinciden. 123

Figura 5-82. Corriente de la bobina del convertidor boost a 1000 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente solo se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a tensión constante, la corriente desciende lentamente después de llegar al régimen permanente a los 0,4 s del experimento. 124

Figura 5-83. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Este error es cero durante el tiempo transcurrido desde que el control CV entra en funcionamiento. 124

Figura 5-84. Duty cycle del convertidor elevador a 1000 W/m^2 para el control a tensión constante. A partir de 0,12 s el duty cycle toma un valor entre 0,51 y 0,65 para la carga a tensión constante. En rojo, está dibujado el valor teórico del duty cycle, 0,602, mientras que en azul está dibujado el resultado del control. 125

- Figura 5-85. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 1000W/m^2 . La potencia durante la carga a tensión constante, a partir de $0,12\text{ s}$, es inferior a la máxima potencia, y muy similar para los mismos porcentajes de batería sea cual sea la irradiancia, siempre que sea suficiente. Esta potencia se compara con los 80 W teóricos, señalados en rojo. 125
- Figura 5-86. Corriente de instantánea de entrada del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de $0,4\text{ s}$, esta corriente supera levemente 1 A . 126
- Figura 5-87. Corriente de la batería durante la carga a 1000 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de $0,15\text{ s}$ la corriente va disminuyendo, en valor absoluto, proporcionalmente a la potencia en cuanto se alcanza el régimen permanente en $0,4\text{ s}$. 126
- Figura 5-88. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 1000 W/m^2 , en la carga a tensión constante. Este valor va disminuyendo lentamente en el régimen permanente, a partir de $0,4\text{ s}$, y es la mitad de la corriente que entra en la batería, por lo que esta no alcanza apenas los $0,2\text{ A}$. El color naranja representa la referencia y el color azul la corriente medida a la salida del flyback. 127
- Figura 5-89. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a tensión constante, el error es nulo, aunque no se aprecia el transitorio de la corriente hasta llegar al régimen permanente. 127
- Figura 5-90. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. La potencia observada alcanza su régimen permanente a los $0,4\text{ s}$ y es notablemente menor de la máxima para este valor de irradiancia, unos 80 W , potencia que se muestra en rojo. 128
- Figura 5-91. Duty cycle del convertidor flyback para 1000 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los $0,1\text{ s}$. El duty cycle presenta un valor constante en torno a $0,55$ durante la fase de carga a tensión constante. En rojo, está dibujado el valor teórico del duty cycle, $0,53$, mientras que en azul está dibujado el resultado del control. 129
- Figura 5-92. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del $98,5\%$, para 1000 W/m^2 . El crecimiento del estado de carga es notable a partir de los $0,12\text{ s}$. 129
- Figura 5-93. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 1000 W/m^2 la tensión de referencia, de $117,6\text{ V}$, se alcanza a los $0,12\text{ s}$, si bien se estabiliza, tras la sobreoscilación, a los $0,6\text{ s}$. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, se observa en las gráficas que el error en régimen permanente es cero para el control a tensión constante en ambos paneles, como se ve a partir de los $0,6\text{ s}$. 130
- Figura 5-94. Estados de funcionamiento del sistema durante el segundo experimento de carga a tensión constante, con una irradiancia de 800 W/m^2 . Tanto las gráficas de la izquierda como las de la derecha muestran los estados de funcionamiento de ambos paneles fotovoltaicos. A los $0,12\text{ s}$ entra en funcionamiento el control en tensión constante, que es el régimen permanente de la carga de la batería al porcentaje especificado en estos experimentos. 131
- Figura 5-95. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 800W/m^2 . Después del arranque y el transitorio, que finaliza a los $0,12\text{ s}$, el control no es MPPT y la referencia de tensión no se emplea en la entrada del convertidor elevador. La tensión fijada se acerca al valor de circuito abierto. 132
- Figura 5-96. Tensión a la salida del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Esta alcanza definitivamente los 35 V de referencia a los $0,4\text{ s}$, tras una fase de arranque de $0,1\text{ s}$ en la que los alcanza por primera vez. La dinámica del control a tensión constante es más lenta, de nuevo, que la del control a corriente constante. 132
- Figura 5-97. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento de carga a tensión constante para una irradiancia a 800 W/m^2 . A partir de $0,12\text{ s}$ se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser cero en $0,6\text{ s}$, si bien en $0,4\text{ s}$ ya es muy pequeña. 133
- Figura 5-98. Corriente de la bobina del convertidor boost a 800 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a tensión constante, a partir de $0,12\text{ s}$, corriente y referencia van disminuyendo rápidamente hasta llegar al régimen permanente a los $0,4\text{ s}$ de simulación, punto a partir del que la disminución de la corriente es menos acusada. 133

- Figura 5-99. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Este error es cero durante la última parte del transitorio y cuando alcanza el régimen permanente, excepto en los picos. No se aprecia la evolución de la referencia de corriente para la bobina del convertidor elevador. 134
- Figura 5-100. Duty cycle del convertidor elevador a 800 W/m^2 para la fase de control a tensión constante. A partir de $0,12 \text{ s}$, para la carga a tensión constante, el duty cycle toma valores situados entre $0,55$ y $0,65$. 134
- Figura 5-101. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 800 W/m^2 para la carga a tensión constante. Al igual que se ha visto en las gráficas anteriores, hasta $0,4 \text{ s}$ no hay una disminución notable de la pendiente de la potencia, que es siempre descendente. 135
- Figura 5-102. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de $0,4 \text{ s}$, esta corriente supera por poco 1 A . 135
- Figura 5-103. Corriente de la batería durante la carga a 800 W/m^2 de irradiancia para el segundo experimento de carga a tensión constante. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Desde los $0,12 \text{ s}$, cuando se aplica el control a tensión constante para la carga de la batería, la corriente va disminuyendo en valor absoluto proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión. Esto ocurre cuando se alcanza el régimen permanente a los $0,4 \text{ s}$. 136
- Figura 5-104. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre $0,1 \text{ s}$ y $0,4 \text{ s}$ hay un transitorio desde que arranca el convertidor hasta que se alcanza el régimen permanente de carga a tensión constante, donde la corriente disminuye más lentamente. 137
- Figura 5-105. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a tensión constante el error es nulo, algo notable a partir de $0,2 \text{ s}$. Esto significa que la corriente sigue la referencia dada por la tensión de la batería. 137
- Figura 5-106. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde $0,12 \text{ s}$ hasta el final, el valor de la potencia vuelve a ser una fracción de la potencia máxima, como se vio para 1000 W/m^2 . La potencia se compara con el valor teórico de máxima potencia, 80 W , marcado en rojo. 138
- Figura 5-107. Duty cycle del convertidor flyback, que empieza a funcionar a los $0,1 \text{ s}$, para 800 W/m^2 durante el experimento a tensión constante. El duty cycle se queda en un valor situado entre $0,5$ y $0,6$, con poco rizado. Aproximadamente, el duty cycle es de $0,55$. 138
- Figura 5-108. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del $98,5\%$, para 800 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae algo. Una vez se carga a tensión constante, a partir de $0,12 \text{ s}$, el estado de carga crece hasta que la carga se complete. 139
- Figura 5-109. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación con una irradiancia de 800 W/m^2 . La tensión llega por primera vez al valor de referencia a los $0,12 \text{ s}$, pero presenta una sobreoscilación antes de llegar a su valor definitivo a los $0,5 \text{ s}$. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, el error en régimen permanente es nulo en la fase de control a tensión constante, a partir de los $0,6 \text{ s}$. 140
- Figura 5-110. Estados de funcionamiento del sistema para el tercer experimento, con 500 W/m^2 de irradiancia. Las gráficas de izquierda y derecha muestran los estados por los que pasa cada panel fotovoltaico. A los $0,1 \text{ s}$ entra en funcionamiento el sistema al completo, que entra en el estado de activación del control a tensión constante cuando transcurren $0,15 \text{ s}$ desde el inicio del experimento. 141
- Figura 5-111. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 500 W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre $0,1 \text{ s}$ y $0,15 \text{ s}$, el controlador busca el punto de máxima potencia. Finalmente, a partir de $0,15 \text{ s}$ la tensión del panel no está regulada por ningún controlador y depende del duty cycle, tomando un valor cada vez más cercano a V_{OC} . 142
- Figura 5-112. Tensión a la salida del convertidor elevador para 500 W/m^2 . Los 35 V de referencia para el modo de carga a tensión constante se alcanzan a los $0,4 \text{ s}$, si bien el error ya era pequeño una vez realizada la transición y el arranque de convertidores. 142

- Figura 5-113. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento a 500 W/m^2 . A partir de 0,4 s el error de régimen permanente es nulo, tras una pequeña desviación en 0,15 s, cuando se produce el cambio de control. 143
- Figura 5-114. Corriente de la bobina del convertidor boost a 500 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control CV, la corriente deja de disminuir rápidamente una vez se alcanza el régimen permanente en 0,4 s. 143
- Figura 5-115. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 500 W/m^2 . Este error es prácticamente cero, excepto en los transitorios de un estado a otro, durante la carga a tensión constante a partir de los 0,15 s. 144
- Figura 5-116. Duty cycle del convertidor elevador a 500 W/m^2 . A partir de 0,4 s el duty cycle oscila en torno a 0,6 para el control de la carga a tensión constante, con pequeñas variaciones entre 0,55 y 0,65. 144
- Figura 5-117. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 500 W/m^2 durante la fase de carga a tensión constante. Una vez superado a los 0,4 s la fase de arranque y el transitorio, la potencia generada es una fracción de la máxima potencia, y va descendiendo lentamente conforme la batería se carga. 145
- Figura 5-118. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de 0,4 s tras el transitorio, esta corriente supera levemente 1 A. 145
- Figura 5-119. Corriente de la batería durante la carga a 300 W/m^2 de irradiancia para el tercer experimento de carga a tensión constante. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de 0,4 s, cuando se alcanza el régimen permanente la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión. 146
- Figura 5-120. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 500 W/m^2 . Una vez se pasa al control a tensión constante, al llegar a 0,2 s la referencia y la corriente coinciden durante el experimento. A partir de 0,4 s, la corriente desciende lentamente. 147
- Figura 5-121. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. El error en régimen permanente de la corriente es nulo una vez se ha alcanzado la referencia antes de llegar a 0,2 s, pero no se aprecia la evolución de la corriente en el transitorio una vez se llega al modo de control a tensión constante. 147
- Figura 5-122. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,15 s hasta el final, el valor de la potencia es una fracción de los 40 W alcanzados a corriente constante. La pendiente se hace menos acusada a partir de 0,5 s. 148
- Figura 5-123. Duty cycle del convertidor flyback para 500 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta un valor de 0,55, con pocas oscilaciones en régimen permanente. 148
- Figura 5-124. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 500 W/m^2 . Durante la fase de carga a tensión constante, a partir de 0,1 s el estado de carga crece hasta llegar a la carga máxima. 149
- Figura 5-125. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la tercera simulación, con una irradiancia de 500 W/m^2 a tensión constante. El valor de referencia se supera por primera vez a los 0,13 s, pero se estabiliza, tras la sobreoscilación, en torno a 0,5 s. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. A la izquierda y a la derecha, el error es nulo para el control a tensión constante en régimen permanente. 150
- Figura 5-126. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 300 W/m^2 . Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1s y 1,2s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,15 s aprox. Desde 1,2s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. El resultado de la tensión del panel fotovoltaico es muy dispar para el control a tensión constante. 151
- Figura 5-127. Tensión a la salida del convertidor elevador para 300 W/m^2 . A partir de 1,2 s, cuando el control de carga de la batería pasa a ser a tensión constante, la tensión a la salida del convertidor elevador cae bruscamente y se aleja del valor de referencia. 151

Figura 5-128. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento con irradiancia de 300 W/m^2 . A partir de 1,2s se puede observar cómo en la fase de control a tensión constante el sistema no puede controlar la tensión de 35 V a la salida del elevador y el error se dispara. El error es cero durante el control CC. 152

Figura 5-129. Corriente de la bobina del convertidor boost a 300 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. La corriente presenta grandes oscilaciones a partir de 1,2 s, cuando la carga se hace a tensión constante. 152

Figura 5-130. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 300 W/m^2 . Este error deja de ser cero en cuanto el sistema pasa a controlar la carga de la batería a tensión constante a partir de 1,2 s. 153

Figura 5-131. Duty cycle del convertidor elevador a 300 W/m^2 . Entre 0,1 s y 1,2 s el duty cycle oscila en torno a 0,54 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Para el control a tensión constante existe saturación del controlador únicamente con esta irradiancia. 153

Figura 5-132. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 300 W/m^2 . A partir de 1,2 s, con la carga a tensión constante, la potencia decae rápidamente y no puede mantenerse la carga. 154

Figura 5-133. Corriente de entrada instantánea del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de 1,2 s, la corriente alcanza un valor de 1,10 A justo en el corte, tras una sobreoscilación negativa poco después de cambiar el control de carga de la batería. 154

Figura 5-134. Corriente de la batería durante la carga a tensión constante con 300 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de 1,2 s, con la carga a tensión constante, la corriente disminuye en valor absoluto hasta llegar al valor de corte a los 1,25 s. 155

Figura 5-135. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 300 W/m^2 . Desde que entra en la fase de carga a tensión constante a los 1,2 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, aunque la potencia decae rápidamente y no puede mantenerse la tensión de referencia en la salida. 156

Figura 5-136. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo. El error en régimen permanente deja de ser cero en cuanto la corriente desciende por debajo del valor de corte a los 1,25 s. 156

Figura 5-137. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 1,2 s hasta el corte, el valor de la potencia desciende rápidamente hasta que la corriente de la batería llega al valor de corte. 157

Figura 5-138. Duty cycle del convertidor flyback para 300 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones durante la carga a corriente constante hasta llegar a los 1,2s, con un valor medio de 0,54. Durante la carga a tensión constante, entre 1,2 s y 1,25 s, el duty cycle no se estabiliza. 157

Figura 5-139. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 300 W/m^2 . Una vez la batería arranca a los 0,1 s se carga a corriente constante hasta llegar a los 1,2 s, llegando el estado de carga hasta un máximo situado entre 98,53% y 98,54%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 300 W/m^2 durante toda la prueba. 158

Figura 5-140. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la prueba de control para la carga a tensión constante a una irradiancia de 300 W/m^2 . La fase de arranque dura hasta algo menos de 0,2 s y le sigue una fase de carga a corriente constante hasta una vez superados los 1,2 s, hasta que el controlador corta algo antes del segundo y medio una vez la batería se da por cargada. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, una vez alcanzada la referencia de 117,6 V no se puede mantener por más de 0,05s antes de cortar la carga. 159

Figura 6-1. Curva característica de potencia de los paneles fotovoltaicos en función de la tensión de salida del panel PV y la irradiancia. Esta gráfica muestra la potencia teórica generada para las irradiancias comprendidas entre 300 y 1000 W/m^2 . 162

Figura 6-2. Comparativa entre la potencia generada y la potencia de carga de los cuatro paneles que se plantearon para el sistema, calculados para todos los niveles de irradiancia estudiados anteriormente entre 300 y 1000 W/m². Esta gráfica permite visualizar cuánta potencia se podría generar como máximo con cuatro paneles fotovoltaicos flexibles, formados por 24 células fotovoltaicas en serie, y visualizar qué parte de esta potencia termina llegando a la batería tras pasar por los convertidores. Los valores reales podrían disminuir. 163

Figura 6-3. Tensión medida a la salida del convertidor *flyback*, sin filtrado para control CC a 1000W/m². En esta gráfica se muestran los valores de pico. Aunque aparentemente sea plana, esta tensión de salida es creciente conforme va pasando el tiempo. 165

Figura 6-4. Gráfica de las tensiones y corrientes de estrés que pueden llegar a soportar los elementos de conmutación del circuito, tanto transistores MOSFET como diodos. Estas medidas se han tomado para una irradiancia de 1000 W/m², en uno de los experimentos realizados para obtener los resultados. Se ve que en parte de este experimento la irradiancia se ve reducida a la mitad. 167

| | |
|-------------------|---|
| EV | Vehículo eléctrico |
| PV | Fotovoltaico |
| MPPT | Búsqueda del punto de máxima potencia |
| DC/DC | De corriente continua a corriente continua |
| CC-CV | Carga mixta corriente constante/tensión constante |
| CC | Corriente constante (carga) |
| CV | Tensión constante (carga) |
| SOC (o % carga) | Estado de carga de la batería |
| V_{mpp} | Tensión del punto de máxima potencia |
| I_{mpp} | Corriente del punto de máxima potencia |
| V_{PV} | Tensión de salida del panel fotovoltaico |
| I_{PV} | Corriente de salida del panel fotovoltaico |
| V_{OC} | Tensión de circuito abierto del panel fotovoltaico |
| I_{SC} | Corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico, notación anglosajona |
| I_{CC} | Corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico, notación española |
| $V_{oboost,th}$ | Tensión umbral de paso del modo de precarga al modo de control de tensión del convertidor boost |
| D | Duty cycle (o ciclo de trabajo) |
| PWM | Modulación por ancho de pulso |
| V_{out} | Tensión de salida o de batería |
| I_{bat} | Corriente de carga de la batería |
| I_o | Corriente de salida del convertidor flyback |
| P_{carga} | Potencia de carga de la batería |
| DC-Link | Enlace entre convertidores DC/DC, con condensador |
| ΔQ_C | Carga del condensador |
| P_{mpp} | Potencia máxima del panel fotovoltaico |
| $P_{m\acute{a}x}$ | Potencia máxima del panel fotovoltaico, notación alternativa |
| ΔI_L | Rizado de corriente de bobina |
| ΔV_o | Rizado de tensión del condensador |
| f_s | Frecuencia de conmutación del transistor o diodos |
| $\eta_{DC/DC}$ | Rendimiento del convertidor |
| PI | Controlador proporcional e integral |

1 INTRODUCCIÓN

El sistema que se va a desarrollar parte de la búsqueda de la reducción de la dependencia del petróleo en Europa, ya que en el viejo continente existen pocos países que sean productores. Esto supone una gran dependencia de la importación de fuentes de energía, que están repartidas de forma desigual por todo el planeta. Además, para mitigar los efectos del calentamiento global, se está confiando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la generación de electricidad con fuentes de energía renovables, cuya potencia instalada es cada vez mayor en todo el mundo.

El mayor reto existente en la actualidad es la electrificación, progresiva, de la totalidad de los medios de transporte, así como la prevención de las posibles consecuencias de un previsible aumento de la demanda de energía eléctrica derivada de la reducción del número de vehículos de combustión. Un aumento desmesurado de la demanda de electricidad, derivado de la reducción o prohibición de la circulación de vehículos con motor térmico, podría comprometer la estabilidad de las redes eléctricas, en caso de no adaptar la potencia instalada a las necesidades del nuevo mercado eléctrico con un incremento de la producción.

Como alternativa a las estaciones de carga fija, existe la posibilidad de montar una estación de carga fotovoltaica en el mismo vehículo, que precisaría de la instalación a bordo de paneles fotovoltaicos y convertidores de potencia de continua a continua, o DC/DC, para alimentar la batería instalada en el vehículo. El gran número de horas de luz solar existente en el territorio español convierte este sistema de carga fotovoltaica en una alternativa interesante para solucionar este inconveniente, ya sea con el fin de extender la autonomía del vehículo eléctrico durante la conducción o cargar la batería mientras esté el vehículo aparcado al Sol.

El objetivo principal del sistema formado por paneles, convertidores y batería no es otro que generar la máxima potencia posible estableciendo una estrategia de carga de la batería en parte a corriente constante y en parte a tensión constante. Para ello, el punto de partida será la aplicación de tecnologías ya asentadas para la generación de electricidad a partir de paneles fotovoltaicos y su posterior almacenamiento en baterías de ion-litio tras pasar por una serie de convertidores de continua a continua en cascada.

La máxima potencia se generará siempre en la carga a corriente constante, por lo que se necesitará un algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia para este caso, de forma que la potencia de carga de la batería, al menos en un día soleado, en el que la irradiancia es la mayor posible, tenga un valor que asegure la viabilidad del sistema.

Asimismo, se estudiará el comportamiento en condiciones menos ideales, de forma que se pueda observar la evolución de la potencia de carga generada y cómo esta se transmite hasta la batería a través de los convertidores, probando así los límites del sistema.

1.1 Tecnologías fotovoltaicas

Existen varias tecnologías capaces de generar electricidad a partir de fuentes de energía renovables. Una de las más extendidas, especialmente en países soleados como España, es la fotovoltaica. En territorio español se ha instalado una potencia de 3256 MW únicamente en 2020, por lo que es la principal fuente de energía renovable junto a la eólica.

La tecnología más extendida es la basada en silicio, de la que existen tres tipologías muy extendidas, silicio monocristalino, policristalino y amorfo. La eficiencia de una celda de cada una de las tecnologías anteriores se muestra en la siguiente tabla, aunque la eficiencia de un panel comercial es siempre menor que la obtenida en pruebas.

Tabla 1-1. Eficiencia de tecnologías fotovoltaicas basadas en silicio.

| | Monocristalino | Policristalino | Amorfo |
|-----------------------|----------------|----------------|--------|
| Eficiencia (%) | 26,7 | 22,3 | 12,1 |

Lo más importante a la hora de elegir una tecnología fotovoltaica para instalarla en la superficie de un vehículo eléctrico es la eficiencia de la transformación de la energía contenida en la radiación incidente en eléctrica. Debido a la limitación de espacio que supone la superficie de un vehículo, las tecnologías menos eficientes quedan descartadas, por lo que en el proyecto se elegirá la tecnología monocristalina, que ofrece la mayor eficiencia posible a un coste razonable.

Los paneles, debido a la forma curva del techo de un vehículo, serán flexibles y estarán formados por células fotovoltaicas SunPower C60, que poseen esta característica. Además, esta célula fotovoltaica presenta una eficiencia mayor a la media de los paneles comerciales, de un 22% frente al 19% habitual.

Si bien el silicio es el material más extendido, se están investigando nuevas tecnologías con mayor eficiencia que todavía tienen poco alcance comercial, por lo que se han descartado para este proyecto. En 2009, ya existían tecnologías emergentes con una eficiencia similar o superior al silicio monocristalino, destacando por encima del resto la tecnología multiunión.

En el gráfico de la Figura 1-1 se resume la eficiencia alcanzada en pruebas de laboratorio desde 1975 hasta 2010, aunque desde 2010 las tecnologías de generación fotovoltaica han continuado ganando eficiencia. Los datos de la tabla 1-1, donde se describe la eficiencia de los paneles fotovoltaicos según la tecnología de silicio empleada, han sido tomados de esta primera gráfica.

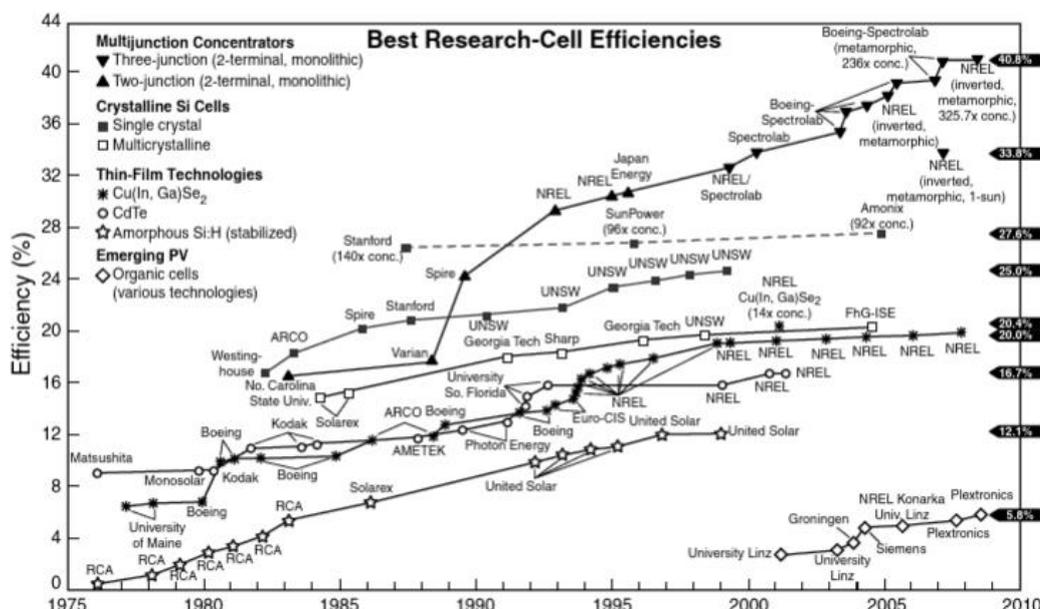


Figura 1-1. [1] Evolución de la eficiencia de diferentes tecnologías fotovoltaicas hasta el año 2010¹.

¹ Reddy, P. Jayarama. "Solar Power Generation. Technology, new concepts & policy", CRC Press, 2012

Si se observa con detalle la segunda gráfica, la de la Figura 2, que corresponde al año 2019, las tecnologías se han ido desarrollando con el fin de alcanzar una mayor eficiencia, aunque tecnologías ya maduras, como los paneles formados por células de silicio monocristalino o el policristalino sin concentración, parecen alcanzar sus límites, siendo las emergentes, como las multiunión o las de concentración, las que más han crecido en eficiencia. Otras tecnologías, como las orgánicas, están alcanzando al silicio amorfo en eficiencia.

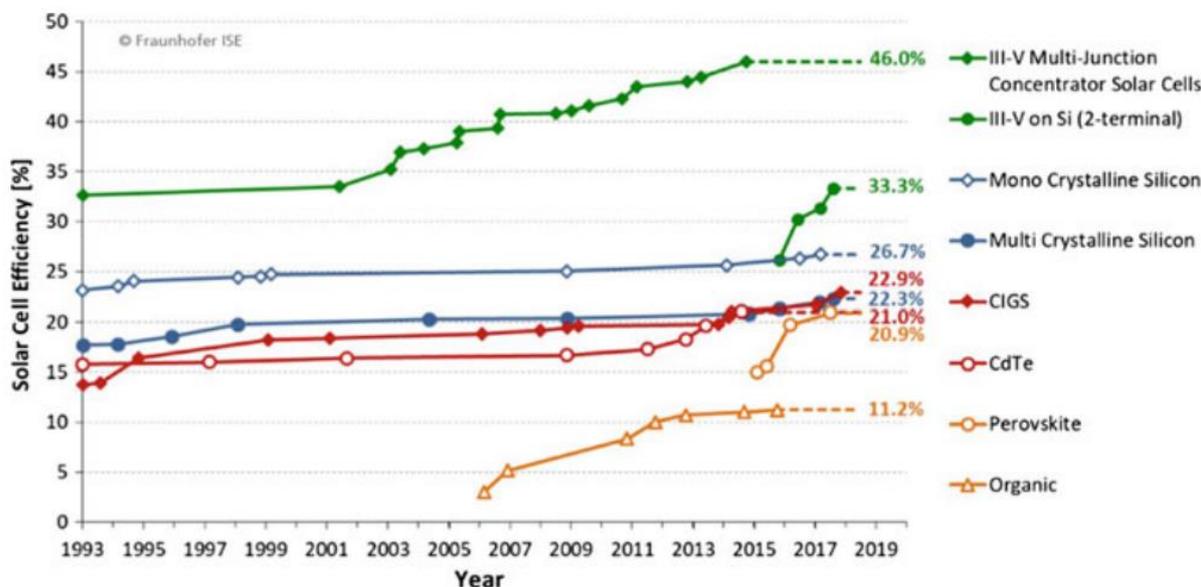


Figura 1-2. [2] Evolución de la eficiencia alcanzada por diferentes tecnologías fotovoltaicas hasta 2020². Destaca la tecnología multiunión con concentración de rayos solares, con una eficiencia del 46%, aunque por razones de coste se va a emplear silicio monocristalino de alta eficiencia.

1.2 Baterías

Un automóvil eléctrico, al no existir tecnologías viables que le permitan circular, de momento, conectado directamente a la red eléctrica, y con el fin ofrecer la misma flexibilidad que un vehículo de combustión, necesita ser alimentado de forma independiente. Esto se consigue gracias a las baterías, que permiten almacenar energía eléctrica en un espacio relativamente pequeño.

Aunque los primeros automóviles utilizaban baterías de plomo-ácido, en la actualidad la tecnología más extendida en vehículos 100% eléctricos es la de ion de litio, si bien no es la única que se aplica en vehículos híbridos y eléctricos. La primera tecnología, la de plomo-ácido, ha quedado relegada a la alimentación de sistemas de arranque por su escasa energía específica en comparación con otras.

Por lo general, las baterías de vehículos eléctricos comerciales tienen unos niveles de tensión que rondan en torno a los 400 V, aunque hay modelos que alcanzan los 800 V, normalmente aquellos en los que se necesita un extra de potencia, como los vehículos pesados o los deportivos.

En la **siguiente tabla**³ pueden observarse algunas características de interés de distintos modelos de vehículos eléctricos que se están fabricando en la actualidad, como la tensión nominal, la energía almacenada, la potencia de carga típica, con el vehículo conectado a la red con un cargador doméstico, el tiempo de carga bajo las condiciones anteriores y la autonomía máxima del vehículo. Además, se ha calculado la capacidad en Ah de la batería.

² Pavlovic, Tomislav. "The Sun and Photovoltaic Technologies", Springer, 2020

³ Rivera, Sebastián; Kouro, Samir; Vázquez, Sergio; Goetz, Stefan M.; Lizana, Ricardo y Romero-Cadaval, Enrique. "Electric Vehicle Charging Infrastructure", IEEE Industrial Electronics Magazine, feb. 2021

Tabla 1-2. [3] Especificaciones de las baterías de distintos modelos de vehículos eléctricos.

| Marca y Modelo | Tensión (V) | Energía (kWh) | Capacidad (Ah) | Potencia (kW) / Tiempo de carga (h) | Autonomía (km) |
|-------------------|-------------|---------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Tesla Model 3 | 360 | 75 | 208,33 | 11,5 / 7,75 | 560 |
| Tesla Model S | 400 | 100 | 250 | 11,5 / 10,25 | 624 |
| Porsche Taycan 4S | 800 | 79,2 | 99 | 11 / 9 | 407 |
| Nissan Leaf | 360 | 40 | 111,11 | 6,6 / 6,5 | 270 |
| Hyundai Ioniq | 320 | 40,4 | 126,25 | 7,2 / 6,25 | 294 |
| Renault Zoe ZE50 | 400 | 54,7 | 136,75 | 22 / 3 | 395 |

A partir de la tabla anterior, puede deducirse que las baterías de ion-litio que alimentan el motor de un vehículo eléctrico requieren una potencia de carga de varios kilovatios como mínimo para poder completar un ciclo de carga, esto es, mientras el vehículo permanezca estacionado en el puesto de carga durante varias horas. Con esto, se obtiene una autonomía razonable para el uso diario del vehículo.

Sin embargo, al tener en cuenta la potencia de carga máxima que puede ofrecer un panel fotovoltaico, por el limitado espacio de la cubierta de un vehículo, esta será mucho menor que los valores vistos en la tabla comparativa entre modelos, lo que significaría un aumento en el tiempo de carga. Dadas las limitadas horas de luz que tiene un día, la tecnología fotovoltaica incorporada en un vehículo eléctrico no serviría como sistema exclusivo de generación de energía eléctrica para alimentar la batería principal, excepto si se consolidaran los paneles de tecnologías fotovoltaicas más eficientes que la basada en silicio monocristalino sin concentración.

1.3 Convertidores de potencia

Con el fin de transmitir la potencia generada a la batería para cargarla, se van a incluir una serie de convertidores de continua a continua. En un principio, se podría utilizar un convertidor elevador o *boost*, que eleva la tensión obtenida en el panel fotovoltaico. El mayor reto que existe en el desarrollo del proyecto es elevar una tensión bastante pequeña a valores similares a los vistos en las baterías anteriores. Por la razón anterior, será necesario más de un convertidor.

Existen dos clases de convertidores de tipología elevadora, con aislamiento y sin aislamiento. Dado que el vehículo, una vez desconectado de la red eléctrica, sería una red aislada, no se exige que el convertidor tenga alguna clase de aislamiento, requerido por las leyes españolas para centrales eléctricas de generación fotovoltaica.

Para elevar la tensión, el convertidor podría ser un reductor-elevador trabajando en modo elevador, un convertidor elevador o un convertidor Flyback, que sí tendría aislamiento. Como únicamente se desea elevar la tensión, sin contemplar una disminución de esta, el primer tipo queda descartado.

La potencia que se prevé que va a generar el sistema es inferior al kilovatio, por lo que sería adecuado utilizar MOSFET en lugar de IGBT, un tipo de transistor utilizado en convertidores que funcionan a baja potencia y en los que se puede aprovechar su bajo consumo, lo que permite una reducción de pérdidas y una mayor eficiencia.

El diseño de los convertidores de potencia, así como la teoría y las ecuaciones que lo describen, se detallará más adelante, en el apartado *Descripción del Sistema*.

1.4 Posibles usos del sistema panel-convertidor-batería

En el apartado anterior se especifican las capacidades de las baterías, así como la potencia necesaria de carga de la batería. Como se desea generar energía eléctrica directamente en el propio vehículo utilizando fuentes de energía renovables, la generación fotovoltaica es el método de obtención de energía más adecuado al poder aprovechar al máximo la superficie del vehículo sin comprometer el peso.

No obstante, por la baja eficiencia que poseen los paneles fotovoltaicos en comparación con otra fuente de energía, la potencia obtenida va a ser insuficiente para alimentar todos los sistemas del vehículo, ya sea la batería principal, el motor o ambos. Se está planteando utilizar la superficie del vehículo para instalar cuatro paneles formados por veinticuatro células C60, que darían, con una iluminación uniforme de 1000 W/m^2 , una potencia de varias centenas de vatios, claramente insuficiente para cargar la batería principal del vehículo.

Por la razón anterior, el sistema que se va a simular, salvo que en un futuro cercano aparezcan paneles fotovoltaicos comerciales con mayor eficiencia, tiene aplicaciones muy diferentes al objetivo inicial, difícil de cumplir debido a diversos inconvenientes como lo son la limitación de espacio y la escasa potencia que es posible generar con las tecnologías comerciales actuales.

Una aplicación más realista, con los estándares actuales, sería la extensión de la autonomía mediante, por ejemplo, la alimentación directa de los sistemas auxiliares o la carga de una batería secundaria encargada de alimentar estos sistemas sin necesidad de descargar la batería principal, de forma que la batería principal se dedicaría en exclusiva a dar energía al motor.

2 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, se están desarrollando varios prototipos de vehículos eléctricos a baterías, EV o BEV a partir de ahora, que buscan aprovechar la energía tomada del Sol mediante paneles fotovoltaicos, y la captación se realiza mientras el vehículo circula o durante el estacionamiento en un lugar con radiación suficiente.

El más cercano a salir al mercado es el Sono Sion⁴, ilustrado en la figura 2-1, un BEV, es decir, un EV sin motor térmico, que, por diseño, añade la posibilidad de generar electricidad mediante células fotovoltaicas repartidas por toda la superficie de la carrocería que se puede aprovechar, con el fin de cargar la batería sin necesidad de ser enchufado, reduciendo así la enorme dependencia de la red eléctrica característica de esta clase de automóviles.



Figura 2-1. [4] Fotografía del Sono Sion, uno de los prototipos de BEV propulsado por energía fotovoltaica.

Como se deja ver en la fotografía, buena parte de la superficie de este automóvil está cubierta de paneles fotovoltaicos, que sirven de fuente de energía para alimentar los sistemas del vehículo, cuando sea posible.

Este primer modelo, el Sono Sion, está llegando a las fases finales de desarrollo y podría tratarse del primer vehículo comercial propulsado por energía 100% renovable, procedente de los paneles fotovoltaicos repartidos por el vehículo. Para la batería, si está totalmente cargada, se estima una autonomía de hasta unos 305 km.

Pero el ejemplo anterior no es el único, ya que ha habido intentos de instalar sistemas de captación de energía solar fotovoltaica para alimentar sistemas eléctricos de un vehículo híbrido o 100% eléctrico por parte de los principales fabricantes de la industria automovilística.

El primer caso conocido es la versión solar del Toyota Prius, uno de los vehículos híbridos más conocidos del mercado, que posee un gran panel fotovoltaico instalado en el techo del vehículo, que aporta carga eléctrica tanto a la batería principal como a la batería auxiliar, encargada esta de alimentar los sistemas auxiliares del vehículo. Si la carga se dirigiera a la batería principal, el vehículo podría circular más kilómetros en modo eléctrico que si solamente se hiciera uso de la electricidad almacenada en la batería, procedente de la red.

En este primer vehículo, mostrado en la figura 2-2, también se ha realizado un estudio acerca del principal problema de este sistema de generación eléctrica, ya que un sombreado parcial a determinadas horas del día, como en las primeras horas de la mañana, al atardecer o en los cortos días de invierno existentes en altas latitudes puede mermar el rendimiento de la generación fotovoltaica. Varios han sido los estudios realizados que aportan información sobre el problema de las pérdidas debidas al sombreado de superficies de generación fotovoltaica y de las consecuencias que tiene en esta. Durante este apartado se sintetizarán algunos de estos estudios.

Otro fabricante que también ha apostado por la energía fotovoltaica, aunque este es un caso menos conocido por su limitada aplicación, ha sido Nissan en su modelo Leaf, visto en la figura 2-3, en el que un pequeño panel fotovoltaico alimenta una batería de 12 V dedicada a alimentar los sistemas auxiliares del vehículo.

⁴ Sono Motors, Web de presentación del Sono Sion, URL: <https://sonomotors.com/en/sion/>.



Figura 2-2. [5] Este Toyota Prius ha sido modificado con paneles fotovoltaicos con el fin de investigar el alcance que podría tener esta tecnología para sortear algunas limitaciones propias de los vehículos eléctricos.



Figura 2-3. [6] Este es el panel fotovoltaico instalado en el Nissan Leaf, pensado más como un extra que como un sistema de generación de energía para la alimentación del motor y/o batería principal. Su fin es generar electricidad para mantener en funcionamiento sistemas auxiliares del vehículo, conectados a una batería de reserva de 12V que entraría en funcionamiento si la batería principal estuviera desconectada.

2.1 Estudio de la extensión de la autonomía de un EV utilizando energía fotovoltaica

Si, además del ámbito empresarial y comercial, tenemos en cuenta el ámbito académico, un grupo de investigadores de la Universidad de Surrey en colaboración con las empresas italianas STMicroelectronics e IFEVS ha desarrollado un prototipo de vehículo eléctrico⁵ alimentado por energía fotovoltaica cuyo fin principal es estudiar cómo puede emplearse la energía fotovoltaica en los vehículos eléctricos puede contribuir a la extensión de la autonomía mediante la recarga de su batería.

⁵ Sorniotti, Aldo. "Electric vehicle driving range extension using photovoltaic panels", University of Surrey, 2016

[7] Este vehículo experimental, en el que se basará el proyecto, tiene un sistema compuesto de cuatro paneles fotovoltaicos, tres fijos instalados en el techo más uno situado bajo la luna trasera del vehículo que solo se despliega cuando este está estacionado. En la figura 2-4 se observa el planteamiento del circuito.

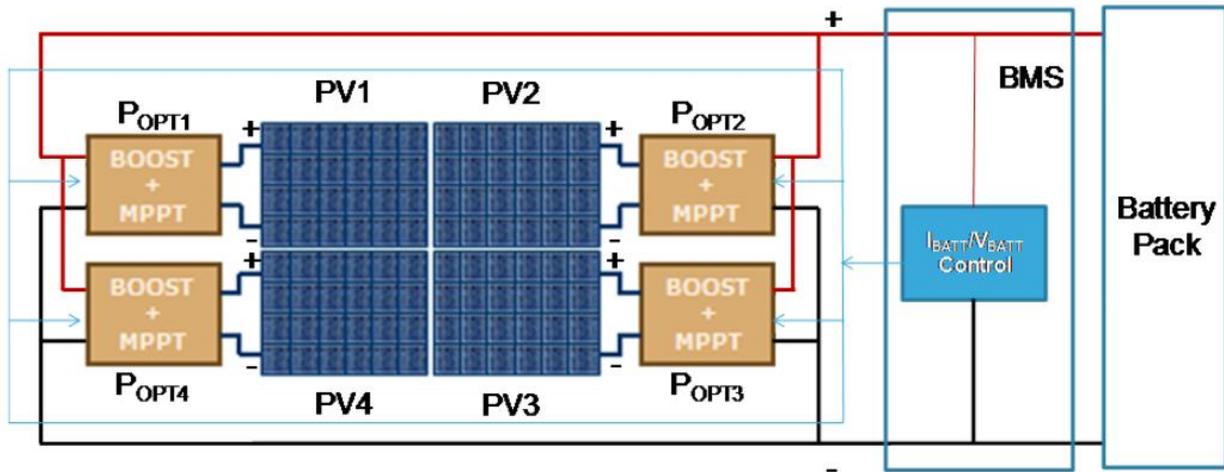


Figura 2-4. Esquema del sistema de alimentación fotovoltaica de la batería de este EV experimental. Como todas las células fotovoltaicas han sido conectadas en serie, cada panel se conecta a su convertidor de forma independiente. El controlador de cada uno aplica el algoritmo MPPT y el control de tensión y corriente de la batería, según el modo de carga.

Cada panel está compuesto por 24 células fotovoltaicas flexibles de silicio monocristalino SunPower C60, de una eficiencia relativamente alta, y todas conectadas en serie. Las especificaciones de cada panel del proyecto explicado en el artículo están contenidas en la **tabla 2-1**. El total de paneles fotovoltaicos de este modelo concreto de vehículo 100% eléctrico es de cuatro, estando uno de ellos oculto bajo el techo, que se desplegaría únicamente cuando el vehículo esté estacionado, asegurando un extra de potencia de carga en este caso.

Tabla 2-1. Datos del panel fotovoltaico del modelo del proyecto de la Universidad de Surrey.

| Característica | Valor |
|--|---------|
| Tensión de circuito abierto (V_{OC}) | 16.32 V |
| Corriente de cortocircuito (I_{CC}) | 6.28 A |
| Tensión de máxima potencia (V_{mpp}) | 13.8 V |
| Corriente de máxima potencia (I_{mpp}) | 5.92 A |
| Potencia máxima (P_{mpp}) | ~80 W |

La batería utilizada consta de cuatro módulos conectados en serie, cada uno formado por una combinación de 14 celdas Panasonic CG18650, dispuestas en dos hileras en paralelo, conteniendo cada una siete celdas en serie. Esta batería toma una tensión que va desde unos 90 V estando descargada hasta unos 115 V estando completamente cargada. La capacidad de cada celda está estimada en 20 Ah, por lo que, teniendo en cuenta que la tensión nominal es de unos 100 V, la energía que puede almacenar cada hilera es de, aproximadamente, 2 kWh.

Como parte del control para el convertidor de potencia, han usado el circuito integrado SPV1020, que eleva la tensión e implementa el algoritmo de perturbación y observación para la búsqueda del punto de máxima potencia. En un próximo apartado se describirá este dispositivo.

En las sucesivas pruebas que se han realizado, la extensión de la autonomía depende totalmente de las horas de luz solar, de la orografía y de la planificación urbana. La distancia adicional que el vehículo recorre gracias a la generación fotovoltaica depende de la latitud, el clima, la trama urbana y la época del año, y se reduce si el vehículo permanece en una zona con sombra o se realiza una conducción a alta velocidad. En la figura 2-5 se pueden ver distintos escenarios en los que se evalúa la extensión de autonomía para diferentes meses del año.

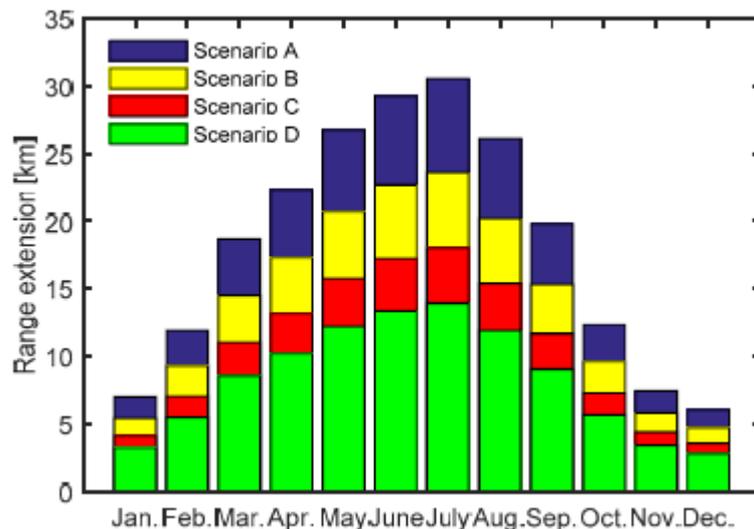


Figura 2-5. Resultados del estudio de la extensión de la autonomía para distintos escenarios y meses del año.

El número de kilómetros adicionales es mayor en los meses de verano que en los de invierno, pasando de apenas 6 o 7 km en diciembre a los más de 30 km adicionales del mes de julio, si se toma en cuenta el escenario A. El escenario A corresponde al vehículo estacionado sin sistemas auxiliares activados, con el panel trasero desplegado, el B igual que el A, pero sin panel trasero. El escenario C representa los que puede realizar el vehículo circulando con el panel trasero desplegado, con los sistemas auxiliares activados. Finalmente, el D representa el vehículo circulando con solo tres paneles generando electricidad, en las mismas condiciones de consumo que el escenario C.

De los convertidores de potencia se espera que su eficiencia sea alta, superior al 90% normalmente. La eficiencia de los convertidores se ha calculado en función de la potencia de entrada y de la irradiancia, en especial se ha calculado para irradiancias de 1000 W/m^2 y de 500 W/m^2 . La figura 2-6 muestra la eficiencia calculada para cada panel fotovoltaico y para las irradiancias anteriormente mencionadas.

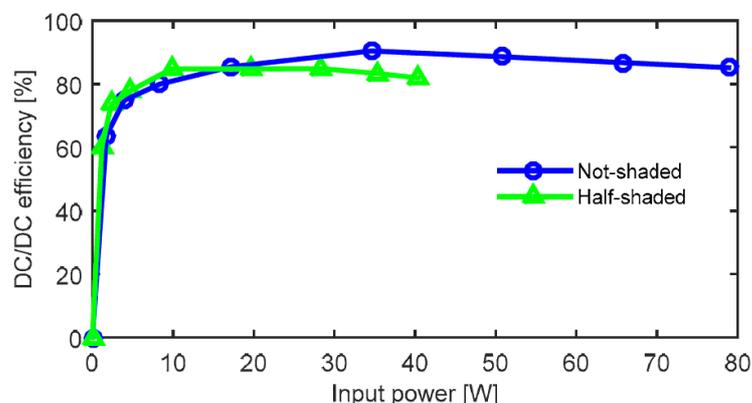


Figura 2-6. Curvas de eficiencia calculadas en función de la potencia generada, para un panel sin sombra, con 1000 W/m^2 de irradiancia, y otro con sombra parcial, con una irradiancia aproximada de 500 W/m^2 . Se puede observar que, en la mayoría de los casos, el valor de la eficiencia queda comprendido entre el 85% y el 90%.

Derivado de lo anterior, una mayor eficiencia significa un menor desperdicio de energía, por lo que el diseño del sistema de carga debe realizarse especificando unas pérdidas inferiores al 10%. Esto es extremadamente importante en un sistema de carga incorporado en un vehículo de tipo *PV-on-roof*, ya que la superficie y la potencia generada son valores limitados, aunque suficientes para motores de escasa potencia.

Además de los resultados anteriores, se va a estudiar la validación del modelo y sistema realizados durante la investigación de la aplicación de la generación fotovoltaica para este EV experimental. Se ha considerado un modelo simulado en condiciones estándar de generación, otro modelo que incorpora los efectos de la temperatura y el sistema de paneles real, con salida filtrada y sin filtrar. Todos se van a comparar en las figuras 2-7, 2-8 y 2-9.

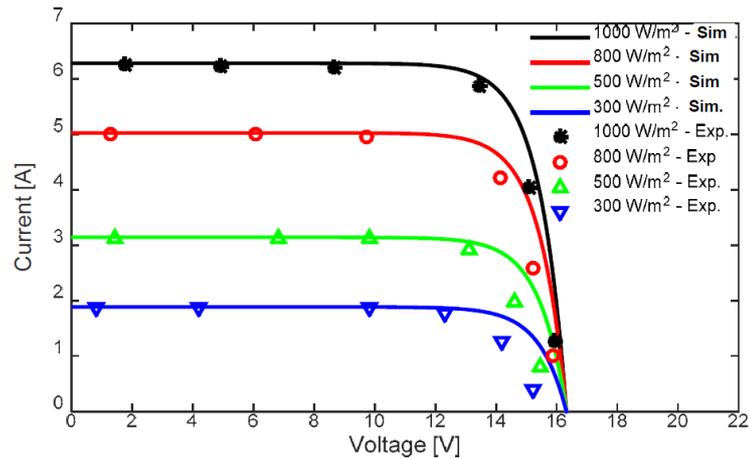


Figura 2-7. Validación experimental del modelo de paneles fotovoltaicos. La mayor diferencia entre el modelo teórico y el experimental se da para irradiancias inferiores a 800 W/m^2 y esto ocurre, sobre todo, para tensiones cercanas al valor de circuito abierto.

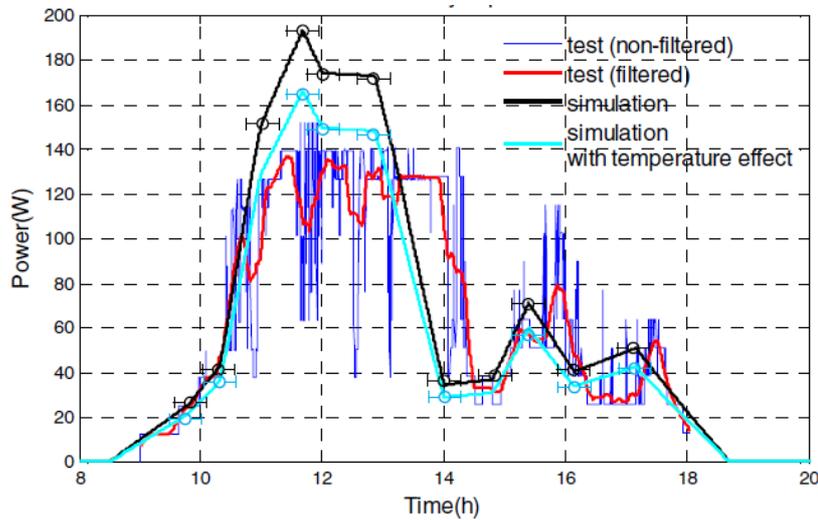


Figura 2-8. Resultados de la potencia generada en las simulaciones y en las pruebas reales. La potencia generada en las simulaciones es mayor que la de las pruebas, con unos 160 W de máximo valor para las simulaciones con efectos de la temperatura. En los experimentos esta apenas llega a un máximo de 130 W .

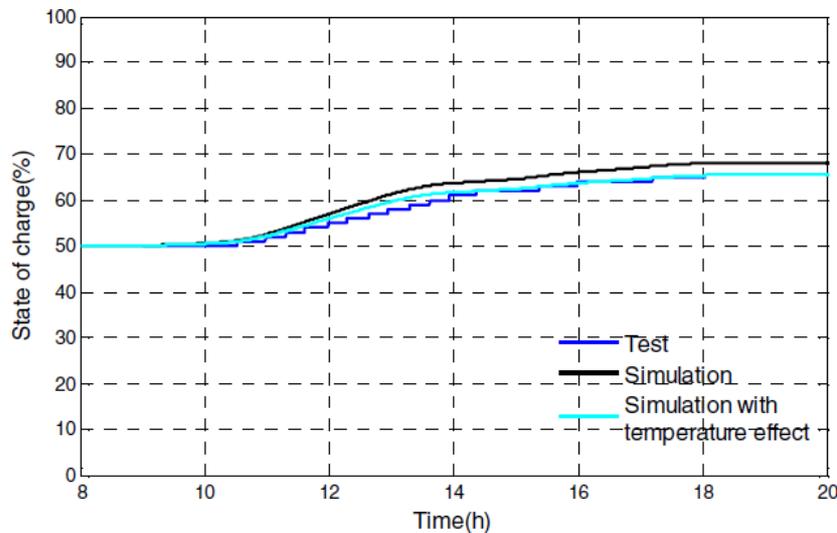


Figura 2-9. Resultados del estado de carga de la batería para las simulaciones y para la prueba real. El resultado de la simulación con efectos térmicos es similar al de la prueba. La carga llega al 66% al final de la prueba real, un valor que no queda muy lejos del casi 70% de la simulación en condiciones estándar.

El modelo ha sido validado para un consumo de energía promedio de 56,94 Wh/km por parte del motor eléctrico que monta, y un consumo de potencia de 1060 W por parte de los sistemas auxiliares del vehículo, considerando el peor de los casos.

2.1.1 SPV1020 y su uso para control MPPT

[8] El circuito integrado SPV1020 hace de convertidor elevador para el sistema diseñado y probado en el estudio anterior, y permite elevar la tensión de entrada, que sería la generada con paneles fotovoltaicos, hasta un máximo de 40 V. Como cualquier convertidor elevador, este tiene límites para elevar la tensión, por lo que precisa de un convertidor adicional que eleve la tensión hasta el valor nominal de la batería.

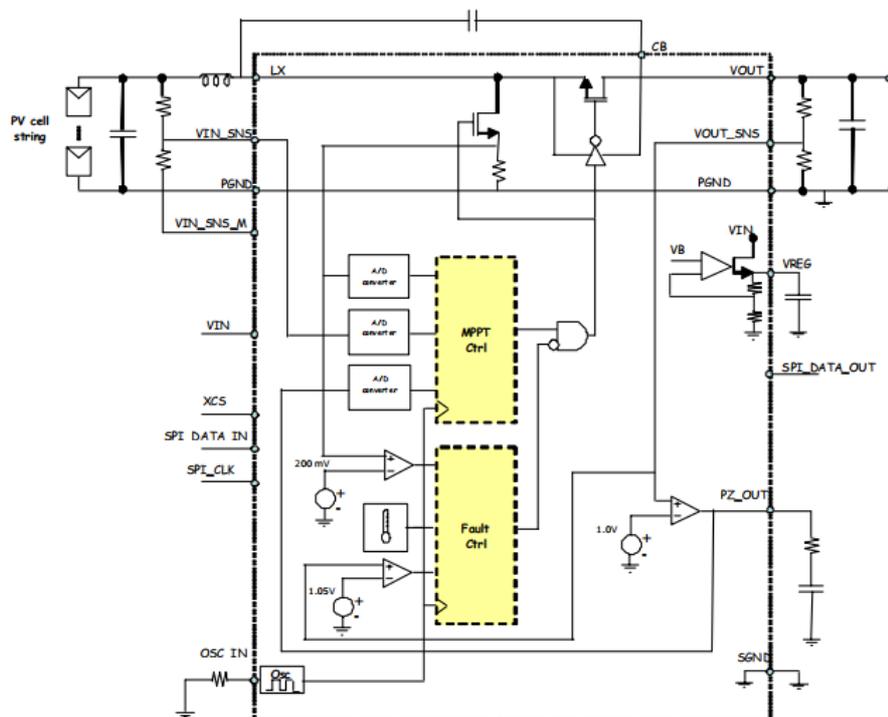


Figura 2-10. Esquema del circuito SPV1020. Emplea transistores MOSFET y MPPT P&O, como el sistema de convertidores que se va a diseñar. El esquema de este integrado es similar al de un convertidor elevador.

Las características fundamentales de este circuito integrado, cuyo esquema es la figura 2-10, son el rango de tensiones de operación, la potencia máxima soportada, la corriente máxima de operación a la salida, la frecuencia de conmutación de los transistores y la eficiencia. Algunas características dependen de factores como la tensión de entrada, la de salida o la temperatura.

En la siguiente tabla 2-2 se detallan las características más relevantes, extraídas de su *datasheet*⁶.

Tabla 2-2. Datos del circuito integrado SPV1020, que implementa un convertidor elevador.

| Característica | Mínimo | Máximo |
|---|----------|---------|
| V_{in} , operación | 6,5 V | 40 V |
| V_{out} , operación | V_{in} | 40 V |
| I_{out} | | 9 A |
| F_{PWM} | 50 kHz | 200 kHz |
| I_{lim} (límite de corriente en switch) | 4 A | 5 A |

⁶STMicroelectronics, SPV1020 Interleaved DC-DC boost converter with built-in MPPT algorithm.

La frecuencia de este sistema, que implementa el algoritmo de búsqueda MPPT, será, junto a las tensiones de entrada y salida y junto a la corriente de salida, uno de los valores que se van a tener en cuenta para el diseño de los controladores de los convertidores de potencia. Esta frecuencia, con un valor configurable comprendido entre 50 y 200 kHz, establecido por defecto entre 70 y 150 kHz, marca las conmutaciones por segundo que va a realizar el transistor del convertidor elevador, y va a determinar la frecuencia de funcionamiento del resto de convertidores.

Este circuito integrado implementa un algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia P&O, o de perturbación y observación, cuyo esquema está en la figura 2-11, conocido por su facilidad de implementación, motivo por el que se usa a pesar de sus oscilaciones en torno al punto de máxima potencia una vez se ha hallado. El funcionamiento de este algoritmo se traduce en producir un incremento o decremento de la tensión según la variación de la potencia medida a la salida.

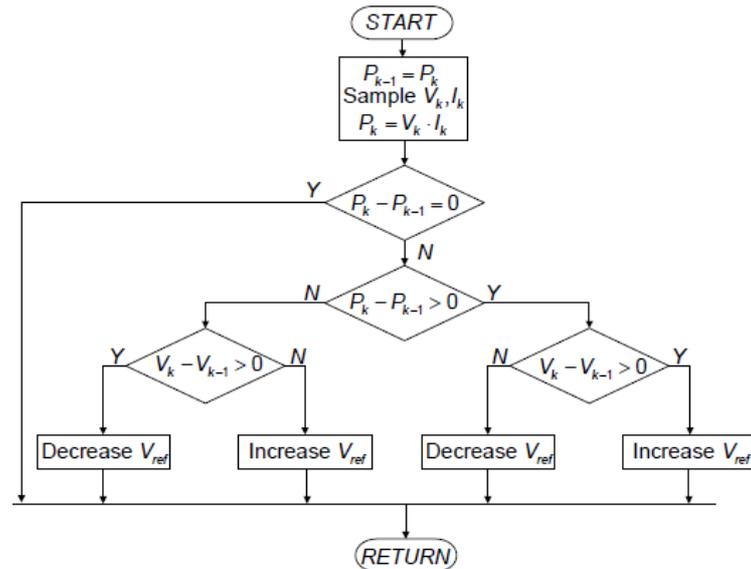


Figura 2-11. Diagrama de flujos del algoritmo P&O. Este algoritmo MPPT se emplea por su facilidad de implementación, aunque presenta algunos inconvenientes. Es el utilizado en el SPV1020, y el empleado en el proyecto de investigación.

Dado que simular el sistema panel-convertidor-batería a las frecuencias de funcionamiento típicas del SPV1020 podría ocasionar una saturación de los recursos disponibles para la simulación y dilatar en exceso la duración, pudiendo demorarse varias horas, se va a tomar para el sistema desarrollado en este proyecto una frecuencia inferior a las especificadas en la hoja de datos. Esta consideración se toma en cuenta porque la excesiva reducción del período de muestreo de la simulación puede dilatar en exceso el tiempo de simulación.

Los datos de interés para la simulación de este circuito son, fundamentalmente, las tensiones de entrada y salida, que deben trabajar siempre en alguno de los rangos especificados, es decir, no pueden superar los valores de saturación del sistema, en este caso la tensión de salida del panel debe tomar un rango entre 6,5 V y la tensión de circuito abierto. El algoritmo MPPT será el encargado de que la tensión supere en todo momento los 6,5 V, de forma que la prueba no será válida si la tensión a la entrada no cumple esa especificación.

Otros datos como la corriente máxima del MOSFET no se tendrán en cuenta, ya que el convertidor va a ser diseñado desde cero, y la corriente máxima soportada por el transistor dependerá del modelo de MOSFET elegido para realizar el convertidor.

2.2 Vehículo eléctrico de alimentación por batería y energía fotovoltaica

[9] Además del caso anterior, se han investigado y explorado otros modelos experimentales de vehículos propulsados, en parte, por energía fotovoltaica. El segundo caso también muestra un vehículo eléctrico alimentado por baterías que admite alimentación directa de sistemas de tracción y auxiliares mediante energía fotovoltaica, que servirían de apoyo a la batería principal, según los requerimientos del sistema y disponibilidad de luz solar.

Este segundo vehículo, desarrollado por el laboratorio francés ESTACA'Lab⁷ y cuyo circuito de alimentación se resume en la figura 2-11, posee un conjunto de paneles fotovoltaicos del que se conocen sus características generales, como la tensión de circuito abierto, la tensión del punto de operación a máxima potencia, la corriente del mismo punto anterior y otros detalles que pertenecen a los convertidores.

La idea de este sistema es utilizar la batería como fuente de energía principal para la tracción mecánica, mientras que el panel fotovoltaico es una fuente de energía secundaria que sirva de apoyo para la alimentación de los sistemas del vehículo y para la carga de la fuente primaria.

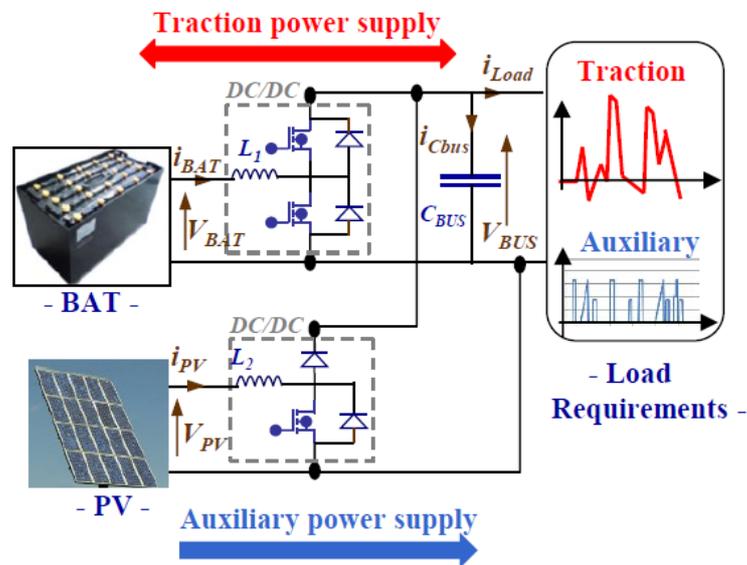


Figura 2-11. Esquema del circuito de este EV experimental con un sistema de alimentación eléctrica híbrida por batería y generación fotovoltaica. El convertidor empleado que une los sistemas eléctricos con la batería es del mismo tipo que el que los conecta con el grupo de paneles fotovoltaicos, de tipología elevadora, pero bidireccional. Esto permite la carga de la batería con la potencia generada sobrante, si el balance es positivo.

Los transistores empleados son, nuevamente en este segundo desarrollo, transistores MOSFET.

Del panel fotovoltaico, la batería, y otros elementos del sistema se conocen las especificaciones técnicas de la tabla 2-3.

Tabla 2-3. Características de distintos elementos del circuito

| Símbolo | Característica | Valor |
|--------------|----------------------------------|-------------|
| V_{OC} | Tensión de circuito abierto | 44 V |
| I_{MPP} | Corriente máxima potencia | 15 A |
| V_{MPP} | Tensión máxima potencia | 32 V |
| V_{BAT} | Tensión de la batería (nominal) | 42 V |
| C_{BUS} | Condensador de DC-link | 4 mF |
| V_{BUSref} | Tensión de referencia de DC-link | 50 V |
| L_1 | Inductor de batería | 100 μ H |
| L_2 | Inductor de panel fotovoltaico | 100 μ H |

⁷ T. Azib, N. Bleichner, A. Ceschia, A. Trompe, B. Mathevet, C. Larouci, *Adaptive Control of Hybrid Photovoltaic Generator for Onboard Automotive Application*, ESTACA'Lab, 2016

Según la tabla anterior, el motor y los sistemas auxiliares están conectados a un DC-link que tiene una tensión de nodo de 50 V, mientras que el equipo de generación de energía fotovoltaica se realiza a 32 V de tensión y 15 A de corriente continua, lo que supone un máximo de 480 W de potencia que se puede destinar a cargar la batería, aunque se desconoce cómo están distribuidos los paneles fotovoltaicos o las celdas de la batería.

Los convertidores de potencia emplean una arquitectura paralela, con un DC-link como nodo común, por lo que comparten tensión de salida. Ambos convertidores son convertidores elevadores convencionales, una opción viable dada la poca diferencia de tensión existente, pues se pasa de 32 V a unos 50 V. El convertidor de la batería es bidireccional, lo que permite que la potencia sobrante del consumo de energía por parte de los sistemas del vehículo pueda cargarla, en caso de que el consumo de energía sea menor que la generación.

Una vez conocidas las especificaciones del sistema, se pasa a describir el controlador que emplea para regular la tensión y la potencia consumida por la tracción y por los sistemas auxiliares. El controlador para el panel fotovoltaico, o para la batería, consta de dos etapas, una de gestión de fuentes de energía y otra de regulación de la corriente.

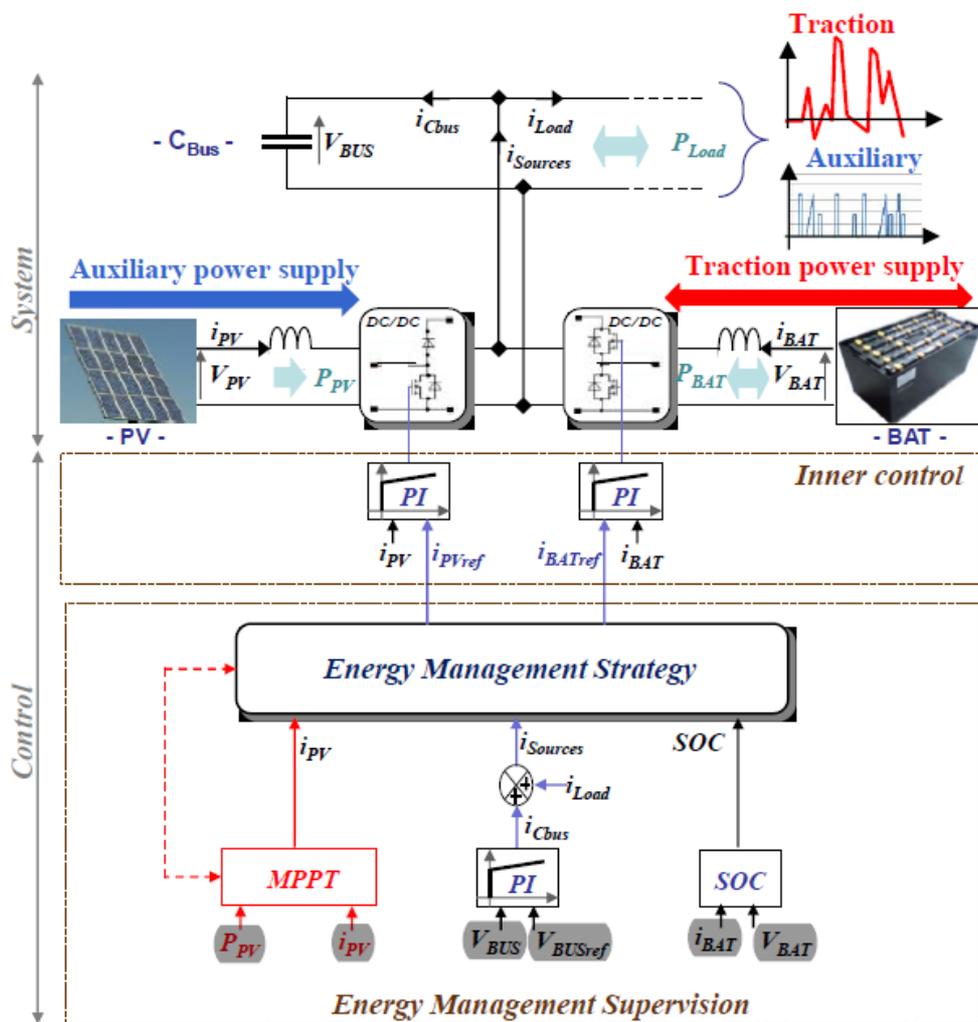


Figura 2-12. Sistema de control de los sistemas eléctricos de este vehículo. Se diferencian dos etapas en los controladores, una de supervisión de la generación de energía y otra de control de corriente, realizada a partir de controladores PI. La etapa de gestión de energía genera dos referencias de corriente, para el panel PV y la batería a partir de los datos de tensión y corriente medidos en varios nodos de entrada y salida del sistema.

El controlador, visto en la figura 2-12, se compone de dos etapas de control en cascada. La primera, de gestión de energía toma varias corrientes en la entrada y el estado de carga de la batería. Una de ellas es la corriente del panel fotovoltaico, conocida mediante la aplicación del algoritmo MPPT. La otra corriente que entra en este bloque es la corriente total que sale de las fuentes de energía, que se consumen en el condensador de DC-link y en los sistemas del vehículo.

De esta primera etapa de control salen la corriente de referencia de panel fotovoltaico (i_{PVref}) y de batería (i_{BATref}), que depende de la potencia demandada y de la potencia que es capaz de proporcionar el panel fotovoltaico. Se intenta que toda la potencia no generada por el panel fotovoltaico sea suplida por la batería.

Además, se modela la batería a partir de su tensión real y su estado de carga, mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} V_{bat} = E_{BAT} - R_{int}I_{BAT} \\ SOC = 100 \left(1 - \frac{\int I_{BAT} dt}{Q_{BAT}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Donde V_{bat} es la tensión de la batería, I_{BAT} la corriente de la batería, R_{int} su resistencia interna, Q_{BAT} la carga de la batería y E_{BAT} es la tensión variable de la batería. Esta se representa mediante otra ecuación diferencial:

$$E_{BAT} = E_0 - k \frac{1 - SOC}{SOC} Q_{BAT} + A e^{-B(1-SOC)Q_{BAT}} \quad (2)$$

En esta otra ecuación E_0 representa la tensión de circuito abierto de la batería, k la tensión de polarización y A y B son voltajes y capacidad exponenciales, respectivamente, aplicables en la zona exponencial de carga.

La corriente que sale de las fuentes de tensión se obtiene al sumar la corriente de la carga y la corriente consumida por el condensador, que se regula mediante un controlador PI que obtiene la tensión medida en la salida del sistema (la tensión de DC-link, llamada V_{BUS}) y la tensión de referencia o V_{BUSref} . Esta se busca que permanezca en 50 V independientemente de las condiciones de entrada o salida.

Esta etapa de gestión de energía toma en cuenta si la batería se encuentra en carga o en descarga, como aparece reflejado en el siguiente esquema 2-13.

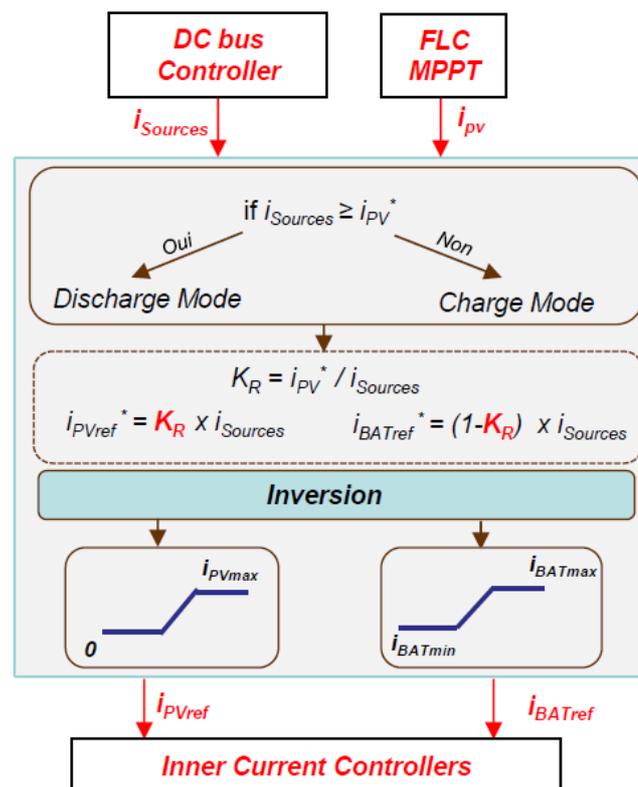


Figura 2-13. Esquema de la etapa de gestión de energía, que, a partir de las corrientes $i_{Sources}$ e i_{PV} medidas, determina el peso de la corriente de la batería o de la generada por panel PV según el parámetro K_R , así como el modo de funcionamiento de la batería, en carga o descarga según la corriente que demande el sistema.

La etapa de control interna toma las referencias de corriente i_{PVref} e i_{BATref} y calcula el duty cycle de los dos convertidores de potencia, el de la batería y el del panel fotovoltaico, según las necesidades del sistema, a partir de las corrientes de referencia y las medidas en cada uno de ellos. Ambas ramas emplean un controlador PI, conocido por mantener un error cero en el régimen permanente del control.

El control MPPT se realiza mediante un algoritmo de control de lógica difusa, que no se aplicará ni desarrollará en el presente proyecto. Además, la diferencia entre este algoritmo y los que se emplean normalmente en generación fotovoltaica (P&O, conductancia incremental) es que este algoritmo da directamente la corriente de referencia del panel fotovoltaico, y no su tensión, por lo que este vehículo implementa un control de potencia basado en la corriente.

Las entradas del controlador esquematizado en la figura 2-14 son las siguientes:

$$\begin{cases} E(k) = \frac{P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1)}{V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1)} \\ CE(k) = E(k) - E(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

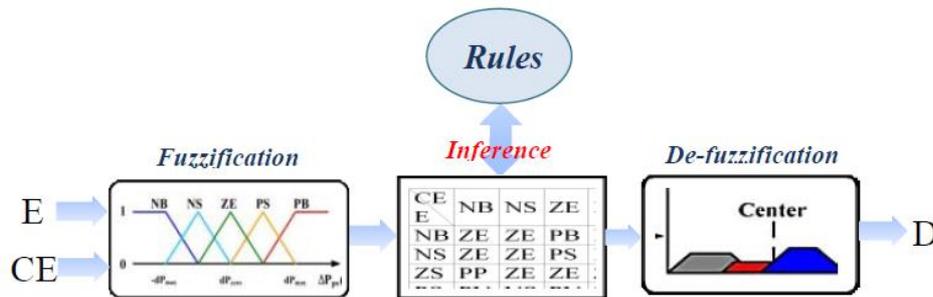


Figura 2-14. Esquema del controlador MPPT por lógica difusa. Este controlador da directamente la corriente de referencia de salida del panel fotovoltaico calculada buscando maximizar la potencia generada. La entrada se calcula mediante la potencia generada y la tensión del panel fotovoltaico.

Los resultados de este proyecto, que se han obtenido en condiciones de iluminación uniforme, pero variable, y son una buena forma de comprobar cómo se comporta el sistema en un entorno de iluminación variable.

Se ha tomado la tensión del DC-link, que tiende siempre hacia ese valor de referencia en cualquier circunstancia, la potencia generada por el panel fotovoltaico, superior a los 480 W teóricos para 1000 W/m², aunque sin llegar a 600 W, la potencia aportada por la batería o consumida por esta misma cuando se carga con la potencia sobrante del panel, y las corrientes de referencia y medidas en batería y panel fotovoltaico.

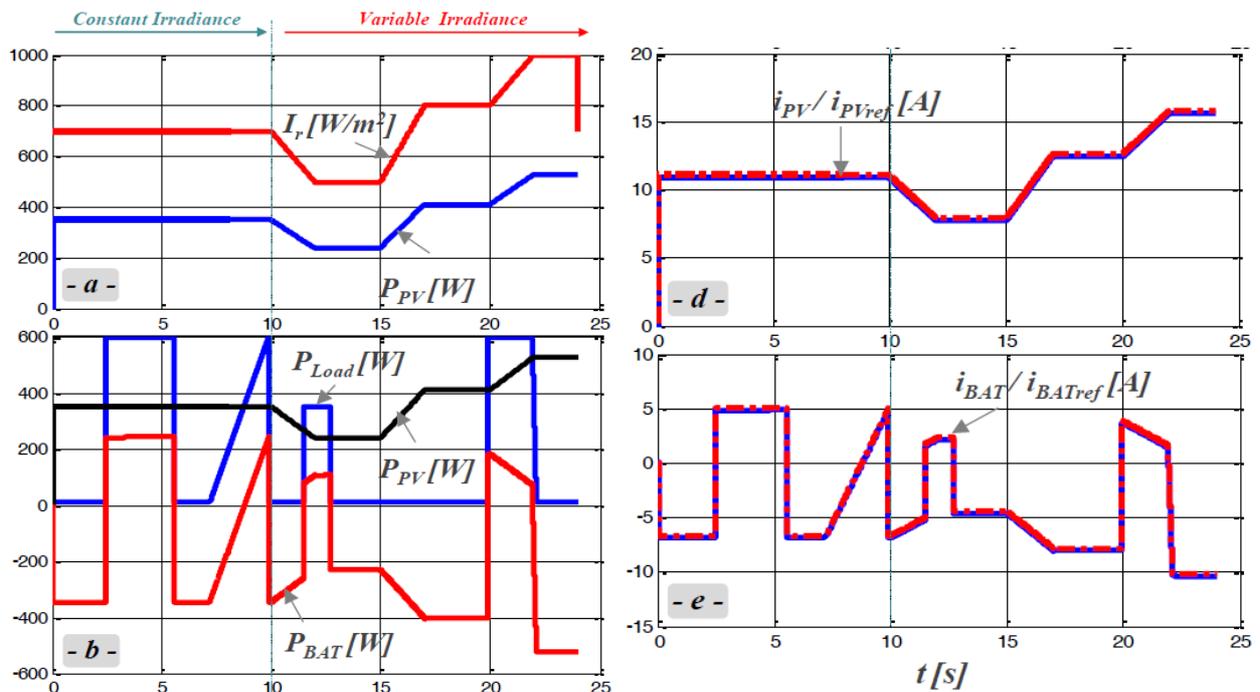


Figura 2-15. Resultados de uno de los experimentos realizados con este sistema. En (a) se muestra la potencia generada por el panel fotovoltaico, que varía según la irradiancia. En (b) se compara esta potencia con la de la batería y con la demandada por el sistema. En (d) y (e), se observa la corriente del panel y de la batería, respectivamente. En (b) se confirma que, si la potencia generada es mayor que la consumida, la batería carga.

2.3 Estrategia CC-CV de carga de baterías

La carga de la batería se realiza mediante la técnica mixta a corriente constante y a tensión constante. Esta técnica se suele aplicar en un convertidor *flyback*, que permite superar los límites de los convertidores elevadores básicos, como se verá en los dos siguientes artículos.

En el primero de dos artículos, titulado *Optimal CC-CV charging of lithium-ion battery for charge equalization controller*, [10] se describe un circuito similar al que se empleará en el proyecto, que conecta una fuente de tensión, que en el caso de este proyecto será un panel fotovoltaico controlado mediante el algoritmo MPPT, con la batería, salida del sistema que se está analizando.

El convertidor flyback tiene la siguiente estructura, aunque algunos elementos, como la bobina de magnetización, son elementos resultantes de modelar el transformador, por lo que forman parte de sus características.

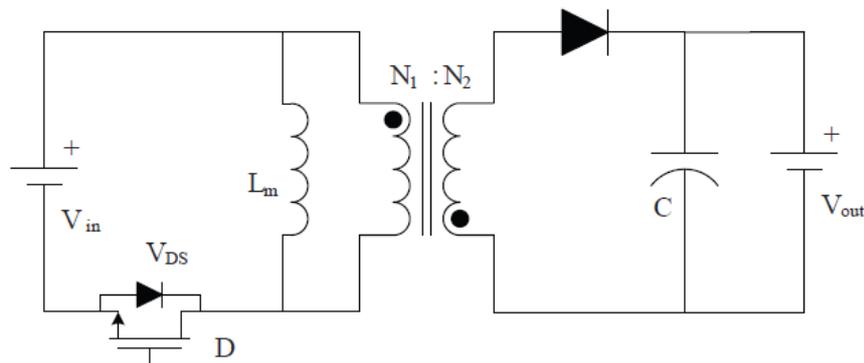


Figura 2-16. Esquema del circuito estudiado, formado por dos fuentes de tensión y un convertidor flyback. La fuente de tensión de la derecha es la celda de la batería que se va a cargar en estos experimentos.

En la siguiente tabla se especifican los parámetros de interés del convertidor flyback, que traslada la energía desde la entrada hasta la celda más descargada de la batería, por equalización.

Tabla 2-4. Características de los elementos que forman parte del convertidor flyback anterior.

| Símbolo | Característica | Valor |
|-------------|------------------------------------|------------------------|
| P_{in} | Potencia de entrada | 10 W |
| f | Frecuencia de conmutación | 1000 Hz |
| T_s | Período de muestreo | 10^{-4} s |
| $N_1:N_2$ | Relación de transformación | 110:5 |
| D_{max} | Duty Cycle | 0.5 |
| L_m | Inductancia mutua, transformador | $1,68 \cdot 10^{-4}$ H |
| C_1 | Condensador de filtro, Flyback | 500 μ F |
| V_{DSmax} | Tensión máxima soportada en MOSFET | 833 V |
| V_{Dmax} | Tensión máxima soportada en diodo | 40 V |

La batería instalada en el sistema en el que se estudia aplicar la estrategia de carga CC-CV se modela mediante la siguiente ecuación matemática:

$$V_{B,out} = \left(E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Ae^{-B \cdot it} \right) - i \cdot R_s \quad (4)$$

En esta ecuación, V_{Bout} es la tensión de carga de la batería, E_0 es la tensión que permanece constante en la batería, a la que se suman las variaciones debidas al estado de carga de la batería, R_s la resistencia interna en ohmios, K es la constante de polarización en A/h, i la corriente de la batería, it es la capacidad extraída de la batería en Ah, resultado de integrar la corriente que circula por la batería medida durante un periodo de tiempo determinado, Q es la capacidad máxima de la batería, i^* es la corriente de baja frecuencia, y A y B representan la tensión de la zona exponencial en voltios y la capacidad exponencial en A/h.

El controlador elegido para la carga de la batería mediante convertidor flyback y técnica de carga mixta CC-CV es del tipo PI, que tiene el siguiente esquema con la forma paralela en la figura 2-17.

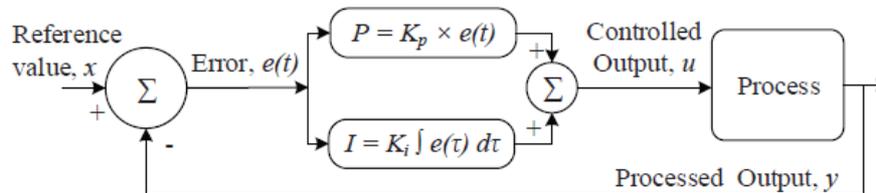


Figura 2-17. Esquema del controlador PI implementado en el sistema, mostrado con forma paralela. En este esquema, e es el error, K_p es la constante proporcional y K_i la constante integral. Estos parámetros se fijarían con un algoritmo PSO.

En el caso concreto del artículo, los parámetros se fijan mediante un algoritmo PSO (optimización de enjambre de partículas), pero no se va a tratar en este proyecto, por lo que los parámetros serán fijos y definidos mediante un método de prueba y error hasta dar con el controlador que ofrezca la mejor respuesta.

El gráfico siguiente da una idea de cómo se comporta una batería durante una carga CC-CV. Durante el tramo de carga a corriente constante, la tensión va aumentando, pero la corriente permanece igual, mientras la batería se carga. Durante el tramo de carga a tensión constante, se produce una disminución de la potencia de carga, mientras la tensión permanece constante, por lo que la corriente de la batería disminuye hasta que se alcanza el valor mínimo, por debajo del que no puede mantenerse una carga en la batería y que está especificado en la batería.

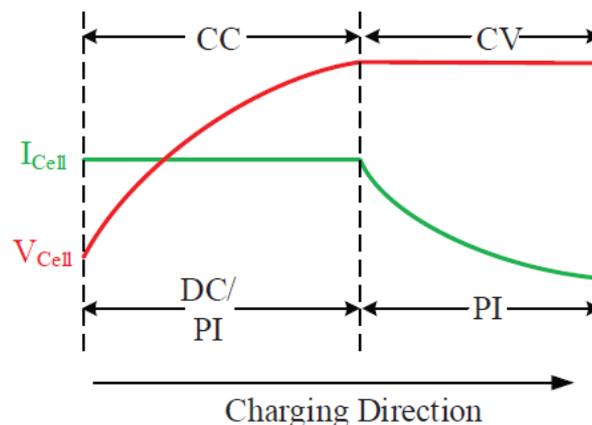


Figura 2-18. En este esquema se muestran las dos zonas diferenciadas de la estrategia de carga CC-CV. En verde, se muestra la corriente de carga de la batería, que permanece constante en el modo CC hasta que se alcanza la tensión de referencia en el modo CV, luego disminuye progresivamente hasta que esta se llena. La tensión se muestra en rojo, y es ascendente, desde un valor mínimo, durante el modo de carga CC.

Los controladores para la tensión constante y para la corriente constante son diferentes, y se procede de la siguiente manera: se definen referencias para la tensión en el caso del control CV y para la corriente en el caso del control CC, se halla el error, que se pasa al algoritmo PSO. Este algoritmo obtiene las constantes de control óptimas. Luego, del controlador sale el duty cycle de ambos tipos de control hacia la entrada del PWM. La onda resultante entrará al MOSFET del convertidor según el nivel de carga de la batería u otro criterio, dependiendo del momento en el que se opte por un control u otro, como se ve en el esquema.

Sin embargo, el fin de este artículo es trasladar la potencia de las celdas más cargadas a aquella con menor carga, ecualizando la batería, pero usa este método de carga empleado en la mayor parte de las baterías, con un control robusto.

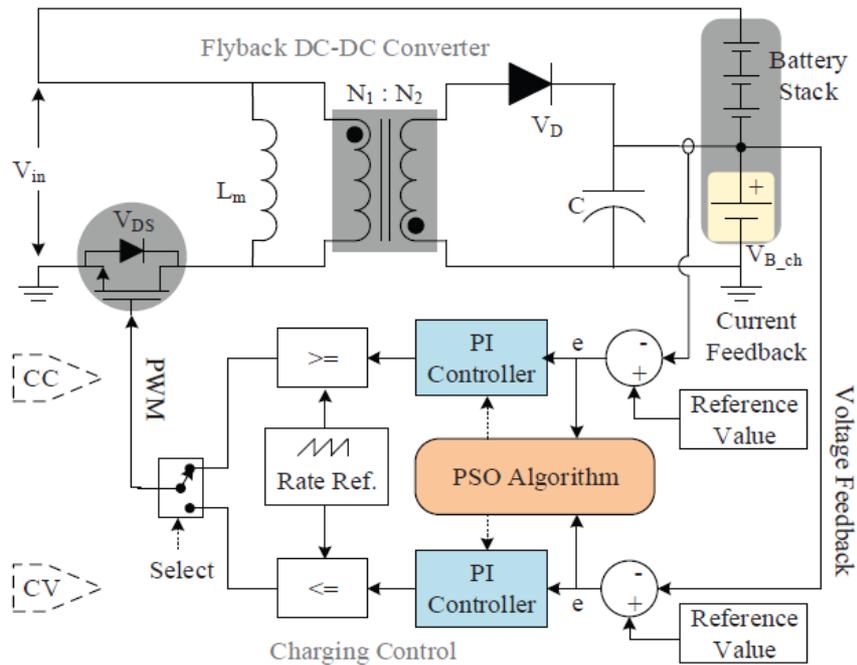


Figura 2-19. Esquema del circuito con el controlador. Ambos modos de carga emplean controladores PI, con la diferencia de que el controlador de CC emplea el error de la corriente medida en la salida y el controlador CV emplea el error de tensión. Las condiciones del PWM están invertidas en ambos controladores.

En el siguiente experimento, se carga una celda de batería de 3,7 V a una corriente máxima de 3,1 A. Se tienen en cuenta también otros valores como la tensión de estrés de un MOSFET, valores que no se alcanzarían en el proyecto presente, ya que se trabajarán con tensiones del siguiente máximo:

$$V_{MOSFET} = 35 V - \left(-\frac{35}{102} \cdot 117,6 V \right) = 75,35 V$$

Posiblemente el máximo total sea algo más debido a alguna sobreoscilación que se mantenga durante poco tiempo, por lo que la tensión de estrés del MOSFET será mucho menor que la de este experimento. Las gráficas del experimento son las siguientes, en detalle.

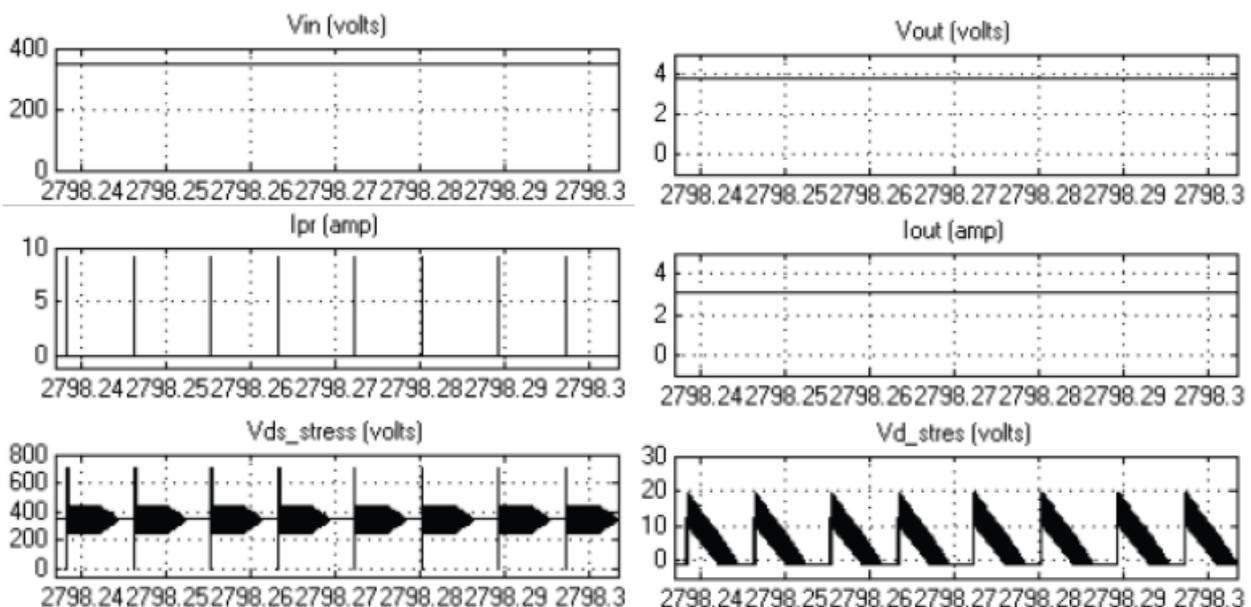


Figura 2-20. Resultados del experimento de carga con la técnica de carga CC-CV. A la izquierda se observan los valores de tensión y corriente de la entrada, mientras que a la derecha se observan los valores de tensión y corriente de la salida. Las gráficas inferiores representan las tensiones de estrés para los semiconductores.

Se pasa de una tensión de batería de 345 V existente para noventa celdas en serie a la entrada del convertidor flyback, a una tensión cercana a 4 V. La corriente es pulsada en la entrada y hay períodos cortos de tiempo en los que la tensión alcanzada en el MOSFET es muy alta, superior a 600 V.

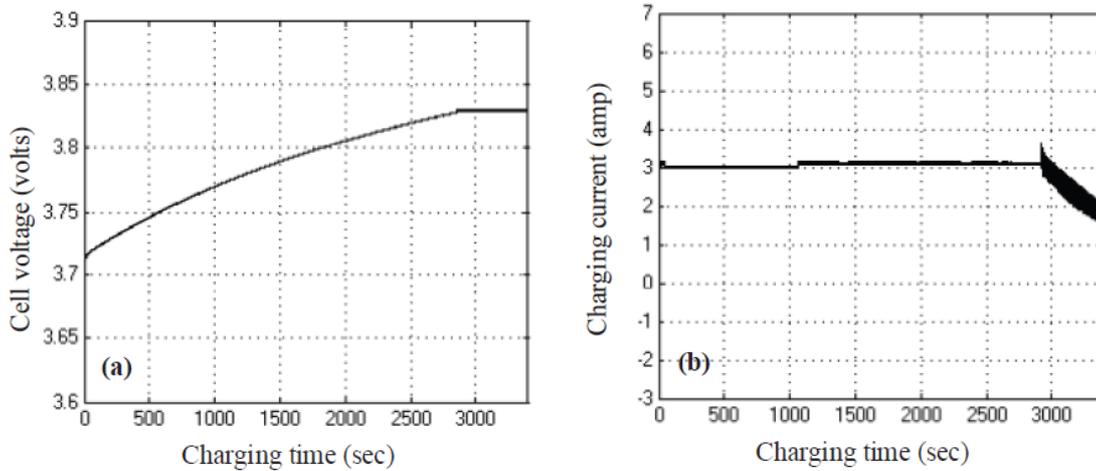


Figura 2-21. Gráficas de tensión y corriente de la batería, a la salida del convertidor. A la izquierda, gráfica de la tensión de carga de la batería, donde se diferencian una zona ascendente (modo CC) y otra constante (modo CV). La tensión en la zona creciente no es lineal. A la derecha, la gráfica representa la corriente, que fuera de la zona constante (modo CC) desciende progresivamente (modo CV) hasta que se finaliza el experimento cuando la carga llega al máximo.

A la salida, por el contrario, la corriente es constante a 3,1 A mientras no se alcance el valor máximo, de 3,83 V más o menos, al menos superior a 3,7 V. Una vez se alcance la tensión más alta, la corriente baja progresivamente hasta el valor de corte, que en este caso depende de la ecualización de cargas. Estos valores pueden verse en las gráficas de la figura 2-21.

2.4 Cargador de baterías para un EV con alto factor de potencia

En otro artículo, titulado *An Improved Battery Charger for Electric Vehicle with High Power Factor*, [11] el cargador de baterías está conectado a la red eléctrica, pero podría aplicarse a cualquier otra fuente de energía, ya que se centra en las estrategias de carga de la batería.

El circuito combina dos clases de convertidores en cascada, siendo la estructura la misma que se va a emplear en el proyecto de electrónica de potencia, aunque en este caso se opera con un convertidor reductor-elevador y un convertidor flyback.

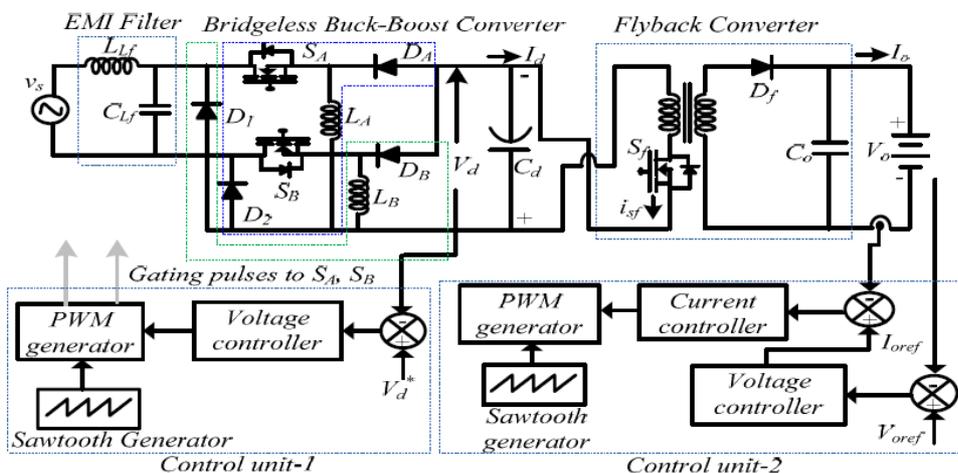


Figura 2-22. Esquema general del circuito, conformado por un convertidor reductor-elevador y un flyback. El flujo de energía iría de la red eléctrica a la batería, que puede tener una tensión menor a esta. Los controladores de tensión y corriente mostrados abajo son de tipo PI, ya controlen tensión o corriente.

El sistema de control para el convertidor reductor-elevador sirve para controlar la tensión en la salida de este primero a través del error obtenido a través de la tensión medida en la salida del reductor-elevador y la tensión de referencia. El resultado se pasa a un PWM que regula las conmutaciones de cada uno de los MOSFET que forman parte del convertidor reductor-elevador sin puente (hay más de uno).

El convertidor flyback es el encargado, nuevamente, de controlar la carga de la batería con el empleo de la técnica de carga CC-CV. Este controlador toma tanto la tensión como la corriente medida en la salida del convertidor.

En primer lugar, compara la tensión V_o con la tensión correspondiente de referencia, y un controlador de tensión genera la referencia de corriente a partir del error de tensión. Esta, una vez obtenida, se compara con la corriente medida y se pasa el error a un controlador de corriente, que fija mediante otro PWM la corriente a la salida del convertidor flyback.

El convertidor reductor-elevador posee tres etapas en cada ciclo de conmutación, ya que trabaja en modo de conducción discontinua. En una primera, se carga la bobina a través del MOSFET que existe en el lado de la entrada del convertidor, tras el filtro de interferencia electromagnética. Luego, otra fase de descarga del inductor da paso a la corriente hacia el convertidor flyback, quedando la red aislada del convertidor durante este instante.

Una vez se descarga completamente la bobina, en una tercera fase no circula corriente por ninguno de los semiconductores del convertidor reductor-elevador. Se podría entrar en detalle para mostrar las ecuaciones que describen el comportamiento de este, pero se va a optar por mostrar las gráficas de tensiones y corrientes de cada elemento de este circuito por cada ciclo de conmutación en régimen permanente. Si hay dos convertidores es para poder cubrir todo el rango de tensiones de la red, tanto positivas como negativas.

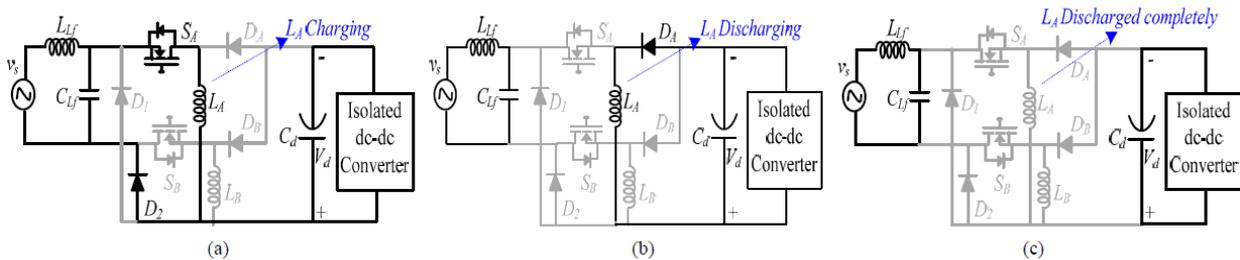


Fig.3 Operating Principle of Bridgeless Converter Fed battery charger (a)-(c) switch ON, switch OFF and freewheeling period during positive half line

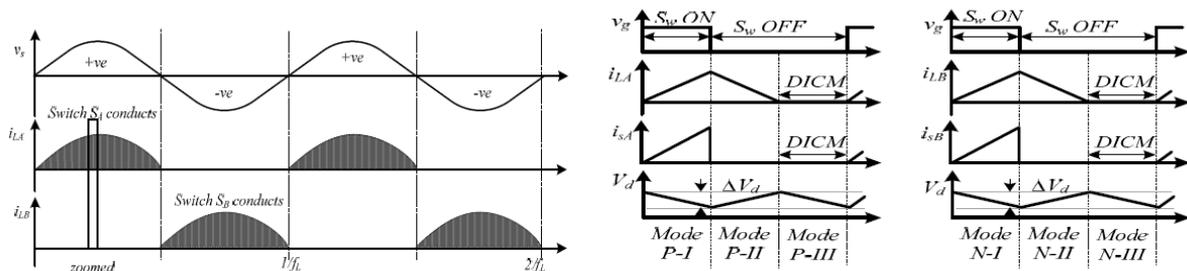


Figura 2-23. Arriba, los tres estados de funcionamiento en régimen permanente del convertidor reductor-elevador. Este, a diferencia del proyectado para la carga de baterías de EV, funciona en modo de conducción discontinua, por lo que tiene una tercera fase, aparte de la de carga y la de descarga de la bobina, en la que no circula corriente por la bobina ni por los elementos de conmutación. Abajo, se detallan las gráficas propias de un convertidor reductor-elevador funcionando en este modo de conducción.

La tensión media que se mide a la entrada es de 198V, siendo la tensión de la entrada una tensión alterna de 220V, aunque podría tener cualquier otro valor. Se propone para el convertidor una frecuencia de conmutación de 20 kHz, aunque puede ser ajustada de forma variable. Los valores de las inductancias calculados son de $345\mu\text{H}$ para las del convertidor y $1,7\text{mH}$ para la del filtro y $191\mu\text{H}$ para la de magnetización del convertidor flyback. La capacidad calculada es de 976nF .

La carga de la batería se realiza a corriente constante, pero, sin embargo, la referencia de corriente se obtiene fijando una referencia de tensión en la salida, que permanecen constantes con el tiempo durante este modo de carga (CC). La referencia de corriente para el modo CC se fija a partir del resultado del controlador PI que controla la tensión en la salida.

El controlador de corriente es un PI que toma el error de corriente de la salida para calcular el duty cycle que se pasa al generador de PWM. Para el control a tensión constante, que se habilita a partir del 80% del estado de carga, se fija una tensión a la salida de referencia, por lo que el controlador de corriente de la batería deja de tener efecto y el controlador de tensión reduce el error mediante el ajuste de las constantes de control.

Las constantes se eligen de acuerdo con el tiempo de respuesta que se desea. Una baja constante integral significa un tiempo de respuesta muy lento, mientras que un valor muy alto puede dañar el sistema por la inestabilidad del posible controlador. Los pulsos de la puerta del MOSFET se generan mediante PWM, lo que permite un rango ajustable de duty cycle.

El hardware se ha probado fijando una potencia de carga de 850W y una tensión de salida d. Se pasa así de una tensión de 220 V a 50 Hz a otra continua de 300 V en el DC-link de interconexión de convertidores elevadores y flyback. A la salida, se ha colocado una batería de 48V con una capacidad de 100Ah. En las siguientes capturas de las medidas en análisis transitorio se confirman estos valores.

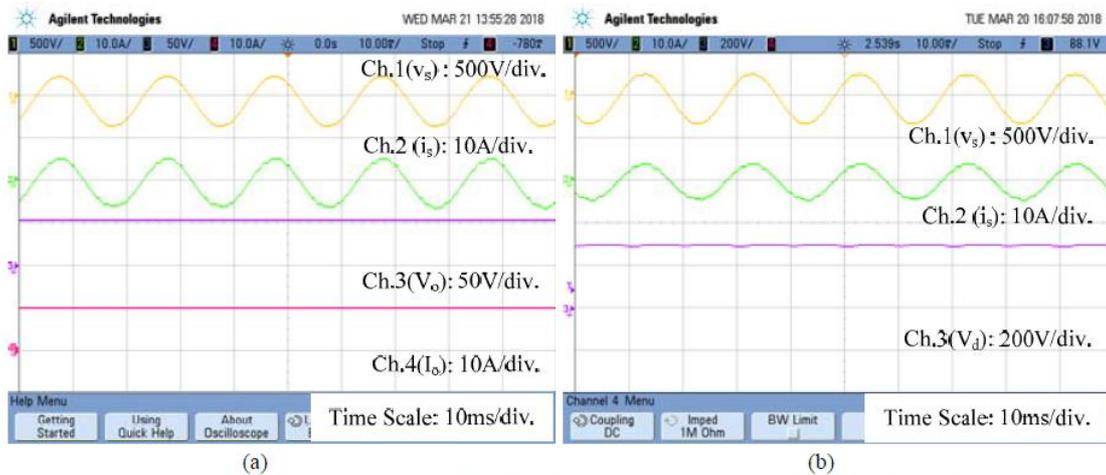


Figura 2-24. Resultados de las tensiones y corrientes de entrada del convertidor reductor-elevador y salida del flyback en la izquierda. Estos resultados corresponden a: Tensiones y corrientes de la red eléctrica, en los canales 1 y 2, y tensión y corriente de batería en los canales 3 y 4 (a), y tensiones y tensión del DC-link en la derecha, medida en el canal 3 en (b).

En estas ampliaciones se observan también los valores de tensión y corriente de elementos semiconductores, corrientes de inductores y tensiones del condensador.

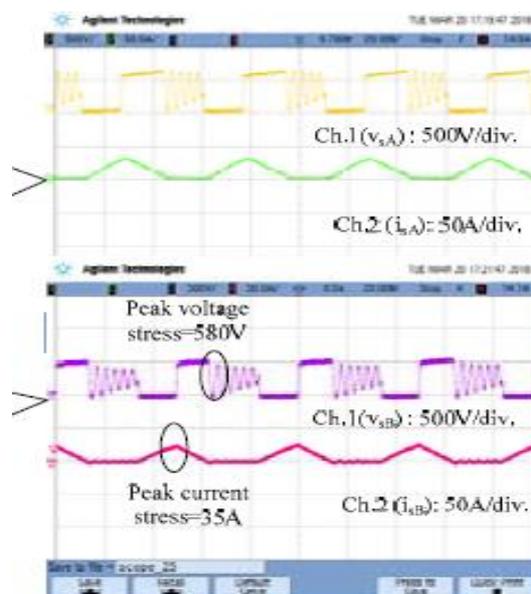


Figura 2-25. Detalle de las tensiones y corrientes de estrés de diodos y transistores del convertidor *Buck-Boost*. Las tensiones alcanzan los 580V en el MOSFET, mientras que se alcanza una corriente de 35 A en los diodos.

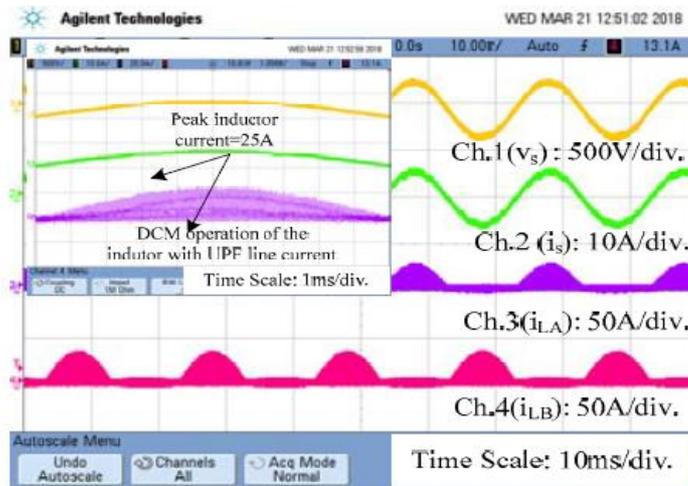


Figura 2-26. De esta gráfica, únicamente importan las corrientes de pico del inductor, en el canal 3, de 25 A. Para el inductor del convertidor que rectifica y reduce/aumenta las tensiones negativas, en el canal 4 se observan valores similares a los vistos para el canal 3.

2.5 Información sobre la carga de celdas paralelas de baterías y su protección

Cargar las baterías utilizando energía fotovoltaica con cualquier corriente que no respete sus límites, según se expone en el artículo *Current Controlled Charging Scheme for off Board Electric vehicle Batteries from Solar PV Array*, [12] puede dañar las baterías, ya que las corrientes de carga pueden llegar a ser muy altas.

El algoritmo MPPT utilizado para asegurar que la generación de potencia es la máxima persigue el objetivo de cargar la batería a la mayor corriente posible, con un valor cercano, aunque no igual, a la corriente de cortocircuito, lo que podría causar daños si la corriente no se soporta.

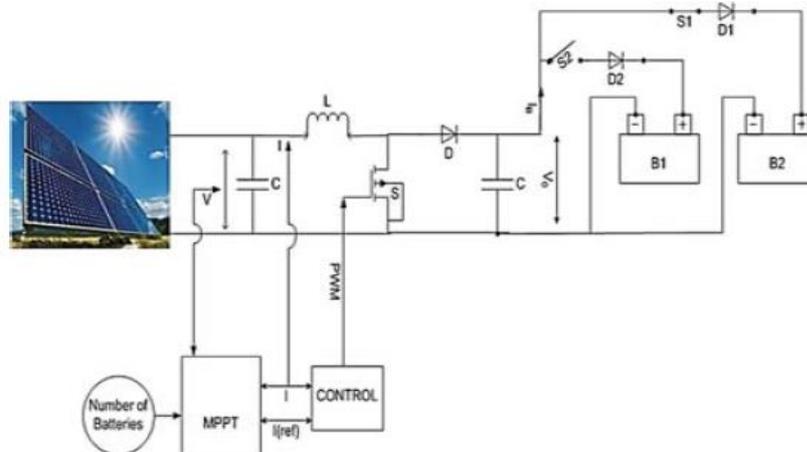


Figura 2-27. Sistema de carga de baterías mediante paneles fotovoltaicos, con una fase de control que fija el duty cycle mediante algoritmo MPPT, que toma tensión y corriente de salida de los paneles fotovoltaicos y fija una corriente de referencia para la bobina. Las baterías son celdas en paralelo con elementos de protección.

El método de carga que este artículo propone está pensado para gestionar la carga de celdas en paralelo que cuentan con un diodo de bloqueo y elementos de conmutación para su protección. Esta estructura recuerda a la que tiene la batería de un vehículo eléctrico, formada por muchas celdas que se combinan en serie y en paralelo con el fin de alcanzar un voltaje y capacidad que asegure la alimentación de este durante largos desplazamientos, de varias centenas de kilómetros.

El sistema de control aplica un algoritmo MPPT hill climbing para definir la referencia de corriente deseada en la entrada del convertidor, a diferencia de los convencionales, que fijan una tensión de referencia. Asimismo, el número de celdas conectadas será otro de los datos que tomará el MPPT para calcular la corriente generada por el panel fotovoltaico.

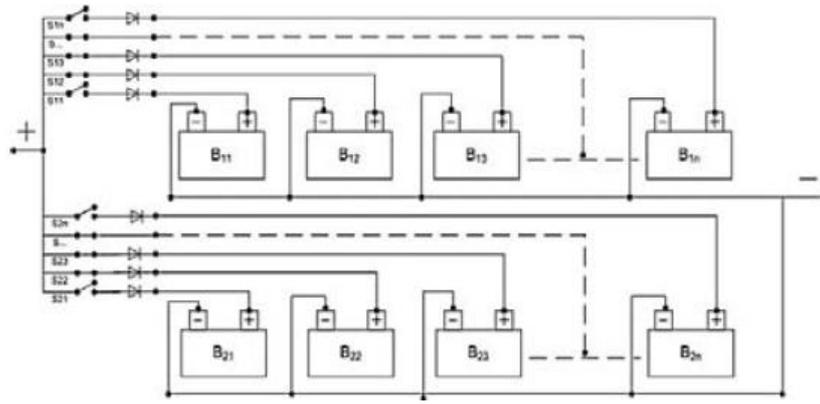


Figura 2-28. Esquema de n baterías en paralelo, que puede servir para representar la distribución de las hileras de celdas en paralelo de una batería de vehículo eléctrico. La tensión de cada batería puede ser la de varias baterías en serie.

Cuando se cargan las celdas en paralelo, la corriente demandada por la batería es proporcional al número de líneas que se están cargando. A pesar de ello, para proteger la batería de corrientes anormalmente altas, si no basta con la reducción que supone el uso de convertidores, se podrá emplear un algoritmo alternativo que haga que la corriente disminuya en caso de que la calculada por MPPT sea mayor que la corriente demandada por las celdas de la batería.

El convertidor empleado es un convertidor DC/DC de tipo elevador, controlado por MPPT o por el algoritmo de derating según las necesidades del sistema.

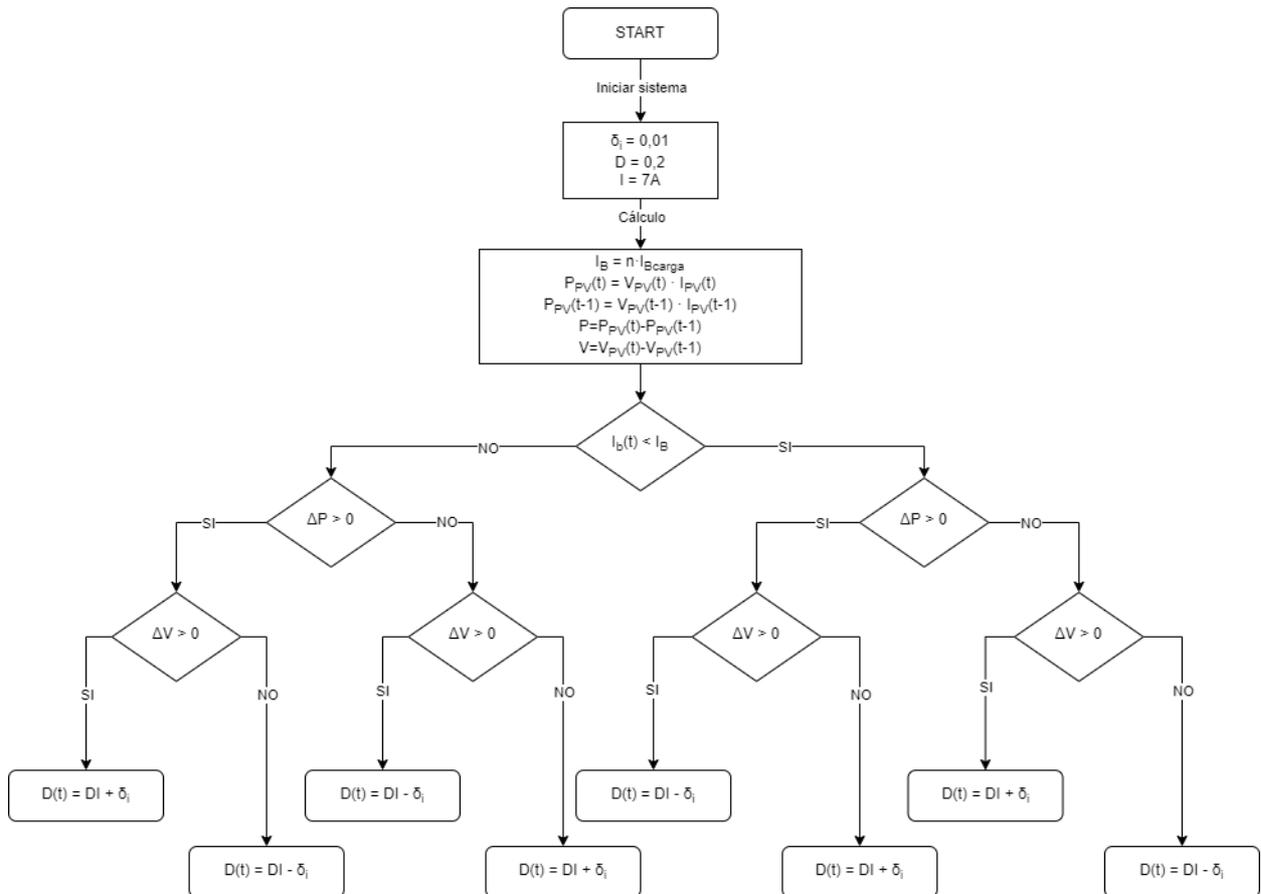


Figura 2-29. Esquema del algoritmo MPPT de Hill-Climbing con degradación en caso de alcanzarse una corriente en la salida del convertidor con un valor mayor que la máxima que aguanta la batería. Este algoritmo tiene un diagrama de flujos similar al que se encontraría en cualquier MPPT, se ejecutaría en bucle y en cada iteración realiza la carga de variables anteriores y calcula errores, con el fin de compararlos y generar un incremento en la referencia o un decremento para acercarlos al punto de máxima potencia.

2.6 Estudio del rendimiento de células fotovoltaicas con sombreado parcial o total

Como se deduce de dos artículos que versan sobre temas similares, la instalación de un sistema de generación fotovoltaica presenta un gran inconveniente a la hora de ser instalado en el techo de un vehículo. Los artículos “*Modeling and Standardization Researches and Discussions of the Car roof PV through International Web Meetings*”, surgido de la colaboración entre diferentes empresas y laboratorios, y “*Impacts on the Output Power of Photovoltaics on Top of Electric and Hybrid Electric Vehicles*” tratan este problema y su posible solución tomando de modelo el techo de un Toyota Prius.

El principal problema del techo de un vehículo es que no es una superficie plana y orientada de forma adecuada para aprovechar al máximo la radiación solar. Más bien, se trata de una superficie curva que puede tener cualquier orientación respecto del Sol, ya que el cuerpo estudiado es un cuerpo móvil. Los paneles instalados son paneles flexibles, que se adaptan a la forma de la carrocería.

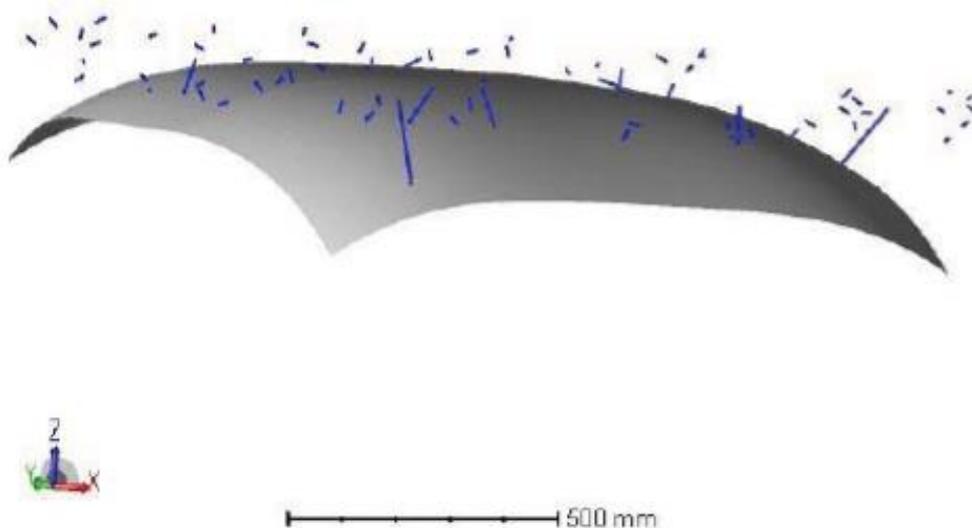


Figura 2-30. [13] Modelo 3D de ejemplo del techo de un automóvil de turismo. El estudio de las sombras se ha realizado para una superficie de 2,04 m² planos, 1,82 m² proyectados y un factor de corrección de curvatura de 0,782. Este último concepto se desarrollará más adelante.

Estas dos características hacen que la potencia generada por el conjunto de paneles llegue a presentar pérdidas, que se sumarían a otras que también se tienen en cuenta en el momento de diseñar el sistema de potencia, como las debidas a la temperatura, que no se contemplarán en el presente proyecto, las debidas al algoritmo MPPT (un 5%), las debidas a los convertidores (un 10%) y las debidas a la carga o descarga de la batería (otro 5%). Todas estas pérdidas no se contemplan en el presente proyecto, aunque se tendrán en cuenta algunas de ellas en conjunto, como las debidas al MPPT, que no alcanza el voltaje exacto de máxima potencia, o a los elementos semiconductores, con una impedancia genérica de 0,1 Ω para cada uno de ellos.

2.6.1 Modelado del sombreado en el techo de un vehículo

La cantidad de radiación incidente sobre los paneles montados en el vehículo depende, en primer lugar, del entorno inmediato de este y, posteriormente, de la forma que adopten. Tanto el entorno como la forma del techo producen sombras, que se deben a la incidencia de radiación sobre una superficie tridimensional y convexa.

La radiación incidente puede ser directa o difusa y procedente o no de la reflexión de esta en el entorno inmediato, en edificios u otros elementos. La forma curva de la superficie modifica cómo incide la radiación en esta, por lo que la incidencia para una superficie plana no es la misma que la existente en una convexa.

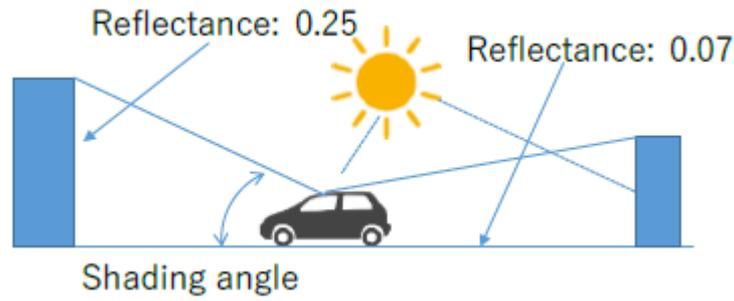


Figura 2-31. [14] Modelo de ejemplo del entorno inmediato al vehículo. Se suele tener en cuenta para esto numerosas variables y datos, como la incidencia de radiación directa, la reflectividad del material y la proyección de sombras, entre otros.

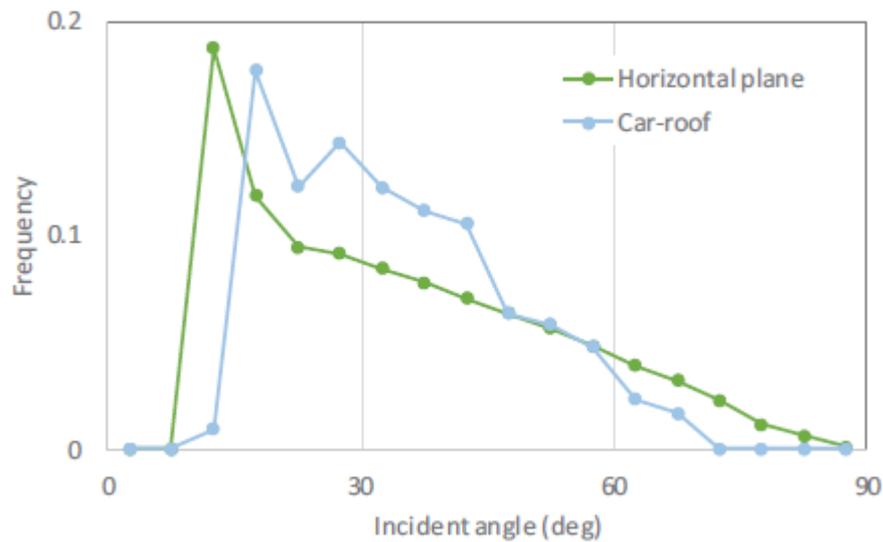


Figura 2-32. [13] Perfil de radiación de una superficie curva, en azul, comparado con el de una plana, en verde. La radiación incide en una superficie convexa con más frecuencia si el ángulo de incidencia queda comprendido entre 20° y 45°, mientras que, para ángulos de incidencia superiores a 60°, la frecuencia de incidencia desciende respecto a la de una superficie plana.

Para elaborar un modelo de un perfil, se simplifica la superficie curvada utilizando la proyección de esta y un factor de curvatura que permita establecer una relación entre la superficie proyectada y la superficie plana, con correcciones de las pérdidas debidas a la forma de esta.

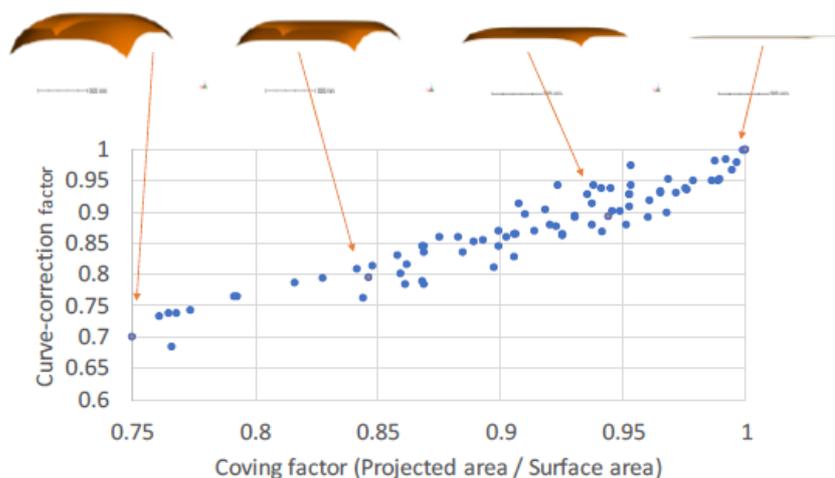
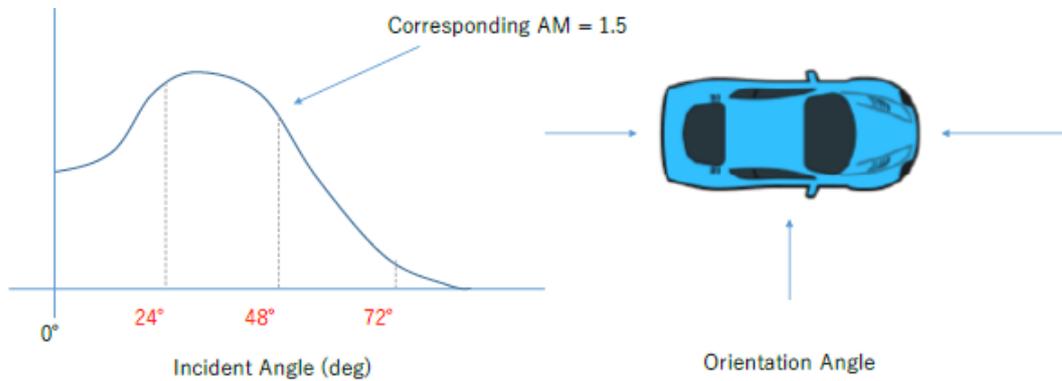


Figura 2-33. [14] Comparación del factor de curvatura con los valores del factor de corrección. Este se ha calculado para el entorno urbano de cuarenta y siete capitales de provincia de Japón, en función de parámetros como la reflexión de la luz o longitudes y ángulos de la sombra proyectada.

El comportamiento de la luz incidente en el vehículo se estudia mediante pruebas de iluminación uniforme, con diferentes ángulos y orientaciones, como se ve en la siguiente gráfica.



3 X 3 + 1 = 10 points

Figura 2-34. [14] Ejemplo de experimento para modelado de incidencia de la luz en el techo de un EV. Este experimento se emplea para cuantificar la incidencia de radiación luminosa sobre la superficie para distintos ángulos y orientaciones de esta. Se obtendrían un total de diez puntos de operación al incluir luz cenital.

Este estudio no se puede trasladar fácilmente a un entorno real. El principal factor de sombreado es el entorno, con una compleja distribución de edificios y otros elementos del paisaje, urbano o no, que afectan negativamente a la generación de energía fotovoltaica, especialmente en invierno y en entornos de edificios o accidentes geográficos de gran altura. Otros factores importantes son el clima de la zona y, en menor medida, la latitud.

Debido a que en el presente proyecto se van a simular pruebas con iluminación uniforme, no es necesario entrar en más detalles de elaboración de un modelo completo del comportamiento de la radiación para una región en concreto.

2.6.2 Cómo afectan las sombras parciales a la potencia generada por un panel fotovoltaico

La generación de electricidad en un panel fotovoltaico curvo está condicionada a una inmensa variedad de condiciones ambientales, siendo la más importante de ellas el entorno por el que se circula durante un día soleado, lo que hace que la irradiancia pueda llegar a ser muy cambiante. A estos factores se suma la arbitrariedad de la orientación del conjunto de paneles montado en el vehículo y el reducido espacio del techo de un vehículo, de 1,5 m² normalmente, con una forma que produce pérdidas en la radiación incidente de hasta un 30% del total en algunas zonas de la superficie.

A todos los condicionantes anteriores se le suma uno nuevo, y es el modelo de célula fotovoltaica que se emplea, y la conexión empleada entre las células fotovoltaicas para formar paneles. Las células empleadas por Toyota tienen las características de la tabla de más abajo, obtenidas en condiciones estándar.

Tabla 2-5. [5] Características de una célula fotovoltaica Blue Chip empleada para el estudio.

| Parámetro | Valor |
|-----------|---------|
| P_{mpp} | 4,140 W |
| V_{mpp} | 0,515 V |
| I_{mpp} | 8,039 A |
| V_{oc} | 0,613 V |
| I_{cc} | 8,602 A |

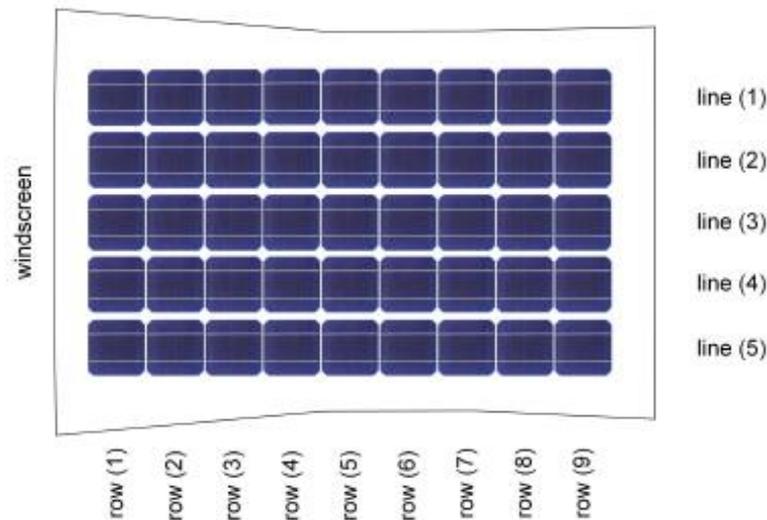


Figura 2-35. [5] Esta es la disposición habitual de las células fotovoltaicas en el techo del vehículo. Estas células fotovoltaicas son flexibles y se adaptan a la forma de la superficie donde se instalan. Dado el limitado espacio existente, se han instalado un total de cuarenta y cinco celdas, organizadas en nueve filas y cinco hileras. La superficie no puede aprovecharse en su totalidad.

Lo normal en los modelos de paneles fotovoltaicos es tratar por igual el punto de operación de todas las células que lo forman. Esta es la razón por la que se establece la siguiente característica de una célula fotovoltaica en condiciones estándar, a 1000 W/m² de irradiancia y 25°C de temperatura.

Pero la forma del techo de un vehículo hace inviable aplicar la condición anterior para este caso. Si el panel fotovoltaico está curvado, inevitablemente se formarán sombras sobre él en caso de incidir radiación solar directa con un ángulo no favorable. En este caso, la potencia real generada siempre será menor que la máxima especificada en la hoja de características del panel.

La siguiente figura ilustra un ejemplo del patrón de sombreado causado por la incidencia de luz directa sobre el techo de un vehículo y cómo afectaría a las células fotovoltaicas instaladas en él.

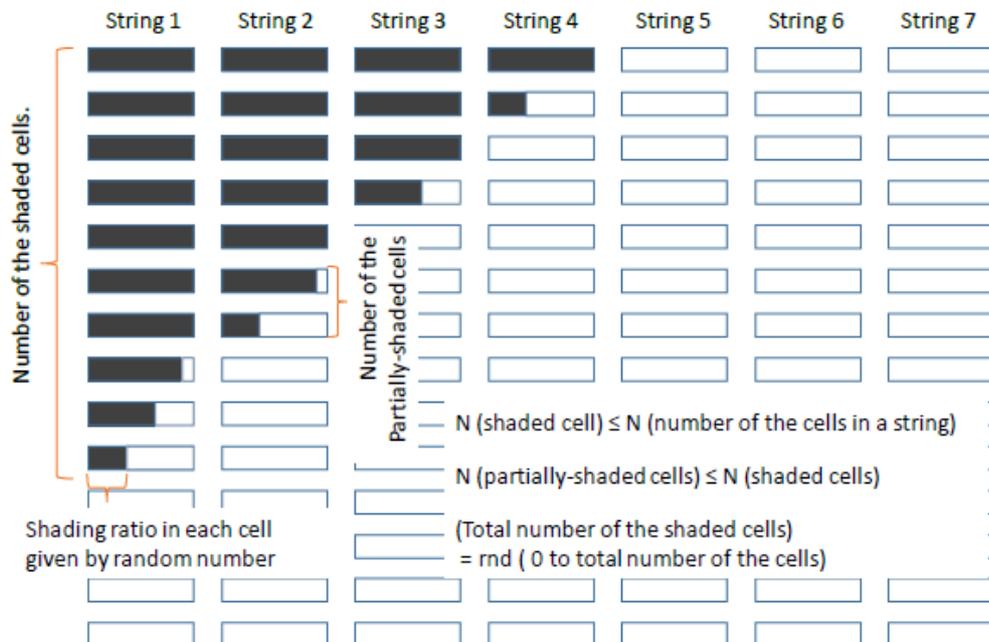


Figura 2-36. [15] Este esquema muestra la distribución típica de las sombras en un panel fotovoltaico curvado de forma convexa. Únicamente se está teniendo en cuenta la incidencia de radiación directa, con la fuente de luz situada en una de las esquinas. Como resultado, una de las esquinas se sombreadá inevitablemente, dejando sombras, totales y parciales, sobre parte del conjunto de paneles.

El objetivo es maximizar la potencia generada con las células existentes. Para comenzar, una conexión en serie

supone una mayor tensión de circuito abierto, mientras que una conexión en paralelo supone una mayor corriente de cortocircuito. Las mayores pérdidas debidas al sombreado, como se pondrá más adelante de manifiesto, se producen para una conexión total en serie de las células, por lo que se va a evitar. En el siguiente gráfico y la siguiente tabla se comparan el grado de inclinación aproximado de cada fila de células fotovoltaicas y el área efectiva de cada una en función del ángulo de la radiación solar incidente.

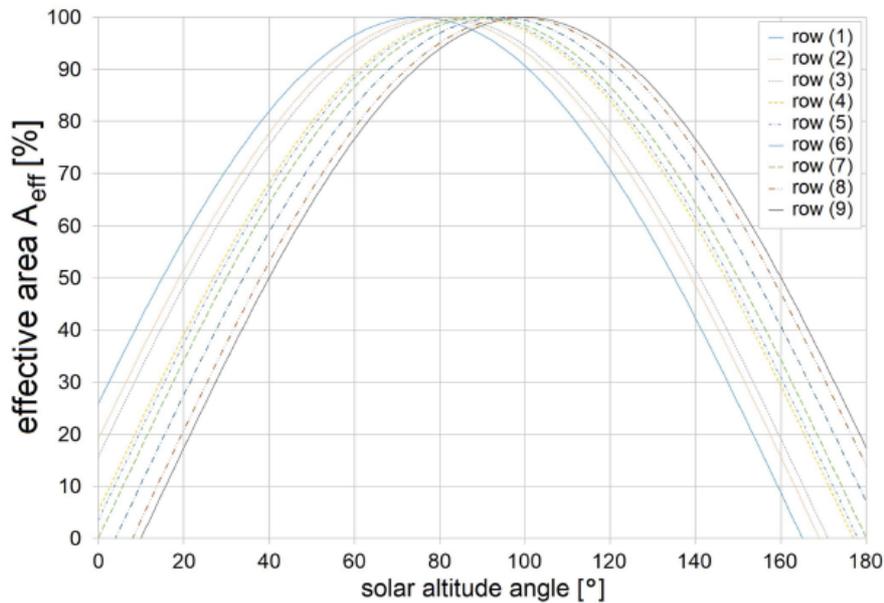


Figura 2-37. [5] Gráfica que compara el área efectiva estudiada (porcentaje de área expuesta a la radiación) de cada una de las células fotovoltaicas en función del ángulo de incidencia de los rayos solares (α). Como se observa, para ángulos de incidencia cercanos a 0° o a 180° , algunas células fotovoltaicas no reciben radiación o reciben muy poca, mientras que los ángulos de incidencia más altos (situados en el centro con una ligera desviación por la inclinación del techo) suponen una mayor llegada de radiación a todas las células fotovoltaicas, especialmente las que están en el centro.

Tabla 2-6. [5] Ángulo respecto a la horizontal de la hilera central de cada una de las filas de células PV (β)

| Fila 1 | Fila 2 | Fila 3 | Fila 4 | Fila 5 | Fila 6 | Fila 7 | Fila 8 | Fila 9 |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 15° | 12° | 9° | 3° | 2° | 0° | -3° | -7° | -9° |

Como se observa en la gráfica anterior, cada célula fotovoltaica va a tener una irradiancia diferente y la luz va a incidir de forma diferente según la orientación de la radiación (α) y de la célula fotovoltaica (β). En el modelo empleado en este artículo, se considera que todas las celdas de una fila tienen el mismo ángulo. El área efectiva de la gráfica anterior se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_{eff} = \cos(\alpha + \beta - 90^\circ) \cdot 100 \quad (5)$$

Aunque es más normal emplear el área efectiva normalizada, que se calcula de esta forma:

$$\hat{A}_{eff,i} = \frac{A_{eff,i}}{A_{eff,max}} \quad (6)$$

Para el caso de la luz cenital, con un ángulo de incidencia de 90° , la diferencia en el área efectiva normalizada entre la primera y última fila es muchísimo menor (5%) que la existente para los ángulos mínimos de incidencia (20° a 160°) de un 70% u 80%, aunque los ángulos de incidencia variarán según la zona geográfica donde se pruebe el vehículo. En el caso concreto del experimento, realizado en Oulu (Finlandia) en el mes de junio, se realizó el experimento para radiación con ángulos de incidencia comprendidos entre 38° y 44° .

La potencia generada por cada célula fotovoltaica, de forma independiente, depende del área efectiva calculada anteriormente. Todas las pruebas se han hecho para el punto de operación de máxima potencia correspondiente a la irradiancia medidas, aunque es habitual normalizar la potencia mediante la ecuación:

$$\hat{P}_{mpp} = \frac{P_{mpp,i}}{P_{mpp,max}} \quad (6)$$

Para este experimento, se han emplean los conceptos de área efectiva, área efectiva normalizada, potencia efectiva y potencia efectiva normalizada. Se detallarán los conceptos de área efectiva y de potencia generada únicamente.

La normalización del área efectiva evita la medida de las condiciones ambientales para células fotovoltaicas con ángulos longitudinales diferentes. En este caso, se puede medir las condiciones para la fila con ángulo cero y estimar las condiciones para otras filas a partir de esta. Este método también se puede aplicar a la potencia. No obstante, se detallarán las tablas con valores sin normalizar. Estas tablas se han elaborado para una luz frontal con ángulos de incidencia entre 38° y 44°.

Tabla 2-7. [5] Área efectiva de cada célula fotovoltaica para los ángulos de incidencia entre 38° y 44°

| | $\alpha= 38^\circ$ | $\alpha= 39^\circ$ | $\alpha= 40^\circ$ | $\alpha= 41^\circ$ | $\alpha= 42^\circ$ | $\alpha= 43^\circ$ | $\alpha= 44^\circ$ |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Fila 1 | 79,86% | 80,90% | 81,92% | 82,90% | 83,87% | 84,80% | 85,72% |
| Fila 2 | 75,47% | 76,60% | 77,71% | 78,80% | 79,86% | 80,90% | 81,92% |
| Fila 3 | 73,14% | 71,31% | 75,47% | 76,60% | 77,71% | 78,80% | 79,86% |
| Fila 4 | 65,61% | 66,91% | 68,20% | 69,47% | 70,71% | 71,93% | 73,14% |
| Fila 5 | 64,28% | 65,61% | 66,91% | 68,20% | 69,47% | 70,71% | 71,93% |
| Fila 6 | 61,57% | 62,93% | 64,28% | 65,61% | 66,91% | 68,20% | 69,47% |
| Fila 7 | 55,92% | 57,36% | 58,78% | 60,18% | 61,57% | 62,93% | 64,28% |
| Fila 8 | 50,00% | 51,50% | 52,99% | 54,46% | 55,92% | 57,36% | 58,78% |
| Fila 9 | 46,95% | 48,48% | 50,00% | 51,50% | 52,99% | 54,46% | 55,92% |

Tabla 2-8. [5] Potencia generada por cada célula fotovoltaica para los ángulos de incidencia entre 38° y 44°

| | $\alpha= 38^\circ$ | $\alpha= 39^\circ$ | $\alpha= 40^\circ$ | $\alpha= 41^\circ$ | $\alpha= 42^\circ$ | $\alpha= 43^\circ$ | $\alpha= 44^\circ$ |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Fila 1 | 3,12 W | 3,21W | 3,42 W | 3,39 W | 3,36 W | 3,42 W | 3,47 W |
| Fila 2 | 2,90 W | 3,03 W | 3,19 W | 3,18 W | 3,21 W | 3,28 W | 3,31 W |
| Fila 3 | 2,84 W | 2,91 W | 3,12 W | 3,12 W | 3,09 W | 3,17 W | 3,25 W |
| Fila 4 | 2,61 W | 2,65 W | 2,85 W | 2,85 W | 2,86 W | 2,92 W | 2,98 W |
| Fila 5 | 2,52 W | 2,64 W | 2,79 W | 2,81 W | 2,85 W | 2,88 W | 2,96 W |
| Fila 6 | 2,42 W | 2,51 W | 2,65 W | 2,69 W | 2,74 W | 2,78 W | 2,83 W |
| Fila 7 | 2,14 W | 2,25 W | 2,42 W | 2,43 W | 2,48 W | 2,60 W | 2,63 W |
| Fila 8 | 1,96 W | 2,08 W | 2,28 W | 2,29 W | 2,35 W | 2, 35 W | 2,41 W |
| Fila 9 | 1,86 W | 1,94 W | 2,03 W | 2,10 W | 2,18 W | 2,18 W | 2,29 W |

Se comprueba que, cuanto mayor es el ángulo medido, mayor es el área efectiva y, por tanto, mayor es la potencia medida en la célula fotovoltaica. También se deduce que la potencia generada se ha medido con una fuente de luz frontal respecto al vehículo, ya que la fila 1 recibe más radiación que la fila 9.

A partir de los datos de potencia absoluta vistos en la tabla anterior, la potencia total se calcula a partir de la potencia individual de cada célula fotovoltaica, mediante la siguiente relación:

$$P_{mpp,total} = \sum_{i=1}^{N_{filas}} N_{hileras} \cdot P_{mpp,i} \quad (7)$$

La conexión de todas las células fotovoltaicas en serie se debe evitar porque la corriente de salida del panel

fotovoltaico queda limitada por la corriente existente en la célula fotovoltaica con menor área efectiva, que es la más sombreada.

Si se tiene en consideración la afirmación anterior, la conexión en serie de estas celdas arroja una menor potencia generada que si se conectasen en paralelo, con hasta un 25% más de pérdidas debidas al sombreado. Pero la conexión en paralelo tampoco es la idónea, por su baja tensión de salida, por lo que el mejor resultado se obtiene al formar paneles mediante una conexión de células fotovoltaicas en serie y paralelo, buscando la mejor relación. Con el fin de estudiar los casos extremos, se ha elaborado una tabla de comparación entre la conexión total en serie y la conexión total en paralelo.

Tabla 2-9. [5] Potencia calculada para el supuesto de conexión en serie total y en paralelo total de células PV y diferencia en las pérdidas existentes por las sombras debidas a la incidencia de radiación.

| | Paralelo | Serie | Diferencia de pérdidas |
|--------------------|----------|----------|------------------------|
| $\alpha= 38^\circ$ | 118,85 W | 83,70 W | ~ 25,17% |
| $\alpha= 39^\circ$ | 116,10 W | 87,30 W | ~ 24,81% |
| $\alpha= 40^\circ$ | 123,75 W | 91,35 W | ~ 26,18% |
| $\alpha= 41^\circ$ | 124,30 W | 94,50 W | ~ 23,97% |
| $\alpha= 42^\circ$ | 125,60 W | 98,10 W | ~ 21,89% |
| $\alpha= 43^\circ$ | 127,90 W | 98,10 W | ~ 23,30% |
| $\alpha= 44^\circ$ | 130,75 W | 103,05 W | ~ 21,19% |

Durante un experimento realizado en las inmediaciones de la universidad, se midió la irradiancia para diferentes partes del vehículo en una calle que tenía zonas sombreadas por árboles y por edificios.

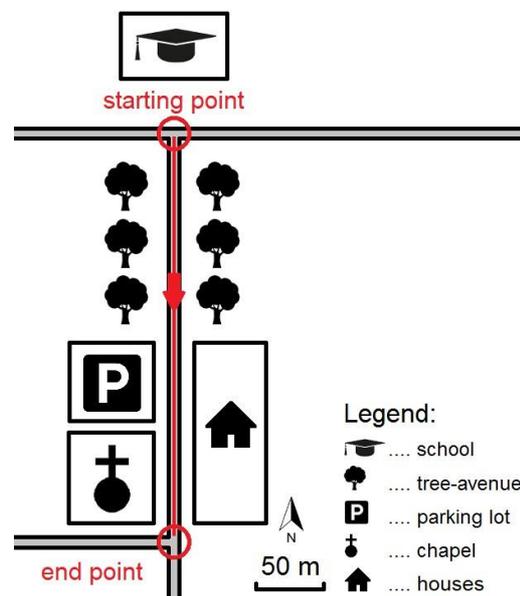


Figura 2-38. [5] Esquema simplificado del entorno del experimento realizado en las inmediaciones de la Universidad de Oulu. Se diferencia claramente la zona arbolada de la zona con edificaciones, que tienen menor influencia en la variación de la irradiancia, pero también contribuyen a su reducción.

Este experimento, especialmente en la parte en la zona arbolada, pone de manifiesto que en zonas urbanas la radiación incidente se reparte de forma desigual. Su fin es medir la irradiancia existente en una época del año determinada en un entorno urbano real, para que se pueda extrapolar a otros experimentos.

La gráfica siguiente parte de una colección de medidas tomadas durante el experimento realizado en el entorno anteriormente descrito, y se puede tratar como un resumen de todos los valores de irradiancias tomados con el

fin de generar un modelo. En esta gráfica quedan registrados los valores máximos y mínimos de irradiancia medidos para las células fotovoltaicas, desde la más iluminada hasta la menos iluminada.

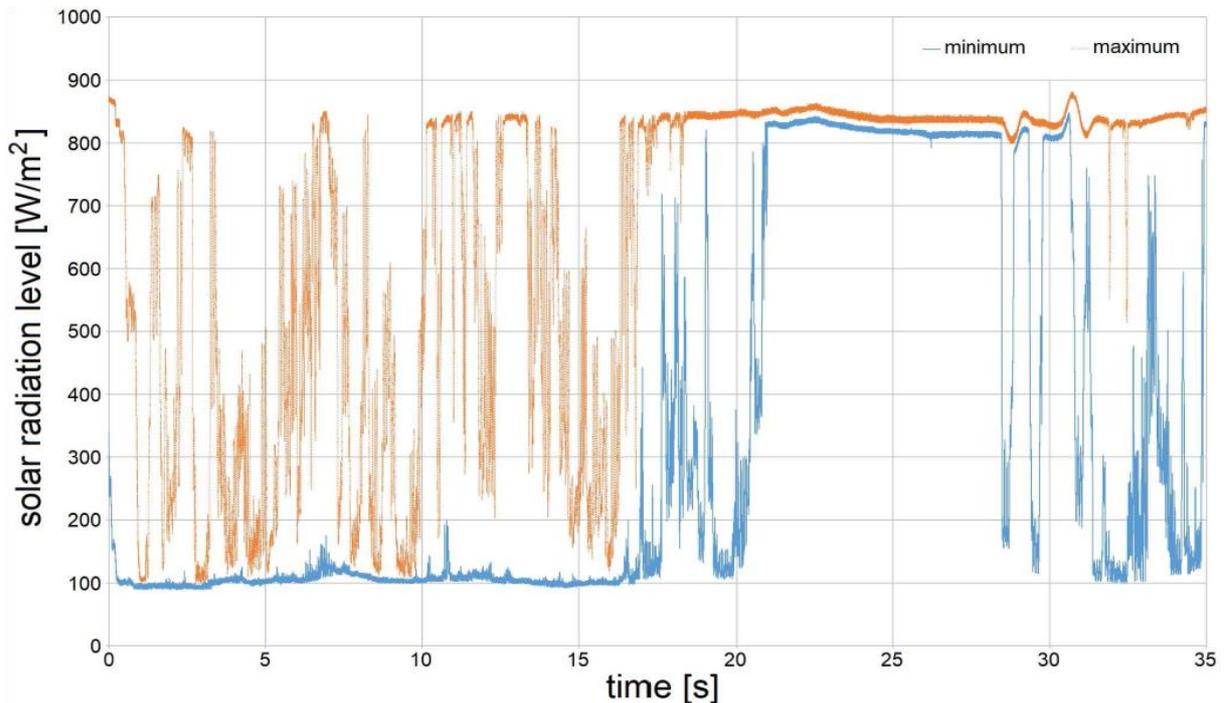


Figura 2-39. [5] Resultados del experimento de medida de la irradiancia en un entorno real realizado por la Universidad de Oulu. Los valores aquí mostrados son los valores máximo y mínimo de la irradiancia tomados durante el experimento en condiciones reales, y confirma que el entorno es el más importante de los factores que afectan negativamente a un sistema de generación de electricidad a partir de energía fotovoltaica. Las mayores diferencias de irradiancia son del 85%, algo que se observa especialmente durante los 20 primeros segundos, correspondientes a la zona comprendida entre la Universidad y el Estacionamiento.

El sombreado parcial de los paneles fotovoltaicos sería mayor en la zona arbolada, donde se ha llegado a medir un valor tan pequeño como 100 W/m^2 de irradiancia en las zonas del techo que reciben menos radiación. La diferencia entre la irradiancia máxima, que no pasa de 850 W/m^2 en casi todo el experimento y la mínima podría alcanzar el 85% en estas zonas. En la zona final del experimento, situada entre edificios, el patrón es parecido, con una diferencia enorme entre las irradiancias mínimas y máximas, aunque menor. Únicamente se salva el tramo sin obstáculos para la radiación, donde la diferencia entre la irradiancia máxima y mínima es muy pequeña, inferior a 50 W/m^2 .

Para las horas con más radiación solar, la enorme diferencia existente entre los valores máximo y mínimo limitaría la corriente que sale de los paneles al valor de la célula con mayor sombreado si se conectasen todos en serie. Con esta condición, se estima una pérdida de rendimiento de hasta un 75% si la corriente de la célula fotovoltaica más débil se aplicara a todas las células fotovoltaicas. Para estos casos, y teniendo en cuenta el limitado espacio de cualquier automóvil, lo habitual es que se opte por realizar una interconexión de células fotovoltaicas en serie y paralelo que mitigue estas pérdidas, algo que puede llevar numerosos experimentos en varias regiones diferentes.

En el caso del presente proyecto, no se tendrá en cuenta la forma del techo del vehículo eléctrico ni el entorno porque las pruebas se realizarán para una radiación uniforme a temperatura constante, pero estos experimentos se realizarán para distintos niveles de irradiancia con el fin de estudiar el comportamiento del sistema a valores inferiores a los 1000 W/m^2 estándar. Además, cada uno de los paneles va a tener una conexión individual a cada uno de los convertidores, con todas las células de cada panel conectadas en serie para obtener una tensión que pueda ser convertida a la salida de cada uno de los paneles fotovoltaicos.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

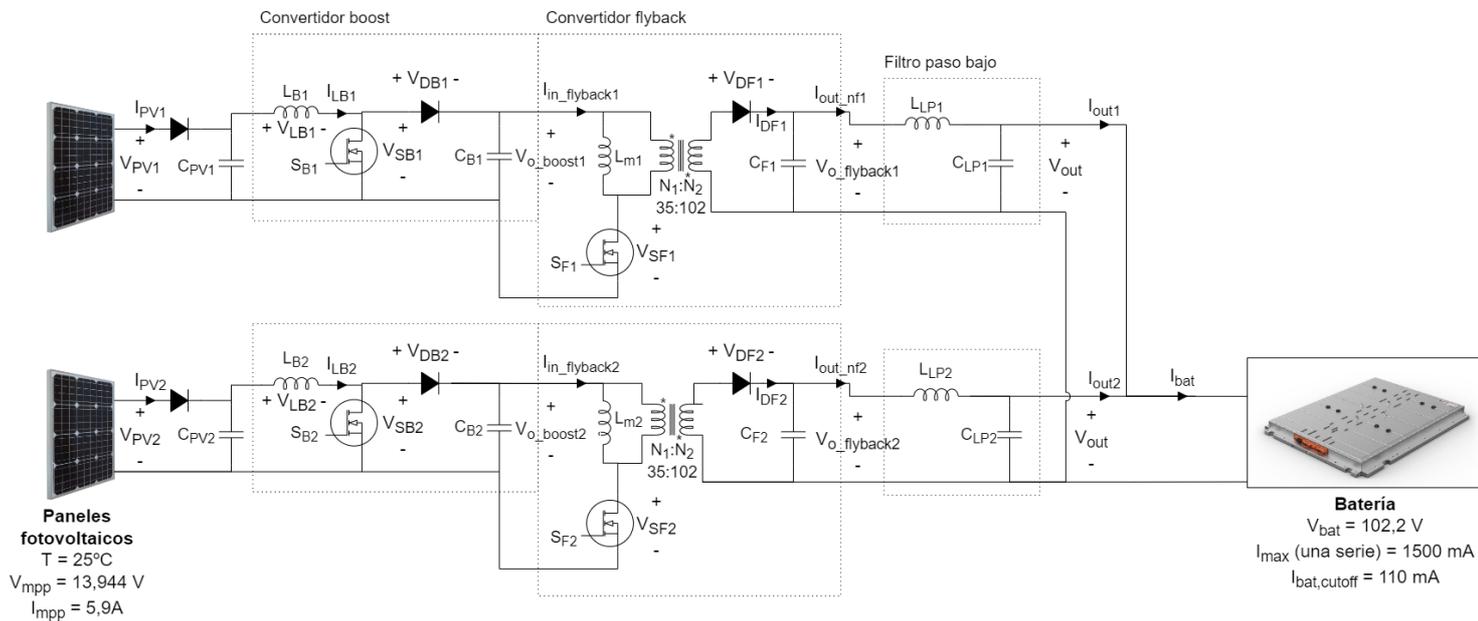


Figura 3-1. Esquema completo del sistema paneles-convertidores-batería. Los datos de este circuito, que son las capacidades de los condensadores, las inductancias de las bobinas y las características de tensión y corriente se definen en este apartado.

El sistema de carga solar de la batería de un vehículo eléctrico que se va a desarrollar consta de dos convertidores de potencia, que alimentan una batería a través de varios paneles solares que serán probados bajo distintas condiciones de iluminación constante, con el fin de emular distintas situaciones de la vida real, como sería la circulación o estacionamiento en un día soleado, un día nublado o por zonas sombreadas, en las que la irradiancia es menor.

La técnica que se va a usar para cargar la batería va a ser mixta, a corriente constante en principio y a tensión constante una vez se alcance el valor máximo de tensión, con una disminución progresiva de la corriente que circula por los elementos del sistema hasta llegar a la corriente de corte, con la batería cargada, aunque el SOC del modelo de la batería es inferior al 100% en todo caso.

La batería estará conectada a los paneles fotovoltaico mediante dos convertidores en cascada que funcionarán a una frecuencia de conmutación de 25 kHz, una frecuencia situada fuera del rango audible. El sistema está basado en el del artículo de investigación, pero no lo emula completamente, ya que, por razones de disponibilidad de recursos a la hora de realizar la simulación, la frecuencia de conmutación, el tiempo de muestreo del sistema y las capacidades de la batería han tenido que ser adaptados con el fin de poder obtener los resultados y estudiar el comportamiento en un tiempo de simulación razonable, normalmente un segundo.

3.1 Panel fotovoltaico

[16] El panel fotovoltaico está compuesto por un total de veinticuatro células flexibles de silicio monocristalino de alta eficiencia, modelo SunPower C60, conectadas en serie. Cada una de las células fotovoltaicas tiene las especificaciones técnicas⁸ de la siguiente tabla, siendo especialmente importantes los puntos de máxima potencia, cortocircuito y circuito abierto.

⁸ Datasheet de una célula fotovoltaica SunPower C60:

http://eshop.terms.eu/data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf

Tabla 3-1. Características de una célula fotovoltaica SunPower C60

| Característica | Valor |
|--|--------------|
| Tensión de circuito abierto (V_{OC}) | 0.686 V |
| Corriente de cortocircuito (I_{SC}) | 6.27 A |
| Tensión de máxima potencia (V_{mpp}) | 0.581 V |
| Corriente de máxima potencia (I_{mpp}) | 5.9 A |
| Potencia máxima (P_{mpp}) | 3.40 W |

Para un panel completo, que únicamente tiene células fotovoltaicas conectadas en serie, las nuevas características se hallan sumando las tensiones. Las corrientes permanecen iguales al no haber células en paralelo. La potencia se calcula a partir de los nuevos valores de tensión y corriente. Estas características son las siguientes:

Tabla 3-2. Características de un panel fotovoltaico formado por las células fotovoltaicas anteriores.

| Característica | Valor |
|--|--------------|
| Tensión de circuito abierto (V_{OC}) | 16.464 V |
| Corriente de cortocircuito (I_{SC}) | 6.27 A |
| Tensión de máxima potencia (V_{mpp}) | 13.944 V |
| Corriente de máxima potencia (I_{mpp}) | 5.9 A |
| Potencia máxima (P_{mpp}) | 82.27 W |

Si se comparan con las del panel del artículo, los valores de tensión, corriente y potencia son similares, ya que se buscaba alcanzar una potencia de unos 80 W por panel y una tensión suficiente para poder ser elevada a un nivel razonable teniendo en cuenta factores como limitaciones del convertidor, sea tensión máxima a la salida de este, eficiencia, tamaño o peso.

Se van a utilizar cuatro paneles idénticos, con las especificaciones anteriormente detalladas, aunque, por necesidades del sistema informático, se realizarán las pruebas con dos paneles fotovoltaicos, con el fin de poder probar los efectos de las pérdidas causadas por una menor incidencia de la radiación solar en el panel. Como máximo, la potencia generada por estos cuatro paneles sería de unos 330 W, que disminuyen ligeramente por causa de las pérdidas de cada uno de los elementos del sistema.

3.1.1 Control MPPT

El algoritmo que busca el punto de máxima potencia de generación de energía eléctrica para un panel fotovoltaico o MPPT se usará con el fin de pasar una referencia de tensión al controlador del panel fotovoltaico mientras la batería cargue a corriente constante, a la máxima potencia que pueda generar el panel fotovoltaico.

El algoritmo empleado es el algoritmo P&O, elegido por su fácil implementación, a pesar de que la tensión permanece oscilante en régimen permanente en torno al punto de máxima potencia. Esto se debe a que el incremento o decremento de tensión sigue un paso fijo, de 0,2 V en este caso. Este algoritmo de perturbación y observación sigue el diagrama de flujos de la Figura existente en la página anterior.

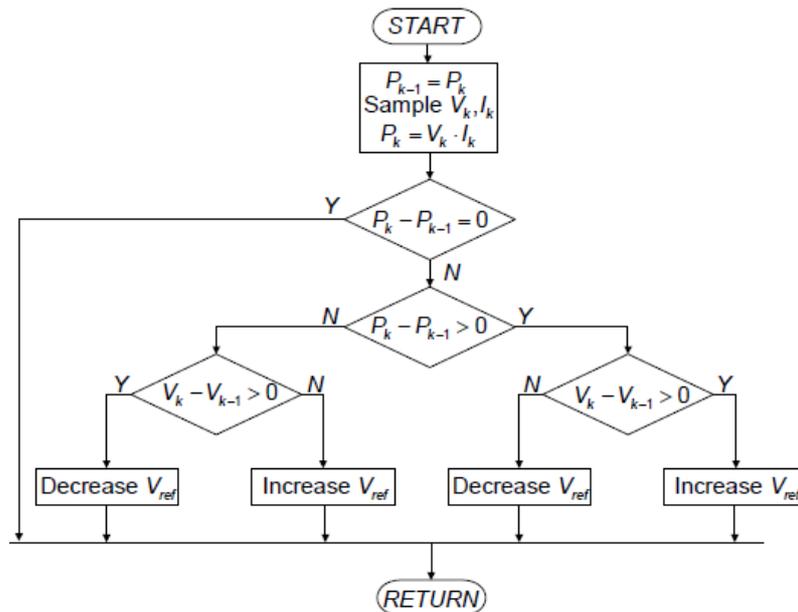


Figura 3-2. Diagrama de flujos del algoritmo P&O. El incremento de tensión es siempre fijo, por lo que este algoritmo da lugar a oscilaciones en cuanto el punto de máxima potencia se alcanza, ya que la tensión resultante quedará siempre por encima o por debajo de este.

En cuanto al código que implementa el anterior diagrama de flujos, es el siguiente:

Código de MATLAB Algoritmo MPPT - Fichero mppt.m

```

global vPVant;
global iPVan;
global Pant;
global incVpvRef;
global VpvRefant;
global contador;
global Nciclos;

% valor inicial de los datos
incVpvRef = 0.2;
VpvRefant = 16.464;
vPVant = block.InputPort(1).Data;
iPVant = block.InputPort(2).Data;
Pant = vPVant*iPVant;
Nciclos = 1450;
contador = Nciclos;

% entrada de datos cuando no se inicia

vPV = block.InputPort(1).Data;
iPV = block.InputPort(2).Data;

if(contador==Nciclos)
    contador = 1;
    % Aquí va el código para al algoritmo MPPT
    P = vPV*iPV;
    incPk = P - Pant;
    incVpv = vPV-vPVant;
    vPVant = vPV;
    Pant = P;
  
```

```

    if(incPk == 0)
        VpvRef = VpvRefant;
    else
        if(incPk > 0)
            if(incVpv > 0)
                VpvRef = VpvRefant + incVpvRef;
            else
                VpvRef = VpvRefant - incVpvRef;
            end
        else
            if(incVpv > 0)
                VpvRef = VpvRefant - incVpvRef;
            else
                VpvRef = VpvRefant + incVpvRef;
            end
        end
    end

    VpvRefant = VpvRef;
else
    VpvRef = VpvRefant;
    contador=contador+1;
end

block.OutputPort(1).Data = VpvRef;

```

Este algoritmo recibe como datos iniciales el número de ciclos, 1450 ciclos que duran 100 ns cada uno, coincidiendo cada uno con el período de muestreo de la simulación. También se parte de la tensión de circuito abierto, V_{oc} , para calcular la tensión de máxima potencia, de forma que la corriente inicial es cero.

En cada iteración, el algoritmo toma la tensión y corriente medida en un instante en el sistema, calculando la potencia a partir de la multiplicación de estos datos. Calcula posteriormente la variación de la potencia y la variación de la tensión en bornes del panel fotovoltaico, guardando los valores anteriores para la próxima iteración, en la que el contador de ciclos se reinicia.

Una vez se ha realizado lo anterior, se calcula si la potencia permanece constante, aumenta o disminuye respecto a la iteración anterior, y se comprueba lo mismo con la variación de la tensión de salida del panel. Según las variaciones anteriores, la tensión de referencia puede aumentar o disminuir.

3.2 Batería

La batería del artículo, por otra parte, tenía una capacidad pequeña, comparada con las especificaciones habituales de las baterías montadas en un vehículo eléctrico, ya que su capacidad máxima era de 40 Ah y, como máximo, puede almacenar unos 4 kWh de energía, un valor diez veces inferior a 40 kWh, que es la energía que puede almacenar la batería del vehículo con menor autonomía de los comparados en la tabla de vehículos eléctricos.

La batería se diseña a partir de una combinación en serie y paralelo de celdas del modelo Panasonic CGR18650CG, un modelo de celda muy utilizado para fabricar baterías de automóviles eléctricos. Esta celda será modelada en MATLAB, sin estar determinada la capacidad por razones de disponibilidad de recursos para la simulación y de tiempo necesario para la ejecución de procesos. Las características de esta celda son las que aparecen en la siguiente tabla 3-3.

Tabla 3-3. [17] Características de una celda de batería Panasonic CGR18650CG

| Característica | Valor |
|--|----------|
| Tensión nominal | 3,65 V |
| Tensión máxima o a plena carga | 4,20 V |
| Tensión mínima o en descarga | 3 V |
| Capacidad estándar | 2500 mAh |
| Corriente máxima de carga | 1500 mA |
| Corriente de corte a plena carga a 20° | 110 mA |

Para obtener la tensión deseada, en torno a 100 V, habría que conectar 28 celdas en serie, lo que daría una tensión nominal de 100,8 V, mínima de 84 V y máxima de 117,6 V. Sin embargo, como se desea observar la evolución de la carga de la batería en sus dos estados, a tensión constante y a corriente constante, la capacidad de la batería será adaptada según las necesidades, pues en un segundo de simulación no se puede observar el comportamiento de la batería conforme la tensión va variando con el tiempo.

El objetivo es hacer dos clases de pruebas, unas en las que se estudie el comportamiento de la batería durante medio ciclo de carga, desde el 50%, y otras en las que se detalle el comportamiento de la batería en una parte del ciclo, especialmente al cargar durante la fase de control a tensión constante. En las primeras pruebas, la capacidad será muy reducida, con el fin de poder hacer seguimiento del sistema en conjunto. En las segundas pruebas se utilizará la décima parte de la capacidad de una celda de batería, lo que permitirá observar el comportamiento del sistema cuando el control es a tensión contante exclusivamente y el seguimiento de la referencia establecida para la tensión del nodo de la batería.

3.3 Convertidores

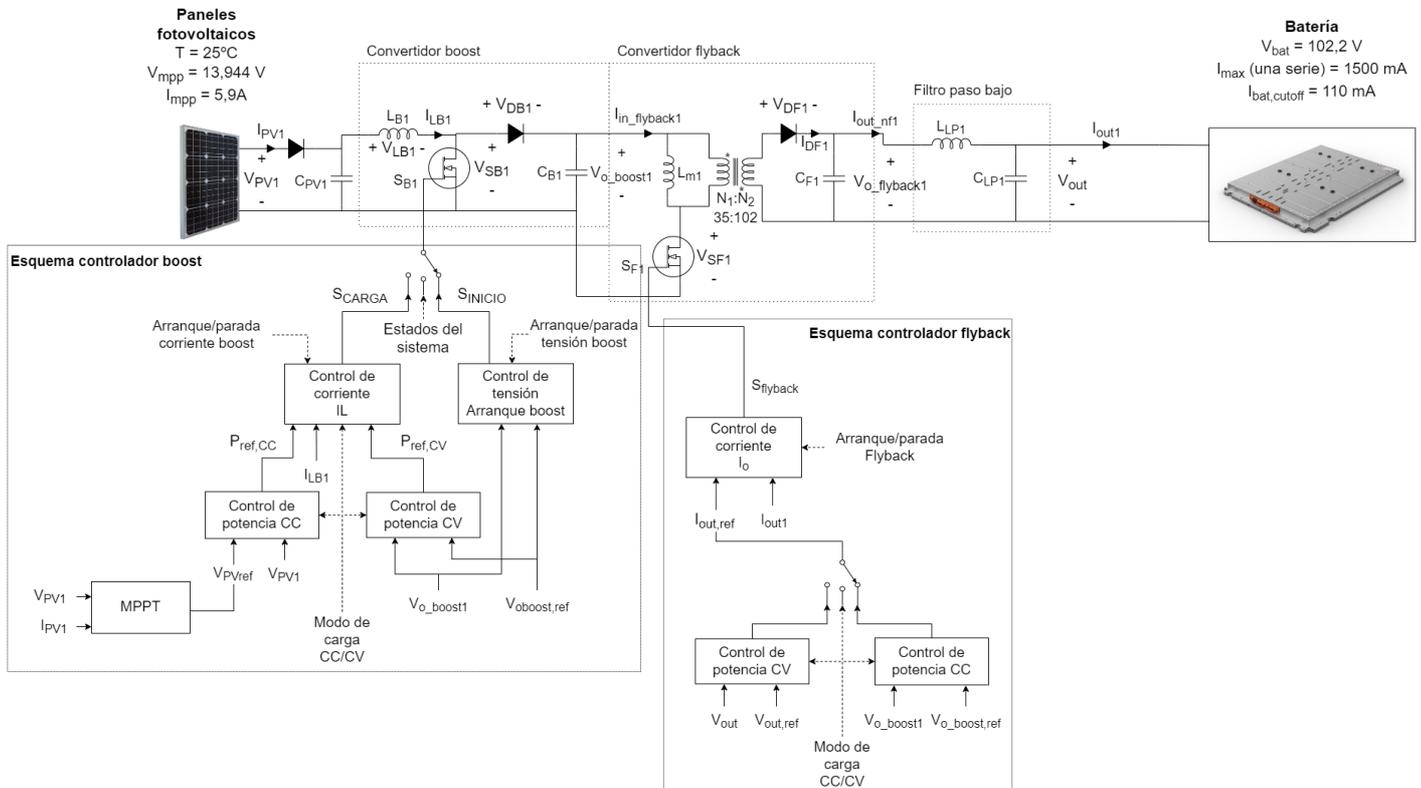


Figura 3-3. Esquema de los convertidores, con sus respectivos esquemas descriptivos de los controladores, de una rama del circuito, con la batería en la salida. Los controladores se verán con más detalle en este apartado.

El sistema consta de convertidores de potencia de continua a continua, o DC/DC, independientes para cada panel, de forma que una sombra, parcial o casi total, en alguno de los cuatro paneles que equipa el vehículo en la cubierta no afecte al comportamiento del resto, pudiendo desactivar completamente el panel afectado en el caso de ocurrir una gran bajada en la potencia generada por este.

Cada panel está conectado al nodo de la batería mediante dos convertidores en cascada, el primero es un elevador y el segundo es un convertidor Flyback, con un transformador de alta frecuencia que permite superar los límites existentes en el convertidor elevador. En ambos casos, se calcularán unas determinadas especificaciones, relacionadas con las tensiones y corrientes previstas a la entrada y salida. Ambas especificaciones se calcularán suponiendo que el convertidor es ideal y que este funciona en régimen permanente.

Se desea que el rizado de tensión, a la entrada y a la salida, sea inferior al 5% cuando el panel trabaje en el punto de generación de máxima potencia a 1000 W/m^2 , al igual que se desea un rizado del 2% en la corriente que circule por la bobina del convertidor. Este valor relativo de rizado será el mismo para los dos convertidores. La frecuencia de conmutación de los transistores de ambos convertidores se fijará en 25 kHz, lo que da un período de conmutación de $40 \mu\text{s}$.

El objetivo del convertidor elevador es pasar de un voltaje que oscila en torno al punto de máxima potencia de generación del panel fotovoltaico a un voltaje superior que no supere los límites de dicho convertidor DC/DC. La tensión de máxima potencia es de 13,944 V, una tensión diez veces menor que la de la batería propuesta para este proyecto. La tensión a la salida será de 35 V, un valor que cumple la especificación de tensión de salida del convertidor con controlador incorporado SPV1020.

El convertidor Flyback se diseñará con el fin de elevar la tensión de 35 V, un valor inferior al límite de 40 V especificado en la hoja de datos del convertidor elevador, a los más de 100 V que requiere la batería durante casi todo el ciclo de carga y descarga.

Este último convertidor DC/DC, con aislamiento galvánico, montará un transformador con una potencia nominal superior al doble de la máxima potencia que es capaz de generar un panel fotovoltaico y cuya relación de transformación es de 35:100.

Ambos convertidores tienen elementos pasivos que deberán ser ajustados a partir de las especificaciones anteriores, mientras que los elementos activos se considerarán ideales durante la fase de diseño. En la fase de pruebas, a la capacidad calculada a la salida del convertidor elevador se le añadirá un condensador de gran capacidad que pueda absorber la corriente de salida de este convertidor mientras el transistor MOSFET del Flyback permanezca abierto y que reduzca el rizado a la salida del convertidor elevador.

3.3.1 Diseño del convertidor elevador

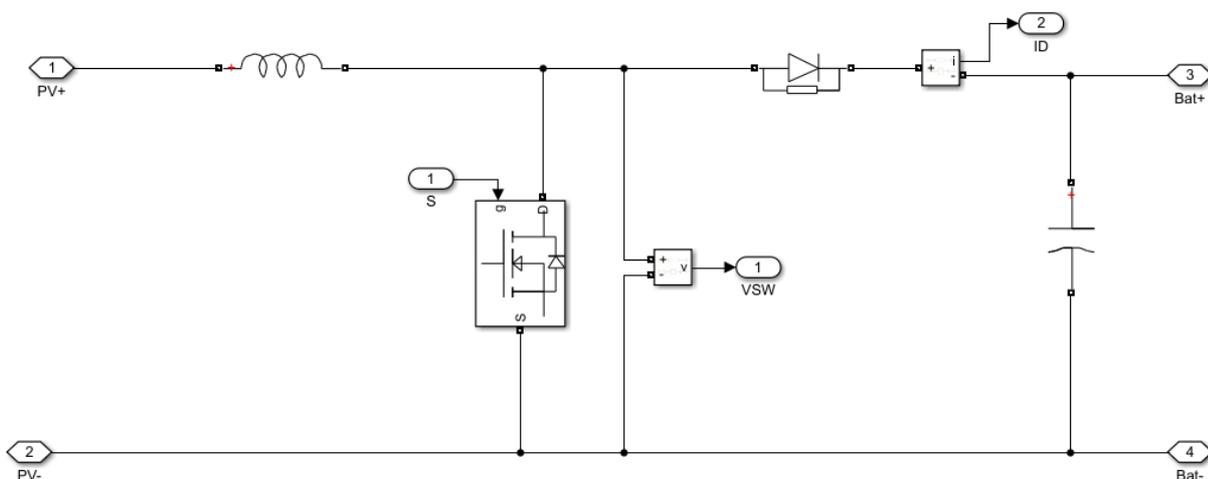


Figura 3-4. Esquema del circuito de un convertidor elevador, tal como se muestra en Simulink.

Este convertidor transforma una tensión de 13,944 V en continua a 35 V en continua, con un rizado de tensión que debe ser inferior al 5%, si la irradiancia se mantiene a 1000 W/m^2 y el generador trabaja en el punto de máxima potencia.

La corriente de entrada es de 5,9 A en el punto de máxima potencia, por lo que el rizado de corriente de la bobina será del 2% de dicha corriente. Aunque se especifique una corriente continua, esta presentará fluctuaciones en torno al punto de máxima potencia debido a la naturaleza oscilatoria del algoritmo MPPT P&O que implementa el sistema una vez alcanzado el punto objetivo.

El rizado de tensión, calculado según las especificaciones anteriores, debe ser de 1,75 V a la salida. El rizado de corriente debe ser, como máximo, de 118 mA. Las especificaciones del convertidor se van a calcular para el modo de conducción continua, porque se espera que, en el punto de máxima potencia, la corriente de la bobina no llegue a cero.

En primer lugar, se va a hallar el ciclo de trabajo o *duty cycle*, D a partir de este momento. Con la ecuación 8 se calcula este valor a partir de las tensiones de entrada y salida de este convertidor elevador.

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 1 - \frac{13,944 V}{35 V} = 0,602 \quad (8)$$

Una vez obtenido D y conocido el período de conmutación, que resulta de invertir la frecuencia de conmutación, se puede obtener la inductancia de la bobina del convertidor a partir de la ecuación 9, con la que se halla el rizado de corriente.

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} (1 - D) T_s \quad (9)$$

Si se intercambian la inductancia L y el rizado de corriente de lugar en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación 10, que servirá para calcular la inductancia. Se sustituye y se calcula la inductancia a partir de las tensiones de entrada y salida, D , la frecuencia de conmutación y el rizado de corriente:

$$L = \frac{V_{in} - V_o}{\Delta I_L} (1 - D) \frac{1}{f_s} = \frac{(35 - 13,944 V) \cdot (1 - 0,602)}{0,118 A \cdot 25 kHz} = 2,84 mH \quad (10)$$

Para la capacidad de salida, se tiene en cuenta el rizado de tensión a la salida, ya conocido y la variación de carga acumulada en el condensador, que se calcula a partir de la corriente que circula por el condensador. Esta puede calcularse integrando la intensidad que circula por el condensador en una de las dos fases del convertidor, estando el MOSFET conduciendo o no. Por lo general, la capacidad de un condensador se calcula:

$$C = \frac{\Delta Q_C}{\Delta V_o} \quad (11)$$

El rizado de tensión se ha calculado previamente. Si se tiene en cuenta la fase donde $I_c = -I_o$, se calcula:

$$\Delta Q_C = I_o D T_s \quad (12)$$

Y si se tiene en cuenta la fase donde $I_c = I_L - I_o$, se calcula:

$$\Delta Q_C = (1 - D) T_s (I_{Lmin} - I_o) + \frac{1}{2} (1 - D) T_s \cdot \Delta I_L \quad (13)$$

Si sustituimos, calculando I_o a partir del balance de potencia y sustituyendo en la ecuación 12...

$$\Delta Q_C = I_o D T_s = I_i (1 - D) D T_s = 5,9 A \cdot (1 - 0,602) \cdot 0,602 \cdot \frac{1}{25 kHz} = 5,65 \cdot 10^{-5} A \cdot s \quad (14)$$

Y mediante la otra ecuación nos saldría lo mismo, siendo I_{Lmin} el valor mínimo del rizado de la corriente que circula por la bobina. Finalmente, la capacidad del condensador de salida se halla sustituyendo en la ecuación 11 los valores correspondientes y es:

$$C_{sal} = \frac{5,65 \cdot 10^{-5} A \cdot s}{1,75 V} = 32,3 \mu F$$

En las ecuaciones anteriores, la corriente del condensador nunca baja de cero mientras el IGBT esté cerrado, ya que la corriente en la bobina varía entre los siguientes valores:

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (15) \quad I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \quad (16)$$

Con estos valores, al considerar una corriente de bobina con un rizado muy inferior al valor medio de la intensidad, esta no podría llegar a cero y el convertidor *boost* trabajaría en modo de conducción continua. Por otro lado, al ser positiva la diferencia de I_L e I_o , la carga del condensador podía calcularse de forma sencilla.

Se ha obtenido una inductancia de 2,84 mH y una capacidad a la salida de 32,3 μ F, calculada esta última con un valor de tensión fijo. Pero a la entrada, como el convertidor elevador tiene una tensión de entrada que depende del algoritmo MPPT, y una corriente que depende, a su vez, de la tensión de entrada, en el rizado se incluirían las variaciones que introduce el algoritmo MPPT.

Un rizado del 5% en la entrada supondría un rizado absoluto de 697 mV, superior a las variaciones de tensión aplicadas en el algoritmo MPPT. Por esto, la capacidad a la entrada se ha buscado mediante la prueba de varias capacidades hasta dar con la que fije el rizado más adecuado, partiendo de 1 μ F. **Tras varias pruebas realizadas con condensadores de 1 μ F, 10 μ F y 20 μ F, este último es el que muestra la mejor respuesta,** ya que el rizado es pequeño y no afecta mucho al comportamiento del sistema.

3.3.2 Diseño del convertidor flyback

El convertidor flyback presentará una tensión de entrada igual o cercana a 35 V en cualquiera de los modos de conducción, mientras que la tensión a la salida variará según el estado de carga de la batería, siendo ascendente durante la fase de control a corriente constante, y permaneciendo invariante cuando el control de la carga se realiza a tensión constante. La tensión de referencia en este último modo se fijará en 117,6 V, que es la máxima de la batería.

No obstante, el cálculo de las especificaciones para los elementos pasivos del circuito se realizará, así como el del *duty cycle*, con la tensión nominal de la batería, que tiene un valor de 100,8 V. La corriente a la salida se calculará utilizando el valor medio de la corriente de entrada, que es la misma que a la salida del convertidor boost.

A la salida la tensión es la de la batería y la corriente es una fracción de la de la batería, según los paneles instalados. La corriente se calculará a partir de la potencia a la salida, que teóricamente se conserva en un convertidor ideal. En uno real será la potencia generada menos las pérdidas.

La corriente en la bobina de magnetización tendrá un rizado del 2% de 2,348 A, valor tomado de la salida del convertidor elevador a máxima potencia y la tensión en el condensador de salida será del 5% de 100,8 V. Esto resulta en que el rizado será de 5,04 V de tensión a la salida y de 0,047 A de corriente en la bobina. La frecuencia de conmutación será de 25 kHz, por lo que se define un ciclo de 40 μ s.

En primer lugar, se calcula la corriente a la salida a partir de la potencia y la tensión, valores ya conocidos:

$$I_o = \frac{P}{V_o} = \frac{82,27W}{102,4V} = 0,806 A \quad (17)$$

El valor de D puede calcularse a partir de los valores de tensión a la entrada y a la salida y de la relación de transformación, como en la ecuación 18.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (18)$$

Ecuación a partir de la que se obtiene, reordenando los términos, la siguiente:

$$D = \frac{1}{1 + \frac{V_{in} \cdot N_2}{V_o \cdot N_1}} \quad (19)$$

Este valor depende de la relación de transformación aplicada al transformador del **convertidor flyback**, cuyo esquema corresponde al de la figura 3-5, donde se representa tal como se configura en simulink, tomando la tensión del MOSFET y la corriente del diodo como tensiones y corrientes que se desean medir.

El transformador se considerará ideal, es decir, no se tendrán en cuenta las pérdidas, y tendrá relación de transformación 35/102. Una vez sea calculado el valor de D, se puede hallar la inductancia de la bobina de magnetización, el condensador y los valores máximo y mínimo de la corriente por el diodo, a partir de la cual se calcula la corriente por la bobina.

En primer lugar, la inductancia de la bobina de magnetización se halla a partir del rizado de corriente, suponiendo modo de conducción continua:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} D T_s}{L_m} \quad (20)$$

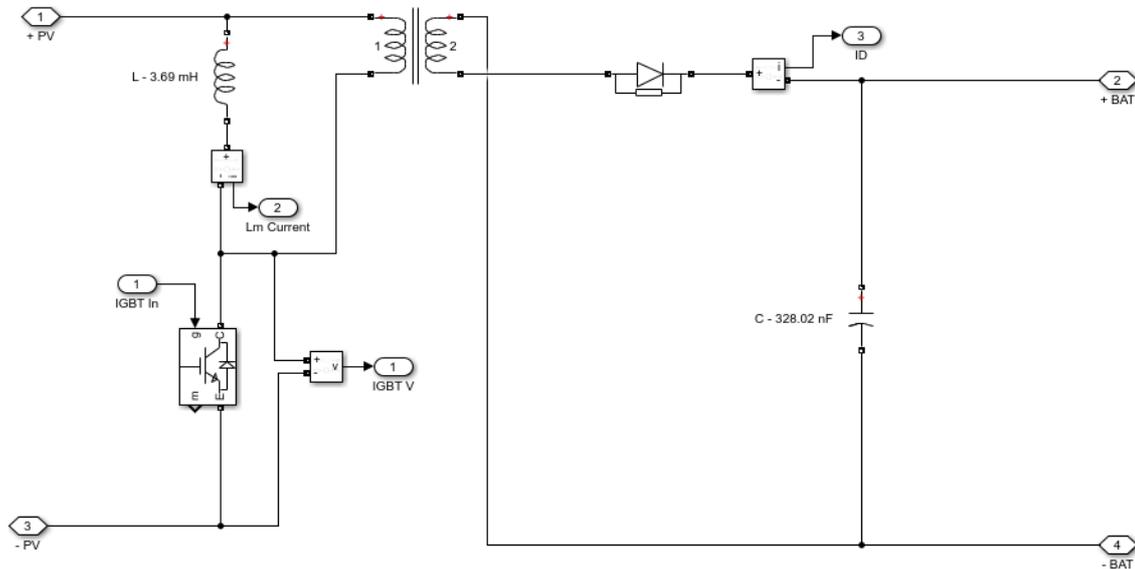


Figura 3-5. Circuito eléctrico del convertidor flyback, tal como se muestra en Simulink.

Posteriormente, se puede hallar la capacidad del condensador a partir de la variación de carga en el mismo y el rizado de tensión a la salida. En primer lugar, se va a proceder al cálculo de la corriente del diodo, de la que podemos conocer el valor mínimo y máximo a partir de las ecuaciones 20 y 21.

$$I_{Dmín} = \frac{I_o}{1-D} - \frac{V_o(1-D)T_s}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (21)$$

$$I_{Dmáx} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{V_o(1-D)T_s}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (22)$$

Si el valor de la corriente del diodo es siempre superior al de la corriente de salida, la variación de carga del condensador puede calcularse exclusivamente a partir de la corriente de salida, por lo que la capacidad del condensador se calculará de la siguiente forma:

$$C = \frac{I_o D T_s}{\Delta V_o} \quad (23)$$

Una vez conocido el valor de la corriente por el diodo, se puede hallar el máximo y mínimo de la corriente por la bobina a partir de la relación de transformación:

$$I_L = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_D \quad (24)$$

Los valores aquí obtenidos podrían variar en la simulación al existir elementos que se han modelado como no ideales con una resistencia muy pequeña o grande según sea necesario, por lo que los cálculos no serán exactos.

El transformador posee una relación de transformación de 35/100, equivalente a multiplicar 2,914 veces la tensión de entrada, con una potencia nominal de 200 VA y una frecuencia de conmutación de 25 kHz. A partir de esta relación de transformación y de las tensiones de entrada y salida, se obtiene el siguiente valor de *duty cycle*, sustituyendo en la ecuación 19:

$$D = \frac{1}{1 + \frac{35V \cdot 102}{102,4V \cdot 35}} = 0,5$$

El valor de la inductancia de magnetización se obtiene a partir del *duty cycle* anterior, al igual que el de la capacidad, que será calculada una vez se conozca la corriente del diodo:

$$L_m = \frac{35 \text{ V} \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{0,047 \text{ A}} = 15 \text{ mH}$$

Se hallan los siguientes valores de corriente por el diodo, máximo y mínimo, sustituyendo en 21 y 22:

$$I_{Dmín} = \frac{0,806 \text{ A}}{1 - 0,5} - \frac{102,4 \text{ V} (1 - 0,5) 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{2 \cdot 15 \text{ mH}} \left(\frac{35}{102} \right)^2 = 1,604 \text{ A}$$

$$I_{Dmáx} = \frac{0,806 \text{ A}}{1 - 0,5} + \frac{102,4 \text{ V} (1 - 0,5) 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{2 \cdot 15 \text{ mH}} \left(\frac{35}{102} \right)^2 = 1,620 \text{ A}$$

Como la corriente que circula por el diodo cuando no está en corte es mayor que la de salida, se podrá calcular la capacidad de forma sencilla, sustituyendo en la ecuación 20:

$$C = \frac{0,806 \text{ A} \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{5,11 \text{ V}} = 3,15 \mu\text{F}$$

Y la corriente por rama de magnetización, sustituyendo en 15 y 16 por los valores correspondientes:

$$I_{Lmín} = 1,604 \text{ A} \cdot \frac{102}{35} = 4,67 \text{ A}$$

$$I_{Lmáx} = 1,620 \text{ A} \cdot \frac{102}{35} = 4,721 \text{ A}$$

Estos valores máximo y mínimo de corriente se medirán a la entrada del convertidor como valores instantáneos, ya que la bobina de magnetización no es más que un modelo de pérdidas del transformador.

Finalmente, se desea conocer cuánta tensión soporta el IGBT en corte, importante cuando se va a elegir el tipo de transistor que se va a utilizar de conmutador. En este caso la tensión soportada se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{sw} = V_{in} + \frac{N_1}{N_2} V_o \quad (25)$$

Los valores máximos y mínimos se calculan con el rizado que presenta el voltaje a la salida del convertidor:

$$V_{swmáx} = 35 \text{ V} + \frac{35}{102} \cdot 104,95 \text{ V} = 71,012 \text{ V}$$

$$V_{swmín} = 35 \text{ V} + \frac{35}{102} \cdot 99,845 \text{ V} = 69,261 \text{ V}$$

Por último, se desea conocer el valor medio de la corriente a la entrada, calculado a partir del *duty cycle*, el valor medio de la corriente de salida y la relación de transformación:

$$\frac{I_{in}}{I_o} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1 - D} \rightarrow I_{in} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1 - D} \cdot I_o \quad (26)$$

$$I_{in} = \frac{102}{35} \cdot \frac{0,5}{1 - 0,5} \cdot 0,806 \text{ A} = 2,348 \text{ A}$$

Además de esto, los valores máximo y mínimo de la potencia instantánea que se transmitirá por el transformador se hallará al multiplicar los valores máximo y mínimo, respectivamente, de la corriente por la bobina por la tensión de entrada, 35 V:

$$P_{máx,inst.} = 35 \text{ V} \cdot 4,623 \text{ A} = 161,805 \text{ W}$$

$$P_{mín,inst.} = 35 \text{ V} \cdot 4,577 \text{ A} = 160,195 \text{ W}$$

Debido a que estos valores superan los 150 W, la elección de un transformador con 200 VA de potencia nominal es la más adecuada para el convertidor *flyback*. Los resultados podrían variar por causa de las pérdidas internas existentes en los elementos activos y transformadores.

3.4 Estados de funcionamiento del sistema

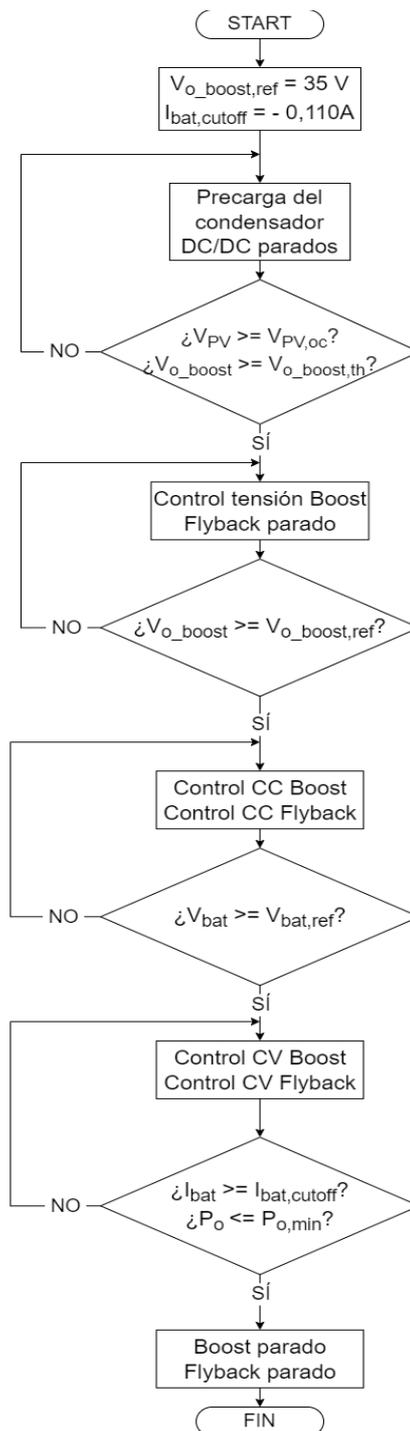


Figura 3-6. Diagrama de flujos de la máquina de estados del sistema de carga de baterías PV. Cada estado habilita o deshabilita el sistema de control de los convertidores según sea necesario.

El sistema durante las pruebas partirá de un determinado estado de carga, y en ese momento se considerará el sistema en el estado inicial, en el que los dos convertidores no conmutan, es decir, están parados. El estado de carga de la batería puede variar según el tipo de pruebas que vayan a realizarse, pues se va a comprobar el funcionamiento del sistema con carga a tensión constante, conforme la batería vaya llegando al 100% de la carga, o con carga a corriente constante, que es la fase más extensa de la carga de la batería.

El segundo estado entra en funcionamiento cuando el condensador está completamente cargado. Para ello, debe superarse un nivel de tensión a la salida del convertidor elevador, que depende de la cantidad de radiación incidente mientras el panel tenga una tensión en bornes igual a su tensión de circuito abierto o V_{oc} .

En todo momento, la tensión a la entrada es la de circuito abierto. Este establecimiento de valores iniciales se puede ver con más detalle en la Figura 3-7. Como aclaración, el condensador que se precarga durante los dos primeros estados es un condensador de gran capacidad, que pueda soportar la corriente que sale del convertidor elevador mientras el *convertidor flyback* esté en corte, y se ha fijado en 1 mF.

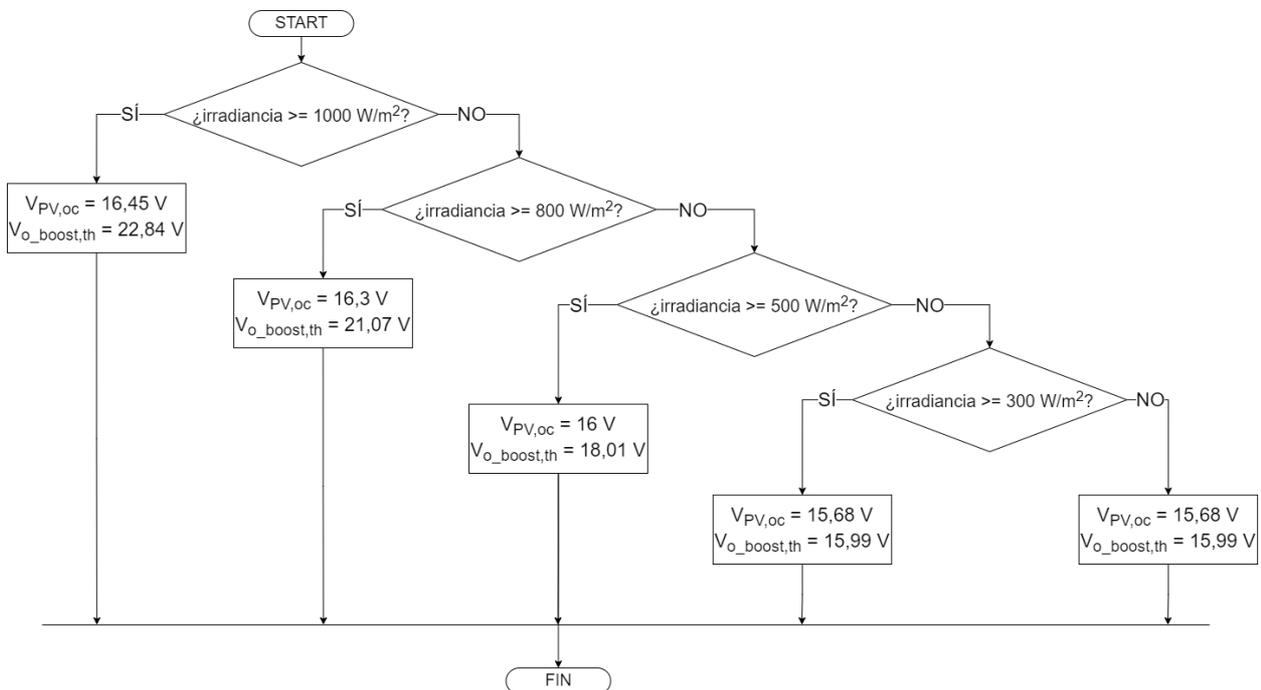


Figura 3-7. En este diagrama de flujos se representa la carga de los valores iniciales de tensión umbral de salida del convertidor elevador, a partir de la cual el control de tensión del convertidor boost, que se explicará posteriormente, comienza a funcionar, así como la tensión inicial de circuito abierto. Hay cuatro puntos de operación específicos empleados, que son para las irradiancias que se verán posteriormente en el experimento.

Los niveles de tensión que se deben superar para pasar al siguiente estado de funcionamiento una vez el condensador está cargado se establecen en el siguiente código, guardado en el archivo *umbral.m*:

Código de umbrales de tensión de precarga del condensador – Fichero *umbral.m*

```

function out = umbral(irr)
    if (irr >= 0)
        v = [15.10 14];
        pinit_cv = 7.78;
    end
    if (irr >= 300)
        v = [15.68 15.99];
        pinit_cv = 24.12;
    end
    if (irr >= 500)
        v = [16 18.01];
        pinit_cv = 40.86;
    end
    if (irr >= 800)
        v = [16.30 21.07];
        pinit_cv = 65.73;
    end
    if (irr >= 1000)
        v = [16.45 22.84];
        pinit_cv = 82.26;
    end
    out = [v pinit_cv];
end
  
```

Una vez se cumpla la condición anterior, un controlador elevará la tensión a la salida del convertidor hasta los 35 V, dados por una referencia fija, hasta que este valor se alcance. La tensión a la entrada, procedente del panel, variará según el *duty cycle* establecido por el controlador y será menor a la tensión V_{oc} .

Una vez se superen los 35 V en el nodo que une la salida del convertidor elevador con la entrada del Flyback, se pasará al tercer estado, en el que ambos convertidores, el elevador y el aislado, estarán conmutando según un controlador que ajuste los niveles de tensión y corriente a las especificaciones deseadas. Mientras la batería no alcance su tensión máxima, se permanecerá en este estado, con la particularidad de que la corriente a la salida del Flyback permanece constante, mientras que la tensión a la salida del Flyback varía hasta que se alcanza el valor máximo de la tensión de la batería.

El controlador del Flyback, en este estado, regulará la corriente a la salida del convertidor, que es, a su vez, la corriente que carga la batería. La referencia de esta corriente se dará a través de un controlador que fija la tensión a la entrada de este convertidor en los 35 V anteriormente especificados. De esta forma, el convertidor Flyback fija la tensión en la salida del convertidor elevador y el convertidor elevador fija la tensión existente a la salida del generador fotovoltaico, controlando el ciclo de conmutación de los transistores.

Si la tensión de la batería alcanza su valor máximo, el funcionamiento de los convertidores cambia y el sistema pasa a un nuevo estado. En esta etapa, el sistema mantiene a la salida del Flyback una tensión fija igual o inferior a la tensión máxima que, por construcción, puede soportar la batería, de forma que esta tensión permanezca constante.

En este estado de control a tensión constante, el controlador del convertidor Flyback deja de controlar la tensión a la entrada, pasando a controlar la tensión a la salida. La tensión a la entrada del convertidor Flyback pasa a ser controlada por el convertidor elevador. Por ello, la tensión a la salida de los paneles fotovoltaicos dejará de ser controlada y tomará un valor comprendido entre V_{mpp} y V_{oc} dependiente de la potencia generada.

En cuanto la batería llega a su capacidad máxima, ambos convertidores cortarán en cuanto la corriente que entra en la batería tenga un valor inferior al valor de corte, que depende del modelo de batería. Para la Panasonic del modelo utilizado en este proyecto, la corriente era de 110 mAh.

Todos los cambios de estado se realizan mediante el código de un fichero de nombre *cambio_estados.m*, que implementa la máquina de estados representada en el diagrama de flujos de la **Figura 3-6**.

Código de la máquina de estados del sistema – Fichero *cambio_estados.m*

```
function out = cambio_estados(input)
    global estados; %% array de longitud [estados]
    global Ibatref; %% corriente de salida de la bateria
    global Voboost_ref; %% tension de referencia Voboost, 35V
    %% inicio de variables
    tiempo = input(1);
    Voboost = input(2);
    VPVoc = input(3);
    Voboost_init = input(4);
    VPV = input(5);
    Vbat = input(6);
    Ibat = input(7);
    Voref = input(9);

    if(tiempo == 0)
        estados = [1 0 0 0];
        Ibatref = -0.110;
        Voboost_ref = 35;
    else
        if (estados(1) == 1) %% parada
            if (VPV >= VPVoc && Voboost >= Voboost_init)
                estados = [0 1 0 0];
            end
        elseif (estados(2) == 1) %% arranque de convertidores
            if (Voboost >= Voboost_ref)
                estados = [0 0 1 0];
            end
        end
    end
end
```

```

end
elseif (estados(3) == 1) %% control corriente constante
    if (Vbat >= Voref)
        estados = [0 0 0 1];
    end
elseif (estados(4) == 1) %% control tensión constante
    if (Ibat >= Ibatref)
        estados = [0 0 0 0];
    end
end
end
end
out = estados;
end

```

3.5 Controladores de los convertidores

Los convertidores de potencia son regulados por controladores que cuentan con varias etapas, tanto si la carga es a tensión constante como si esta se desarrolla a corriente constante, con la excepción de la etapa de arranque, que tiene una única etapa. Ambos controladores tienen como entrada una tensión de referencia para la tensión que haya en ese momento a la entrada o a la salida de los convertidores, según sea el caso, además de esa misma tensión, que se desea regular. Para la fase de arranque se tiene en cuenta únicamente la tensión que haya a la salida del convertidor elevador, permaneciendo el flyback apagado. La salida, en todo momento, será una señal con las conmutaciones de los transistores que se regula según el *duty cycle* calculado en los controladores.

Por otro lado, los controladores PI empleados para calcular la potencia de referencia, empleada para hallar la corriente que se pasa de referencia con el fin de regular la existente a la entrada del elevador o a la salida del flyback según el convertidor que sea controlado, en el modo de carga a tensión constante, deben ser iniciados de forma externa con la máxima potencia que es capaz de dar el panel a una irradiancia dada.

3.5.1 Convertidor elevador

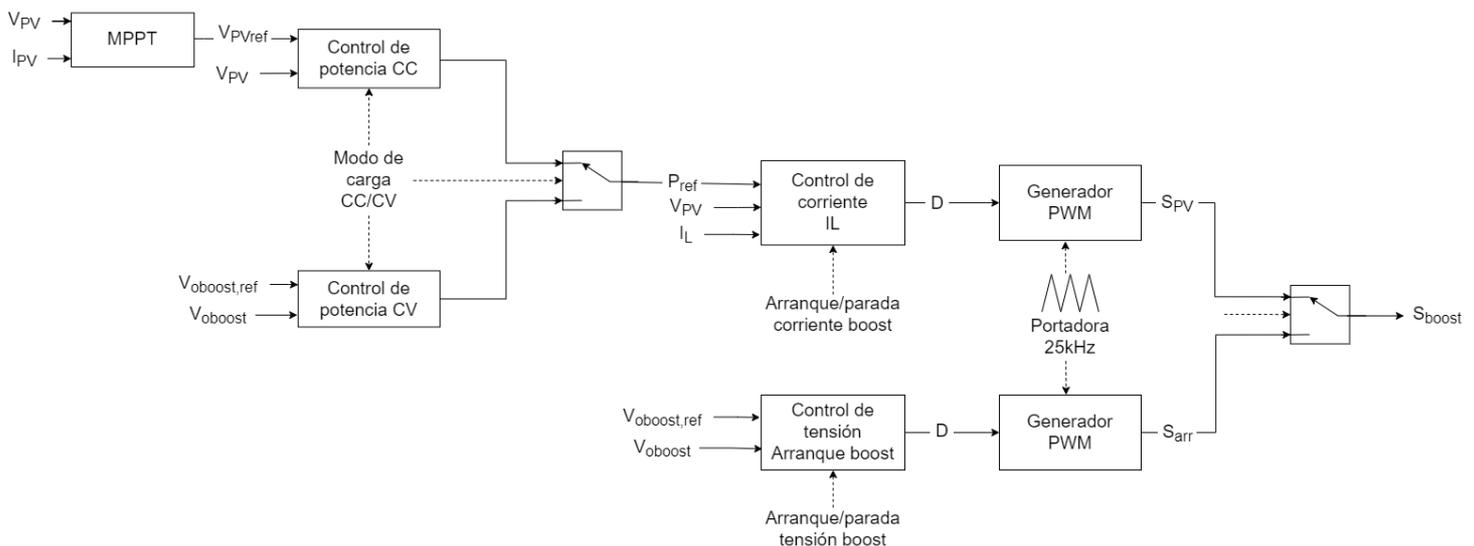


Figura 3-8. Esquema general del controlador del convertidor elevador. Se diferencian tres partes. Al principio, entre la fase del algoritmo MPPT y el control de corriente, según el modo de carga se genera, mediante controladores PI, una referencia de potencia a partir del error de tensión en la entrada para el modo CC y a partir del error de tensión de la salida para el modo CV. Esta referencia de potencia se pasa al segundo bloque, de control de corriente, que, mediante PWM, genera la secuencia de conmutación. Finalmente, un tercer bloque, el inferior, se encarga de controlar la tensión de salida del convertidor elevador durante la fase de arranque, en la que no circula corriente controlada por el convertidor.

La etapa interna es la parte del control de lazo abierto, ya que el controlador de esta etapa, un PI, que nos

asegura un error en régimen permanente prácticamente nulo, controla la corriente que circula por la bobina, ajustándola a la referencia. En la fase de diseño esta referencia es fija, pero en las pruebas se obtiene a partir de la referencia de potencia obtenida para el sistema, por lo que pasa a ser variable.

La referencia de potencia se incluye en el lazo cerrado de control, donde se toma de referencia la tensión deseada y se calcula la potencia de referencia a partir de la diferencia existente entre la mitad del cuadrado de la tensión de referencia dada y la mitad del cuadrado de la tensión medida en el nodo de interés según el modo de control de carga de la batería.

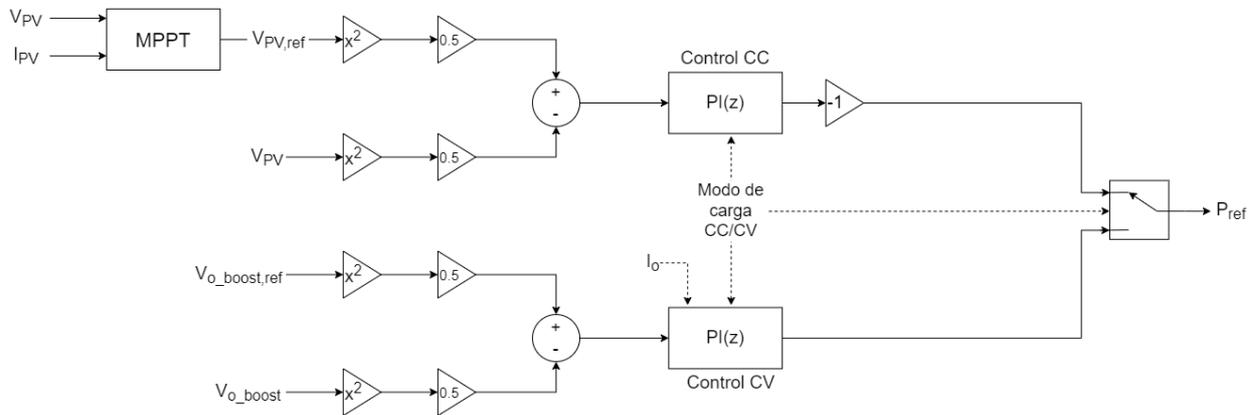


Figura 3-9. Esquema del lazo externo del controlador del convertidor elevador. Esta parte del controlador se encarga de generar una potencia de referencia para hallar una referencia de corriente que aplicar a la corriente del inductor del convertidor elevador, tanto para los modos de CC como CV.

En el control a corriente constante, la referencia de tensión se calcula mediante el algoritmo MPPT, y la tensión a regular es la que ingresa en el convertidor desde el panel fotovoltaico. Una vez se obtiene la potencia de referencia, se divide el resultado entre la tensión en la entrada del convertidor boost y se obtiene una referencia de corriente. En la segunda etapa, se obtiene el error de la corriente de referencia y se hace pasar por un controlador, que nos da la tensión diferencial, que se suma al valor actual de tensión de entrada. Esta segunda etapa es válida para el control a tensión constante y para el control a corriente constante.

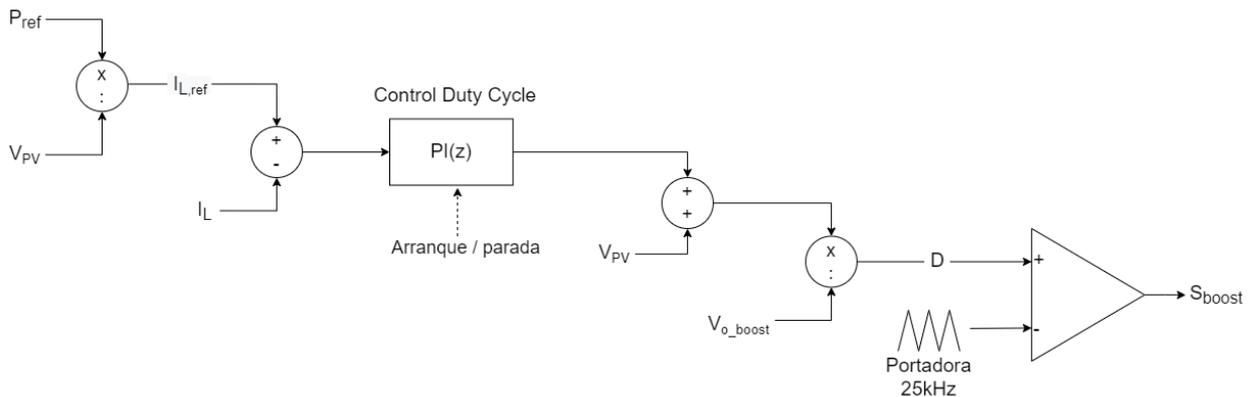


Figura 3-10. Esquema del controlador de corriente del inductor del convertidor elevador y generador de Duty Cycle y pulsos para el MOSFET del convertidor elevador. El PI obtiene, a partir del error de corriente, una tensión que sirve para calcular el duty cycle del convertidor.

Para el control a tensión constante, la primera etapa también obtiene una potencia de referencia, pero esta se hace a partir de una referencia de tensión para la salida, que debe mantenerse a 35 V, mientras que la tensión a la entrada se mantiene libre, es decir, varía según los requerimientos de la salida. Por tanto, la entrada del controlador del convertidor elevador obtiene una tensión medida en la salida, que evoluciona hasta ajustarse a los 35 V de la referencia. Es en este modo cuando el convertidor elevador mantiene los 35 V en el nodo de interconexión de ambos convertidores.

El *duty cycle* se obtiene al dividir la tensión resultante de la suma de la tensión de salida del panel fotovoltaico

y la tensión diferencial saliente del controlador de corriente entre la tensión existente a la salida del convertidor. Este resultado se pasa por un comparador que genera la señal de entrada en la puerta del transistor MOSFET.

En cuanto a las constantes de control de los controladores PI, han sido ajustados mediante un método de prueba y error, buscando la mejor respuesta mediante sucesivas pruebas en la fase de diseño del controlador. Inicialmente se buscaba el punto de control todo-nada y luego se redujeron las constantes hasta hallar la respuesta buscada. Esto era posible debido a que hay saturaciones de la respuesta de cada controlador.

Estos controladores PI discretos implementan la integración mediante el método de Euler hacia delante, con un tiempo de muestreo cien veces superior al período de muestreo de la simulación, de 100 ns, por lo que el período de muestreo de los controladores se fija en 10 μ s.

Las constantes de control para el sistema de control de los voltajes que entran o salen del convertidor elevador son:

1. Para el controlador que genera la potencia de referencia que se emplea para calcular la referencia de corriente cuando la carga se realiza a **tensión constante, se ha ajustado la constante proporcional en 1,5 y la constante integral en 15.**
2. Para el controlador que genera la potencia de referencia que se emplea para calcular la referencia de corriente durante la carga a **corriente constante, se le ha dado a la constante proporcional un valor de 1 y a la integral un valor de 70.**
3. Para el controlador que, a partir del error existente en la corriente medida en la entrada del convertidor elevador, calculado a partir de una referencia dada por los controladores PI anteriores según el modo de control, y que genera una diferencia de tensión que se suma a la medida en la salida del panel, se ha empleado **la constante proporcional 100 y la constante integral 70.**

El controlador anteriormente descrito es idéntico para cada uno de los convertidores elevadores que existen en el sistema del proyecto, ya que se usa un convertidor por cada panel fotovoltaico.

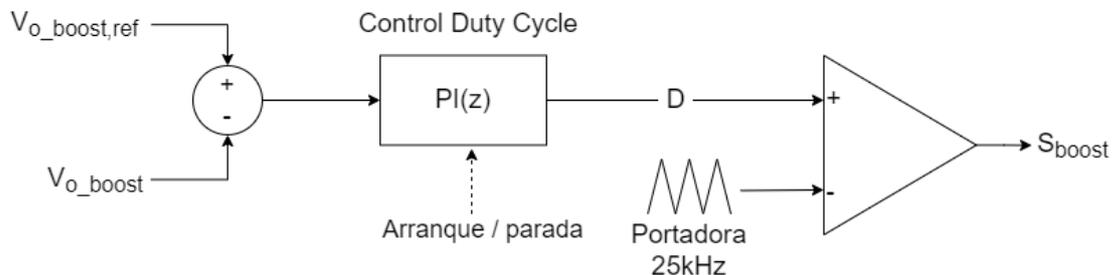


Figura 3-11. Esquema del controlador de arranque del convertidor boost, que controla la tensión $V_{o_{boost}}$ de este.

Además, existe un controlador que será empleado únicamente durante la fase de transición entre la fase inicial con el panel trabajando en modo de circuito abierto y la fase de carga a corriente constante una vez se superen los 35 V. Recibirá 35 V como tensión de referencia, valor al que debe igualarse la tensión para que entre en funcionamiento el convertidor flyback.

Este último controlador es un PI de **constante proporcional 0.001 y constante integral 1** que recibe los 35 V de referencia y la tensión medida a la salida del convertidor elevador y a partir de la diferencia entre los dos valores anteriores establece un *duty cycle* en la puerta del MOSFET del elevador. El convertidor flyback permanece apagado.

3.5.2 Convertidor Flyback

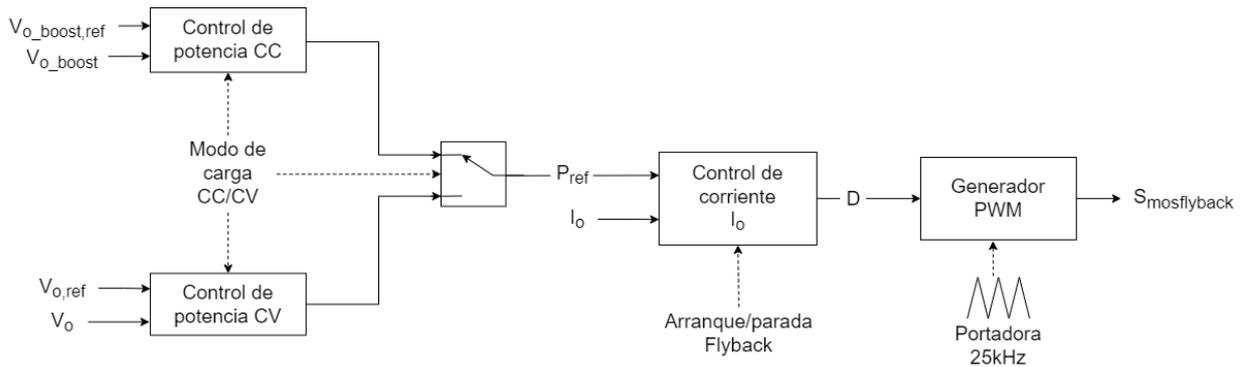


Figura 3-12. Esquema del controlador del convertidor flyback. Este controlador es muy similar al visto para el convertidor elevador, ya que posee una fase que genera una referencia de corriente a partir del error de tensión.

En el convertidor Flyback también se puede trabajar en los dos modos de carga. En este caso, según el modo de carga también cambia la tensión a partir de la que se obtiene la referencia de corriente, en este caso a la salida para el control a tensión constante y a la entrada para el control a corriente constante.

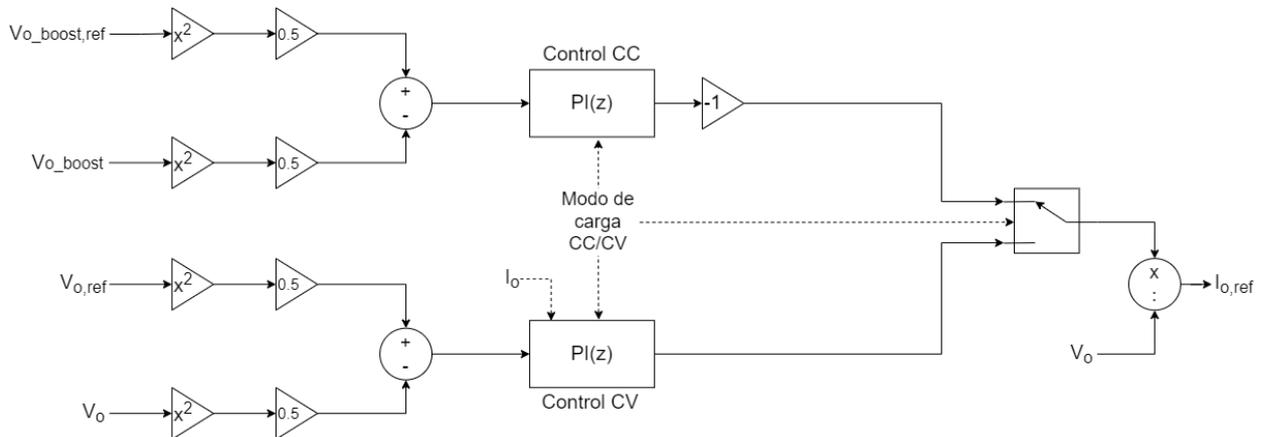


Figura 3-13. Generador de referencia de corriente de salida para el convertidor flyback. La parte superior corresponde a la parte de control de carga a corriente constante, mientras que la parte inferior corresponde a la parte de carga a tensión constante. La potencia de referencia generada por el controlador PI discreto se divide entre la tensión de salida del *flyback* para obtener la corriente de referencia a la salida.

Dependiendo del control aplicado, la referencia de corriente se obtiene siempre a partir del error de la mitad del cuadrado del valor de las tensiones, es decir, la diferencia existente entre la tensión de referencia y la medida en el nodo que corresponda. En cualquier nodo que se mida la tensión y se calcule la potencia de referencia mediante un controlador PI se halla la referencia de corriente a la salida dividiendo la potencia resultante entre la tensión medida en el nodo que une el convertidor Flyback con la batería.

Una vez calculado el error de la corriente de salida, un controlador PI genera el valor del *duty cycle* para el convertidor Flyback, en ambos modos de control. Este valor se pasa por un comparador, que genera la señal que alimenta la puerta del MOSFET.

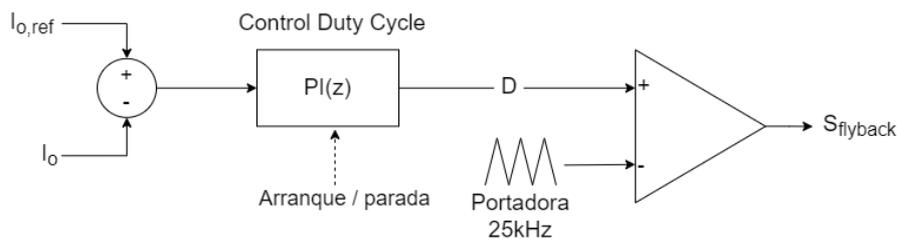


Figura 3-14. Controlador de la corriente de salida I_o del convertidor flyback.

Para obtener la referencia de corriente en el modo de carga a tensión constante, se mide la tensión a la salida y se compara con la referencia, que es la tensión máxima de la batería. Si la carga de la batería se hace a corriente constante, el convertidor Flyback es el encargado de mantener los 35 V en el nodo de conexión de los convertidores, por lo que esa referencia se utiliza para controlar la tensión a la entrada del convertidor Flyback.

Finalmente, para cada controlador se ha establecido el método de Euler hacia delante como método de integración, con un período de muestreo de 10 μ s. Las constantes de control son:

1. Para el controlador que fija la referencia de corriente para la **carga a corriente constante** y que recibe la tensión a la entrada del convertidor Flyback **se ha fijado una constante proporcional de 10 y una constante integral de 20**.
2. Para el controlador que fija la referencia de corriente de salida del Flyback en el modo de **carga a tensión constante**, **la constante proporcional es de 1 y la constante integral de 10**.
3. Para el controlador que obtiene el *duty cycle* a partir del error existente en la corriente de salida del convertidor Flyback correspondiente, **la constante proporcional es de 0,5 y la constante integral es de 30**.

Los controladores de los convertidores conectados a los otros tres paneles fotovoltaicos son idénticos a los descritos anteriormente. En todos los controladores, la constante integral suele superar a la proporcional, excepto en el controlador de la corriente que entra en el convertidor elevador desde el panel fotovoltaico.

3.6 Resumen de características del sistema

Una vez vistos todos los datos del sistema y la descripción de los controladores, en la siguiente tabla, la 3-4, se deja un resumen con los datos más relevantes para los convertidores, tras haber sido calculados.

Tabla 3-4. Resumen de las características del sistema de carga de baterías mediante paneles fotovoltaicos.

| Símbolo | Descripción | Valor |
|-------------------|---|---------------------|
| V_{mpp} | Tensión de máxima potencia entregada al conv. boost por el panel PV | 13,944 V |
| I_{mpp} | Corriente de máxima potencia que entrega al conv. boost el panel PV | 5,9 A |
| $P_{m\acute{a}x}$ | Potencia máxima entregada por el panel PV al convertidor boost | 82,27 W |
| C_{PV} | Capacidad de salida del panel fotovoltaico | 20 μ F |
| L_B | Inductancia de la bobina de entrada del convertidor elevador | 2,84 mH |
| C_B | Capacidad de salida del convertidor elevador, dos condensadores en paralelo | 32,3 μ F + 1 mF |
| L_m | Inductancia de la bobina de magnetización del transformador del flyback | 15 mH |
| $N_1:N_2$ | Relación de transformación del transformador del flyback | 35:102 |
| C_F | Capacidad de salida del convertidor flyback | 3,15 μ F |
| L_{LP} | Inductancia del inductor del filtro de paso bajo instalado en la salida del convertidor flyback hacia la batería | 200 μ H |
| C_{LP} | Capacidad del condensador del filtro de paso bajo instalado en la salida del convertidor flyback hacia la batería | 500 μ F |
| V_{bat} | Tensión nominal de la batería | 102,2 V |
| $I_{bat,max}$ | Corriente máxima soportada por la batería | 1500 mA |
| $I_{bat,cutoff}$ | Corriente mínima requerida por la batería para mantener una carga | 110 mA |

4 PRUEBAS DEL SISTEMA

Con el fin de estudiar el comportamiento del sistema diseñado en este proyecto, se han realizado pruebas, todas ellas en distintas condiciones de luminosidad uniformes. El rango de condiciones de iluminación es bastante amplio, y se van a realizar pruebas de los convertidores de potencia con una irradiancia que tomará valores comprendidos entre los 300 W/m² y 1000 W/m².

Las condiciones de luminosidad tan amplias servirían para, mediante simulación pruebas de laboratorio, estudiar el comportamiento que tendría el sistema en condiciones de funcionamiento reales, donde la irradiancia es variable por numerosas causas, pues los paneles no siempre van a estar expuestos a una irradiancia de 1000 W/m², el valor ideal ya que es cuando generan la máxima potencia.

Una irradiancia menor supondrá la generación de una potencia menor, e incluso es probable que la potencia generada sea tan débil que sea imposible la carga de la batería, especialmente cuando se alcanzan la tensión máxima de la batería.

Por otro lado, la batería tiene limitaciones, pues solo sería posible alcanzar el 100% de su capacidad total cuando la carga a tensión constante se realiza a la tensión máxima que es capaz de soportar. En caso de realizar el control a una tensión inferior a la máxima, la batería no llega al total de su capacidad, quedándose en un estado de carga situado entre el 90% y el 100%.

4.1 Pruebas del convertidor elevador

En primer lugar, se probó el convertidor elevador anteriormente diseñado. Una vez se han hallado las especificaciones respecto a niveles de tensión, corriente, rizados, capacidades e inductancias del convertidor, se sustituirá el circuito existente a la salida por una resistencia, que soportará la tensión a la salida.

El cálculo de la resistencia se hará a partir del punto en el que la tensión sea el doble de la tensión de máxima potencia, con una potencia de salida igual a la máxima potencia que puede dar el panel fotovoltaico. Las pérdidas se supondrán despreciables. La máxima potencia que proporciona el generador es de aproximadamente 82,27 W y la tensión de salida se fija en 35 V, por lo que la resistencia, calculada a partir de la ecuación:

$$P = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{P} \quad (20)$$

Esta resistencia se fijará a la salida del convertidor. Una vez fijada, se probará con diferentes valores de *duty cycle* que se muevan en torno a 0,5.

4.1.1 Pruebas con tensión de entrada fija

En este primer caso se ha fijado una tensión en la entrada de 13,944 V, correspondiente a la tensión de máxima potencia con una irradiancia de 1000 W/m², que será la usada, en principio, para todas las pruebas, aunque no la única, ya que en la prueba final esta podría variar según la cantidad de radiación que incide sobre el panel.

Con estas primeras pruebas se quiere comprobar si el convertidor cumple las especificaciones de diseño, especialmente en el rizado. Esto se comprobará en el condensador de la salida y en la bobina, además de la tensión a la salida. A la salida se ha colocado una resistencia que se ha calculado mediante la ecuación 10:

$$P = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{P} = \frac{(35 \text{ V})^2}{82,27 \text{ W}} = 14,88 \Omega$$

El circuito de las presentes pruebas emplea un MOSFET como conmutador, utilizado también en el SPV1020.

4.1.1.1 D=0,602

En primer lugar, se considera una tensión a la entrada constante e igual al valor de V_{mpp} o 13,944 V, como se indica en la siguiente gráfica:

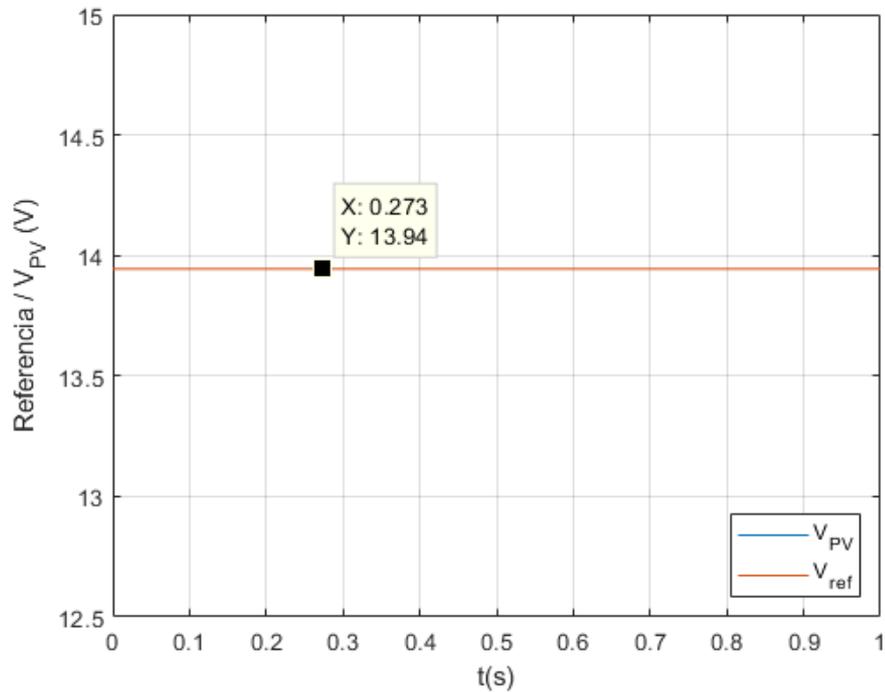


Figura 4-1. Tensión de entrada durante la prueba con carga resistiva y tensión impuesta. Esta se impone mediante una fuente de tensión continua definida por el usuario.

Se ha realizado una prueba con D igual a 0,602. La tensión de salida es constante y presenta una pequeña oscilación debida al rizado. Se mantiene en un valor cercano a 35 V, concretamente 34,015 V, con picos máximos de 34,86 V y mínimos de 33,17 V, por lo que el rizado es de 1,69 V o de un 4,97 %, lo que significa que se cumplen las especificaciones a la salida.

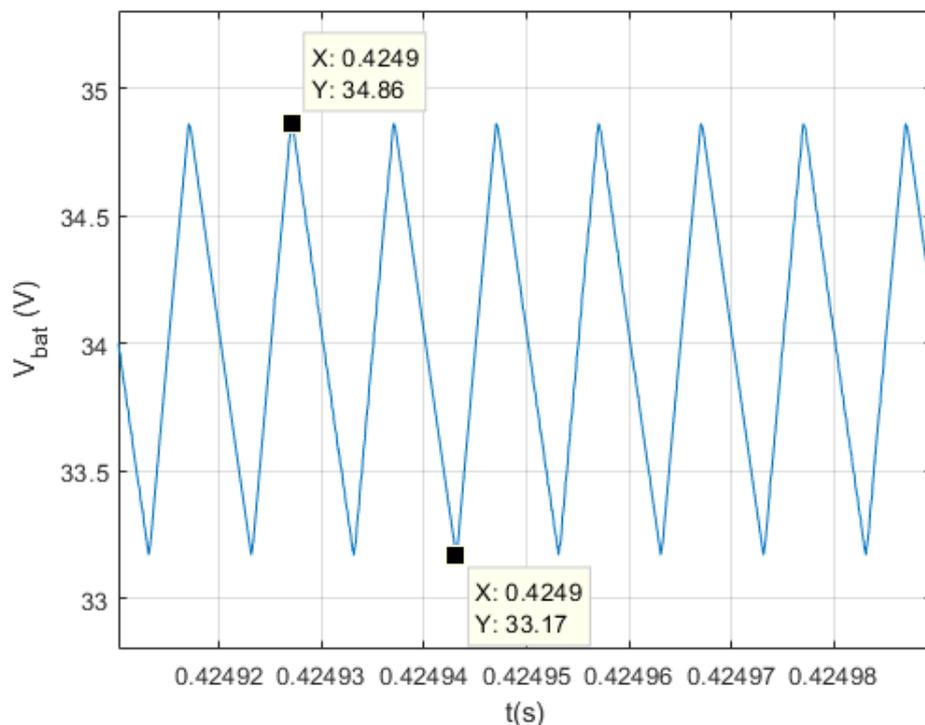


Figura 4-2. Tensión a la salida del convertidor elevador con carga resistiva de prueba, definida en 14,88 Ω .

En cuanto a la corriente, el rizado debe ser inferior al 2% o 118 mA. Esta debe mantenerse en torno a 5,9 A. Con un *duty cycle* de 0,602, la corriente toma un valor medio de 5,864 A, cercano a 5,9 A.

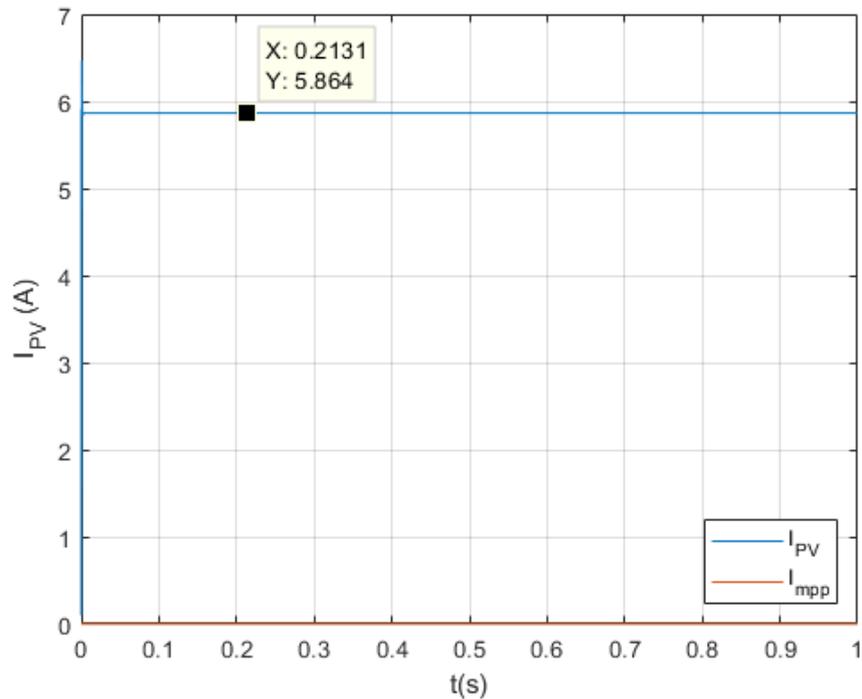


Figura 4-3. Corriente a la entrada del convertidor elevador durante la prueba con parámetros fijos. La potencia generada es de 82,27 W de potencia, valor basado en las características del panel fotovoltaico.

Si se observa con más detalle, el rizado es de 112 mA o del 1,9% relativo, por lo que el convertidor cumple las especificaciones. Esto se conoce a partir de los picos de corriente, que toman valores de 5,92 A y de 5,808 A respectivamente. En la gráfica se puede observar con detalle la evolución de la corriente en régimen permanente. Como el rizado es muy pequeño comparado con el valor medio, el convertidor trabajará siempre en modo de conducción continua.

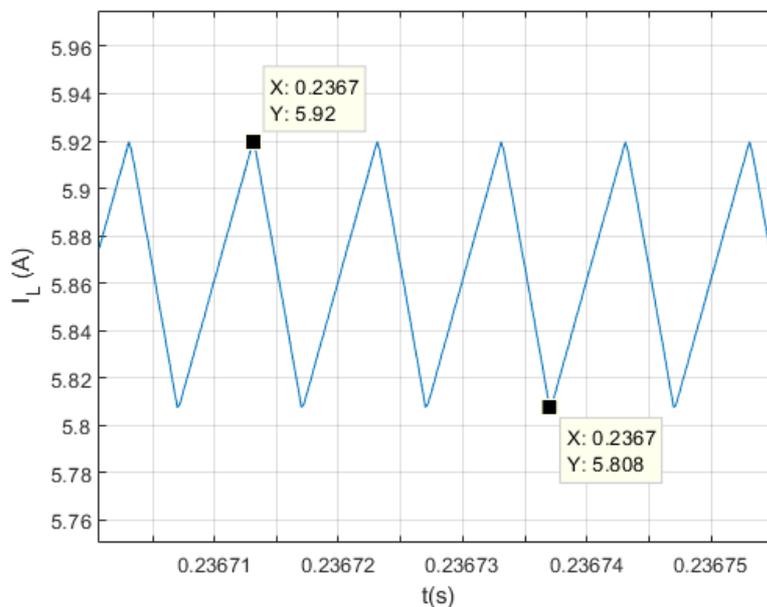


Figura 4-4. Rizado de la corriente a la entrada del convertidor elevador durante esta primera prueba con parámetros fijos a 82,27 W de potencia.

Otros valores que podrían ser interesantes son el valor de la potencia a la salida y de la corriente a la salida. La corriente a la salida se calcula a partir del balance de potencias, por lo que:

$$P_i = P_o \rightarrow V_{in} I_{in} = V_o I_o \rightarrow \frac{V_{in}}{V_o} = \frac{I_o}{I_{in}} \quad (20)$$

A partir de la ecuación anterior es posible hallar la relación entre D y las corrientes de entrada y salida:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 1 - \frac{I_o}{I_{in}} \rightarrow \frac{I_o}{I_{in}} = 1 - D \rightarrow I_o = (1 - D)I_{in} \quad (21)$$

$$I_o = (1 - 0,602) \cdot 5,9 A = 2,348 A$$

En el caso presente, con D igual a 0,602, la corriente de salida toma valores entre 2,343 A y 2,229 A. En la gráfica se observan estos valores, siendo su valor medio de 2,286 A, cercano al calculado:

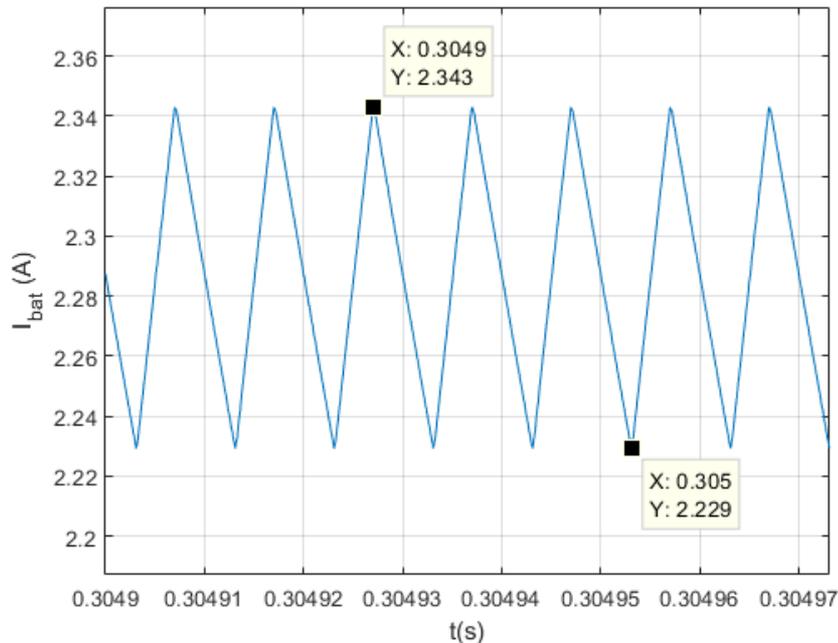


Figura 4-5. Corriente a la salida del convertidor elevador, con carga resistiva de prueba para estudiar el comportamiento del convertidor a una determinada potencia.

La potencia toma un valor similar a 80 W, que es la especificación que debe cumplir el sistema. En la gráfica se ve que el valor medio es de 81,76 W.

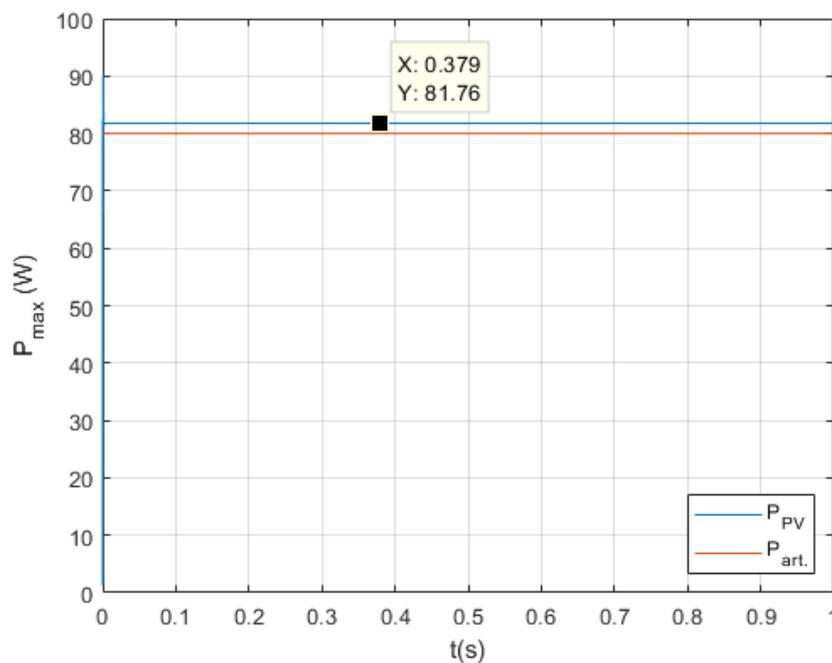


Figura 4-6. Potencia medida a la entrada del convertidor elevador para una tensión fija de prueba. Este valor es constante e igual a 81,76 W, porque la tensión tiene un valor fijo.

4.1.2 Pruebas del convertidor elevador con referencia fija de corriente

En la segunda fase, se realizarán pruebas del control de corriente fijando una referencia, que se van a realizar para los valores de corriente de máxima potencia que corresponden a las irradiancias de 500, 800 y 1000 W/m², aunque en esta fase se fijará una irradiancia de 1000 W/m² primero y de 300 W/m² posteriormente, para estudiar los valores máximos y mínimos de corriente posible dentro de los experimentos. Las simulaciones durarán 0,25 segundos.

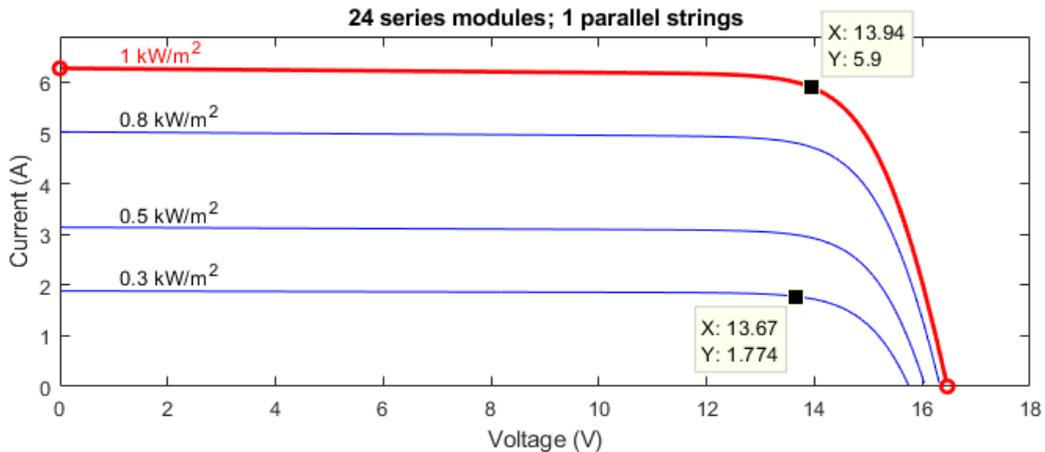


Figura 4-7. Curvas características del panel fotovoltaico. Se detallan la tensión y corriente para los puntos de máxima potencia a 1000 y 300 W/m², que son los que se van a usar en estas pruebas.

Las corrientes que se han utilizado para realizar pruebas con el nuevo controlador son 5,9 A, la del punto de máxima potencia para 1000 W/m², y 1,774 A, la del punto de máxima potencia para 300 W/m². La tensión para el punto de máxima potencia a 300 W/m² es de 13,67 V.

A continuación, se describirán las gráficas de cada uno de los puntos anteriores, en las que se detalla cómo se comporta la corriente de entrada y salida, la tensión de entrada y salida, y la potencia generada. En estos experimentos, la frecuencia del sistema es igual a la que tiene por defecto el SPV1020, unos 100 kHz, pero será reducida en experimentos posteriores a la originalmente planteada, de 25 kHz.

4.1.2.1 $I_{PV} = 5,9 A$

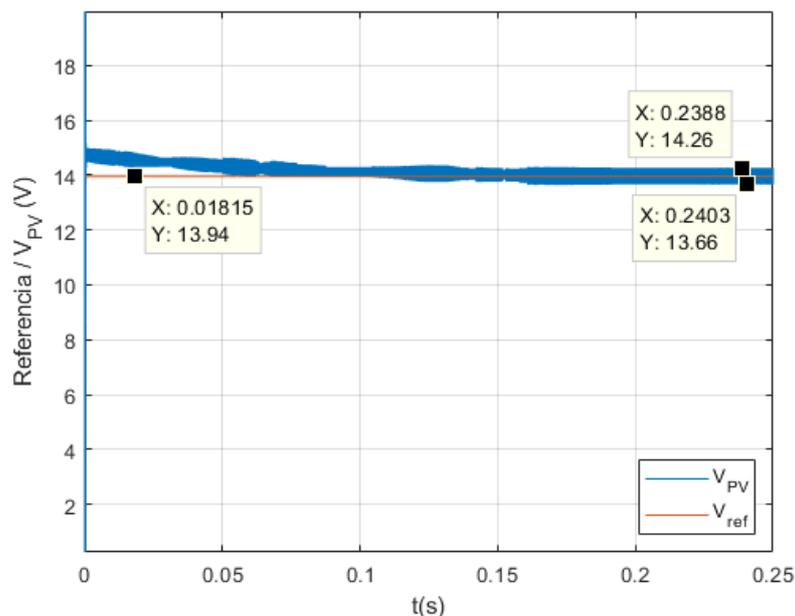


Figura 4-8. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000 W/m² y referencia fija. Tras un transitorio de un segundo, aproximadamente, se alcanza la referencia, con un rizado conformado por los dos valores de pico mostrados en la parte derecha de la gráfica.

En primer lugar, se comentará la gráfica de la tensión del panel fotovoltaico vista anteriormente representada en la figura 4-8. Para este valor de corriente de salida de 5,9 A, la tensión media coincide con la de máxima potencia. La presencia de un condensador produce un rizado en el valor de la tensión de entrada.

La tensión toma unos valores comprendidos entre 14,26 V y 13,66 V, lo que supone un valor medio de 13,96 V y un rizado de 600 mV o de un 4,29 %. Estos valores indican que el panel se encuentra trabajando en el punto de máxima potencia y el rizado se encuentra dentro del valor del 5% deseado en las especificaciones iniciales.

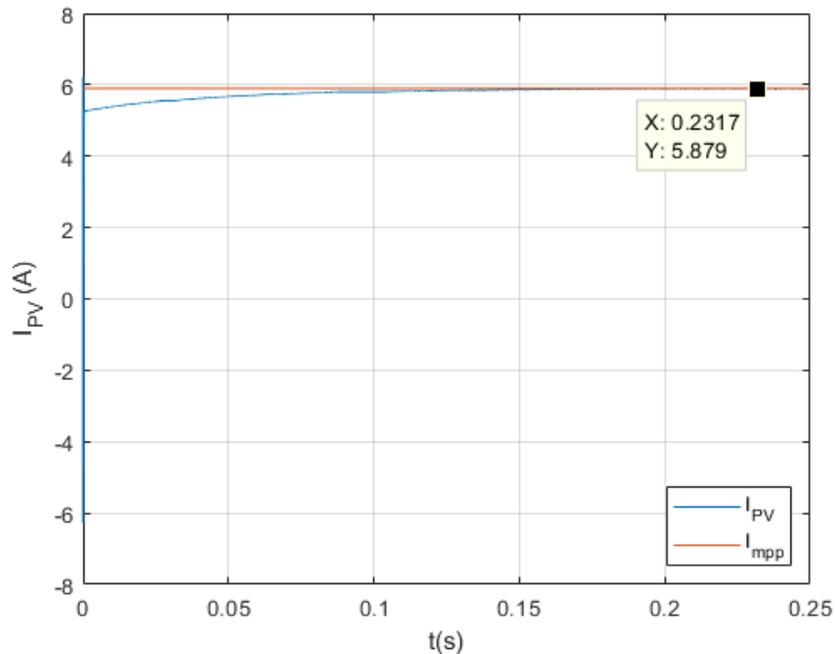


Figura 4-9. Corriente de salida del panel fotovoltaico para la prueba de 1000 W/m².

En cuanto a la corriente de entrada del panel fotovoltaico, vista también en la gráfica anterior de la figura 4-9 esta tiene un valor medio de 5,879 A en régimen permanente, algo debido a la naturaleza del controlador PI, que asegura un error en régimen permanente prácticamente nulo. Este se alcanza en más o menos 0,1 segundos.

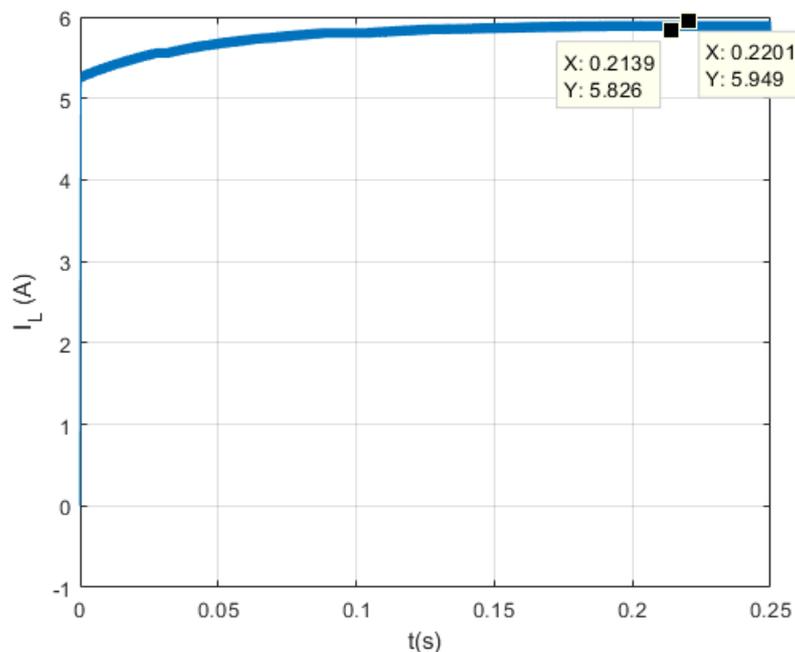


Figura 4-10. Corriente de bobina para la prueba con irradiancia de 1000 W/m². Los valores mostrados a la derecha son los utilizados para calcular el rizado, que permanece en el 2,11%, relativo a la corriente medida.

Una vez conocido el valor medio de la corriente de salida del panel fotovoltaico, se debe conocer la corriente por la bobina, que toma valores máximos en régimen permanente de 5,949 A y mínimos de 5,826 A, presentando un valor medio de 5,88 A y un rizado de 123 mA o de un 2,11 %, que no supera por mucho el valor calculado teóricamente. Todos los valores anteriores se ven en la gráfica de la figura 4-10.

El valor anterior del rizado resulta de sumarle al rizado de corriente de la bobina del convertidor las fluctuaciones que ya presentaba la corriente a la salida del panel fotovoltaico debidas al rizado de tensión del condensador colocado a la entrada. Este último rizado no influye mucho en el valor del rizado final.

A la entrada del convertidor se genera una potencia de 82,16 W, valor que prácticamente coincide con la máxima potencia que puede generar el panel fotovoltaico en condiciones óptimas de iluminación.

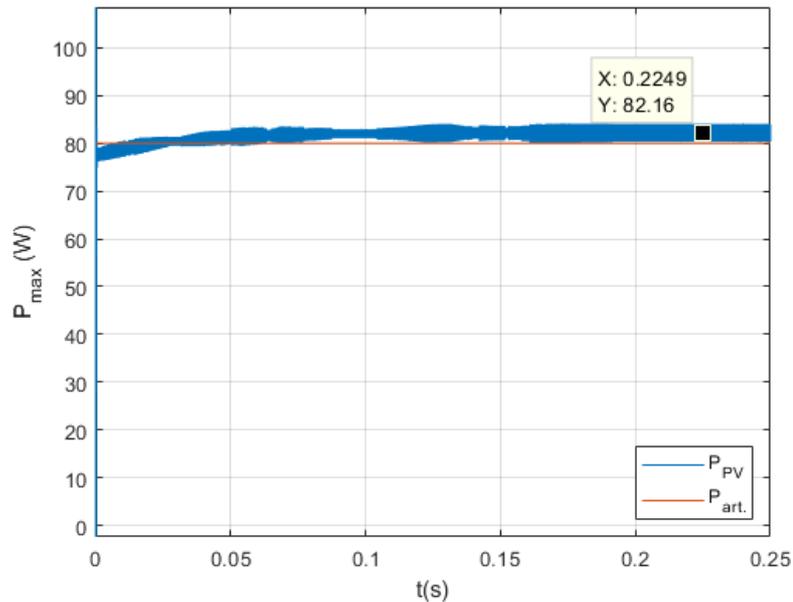


Figura 4-11. Potencia generada en el panel fotovoltaico para 5,9 A y 1000W/m². Esta potencia es ligeramente superior a 80 W, pero se ajusta al valor teórico mencionado.

La tensión a la salida del convertidor toma valores entre 35 V y 35,58 V, siendo este último la tensión fijada a la salida por la batería. Esto da un valor medio de 35,29 V y un rizado de 580 mV o de un 1,64%, lo que entra en las especificaciones. Esta tensión está marcada por el valor de la resistencia que modela la fuente real de tensión, que depende de la corriente que circule por ella.

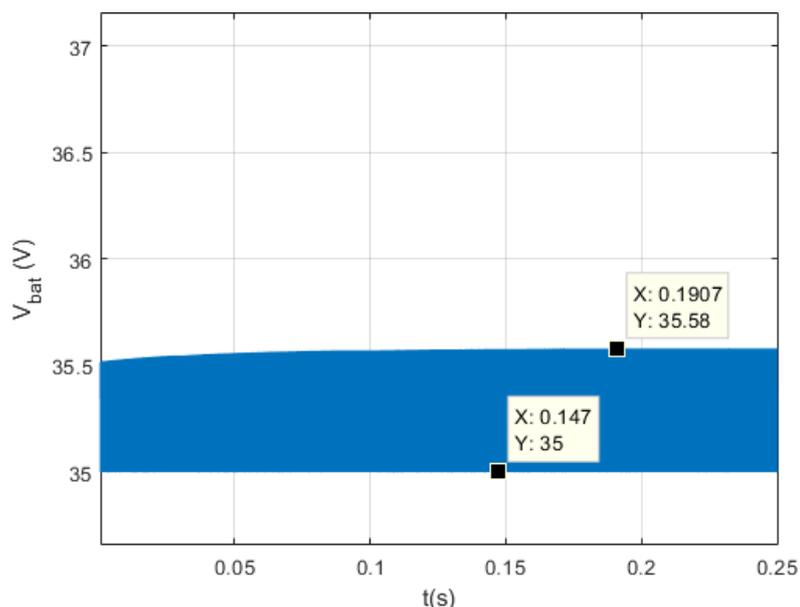


Figura 4-12. Tensión de salida del convertidor elevador para 5,9 A y 1000 W/m² de irradiancia durante las primeras pruebas. El rizado de 500 mV aprox. es pequeño si se compara con la tensión medida, de 35 V.

Finalmente, el valor medio de la corriente a la salida del convertidor se establece en un valor medio de 2,206 A. Este valor queda algo por debajo del calculado teóricamente, que era de unos 2,348 A.

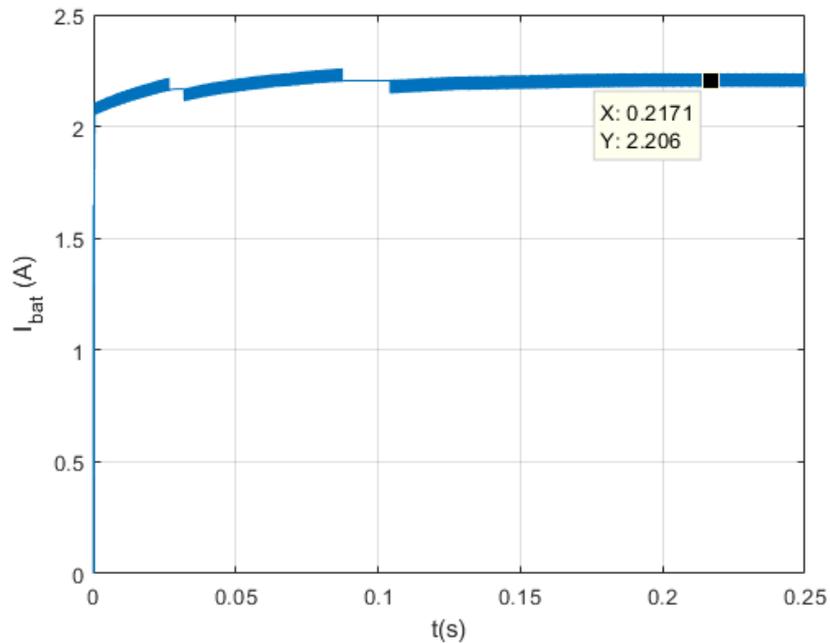


Figura 4-13. Valor medio de la corriente a la salida del convertidor boost, medida para 5,9 A de corriente de salida del panel. Esta es de 2,206 A.

4.1.2.2 $I_{PV} = 1,774$ A

La tensión de salida del panel fotovoltaico no sufre grandes variaciones ante cambios bruscos en la iluminación, al contrario que la corriente, que disminuye muchísimo en el caso de presentarse sombras en la superficie del panel. En este caso, toma valores entre 14,19 V y 13,33 V, siendo su valor medio de 13,76 V y su rizado de 860 mV o de un 6,25%. En la curva del panel, la tensión que corresponde a esta corriente de 1,774 A es de 13,67 V.

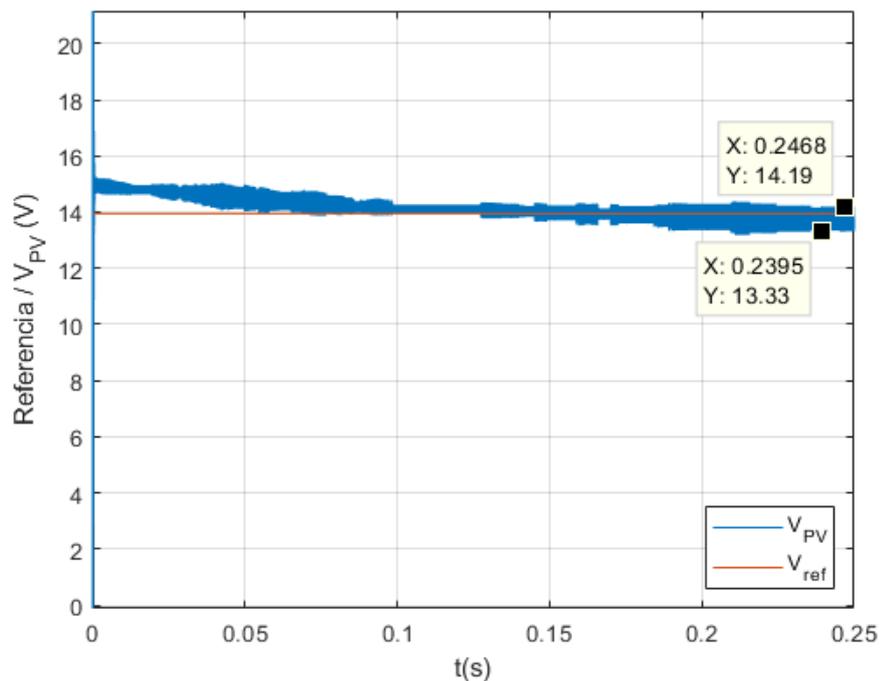


Figura 4-14. Tensión de salida del panel para 1,774 A de corriente de referencia para el panel PV. El rizado es más irregular que para 5,9 A. A pesar de lo anterior, los valores máximo y mínimo de la tensión de entrada del convertidor boost se pueden medir y son las dos etiquetas de la derecha.

La corriente a la entrada del convertidor alcanza el valor de referencia, 1,774 A en algo más de 0,15 segundos, tomando un valor en régimen permanente de 1,75 A, un valor algo menor que la referencia fijada para esta irradiancia de 300 W/m².

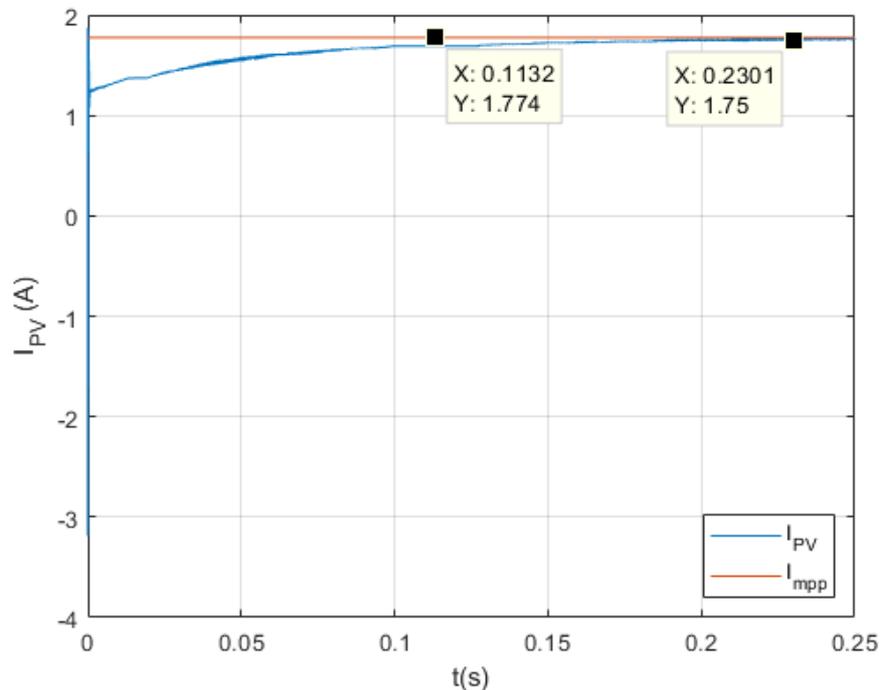


Figura 4-15. Corriente de salida del panel fotovoltaico para 300 W/m². La corriente se ajusta a la medida teóricamente con la curva de la gráfica inferior.

En la curva teórica del panel fotovoltaico esta corriente se correspondería con una tensión de 13,83 V, ligeramente mayor a la de máxima potencia en este punto de operación, incluso mayor que el valor experimental.

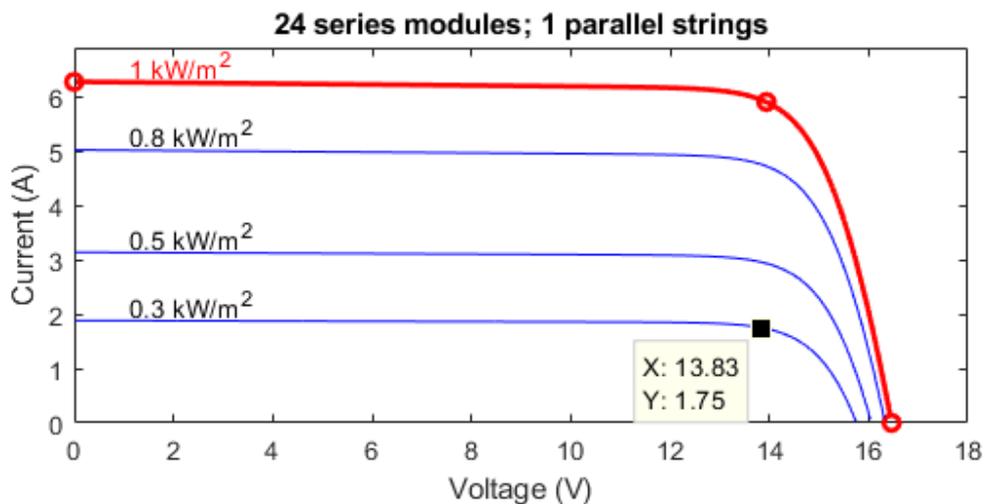


Figura 4-16. Curvas características del panel fotovoltaico. Se especifica la corriente, como valor teórico obtenido mediante estas curvas, para la irradiancia de 300 W/m². La potencia calculada, realizando el producto de los datos marcados de la gráfica, sería de 24,20 W.

Para la bobina, se acumulan dos rizados, el existente a la entrada debido a las variaciones en la tensión del panel fotovoltaico por la presencia de un condensador, y el que ya tenía la bobina. En conjunto, se observa que el valor máximo es de 1,824 A y el mínimo de 1,685, resultando en un valor medio de 1,754 A y un rizado de 139 mA o de un 7,92 %. El circuito está claramente diseñado para un valor de corriente de 5,9 A, por eso el rizado relativo es mayor.

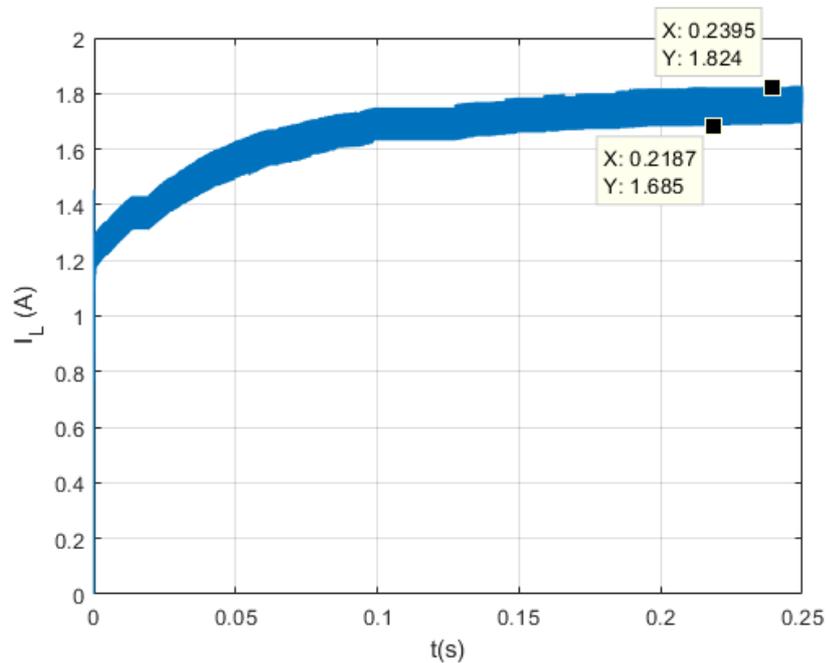


Figura 4-17. Valores máximo y mínimo de la corriente en la bobina en el régimen permanente, para una irradiancia de 300 W/m².

La potencia generada es menor, como se esperaba. Para este nivel de irradiancia de 300 W/m², se genera una potencia de 24,18 W. La potencia generada según las curvas teóricas de potencia es de 24,25 W.

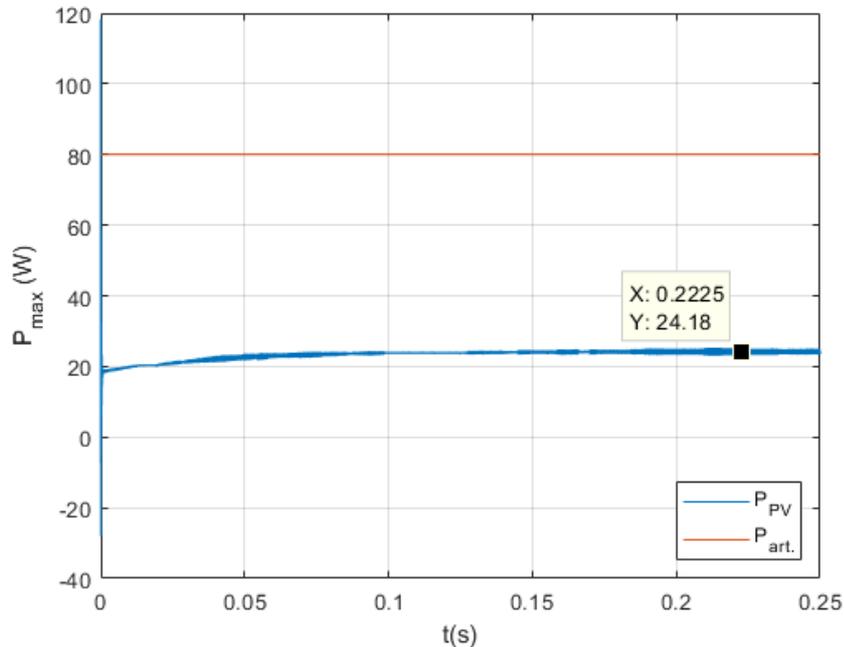


Figura 4-18. Potencia generada a 300 W/m². Su valor experimental, de 24,18 W, se ajusta perfectamente al valor teórico calculado con los datos de la figura 4-16

La tensión de salida se mantiene igual, pero el rizado es menor, debido a que por la batería circula menos corriente. El valor máximo pasa a ser de 35,17 V y el rizado a la salida es de 170 mV, menor que para 1000 W/m². El valor medio es de 35,085 V.

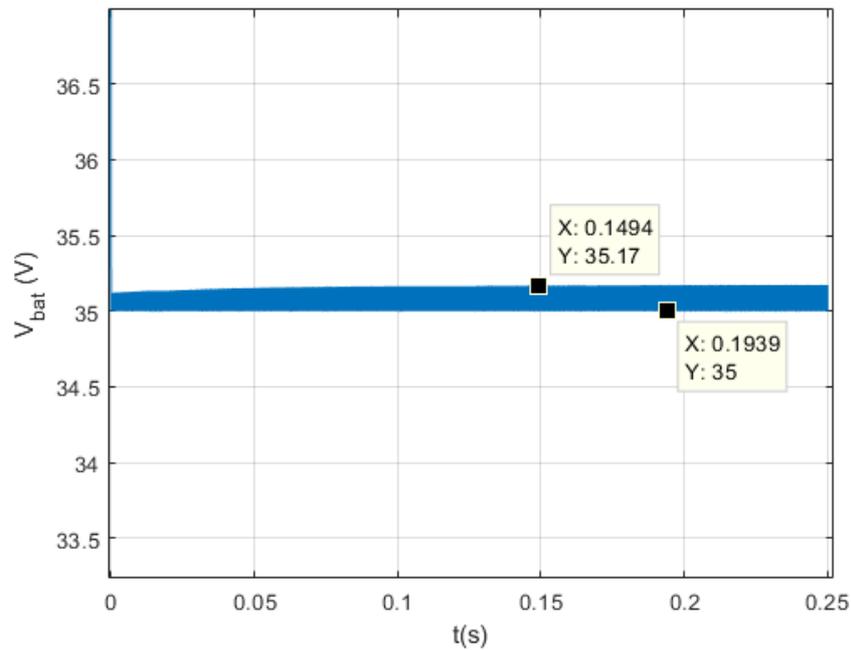


Figura 4-19. El valor medio de la tensión de salida permanece igual a 300 W/m^2 , en los 35 V de referencia, con un rizado menor que se debe a que la corriente, en este caso, es menor que la vista para el caso anterior.

A la salida del convertidor, la corriente calculada teóricamente se hallaría a partir del *duty cycle* correspondiente, hallado a partir de las tensiones vistas anteriormente, 13,944 V y 35,085 V. Este D es de 0,603, mientras que la corriente de entrada es de 1,774 A, calculándose la de salida de la siguiente forma:

$$I_o = 1,774 \text{ A} \cdot (1 - 0,603) = 0,704 \text{ A}$$

Tras calcular el valor teórico de 0,704 A, se observa que, experimentalmente, la corriente toma un valor de 0,667 A.

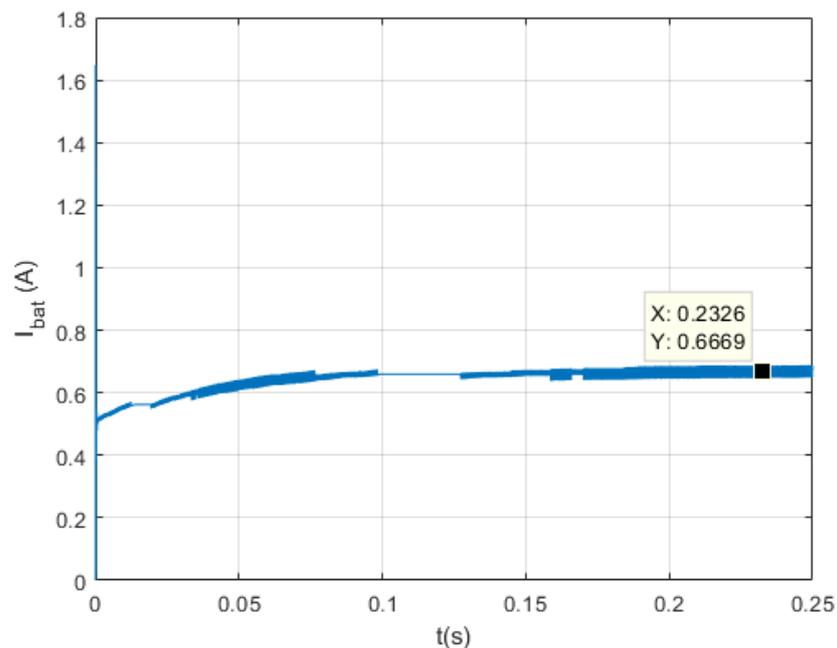


Figura 4-20. Valor de régimen permanente de la corriente medida a la salida del elevador para 300 W/m^2 .

4.2 Prueba del convertidor *flyback* para tensión de entrada fijada a 35 V

Con el fin de probar el convertidor *flyback* diseñado, se ha realizado una prueba, que ha dado los siguientes resultados tras una simulación de 0,25 segundos.

La corriente a la salida es de, aproximadamente, 0,8 A y la tensión a la salida es de unos 100 V, valores similares a los teóricos, aunque estos han sufrido variaciones por la presencia de pérdidas en los elementos semiconductores, donde se ha tomado $0,1 \Omega$ como valor de resistencia, con el fin de representar las pérdidas. El transformador se considera ideal. En la entrada se ha impuesto un valor de 35 V.

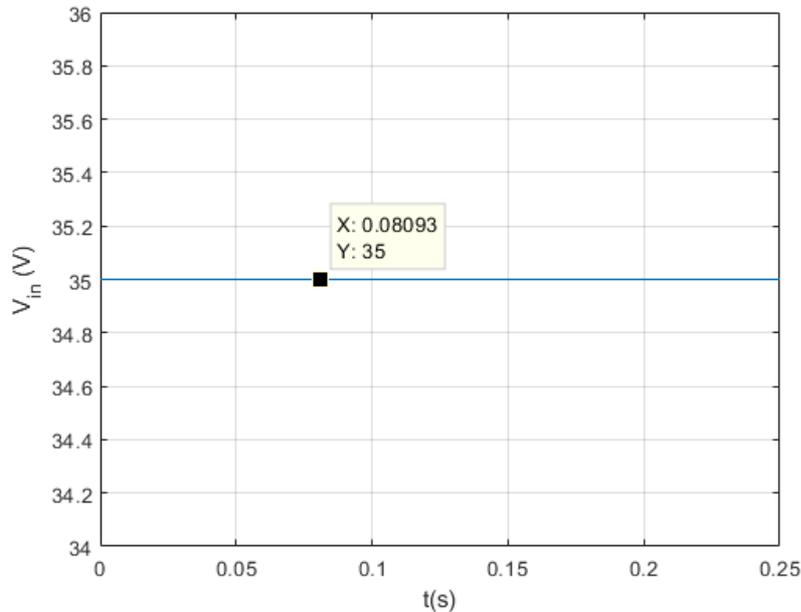


Figura 4-21. Tensión a la entrada del convertidor *flyback*. Esta prueba se ha hecho para una tensión fija y un *duty cycle* de 0,5.

La corriente a la entrada va variando según el estado del conmutador. Si está cerrado, toma el valor de I_L , mientras que si está abierto no circula corriente. El valor de la corriente por la bobina será mostrado con detalle más adelante.

La corriente de entrada toma un valor medio de 2,292 A, inferior al calculado por causa de las pérdidas anteriormente descritas.

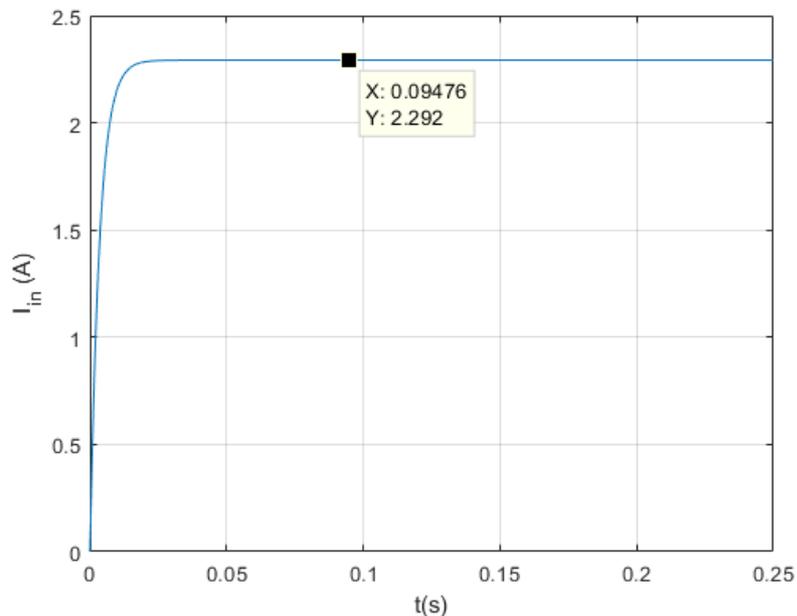


Figura 4-22. Corriente media de entrada en el convertidor *flyback* para tensión fija de entrada y *duty cycle* 0,5.

El valor de I_L es de entre 4,605 A de máximo y 4,561 A de mínimo, lo que supone un valor medio de 4,583 A y un rizado de 44 mA o de un 0,960 %. Estos valores son ligeramente inferiores a los calculados teóricamente, que eran de 4,623 A y 4,577 A de máximo y mínimo, como se ve en la próxima gráfica. Las especificaciones de rizado de corriente se cumplen.

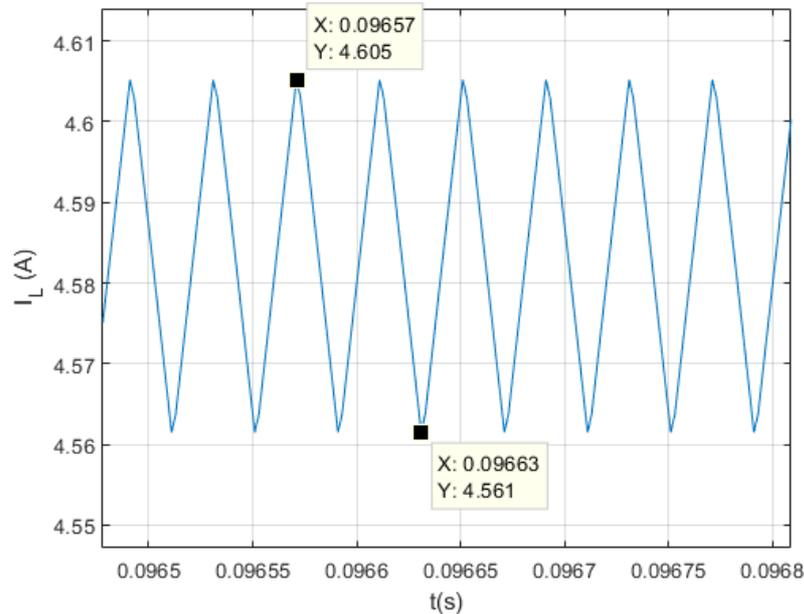


Figura 4-23. Rizado de la corriente de la bobina de magnetización para un *duty cycle* de 0,5 y 82,27 W de potencia. Este rizado realmente se mediría en la entrada del *flyback*, por lo que estos datos serían ficticios.

La potencia instantánea es bastante mayor que la vista para el convertidor elevador. Sin embargo, esta potencia no será tenida en cuenta para futuros cálculos, ya que la que de verdad interesa es la media. Esta potencia varía entre 161,2 W de máximo y 159,7 W de mínimo, mientras que teóricamente se calculó una potencia de 161,805 W de máximo y 160,195 W de mínimo.

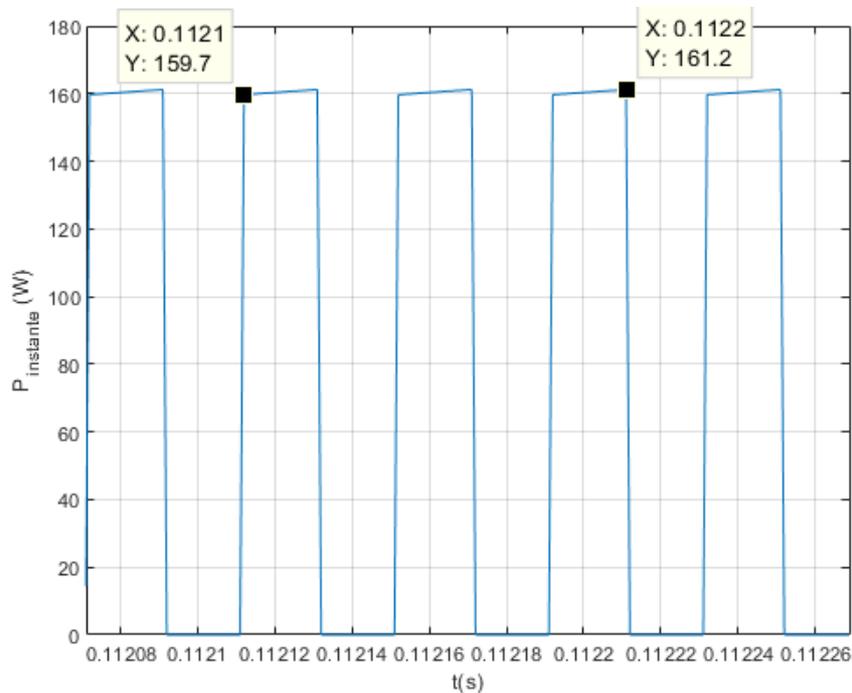


Figura 4-24. Potencia instantánea medida a la entrada del convertidor *flyback* para *duty cycle* de 0,5 y potencia de 82,27 W a la salida.

El valor medio de la potencia a la entrada es de 80,22 W, similar a los 82,27 W calculados para el panel fotovoltaico y que, si ambos convertidores fueran ideales, llegaría sin pérdidas a la salida.

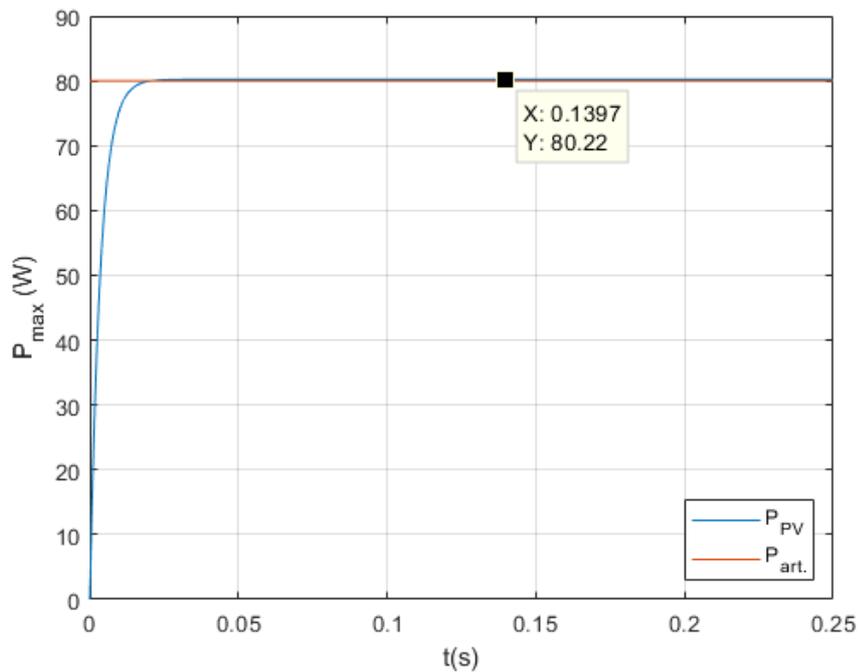


Figura 4-25. Potencia media de entrada, calculada a partir de la tensión y corriente que entran en el convertidor *flyback*, para la prueba con duty cycle de 0,5.

En cuanto a la salida, tenemos una intensidad de 0,786 A de valor medio, que se acerca, aunque por debajo, a los 0,805 A calculados teóricamente.

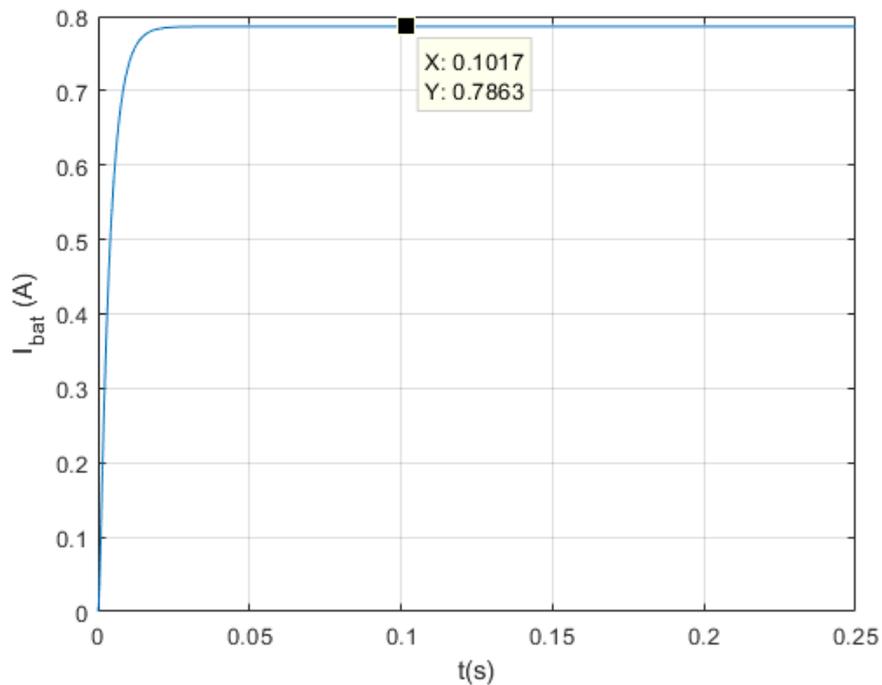


Figura 4-26. Corriente medida a la salida del convertidor *flyback*, filtrada, para 0,5 de duty cycle y 82,27 W de potencia.

La tensión toma valores entre 97,4 V y 102,2 V, con valor medio de 99,8 V y un rizado de 4,8 V o de un 4,81%. En este caso se cumplen las especificaciones de rizado de tensión, pero el valor medio, debido a las pérdidas en elementos semiconductores, es inferior al teórico.

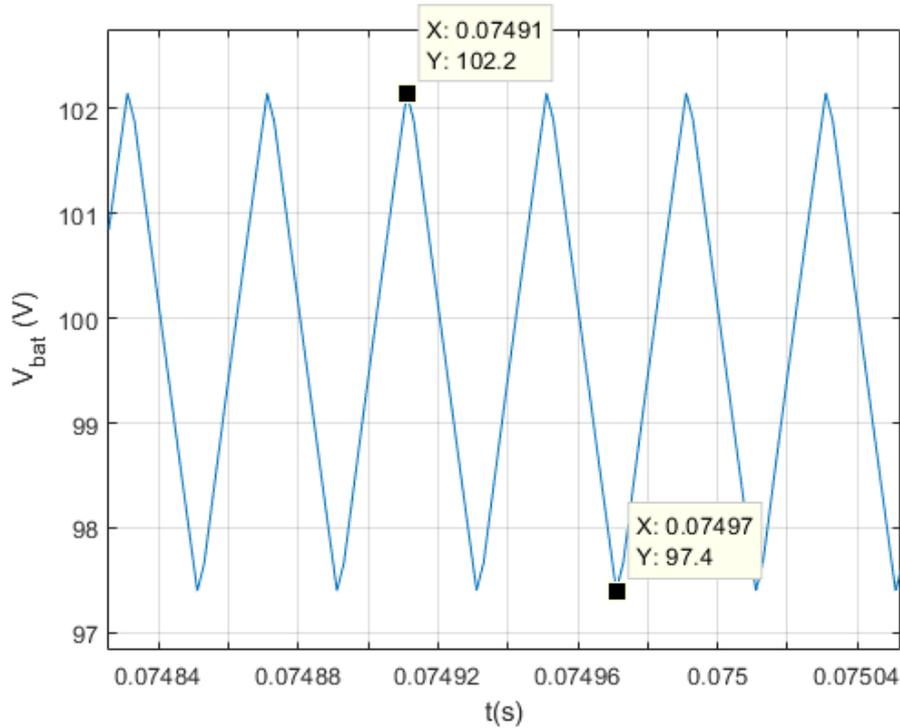


Figura 4-27. Detalle de la tensión medida a la salida del *flyback*, con rizado de tensión debido a la presencia de un condensador a la salida. Prueba realizada a 82,27 W de potencia y *duty cycle* de 0,5.

En la siguiente gráfica, se observa que la corriente en el diodo del convertidor toma valores ligeramente superiores a los calculados también. El valor máximo y mínimo es de 1,580 A y 1,565 A, que se comparan con los 1,618 A y 1,602 A calculados.

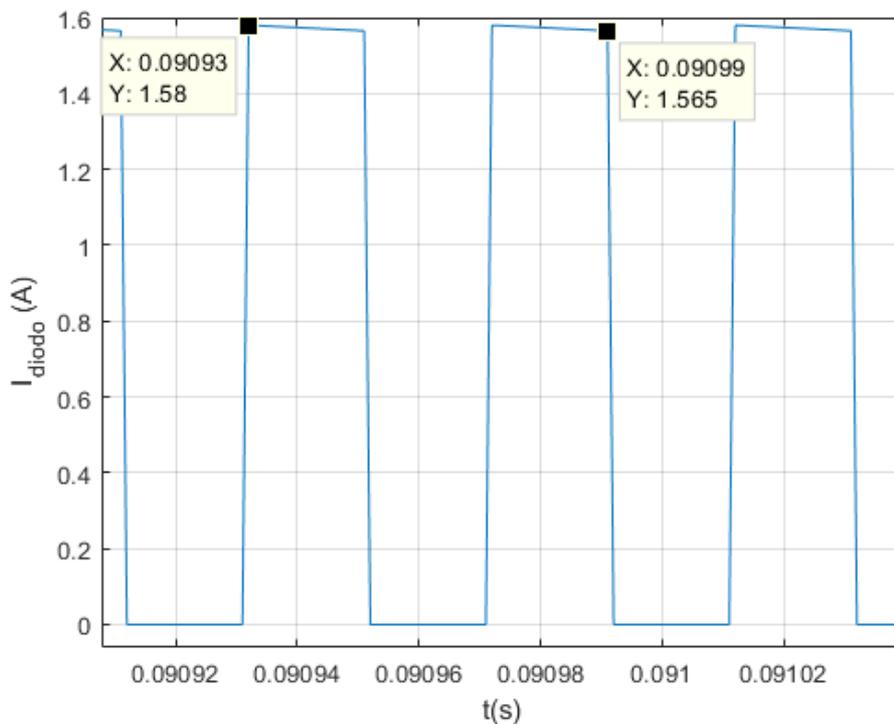


Figura 4-28. Corriente que soporta el diodo del convertidor *flyback* para 1000 W/m².

Finalmente, para comprobar si se cumple la tensión del IGBT especificada, se ha obtenido la siguiente gráfica, donde hay una tensión comprendida entre 68,76 V y 70,35 V mientras este esté en corte, que se comparan con los 69,192 V de mínimo y los 70,945 V de máximo obtenidos teóricamente en el apartado anterior, donde se diseñaron los convertidores en base a unas especificaciones previas.

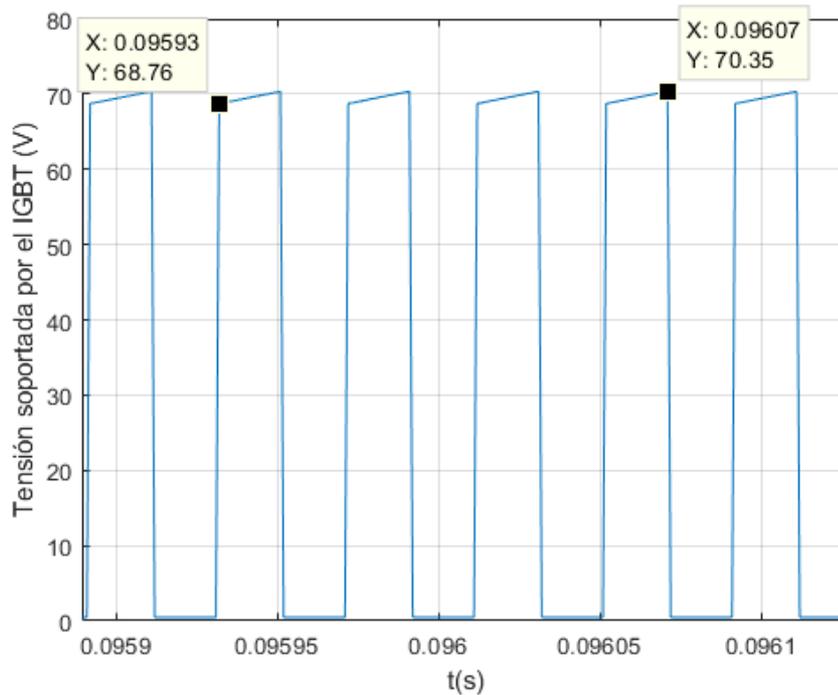


Figura 4-29. Tensión que soporta el IGBT del convertidor flyback para 1000 W/m².

4.3 Conclusiones

Para finalizar, con los datos obtenidos en este apartado se comprueba que el sistema diseñado en el apartado anterior, donde este era descrito y diseñado, cumple o supera por muy poco, como en el caso de la corriente que circula por la bobina de entrada del convertidor elevador, las especificaciones iniciales cuando se fija una referencia de corriente equivalente a las que habría con una irradiancia de 1000 W/m², que es una de las condiciones estándar tomadas para el diseño de un panel fotovoltaico. También se observa que dichas especificaciones se dejan de cumplir cuando el punto de operación se aleja de las condiciones estándar de iluminación, como se vio en el segundo apartado de las pruebas de referencia fija de corriente para el convertidor elevador.

Una vez conocido el sistema de control de los convertidores y el comportamiento en condiciones ideales, se va a pasar a probar el sistema en una serie de experimentos en los que se expone el conjunto de paneles a una iluminación uniforme. Por otro lado, la frecuencia de conmutación del sistema para las pruebas realizadas en el siguiente apartado será de 25 kHz.

5 SIMULACIONES DEL SISTEMA

Una vez se han diseñado los convertidores y sus respectivos controladores, y se han descrito las técnicas empleadas para diseñar un sistema que tiene el propósito de trasladar la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico, llega el momento de comprobar si las especificaciones para las que fue diseñado el sistema se cumplen y de las limitaciones que este pueda tener.

Las simulaciones representan el comportamiento que tendría un sistema de este tipo para condiciones de iluminación uniforme, sin sombras ni otras perturbaciones que puedan afectarle, y por esto se realizarán para un amplio espectro de irradiancias comprendido entre 300 y 1000 W/m², representado por sus extremos y dos puntos de operación intermedios.

5.1 Condiciones de las pruebas del sistema paneles-convertidores-batería

Hasta el momento, ambos convertidores han sido simulados por separado y para valores específicos y constantes en la entrada o en la salida, por lo que se estudiará el comportamiento en un entorno más o menos real en las siguientes pruebas, donde las simulaciones tendrán una mayor similitud con la realidad. Todas las pruebas se realizarán a una temperatura constante, fijada en 25 °C, y con una iluminación uniforme para cada panel.

Las pruebas con iluminación uniforme se realizarán para una irradiancia de 300, 500, 800 y 1000 W/m², de forma que todos los paneles reciban la misma cantidad de luz por unidad de área. La tensión de los paneles tomará un valor entre la tensión de circuito abierto y el voltaje de máxima potencia, que puede oscilar 0,2 V alrededor del punto de máxima potencia, pudiendo tomar algún valor inferior durante el régimen transitorio.

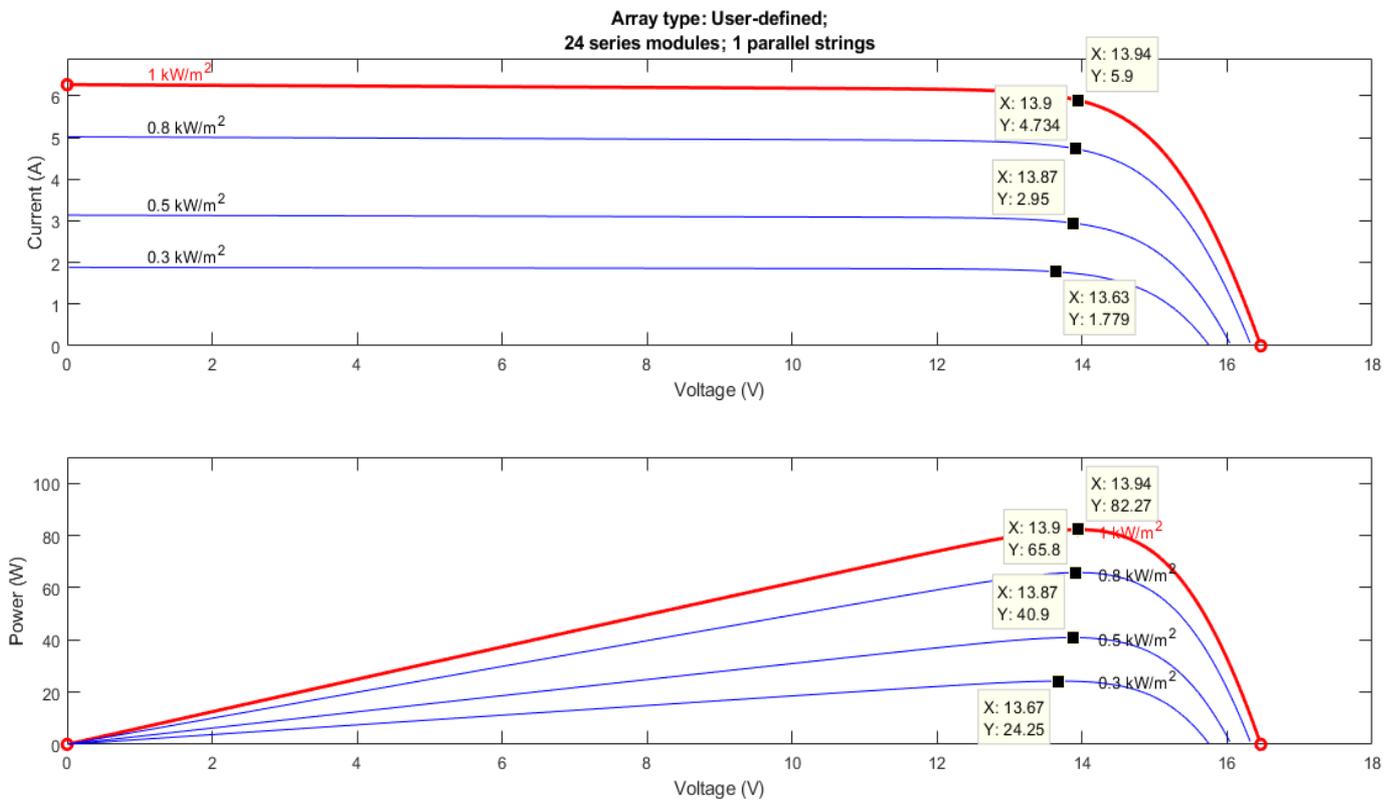


Figura 5-1. Curvas características de los paneles fotovoltaicos. En la gráfica superior se especifican la tensión y corriente de los puntos de máxima potencia para las irradiancias entre 300 y 1000 W/m². La gráfica inferior muestra la potencia generada para las irradiancias comprendidas entre 300 y 1000 W/m².

En las sucesivas pruebas del sistema de este proyecto, el objetivo es, para la carga a corriente constante, cargar la batería a la máxima potencia que puede generar un panel fotovoltaico para cualquier nivel de iluminación.

El sistema está diseñado para unas especificaciones dadas suponiendo una irradiancia de 1000 W/m^2 , pero se va a estudiar su comportamiento a niveles inferiores a 1000 W/m^2 con el fin de prever cómo sería su comportamiento en condiciones de iluminación menos ideales.

A 1000 W/m^2 la potencia máxima es de $82,27 \text{ W}$, que se alcanza a los $13,94 \text{ V}$ y la corriente de salida del panel para esta irradiancia es de $5,9 \text{ A}$, valores que coinciden con las especificaciones anteriormente mostradas.

Para 300 W/m^2 se genera una potencia de hasta $24,25 \text{ W}$, que se alcanzan a los $13,67 \text{ V}$ de tensión, siendo la corriente de salida del panel de $1,779 \text{ A}$. Para 500 W/m^2 la máxima potencia generada es de $40,9 \text{ W}$ a una tensión de $13,87 \text{ V}$, siendo la corriente de salida de $2,95 \text{ A}$. Finalmente, para 800 W/m^2 se generan hasta $65,8 \text{ W}$ de potencia, a una tensión de $13,9 \text{ V}$ y con $4,734 \text{ A}$ de corriente.

En primer lugar, se estudiará el comportamiento de la carga a corriente constante y a tensión constante de la batería en un cuarto de ciclo de carga, tomando como ciclo la carga y descarga completa de la batería. Se tomará como punto de partida un estado de carga del 50%, llegando a un valor cercano al 100%. La capacidad de la batería, por razones de recursos, será de $0,225 \text{ mAh}$.

En segundo lugar, al ser un segundo un tiempo de simulación muy corto para estudiar el comportamiento de una batería mientras esta carga a tensión constante, pues por lo general la carga a tensión constante representa una mínima parte del tiempo de simulación, se va a realizar una segunda prueba únicamente a tensión constante, para comprobar la estabilidad de los controladores programados. Estas pruebas se realizarán para cada una de las irradiancias mostradas en las curvas características de los paneles y para una capacidad de 225 mAh .

Estas capacidades de batería tan pequeñas sirven únicamente para la simulación de este sistema, pues en la realidad se emplearía una combinación de celdas en serie y paralelo que asegure una capacidad suficiente para poder asegurar una autonomía de varias centenas de kilómetros, en caso de un vehículo 100% eléctrico, o decenas, en caso de un vehículo híbrido.

En todas las pruebas interesa conocer ciertas tensiones y corrientes, que serán las tensiones de salida del panel, salida del convertidor elevador, salida del convertidor flyback, la corriente de salida del panel fotovoltaico, la corriente de salida del convertidor elevador, la corriente de entrada del convertidor flyback, la corriente de salida del convertidor flyback y la suma de todas las corrientes que entran en la batería. Aparte de lo anterior, se medirá la potencia instantánea en la entrada del convertidor elevador y en la salida del convertidor flyback. El total de la potencia generada por los dos paneles que hay en la simulación, es la suma de las potencias existentes a la salida.

Además, se mostrarán los diagramas de estados, así como otros datos de interés, como el estado de carga, o el duty cycle instantáneo. El tiempo de muestreo de los datos es de 100 ns y el tiempo de muestreo de los controladores de $10 \mu\text{s}$.

5.2 Pruebas de carga de la batería CC-CV

En estas primeras simulaciones se observa la evolución de la carga de la batería en simulaciones de un segundo de duración, partiendo de un estado de carga del 50% y a irradiancias de 1000 , 800 , 500 y 300 W/m^2 .

Durante las pruebas, los estados de funcionamiento del sistema, que se van a monitorizar, son la precarga del condensador, la fase de arranque del convertidor elevador, la carga a tensión constante y la carga a corriente constante.

5.2.1 Irradiancia de 1000 W/m^2

Para una irradiancia de 1000 W/m^2 , la potencia generada alcanzará su máximo valor, que no será igual al que se calculó de forma teórica porque se tendrán en cuenta algunas pérdidas en los elementos semiconductores.

En el caso de que la radiación incidente sea de 1000 W/m^2 , los estados pasan por una fase de arranque que dura $0,1 \text{ s}$ y que incluye la precarga del condensador en un estado de parada durante un período de tiempo muy corto. La carga a corriente constante dura hasta llegar a unos $0,5 \text{ s}$ y la batería está completamente cargada a los $0,6 \text{ s}$.

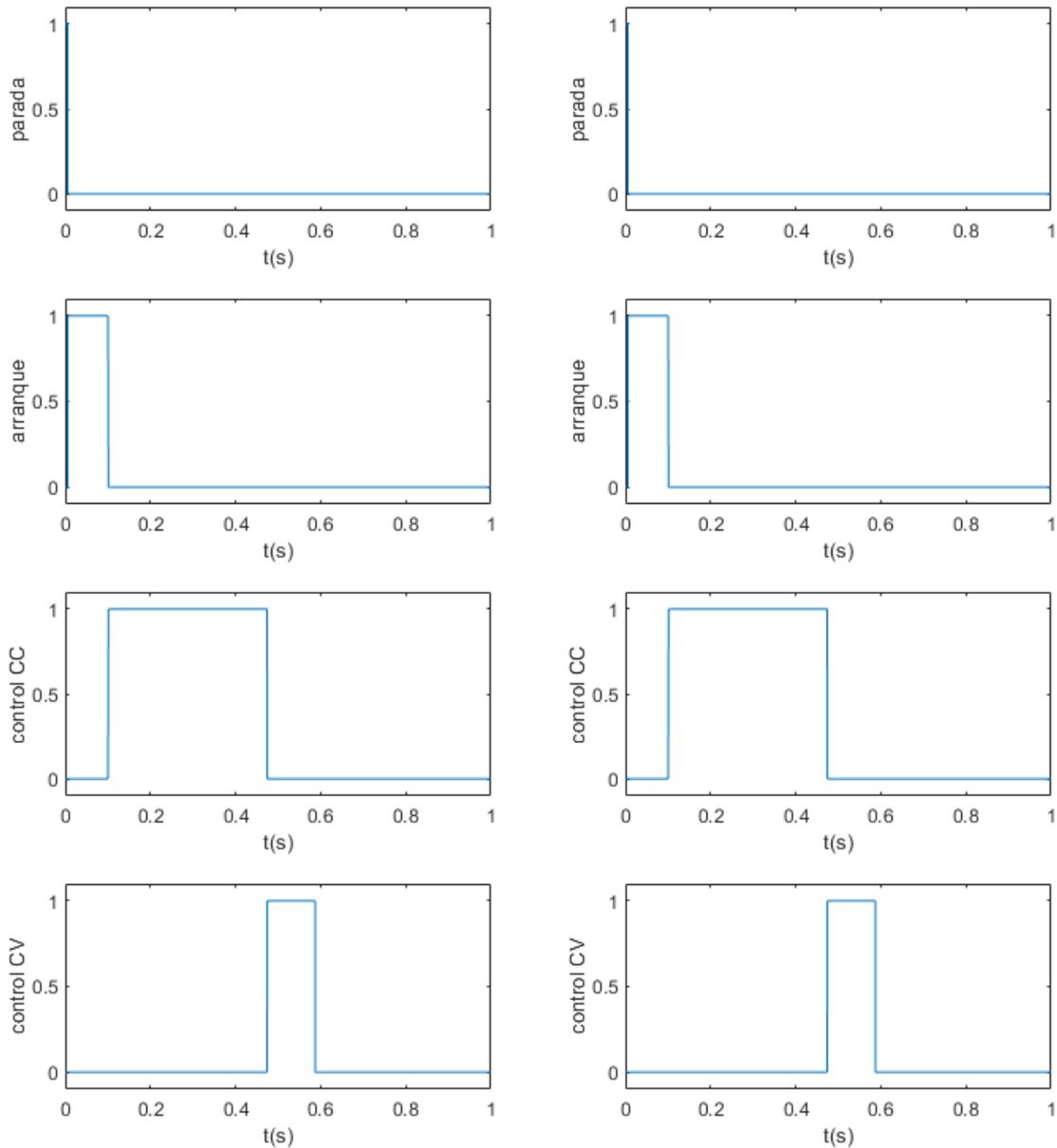


Figura 5-2. Estados de funcionamiento del sistema del proyecto en el primer experimento, con 1000 W/m^2 de irradiancia. Ambas gráficas corresponden a los estados de funcionamiento de cada uno de los paneles. En general, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento todo el sistema, que se para una vez se ha llenado la batería en torno a 0,6 s de simulación.

Como se ve en la gráfica anterior, los estados de operación vistos en la simulación coinciden con los de la máquina de estados propuesta en el diseño del sistema de carga y, como es de esperar en experimentos de solo carga, el paso de un estado a otro se produce de forma secuencial.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador. La tensión de entrada, una vez ha terminado la fase de arranque, se establece, para la carga a corriente constante, en torno a los 14 V, permaneciendo la tensión de salida en 35 V, cuya referencia se entrega al convertidor elevador durante el arranque.

En la carga a tensión constante, la tensión en la entrada del panel fotovoltaico deja de estar controlada por el algoritmo MPPT, que se desactiva una vez el sistema alcanza este modo de carga. La tensión a la entrada del panel fotovoltaico toma un valor marcado por el *duty cycle* del convertidor elevador mientras se controla la tensión a la salida de este.

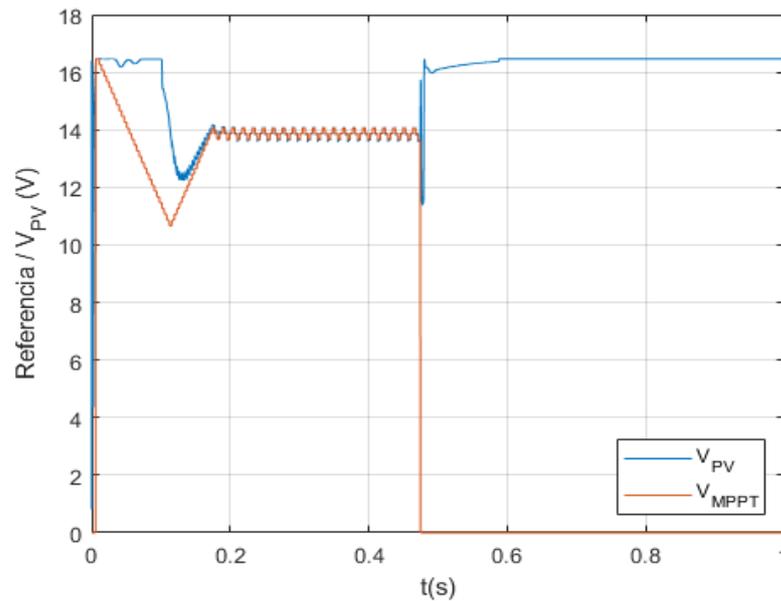


Figura 5-3. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1s y 0,2s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,2 s aprox. Desde 0,5s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva.

La tensión a la salida del convertidor elevador siempre está controlada por alguno de los controladores de los convertidores de potencia que unen el panel fotovoltaico con el nodo de salida, el que está conectado a un filtro LC de corriente y, este filtro, a la batería. Durante el arranque, una vez se supera una tensión umbral de 22,84 V a la salida del elevador, un controlador PI lleva esta tensión a 35 V, sin entrar en funcionamiento el flyback.

Para el control a corriente constante, la tensión de salida sigue una referencia de 35 V dada al controlador del convertidor flyback, que fija la referencia de corriente a la salida del flyback para la carga a corriente constante.

Cuando el control pasa a tensión constante, el controlador del convertidor elevador pasa a fijar la tensión a la salida de este, con una referencia de 35 V, que intenta seguir pero que se queda en más de los 35 V dados como referencia por la escasa duración de la carga a tensión constante, por causa de la capacidad escasa de la batería hipotética que permite ver un cuarto de ciclo de carga en un segundo de simulación o menos.

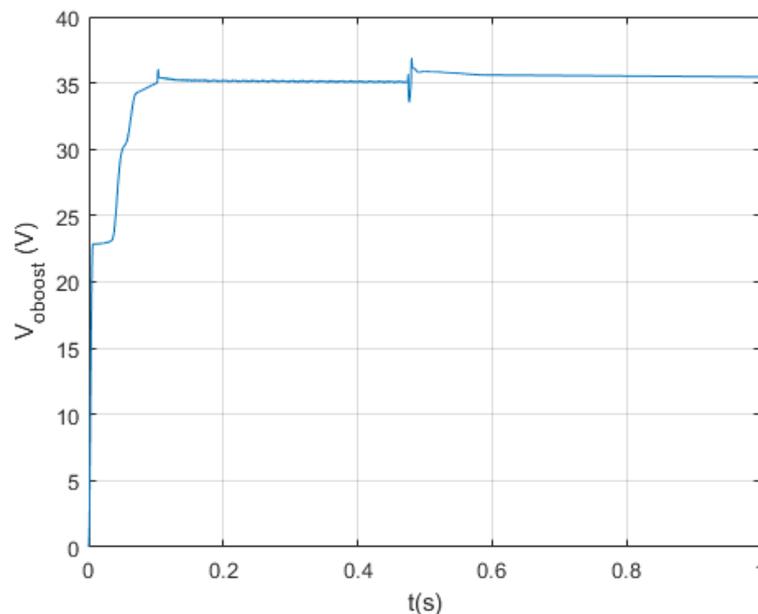


Figura 5-4. Tensión a la salida del convertidor elevador para 1000W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 0,5 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante.

Ambos controladores, al ser proporcionales e integrales (PI) aseguran un error en régimen permanente nulo, como así pone de manifiesto la siguiente gráfica de errores. El primer controlador PI acerca la tensión del convertidor elevador a 35 V, que es el nivel de tensión que deberá mantener en el régimen permanente sea cual sea su estado (arranque, carga a corriente constante o carga a tensión constante).

Esto se cumple, por lo que se puede observar en este experimento, en el estado de carga de la batería a corriente constante, donde si el error se aleja de cero es por los transitorios cada vez que sube o baja la referencia de tensión dada por el MPPT, y se verá más adelante en la carga a tensión constante durante los experimentos de carga a alto porcentaje de batería.

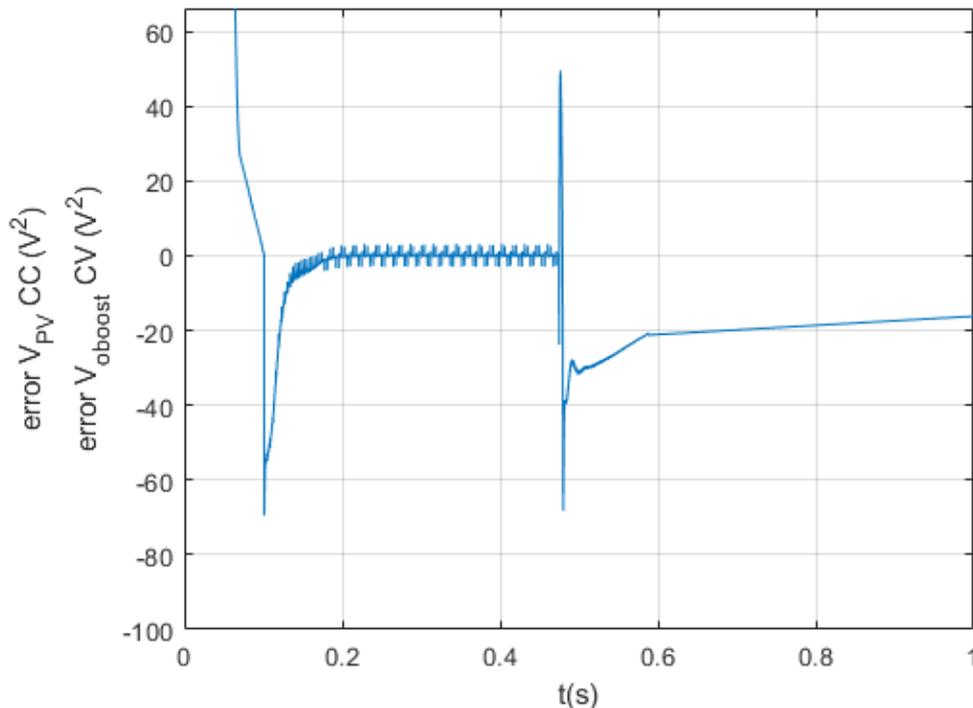


Figura 5-5. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador. A partir de 0,1s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,2s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están barajando.

La tensión de salida del panel fotovoltaico, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor elevador, al considerar ideales los diodos de bloqueo, presenta, durante el modo de carga de la batería a corriente constante, una serie de oscilaciones debidas al algoritmo MPPT. Las oscilaciones vienen dadas por las variaciones en la referencia de tensión de máxima potencia, que tiene un valor que no es constante una vez alcanzado el valor de tensión de máxima potencia.

Los niveles de tensión medidos tienen de máximo 14,08 V y de mínimo 13,63 V, con una variación de 0,4 V entre el valor máximo y mínimo de la tensión de referencia. Respecto a las variaciones de la tensión debidas al ruido y al rizado en la entrada, en todos los niveles de tensión, máximo y mínimo del régimen permanente, son muy similares independientemente de los incrementos o decrementos existentes al deberse al condensador situado en paralelo al panel fotovoltaico.

El valor medio de la tensión de salida del panel es de 13,85 V, con un incremento total de 450 mV. Si se tiene en cuenta las variaciones de la tensión una vez se alcanza el valor de referencia dado, el rizado es bastante menor, de 0,04 V. El rizado relativo para este último valor es inferior al 1%, mientras que si se tiene en cuenta el total de las variaciones pasa a ser del 3,25%, tomando en cuenta el valor medio de tensión calculado anteriormente.

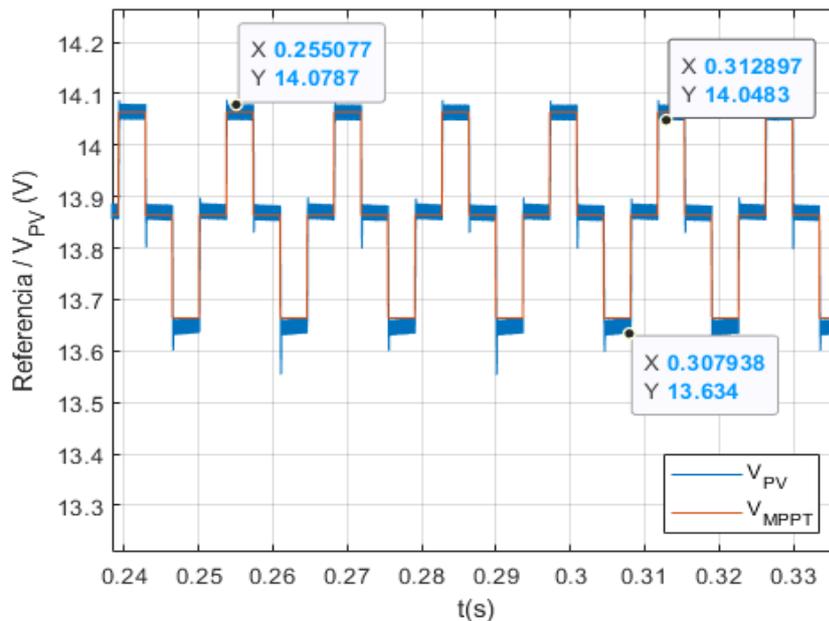


Figura 5-6. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 1000W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

La siguiente gráfica muestra cómo la corriente de la bobina del convertidor elevador, que es la misma que la que entra en el convertidor elevador, toma valores cercanos a los 5,9 A especificados para la corriente de salida del panel fotovoltaico durante el régimen permanente del modo de carga a corriente constante de la batería.

Previamente, durante el arranque, la corriente es cero durante casi todo el tiempo, excepto en algunos instantes, principalmente cuando la tensión a la salida del convertidor elevador iba subiendo a los 35 V por primera vez tras la precarga del condensador al inicio del experimento.

Durante el transitorio del control a corriente constante, la corriente en la bobina supera los 6 A levemente, mientras que, en el modo de control a tensión constante, va disminuyendo progresivamente después de un transitorio en el que cae bruscamente de 6 A hasta los 2,1 A. Cuando la corriente llega a un valor situado en aproximadamente 0,5 A, la carga de la batería se corta, tras haber alcanzado el punto de máxima carga.

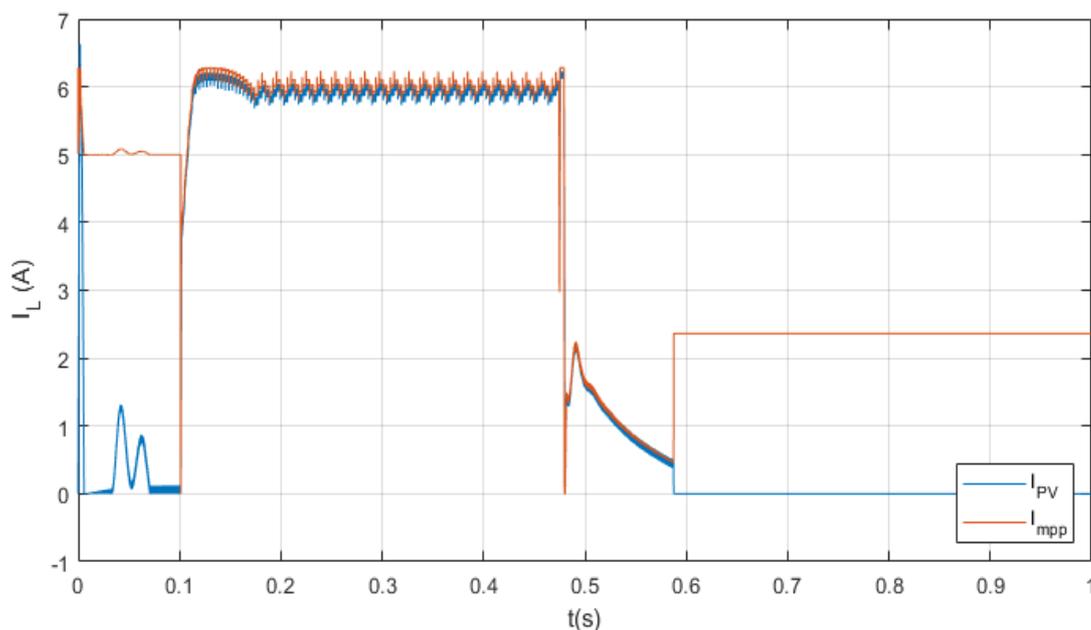


Figura 5-7. Corriente de la bobina del convertidor boost a 1000W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente solo se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a corriente constante, la corriente alcanza los 6 A por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,6 s la carga de la batería se corta.

Si se observa con detalle la corriente durante la carga de la batería a corriente constante, el valor máximo es de 6,049 A y el mínimo de 5,77 A. Aunque la bobina esté diseñada para un cierto valor de rizado de 118 mA, el rizado total, una vez se tiene en cuenta las variaciones introducidas por el algoritmo MPPT, este es de 279 mA, más del doble que el rizado de diseño, lo que en valores relativos supone un 4,7 % de la corriente que atraviesa la bobina. La corriente de la bobina es de 5,9 A en este estado.

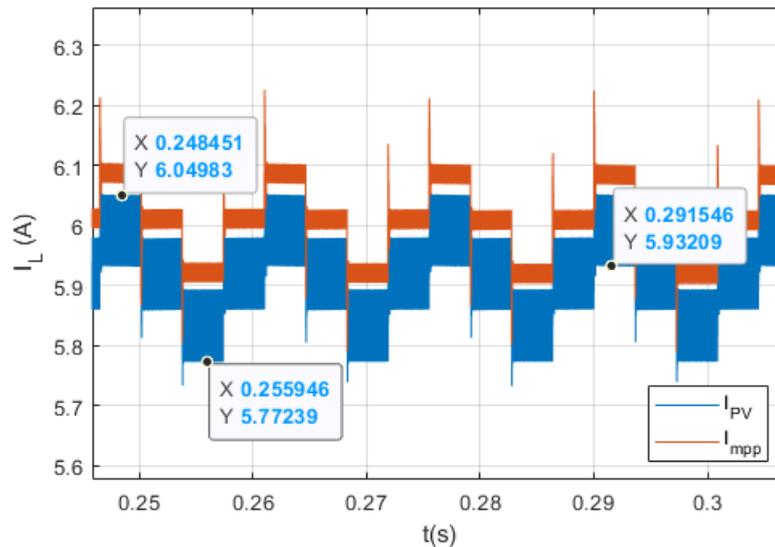


Figura 5-8. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 800W/m² y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

El error en régimen permanente de los modos de control donde interviene un PI como controlador de lazo abierto, para fijar la corriente de la bobina una vez se le entrega una referencia de corriente calculada como la potencia de referencia fijada por los controladores PI de tensión, sea esta la de entrada o salida del convertidor, es cero. Esto se cumple tanto para el modo de carga a tensión constante como para el modo de carga a corriente constante.

El único punto donde el error no es nulo es en los transitorios. En la gráfica de los errores se puede observar también que, durante los modos de parada, arranque y parada por carga completa de la batería, el error no se tiene en cuenta, pues la corriente de la bobina es cero en esos estados del sistema y la referencia no la fija ningún controlador.

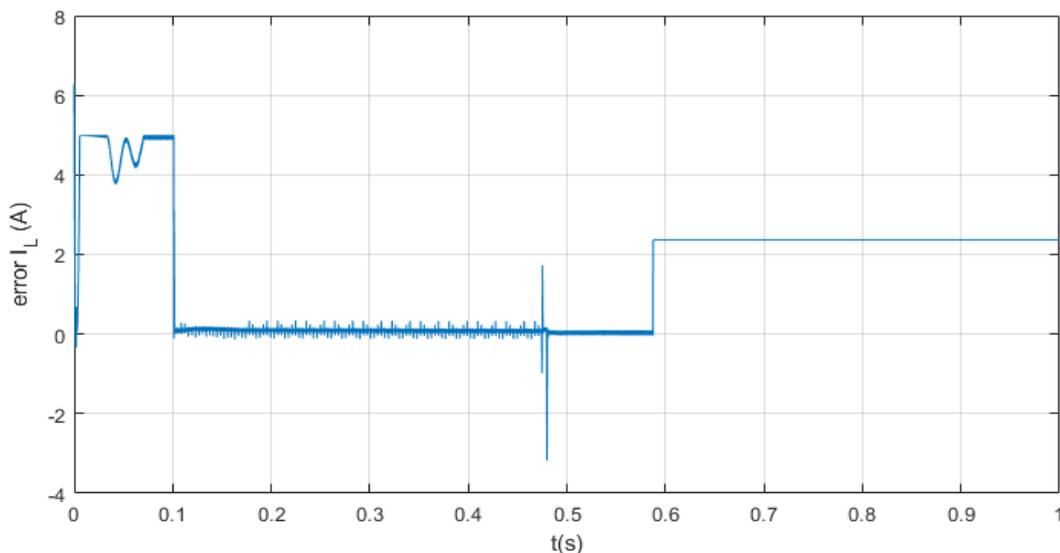


Figura 5-9. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 1000 W/m². Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,47 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,6 s.

El duty cycle del convertidor elevador presenta grandes variaciones, pero su valor medio se sitúa en el valor teórico del duty cycle para el convertidor elevador, 0,602. A pesar de eso, se observa que el duty cycle satura por su valor superior cada vez que hay un transitorio.

Por lo general, según lo que se observa en la gráfica, el duty cycle, si se eliminan los picos, toma valores entre 0,35 y 0,85 la mayor parte del tiempo durante la fase de carga a corriente constante, si se excluyen los transitorios.

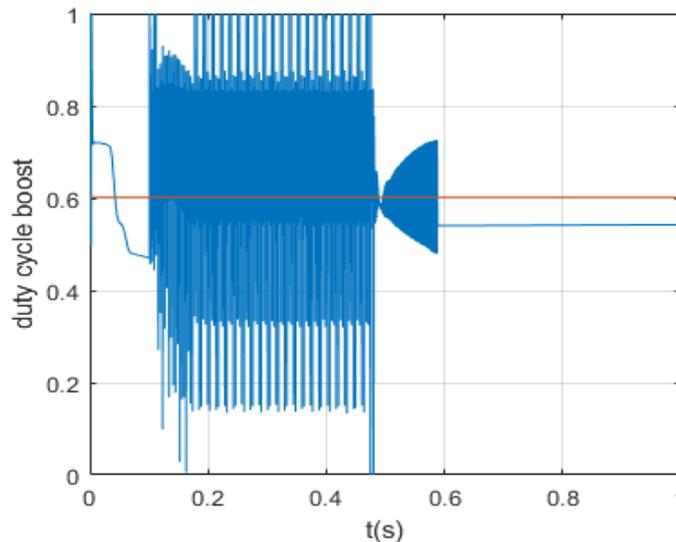


Figura 5-10. Duty cycle del convertidor elevador a 1000 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,6 s el duty cycle oscila en torno a 0,6 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,5 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor. En rojo está dibujado el duty cycle teórico, 0,602, mientras que en azul está el duty cycle medido.

Tras el paso del estado de carga a corriente constante a carga a tensión constante, la fluctuación es menor que para el estado anterior, permaneciendo igual el valor medio. Con estos valores de duty cycle, la potencia máxima es de 81,73 W, valor cercano a la especificación del panel fotovoltaico. Para el modo de carga a tensión constante, esta potencia decae rápidamente al principio, tomando valores por debajo de 30 W casi todo el tiempo que el sistema permanece en el estado de carga a tensión constante. El corte se produce por debajo de 10 W.

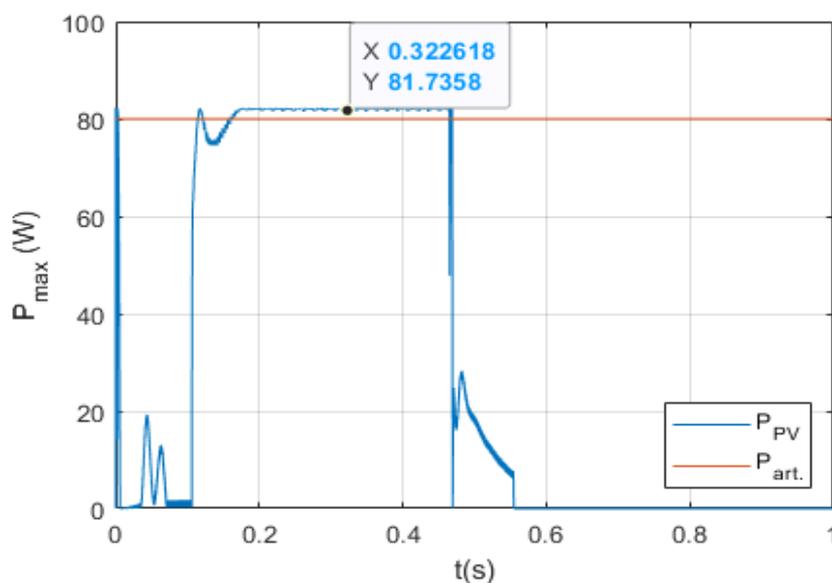


Figura 5-11. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 1000 W/m^2 . Entre 0,1s y 0,5s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, cercano a los 82 W nominales. En rojo, están dibujados los 80 W teóricos para esta irradiancia.

Pasando al convertidor flyback, la corriente de entrada es el primer valor del que se verán los resultados, ya que la tensión de entrada de este coincide con la existente a la salida del convertidor elevador.

La corriente de entrada del convertidor flyback, que es la que atraviesa el MOSFET de este convertidor, es de unos 4 A aproximadamente durante la fase de control a corriente constante. En cuanto el sistema cambia al modo de carga a tensión constante, la corriente de entrada del convertidor flyback va disminuyendo igual que ocurre en el convertidor elevador.

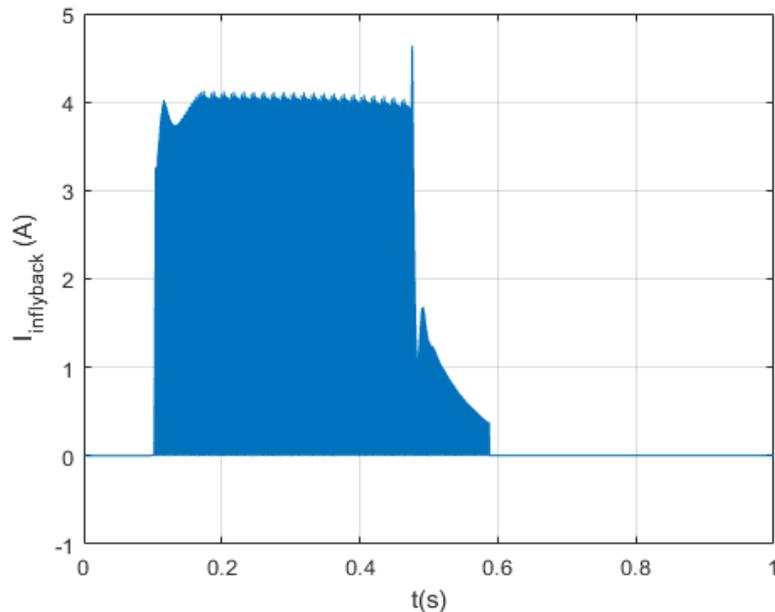


Figura 5-12. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,2 s y 0,5 s, esta corriente supera los 4 A. Entre 0,5 s y 0,6 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte.

Si se observa con más detalle, durante una fracción del *duty cycle* la corriente instantánea es cero y durante otra fracción del *duty cycle*, sigue un rizado propio de una bobina, que en el modelo teórico del convertidor *flyback* correspondería a la bobina de magnetización del transformador. Como esta bobina es un modelo y depende del transformador, no se puede medir la corriente que circula por ella.

El rizado, por lo visto anteriormente, se hallará mediante una ampliación en el tramo correspondiente al estado de carga a corriente constante de la corriente de entrada del convertidor flyback.

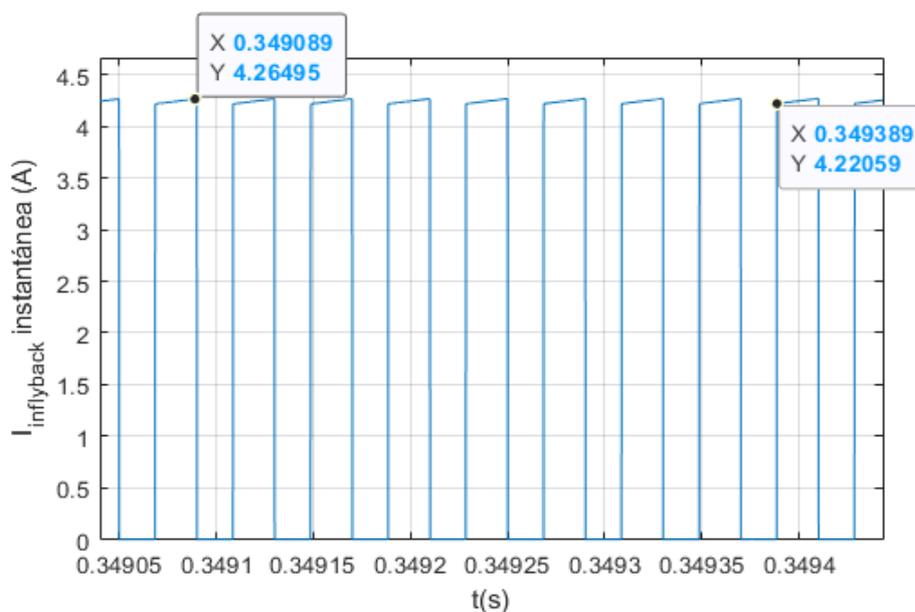


Figura 5-13. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 1000 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente.

Durante este tramo, la corriente de entrada de este convertidor varía, cuando no es cero, entre 4,22 A y 4,26 A de valores mínimo y máximo. Esto supone un rizado, teniendo en cuenta los decimales de las etiquetas, de 44,36 mA.

El valor relativo se calcula a partir de la corriente media de salida, que para 1000 W/m² es de 2,328 A, tal y como se calcula a partir de la corriente de entrada y el duty cycle del convertidor elevador:

$$I_o = 5,9 \text{ A} \cdot (1 - 0,602) = 2,348 \text{ A}$$

El rizado relativo, con los 44,36 mA de rizado absoluto y el valor de I_o de 2,348 A se queda en un 1,88%, menos del 2% propuesto inicialmente.

La corriente de la batería, que se detalla en las tres siguientes figuras es la suma de todas las corrientes que salen de cada uno de los convertidores flyback. En el caso de la batería, formada por combinaciones en serie y paralelo, esta tiene un máximo de 1,5 A y no puede superarse.

Para dos paneles, esta corriente que entra es de 1,389 A de media, aunque tiene picos causados durante la carga a corriente constante. Tras una primera fase de precarga y arranque, un transitorio de 0,1 segundos la lleva a su valor máximo, que no supera la corriente máxima de la batería.

Entre 0,2 y 0,5 s, la corriente tiene una pequeña disminución derivada de la forma de fijar la referencia de corriente para este estado del sistema, ya que esta se fija a partir de la tensión de entrada del flyback, que se desea mantener en 35 V.

En el estado de carga a tensión constante, la corriente disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor de corte, unos 110 mA, en el que se considera cargada la batería. Una vez cargada, ambos convertidores se apagan y la corriente de la batería es cero. En la gráfica, el signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando.

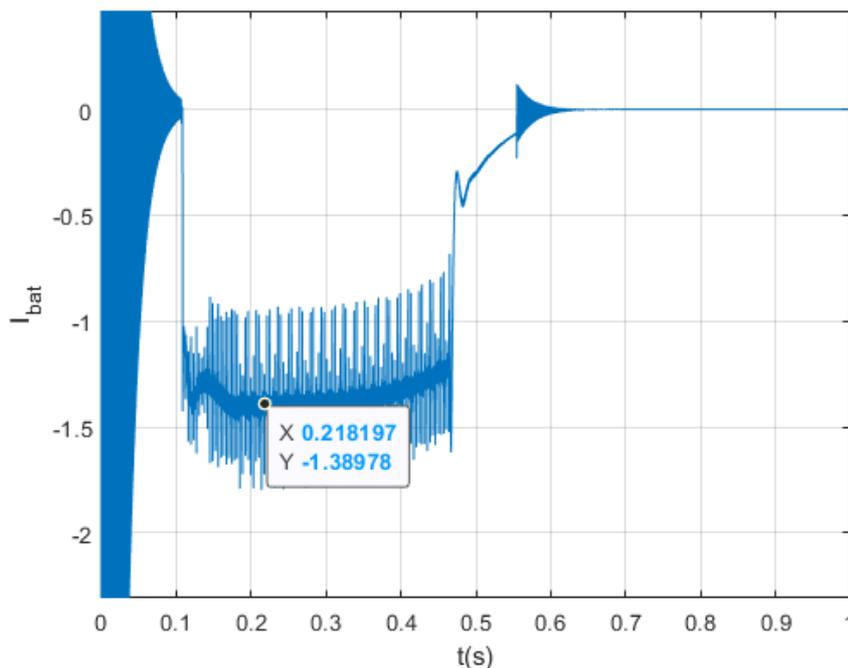


Figura 5-14. Corriente de la batería durante la carga a 1000 W/m² de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,5 s. Entre 0,5 s y 0,6 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte.

Como la corriente anterior es la suma de todas las corrientes de salida de los convertidores, y en el experimento se están teniendo en cuenta dos paneles fotovoltaicos en lugar de los cuatro o más que pueden montarse en la superficie de un turismo, la corriente de salida de un convertidor flyback es la mitad de la corriente anterior, unos 0,695 A. La corriente teórica era de unos 0,8 A, pero en la práctica la corriente de salida del convertidor flyback toma un valor menor por las pérdidas, resistivas, inductivas o capacitivas, que existen siempre en los elementos activos y pasivos de un circuito.

Tanto los valores de referencia como los medidos coinciden en la mayor parte del tiempo en el modo de control a corriente constante, que comienza a partir de los 0,1 segundos. Como la referencia de corriente va fijada por tensión, hasta que no finaliza el transitorio que existe al principio del tramo de la fase de carga de la batería a corriente constante no hay un seguimiento real de la referencia por parte del controlador.

Si se tienen en cuenta los picos y no únicamente el valor medio, la corriente no supera los 0,85 A ni baja de 0,4 A, como se observa en la gráfica. Para el control a tensión constante, una vez se pasa el transitorio existente en torno a 0,5 segundos, la corriente disminuye progresivamente hasta 0,055 A, que es la mitad del valor de la corriente de corte de la batería. A partir del corte, la corriente pasa a ser cero.

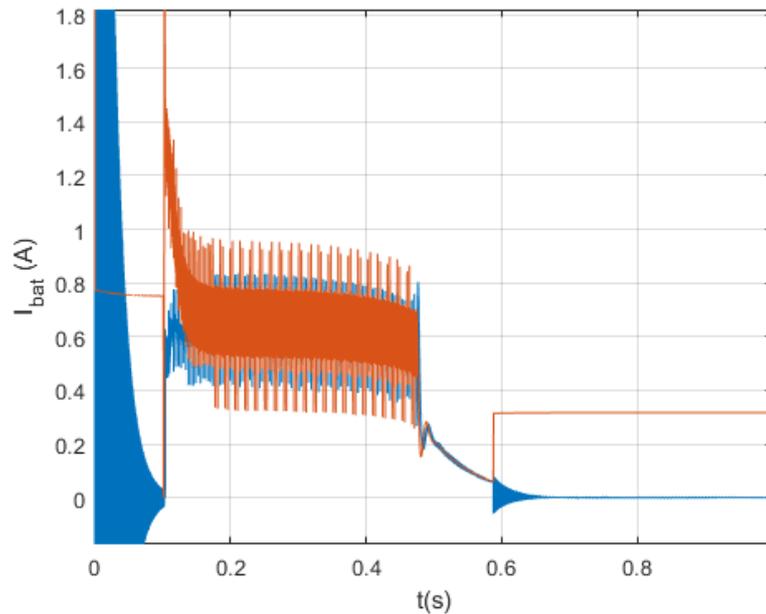


Figura 5-15. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 1000 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,5 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,5 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,6 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el azul la corriente medida.

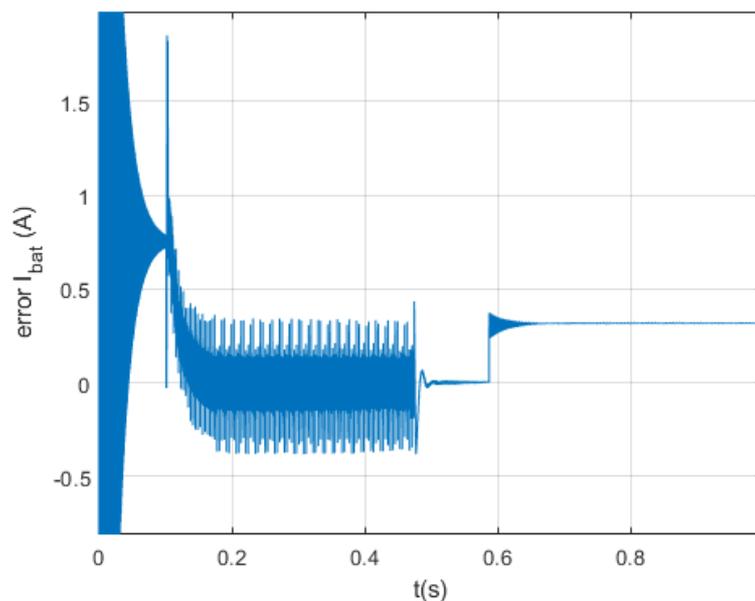


Figura 5-16. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,4 y 0,6 segundos.

El error en régimen permanente de la corriente de salida de un solo convertidor, que debe tenerse en cuenta únicamente para los estados del sistema donde se carga la batería, es cero, aunque para el estado de carga a corriente constante hay una variación de pico a pico que no supera los 0,25 A de error normalmente.

En el caso de la potencia de salida de cada convertidor elevador, para 1000 W/m^2 es de media de 77,14 W, aunque la instantánea puede variar entre 50 y 90 W una vez superado el transitorio. Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de 81,73 W, se puede calcular el rendimiento con la siguiente ecuación.

$$\eta_{DC/DC} (\%) = \frac{P_{oflyback}}{P_{inboost}} \cdot 100 = \frac{P_{oflyback}}{P_{oflyback} + P_{DC/DC}} \cdot 100 \quad (21)$$

Donde $P_{oflyback}$ es la potencia de salida del convertidor flyback y $P_{DC/DC}$ representa las pérdidas existentes en el conjunto de convertidores. El rendimiento calculado es el siguiente:

$$\eta_{DC/DC} = \frac{77,15 \text{ W}}{81,73 \text{ W}} \cdot 100 = 94,396 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 50% para 1000 W/m^2 . Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante. Para el caso descrito, las pérdidas son de 4,58 W.

La forma de onda de la potencia de salida depende fuertemente de la corriente de salida del convertidor flyback, con unos picos notables y una ligera disminución que hace que, justo antes de pasar al estado de carga a tensión constante, sea de 70 W. A los 0,5 segundos, el sistema pasa al modo de carga a tensión constante con una referencia de 117,6 V para la salida del convertidor flyback.

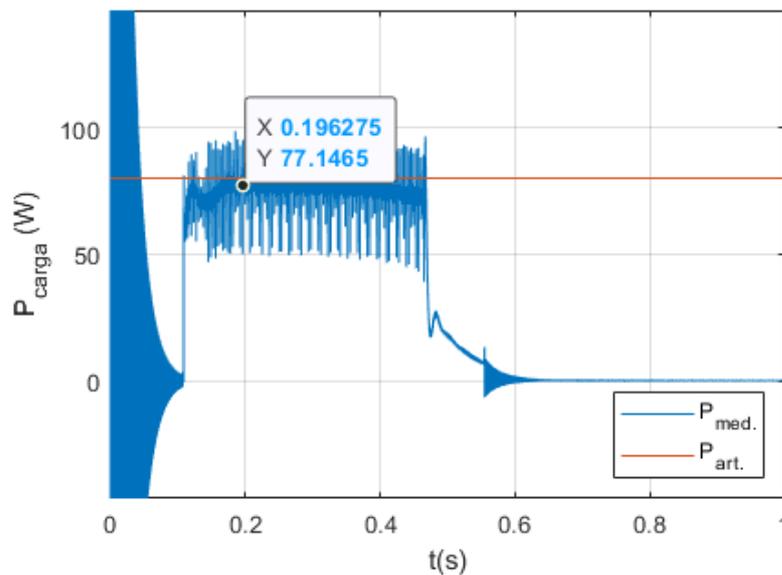


Figura 5-17. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a corriente constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,5 s, el valor de la potencia se sitúa por encima de 70 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería. Esta potencia calculada a la salida, en azul, se compara con la teórica de 80 W para este valor de irradiancia.

Para el duty cycle, el valor real es ligeramente superior al teórico, debido principalmente a las pérdidas del sistema, que no se tienen en cuenta para el diseño de un convertidor ideal. Los valores que aparecen en la gráfica oscilan, durante la carga a corriente constante, tras un período en el que el convertidor flyback está apagado, entre 0,4 y 0,65, sin contar los picos debidos a los transitorios cada vez que cambia la referencia de tensión.

Para el modo de carga a tensión constante, el valor es de 0,55 aproximadamente, sin grandes oscilaciones, tras un transitorio que se completa un poco más tarde de los 0,5 segundos.

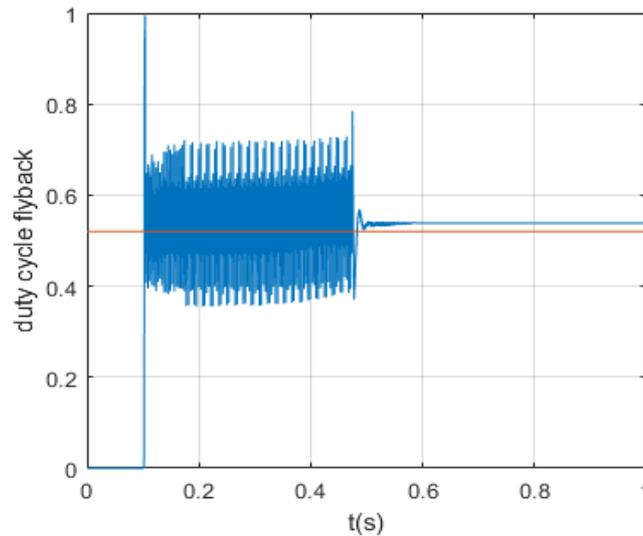


Figura 5-18. Duty cycle del convertidor flyback para 1000 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,4 y 0,65 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 0,5 s y 0,6 s, el valor presenta un rizado poco apreciable.

En la gráfica inferior se aprecia cómo, al 96,54%, el estado de carga o porcentaje de batería crece linealmente hasta este valor, durante la carga a corriente constante, desde un 38%, volviendo al 50% inicial a los 0,2 s, cuando se obtiene el mayor rendimiento en cuanto a potencias.

El porcentaje de batería máximo que se puede alcanzar a 1000 W/m^2 , irradiancia que incide en cada panel durante el experimento y que se muestra más abajo en la misma ilustración, es del 99,16%.

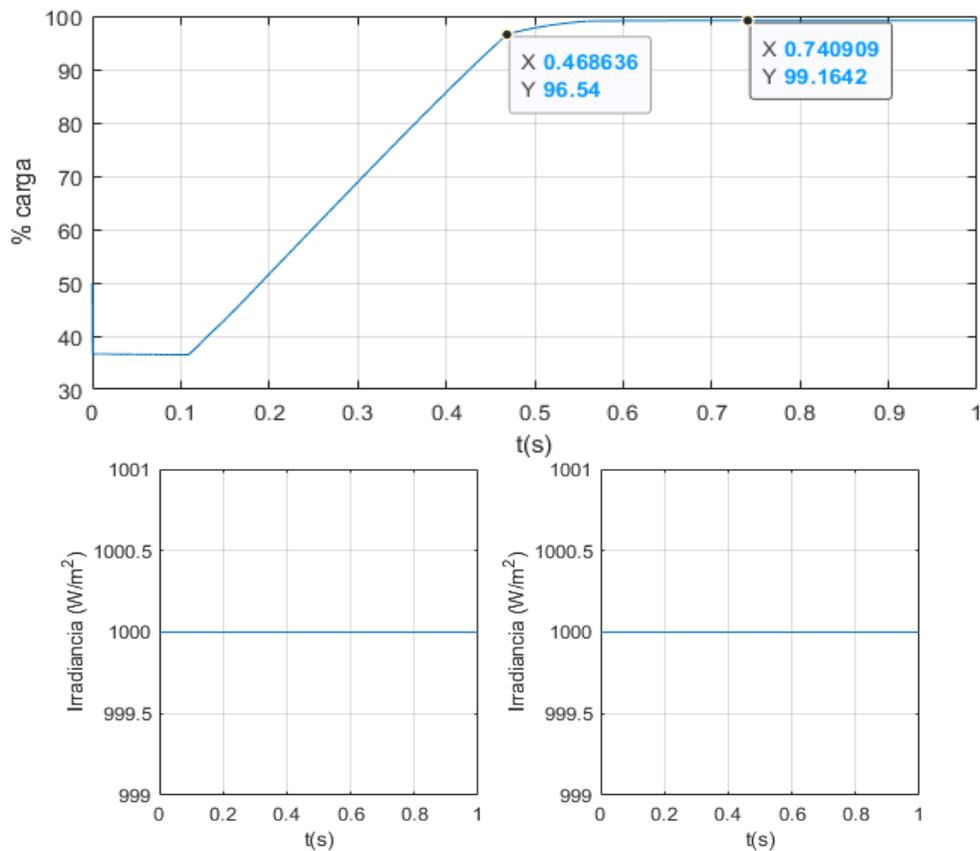


Figura 5-19. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 1000 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo menos de 0,5 s, el estado de carga crece hasta un 95%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,6 s, es del 99,08%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 1000 W/m^2 durante toda la prueba.

La tensión máxima que se alcanza con este método de carga es de algo más de 117,6 V, pero esto se debe al corto espacio de tiempo que dura la parte de carga a tensión constante, que ocupa un tiempo de 0,1 s respecto al total del experimento por la capacidad irreal de la batería especificada en Simulink, de 0,225 mAh.

Esta tensión se da únicamente en este estado, siendo menor en el arranque de los convertidores, donde llega a unos 109-110 V, en el modo de carga a corriente constante y una vez la batería está cargada. Cuando la batería queda cargada la tensión baja de los 117,6 V de referencia para la carga a tensión constante.

Durante la carga a corriente constante, es posible diferenciar la transición de la zona lineal de carga a la exponencial en los 0,3 segundos, en cuanto el porcentaje de batería supera el 70% según se observa en la gráfica anterior.

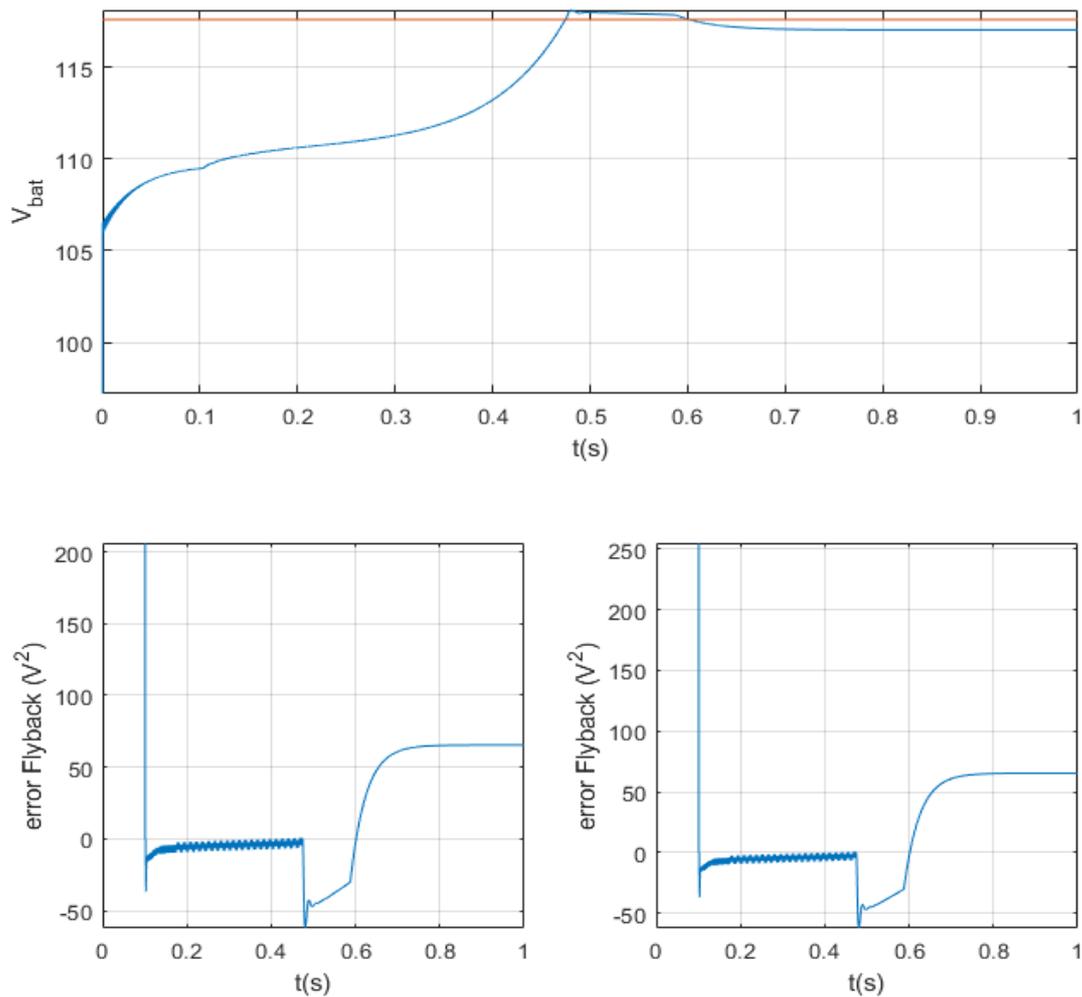


Figura 5-20. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación.

A 1000 W/m^2 la carga va en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,3 s, cuando la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería.

En las gráficas inferiores de la figura anterior se observa el error existente entre la tensión de referencia y la tensión medida en el sistema. Hasta 0,5 segundos la diferencia entre los 35 V de referencia para el nodo de entrada del flyback y el valor medido es muy pequeña llegando a cero en el régimen permanente, gracias al controlador PI.

A partir de 0,5 segundos, el error en régimen permanente se reduce, pero el tiempo del experimento y la capacidad de la batería no dejan ver el momento en el que este llega a cero. Esto significa que la dinámica del controlador de la carga en control CV es lenta respecto a los tiempos de simulación que se consideran para este experimento.

5.2.2 Irradiancia de 800 W/m²

Para una irradiancia de 800 W/m², la máxima potencia generada no será el valor nominal del panel fotovoltaico, pues solo se da para una irradiancia de 1000 W/m².

Como se vio en el experimento anterior, los estados pasan por una fase de arranque, similar al caso anterior, que dura 0,1 s y que incluye la precarga del condensador en un estado de parada durante un corto período de tiempo. La carga a corriente constante dura hasta llegar a unos 0,53 s y la batería está completamente cargada a los 0,62 s.

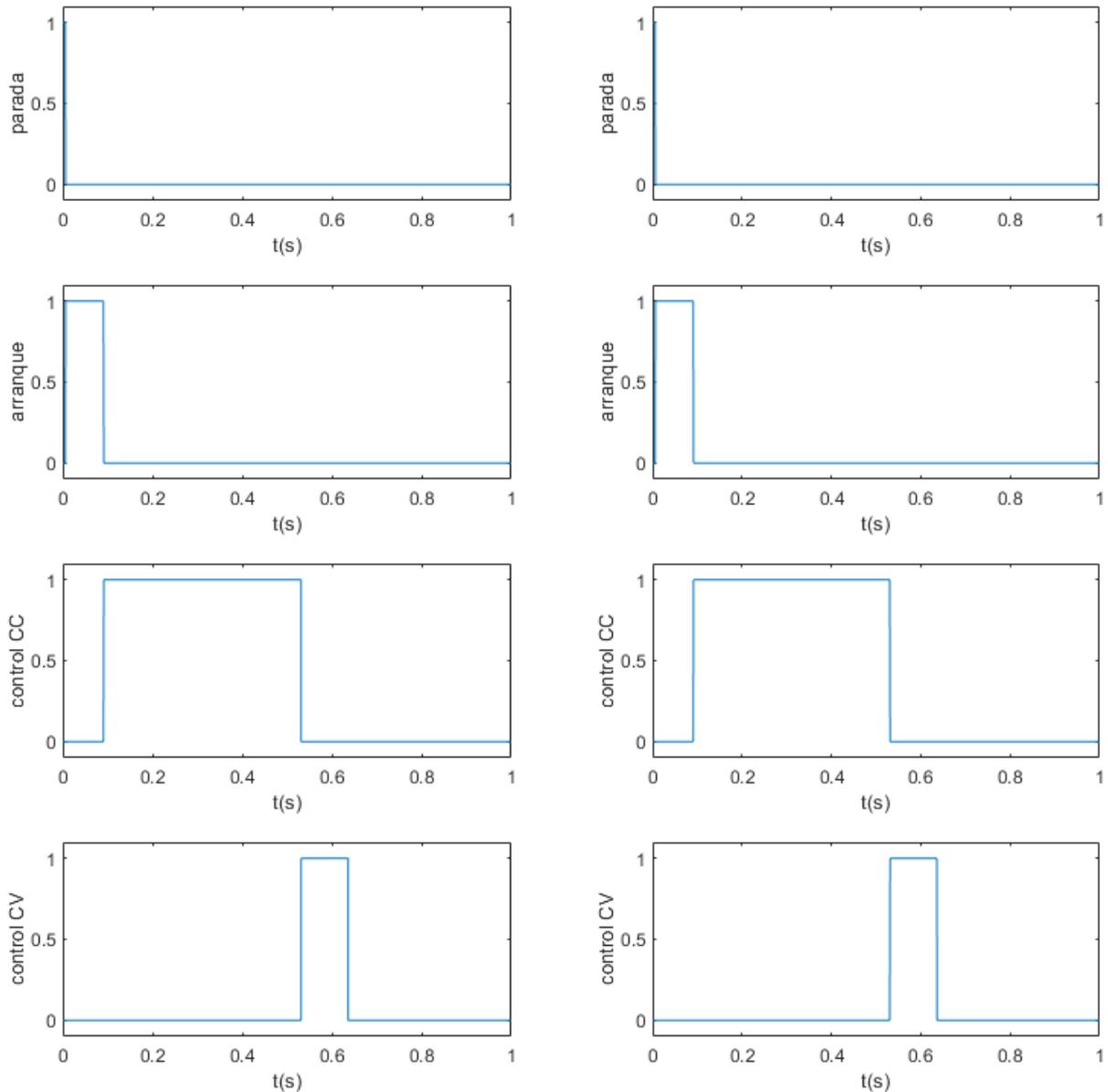


Figura 5-21. Estados de funcionamiento del sistema en el segundo experimento, con la irradiancia ajustada en 800 W/m². Tanto las gráficas de la izquierda como las de la derecha corresponden a los estados de funcionamiento de cada uno de los paneles. De media, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a 0,62 s.

Los tiempos de simulación son ligeramente diferentes, aunque muy similares al primer caso porque la variación respecto al primer experimento no es importante.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador. La tensión de entrada, una vez ha terminado la fase de arranque, se establece, para la carga a corriente constante, en torno a los 14 V de nuevo, valor cercano a los 13,85 V de tensión de máxima potencia nominal.

Esta fase de carga a corriente constante dura desde los 0,1 segundos, en cuanto se alcanzan los 35 V en la

salida del elevador, hasta los 0,53 segundos, cuando se supera la tensión máxima de la batería durante la carga.

La tensión de salida del convertidor se lleva a 35 V mientras el convertidor elevador esté en marcha, y la referencia se entrega al convertidor elevador durante esta fase de arranque posterior a la precarga del condensador.

En la carga a tensión constante, tras un transitorio en torno a 0,53 segundos que se prolonga unas pocas centésimas de segundo, la tensión toma un valor situado por encima de la tensión de máxima potencia y por debajo de la tensión de circuito abierto, que para este caso es inferior a la nominal, de 16,3 V en lugar de los 16,464 V de tensión de circuito abierto para el panel cuando la irradiancia es de 1000 W/m².

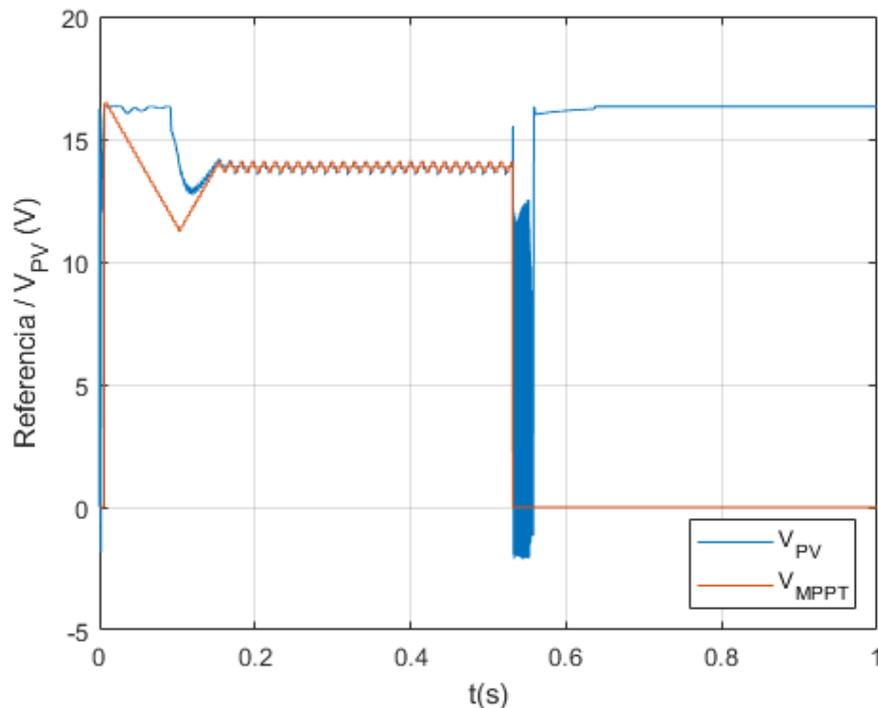


Figura 5-22. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 800W/m² y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1s y 0,53s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,17 s aprox. Desde 0,53s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva.

La tensión a la salida del convertidor elevador siempre está controlada por alguno de los controladores de los convertidores de potencia que conectan el panel fotovoltaico con el nodo de salida del flyback, que da a la batería, aunque no lo hace directamente porque existe un filtro LC.

Durante el arranque, una vez se supera el umbral de 21,07 V para la tensión de salida del elevador, un PI lleva esta tensión a 35 V de referencia, con el flyback apagado hasta que se alcanzan en torno a 0,1 segundos.

Para el control a corriente constante, la tensión de salida sigue la referencia de 35 V dada al controlador del convertidor flyback, que fija la referencia de corriente a la salida del flyback en el modo de carga de la batería a corriente constante.

Cuando el control de la carga pasa a ser a tensión constante a los 0,5 segundos, el controlador del convertidor elevador pasa a fijar la tensión a la salida de este, con una referencia de 35 V, que intenta seguir pero que se queda en más de los 35 V dados como referencia por la escasa duración de la carga a tensión constante y por la capacidad definida para la batería en estos experimentos de carga CC-CV destinados a estudiar un comportamiento general de la batería.

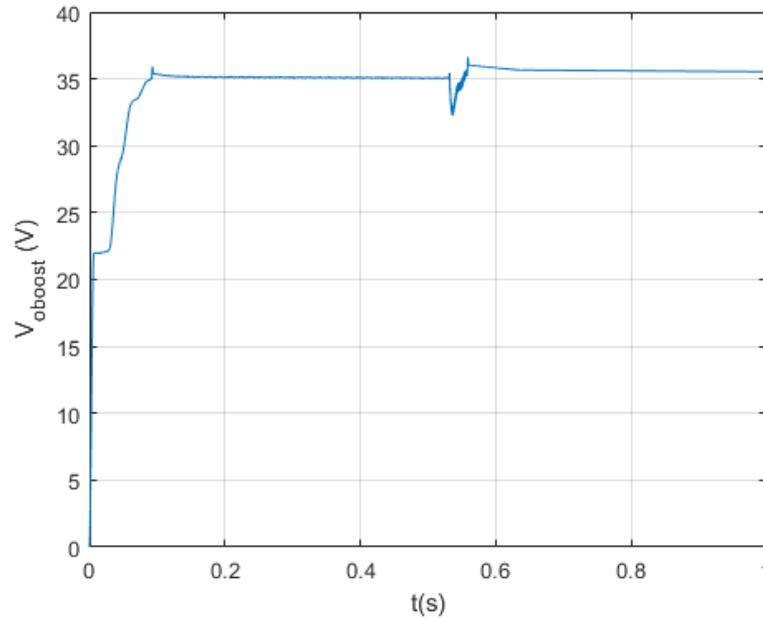


Figura 5-23. Tensión a la salida del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 0,53 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante.

Ambos controladores, al ser proporcionales e integrales (PI) aseguran un error en régimen permanente nulo, como así pone de manifiesto la siguiente gráfica de errores. El primer controlador PI acerca la tensión del convertidor elevador a 35 V, que es el nivel de tensión que deberá mantener en el régimen permanente sea cual sea su estado (arranque, carga a corriente constante o carga a tensión constante).

Esto se cumple, por lo que se puede observar en este experimento, en el estado de carga de la batería a corriente constante, donde si el error se aleja de cero es por los transitorios cada vez que sube o baja la referencia de tensión dada por el MPPT, y se verá más adelante en la carga a tensión constante durante los experimentos de carga a alto porcentaje de batería.

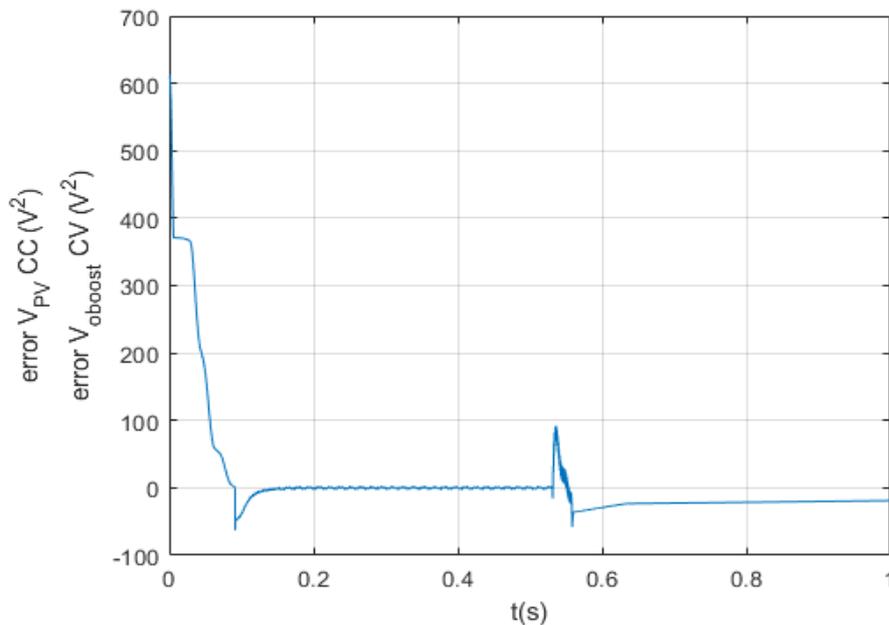


Figura 5-24. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Desde el principio se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están empleando.

La tensión de salida del panel fotovoltaico, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor elevador, al considerar ideales los diodos de bloqueo, presenta, durante el modo de carga de la batería a corriente constante, una serie de oscilaciones debidas al algoritmo MPPT. Las oscilaciones vienen dadas por las variaciones en la referencia de tensión de máxima potencia, que tiene un valor que no es constante una vez alcanzado el valor de tensión de máxima potencia.

Los niveles de tensión medidos tienen de máximo 14,08 V y de mínimo 13,63 V, con una variación de 0,4 V entre el valor máximo y mínimo de la tensión de referencia. Respecto a las variaciones de la tensión debidas al ruido y al rizado en la entrada, en todos los niveles de tensión, máximo y mínimo del régimen permanente, son muy similares independientemente de los incrementos o decrementos existentes al deberse al condensador situado en paralelo al panel fotovoltaico.

El valor medio de la tensión de salida del panel es de 13,85 V, con un incremento total de 450 mV. Si se tienen en cuenta las variaciones de la tensión una vez se alcanza el valor de referencia dado, el rizado es despreciable. El rizado relativo para este último valor es inferior al 1%, mientras que si se tiene en cuenta el total de las variaciones pasa a ser del 3,25%, tomando en cuenta el valor medio de tensión calculado anteriormente. Este valor se acerca al teórico de 13,9 V, si bien queda por debajo.

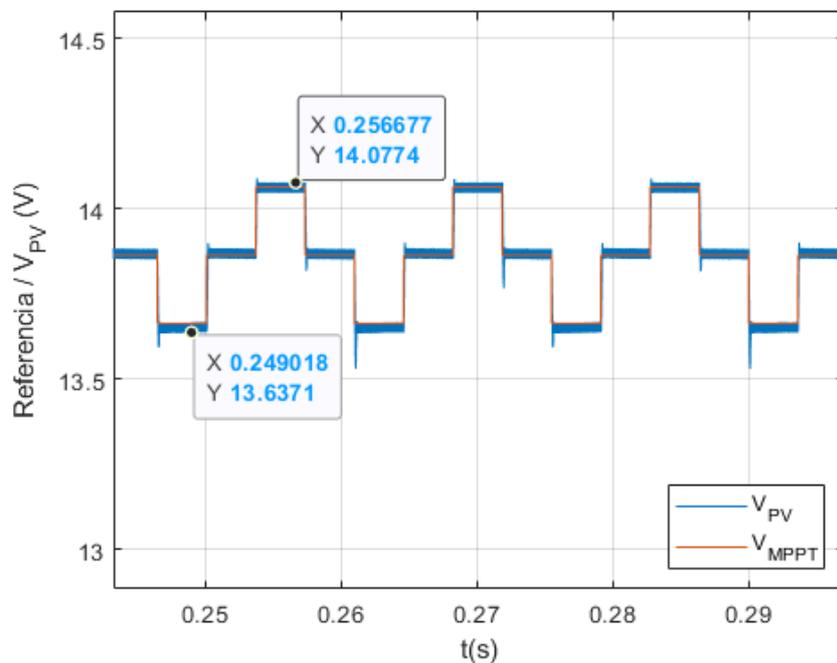


Figura 5-25. Detalle de la tensión de salida del panel (en azul) y referencia (en rojo) para 800W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

La siguiente gráfica muestra cómo la corriente de la bobina del convertidor elevador toma valores cercanos a los 4,73 A especificados para la corriente de salida del panel fotovoltaico durante el régimen permanente del modo de carga a corriente constante de la batería.

Previamente, durante el arranque, la corriente es cero casi todo el tiempo, excepto en ciertos instantes en los que la tensión a la salida del convertidor elevador va camino de alcanzar los 35 V por primera vez, tras la precarga del condensador del nodo de conexión del convertidor flyback.

Durante el transitorio de la fase de arranque a la fase de carga a corriente constante, la corriente en la bobina apenas alcanza los 5 A levemente, mientras que, en la carga a tensión constante, va disminuyendo progresivamente después de un transitorio en el que cae bruscamente de 5 A hasta los 1,4 A. Cuando la corriente llega a un valor situado en aproximadamente 0,5 A, la carga de la batería se corta, tras haber alcanzado el máximo estado de carga.

Si se observa con detalle la corriente durante la fase de carga de la batería a corriente constante, esta alcanza un máximo de 4,85 A y un mínimo de 4,61 A. El rizado total, una vez se tiene en cuenta las variaciones introducidas por el algoritmo MPPT, es de 240 mA, que en valores relativos se traduce en un 5,07 % de la

corriente que atraviesa la bobina. La corriente de la bobina es de 4,73 A, el valor teórico de la corriente del panel fotovoltaico para 800 W/m^2 de irradiancia.

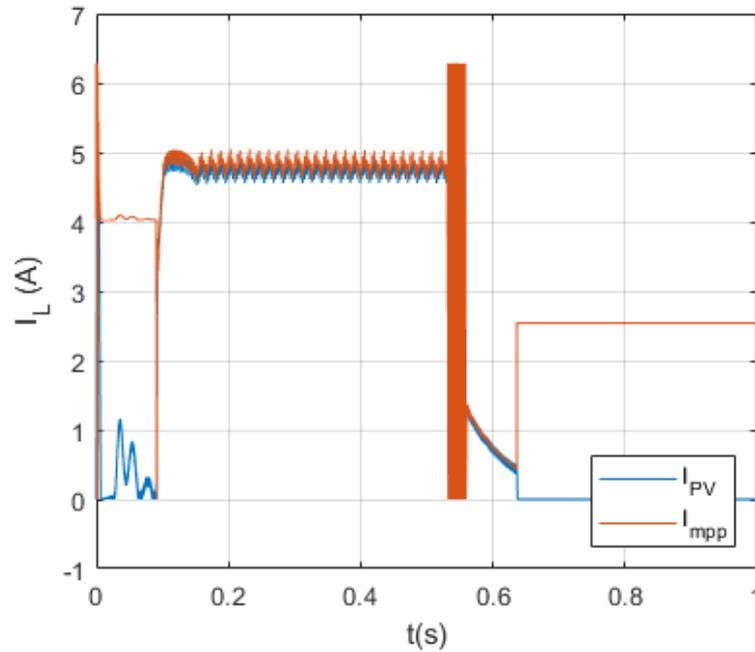


Figura 5-26. Corriente de la bobina del convertidor boost a 800 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente llega casi a 5 A, por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,63 s la carga de la batería se corta.

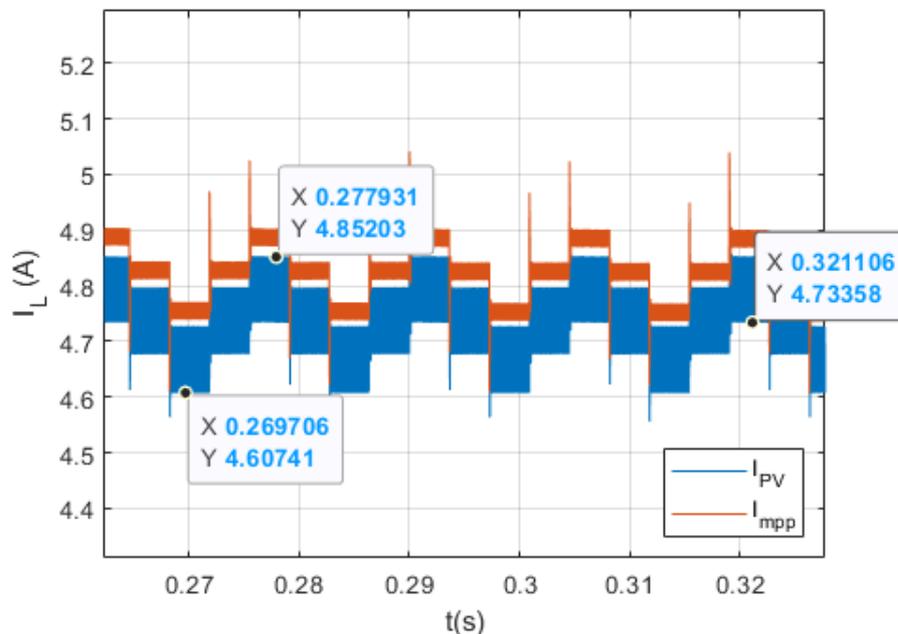


Figura 5-27. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 800 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante. La línea azul representa la corriente medida en la bobina y la línea naranja representa la referencia de corriente generada mediante el control MPPT.

El error en régimen permanente de los modos de control donde los controladores PI fijan el duty cycle del sistema, para fijar la corriente de la bobina una vez se le entrega una referencia de corriente calculada a partir de la potencia de referencia fijada por controladores PI que reciben una referencia tensión, sea esta generada por MPPT para la tensión de entrada o fija para la tensión de salida del convertidor, es cero. Esto se cumple tanto para ambas técnicas de carga, excepto en los transitorios.

Como se observa en la gráfica de error para la corriente de la bobina del convertidor elevador, durante los modos de parada, arranque y parada por carga completa de la batería, el error no debe tenerse en cuenta, pues no circula corriente por la bobina mientras duren esos estados y la referencia no está fijada por ningún controlador.

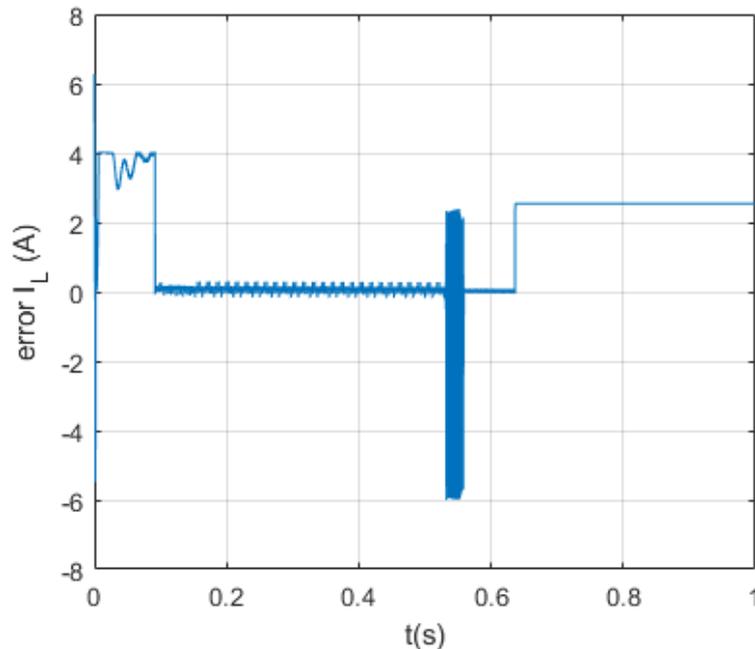


Figura 5-28. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,55 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,63 s.

El duty cycle del convertidor elevador presenta grandes variaciones, con su valor medio tomado alrededor del valor teórico del duty cycle para el convertidor elevador, 0,603. El duty cycle satura por su valor superior cada vez que hay un transitorio.

En general, según lo que se ve en la gráfica, el duty cycle, si no se toman en consideración los picos, toma valores entre 0,3 y 0,82 la mayor parte del tiempo durante la fase de carga a corriente constante, excepto en los transitorios.

Tras cambiar el estado del sistema al de carga a tensión constante, las diferencias entre el máximo y el mínimo valor son menores que para el estado anterior, bajando ligeramente el valor medio. Con estos valores de duty cycle, la potencia máxima es de 65,61 W, valor cercano a la especificación del panel fotovoltaico, unos 65 W para la irradiancia de 800 W/m^2 . Para el modo de carga a tensión constante, esta potencia decae rápidamente al principio, tomando valores por debajo de 30 W casi todo el tiempo que el sistema permanece en el estado de carga a tensión constante. El corte se produce por debajo de 10 W.

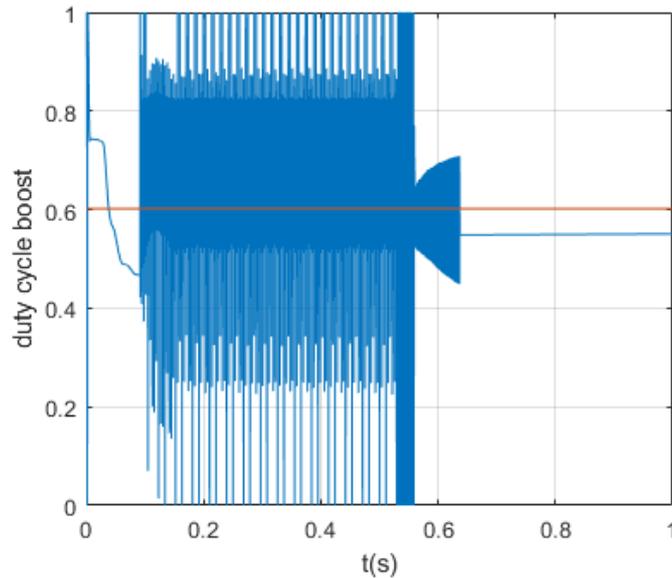


Figura 5-29. Duty cycle del convertidor elevador a 800 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,53 s, antes de la transición, el duty cycle oscila en torno a 0,7 durante el control MPPT. Tras el transitorio en 0,55 s, el duty cycle se hace más cercano a 0,6 en el modo de control a tensión constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,53 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor.

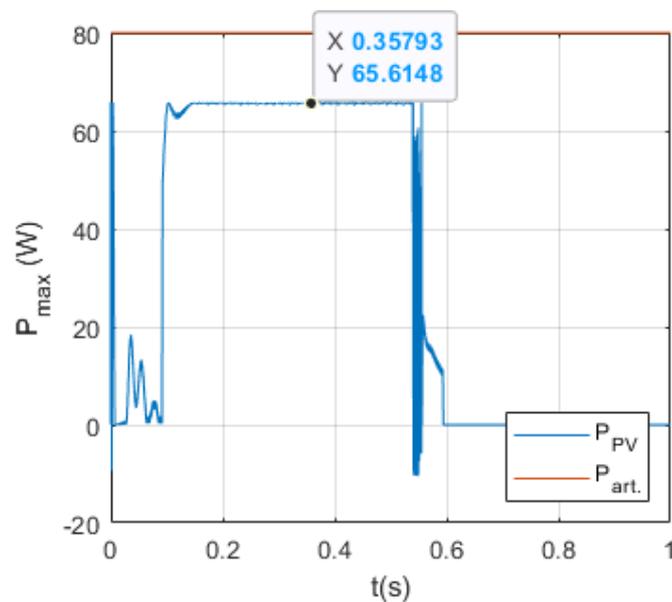


Figura 5-30. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre 0,1s y 0,53s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 65 W.

Pasando al convertidor flyback, la corriente de entrada es el primer valor del que se verán los resultados, ya que la tensión de entrada de este coincide con la existente a la salida del convertidor elevador.

La corriente de entrada del convertidor flyback, que es la que atraviesa el MOSFET de este convertidor, es de unos 3,5 A durante la fase de control a corriente constante, con una ligera disminución cuando aumenta el porcentaje de carga. En cuanto el sistema cambia al modo de carga a tensión constante, la corriente de entrada del convertidor flyback va disminuyendo, al igual que la corriente de bobina para el convertidor elevador, que tiene una tendencia similar. El valor de corte se da a los 0,4 A instantáneos.

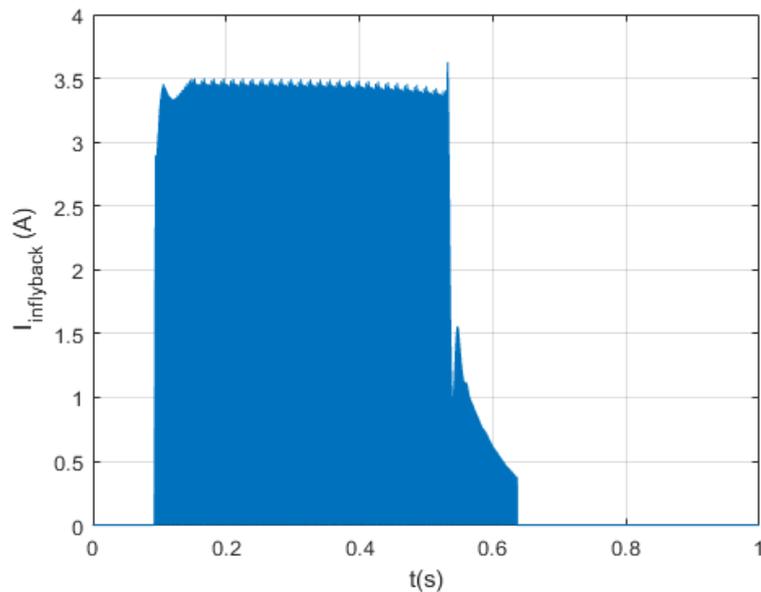


Figura 5-31. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,16 s y 0,55 s, esta corriente casi alcanza los 3,5 A. Entre 0,55 s y 0,62 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte.

Si se observa con más detalle, durante una fracción del *duty cycle* la corriente instantánea es cero y durante otra fracción del *duty cycle*, sigue el rizado que correspondería a la bobina de magnetización del transformador. Como esta bobina es un modelo y depende del transformador, no se puede medir la corriente que circula por ella directamente y se tendrá que observar mediante la corriente que entra en el *flyback*.

El rizado, por lo visto anteriormente, se hallará mediante una ampliación en el tramo correspondiente al estado de carga a corriente constante de la corriente de entrada del convertidor flyback.

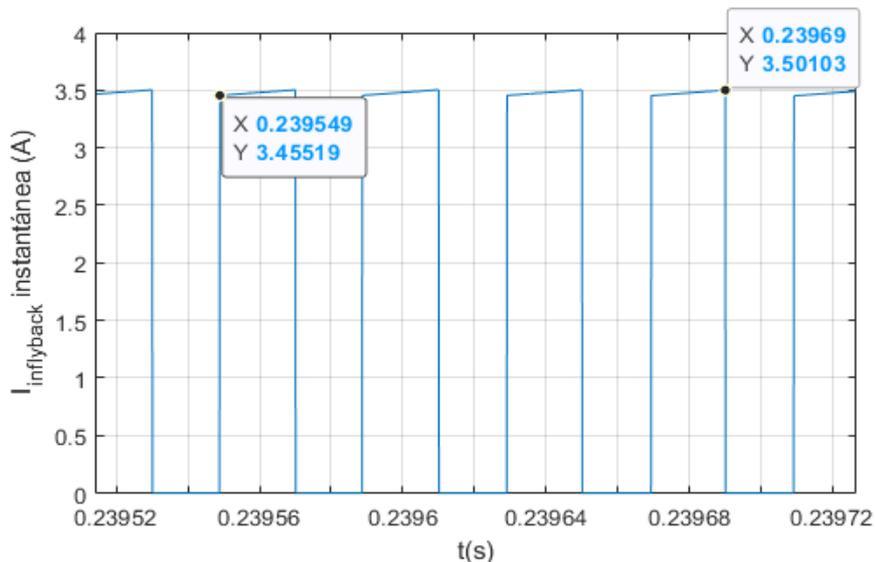


Figura 5-32. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 800 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente.

Durante este tramo, la corriente de entrada de este convertidor varía, cuando no es cero, entre 3,45 A y 3,5 A de valores mínimo y máximo. Esto supone un rizado, teniendo en cuenta los decimales de las etiquetas de la gráfica de la figura 5-32, de 25 mA.

El valor relativo del rizado se calculará a partir de la corriente media de salida, que para 800 W/m^2 es de 2,328 A, tal y como se calcula a partir de la corriente de entrada y el *duty cycle* del convertidor elevador:

$$I_o = 4,73 \text{ A} \cdot (1 - 0,603) = 1,877 \text{ A}$$

El rizado relativo, con los 25 mA de rizado absoluto y el valor de I_o de 1,873 A se queda en un 1,33%, menos

del 2% propuesto en las especificaciones.

La corriente de la batería o suma de todas las corrientes que salen de cada uno de los convertidores flyback es de 1,389 A de media y, al igual que se ha visto antes, tiene picos causados durante la carga a corriente constante. Tras una primera fase de precarga y arranque, un transitorio inferior a 0,1 segundos la lleva a su valor máximo, que no supera la corriente máxima de la batería especificada, 1,5 A.

Entre 0,2 y 0,5 s, la corriente tiene una pequeña disminución derivada de la forma de fijar la referencia de corriente para este estado del sistema, ya que esta se fija a partir de la tensión de entrada del flyback, que se desea mantener en 35 V.

En el estado de carga a tensión constante, la corriente disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor de corte, unos 110 mA, en el que se considera cargada la batería. Una vez cargada, ambos convertidores se apagan y la corriente de la batería es cero. En la gráfica, el signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando.

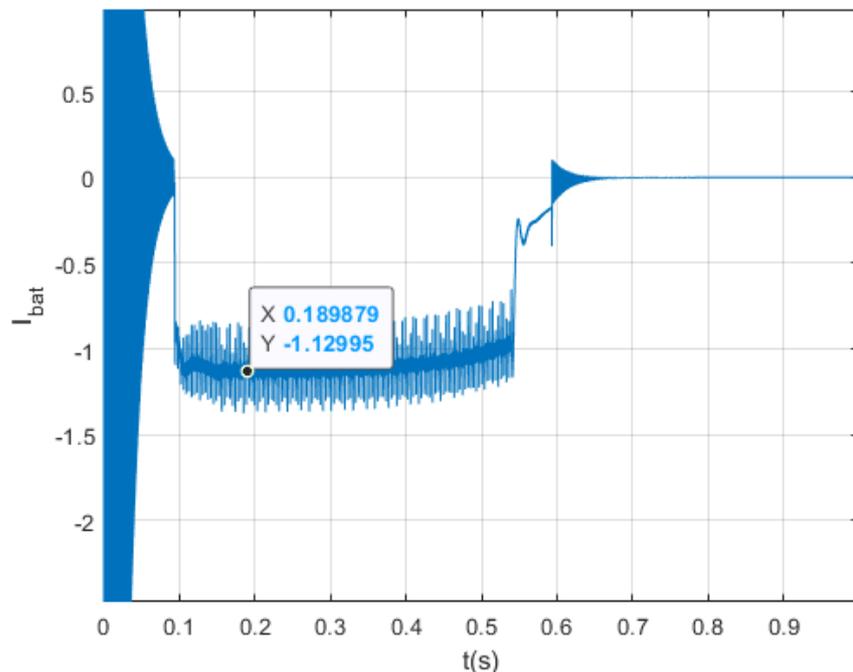


Figura 5-33. Corriente de la batería durante la carga a 800 W/m² de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,55 s. Entre 0,55 s y 0,6 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte.

Como la corriente anterior es la suma de todas las corrientes de salida de los convertidores, y en el experimento se están teniendo en cuenta dos paneles fotovoltaicos en lugar de los cuatro, o incluso más, que pueden montarse en la superficie de un turismo, la corriente de salida de un convertidor flyback es la mitad de la corriente anterior, unos 0,565 A.

Tanto los valores de referencia como los medidos coinciden en la mayor parte del tiempo en el modo de control a corriente constante, que comienza a partir de los 0,1 segundos. Como la referencia de corriente va fijada por tensión, hasta que no finaliza el transitorio que existe al principio del tramo de la fase de carga de la batería a corriente constante no hay un seguimiento real de la referencia por parte del controlador.

Si se tienen en cuenta los picos y no únicamente el valor medio, la corriente no se aleja demasiado de 0,5 A, como se observa en la gráfica, donde se puede adivinar un máximo de 0,6 A y un mínimo situado entre 0,4 A y 0,5 A. Para el control a tensión constante, una vez se pasa el transitorio existente en torno a 0,55 segundos, la corriente disminuye progresivamente hasta 0,055 A, que es la mitad del valor de la corriente de corte de la batería. A partir del corte, la corriente pasa a ser cero. El error en régimen permanente, que debe tenerse en cuenta únicamente para los estados del sistema donde se carga la batería, es cero, aunque para el estado de carga a corriente constante hay una variación de pico a pico que no supera los 0,2 A de error normalmente.

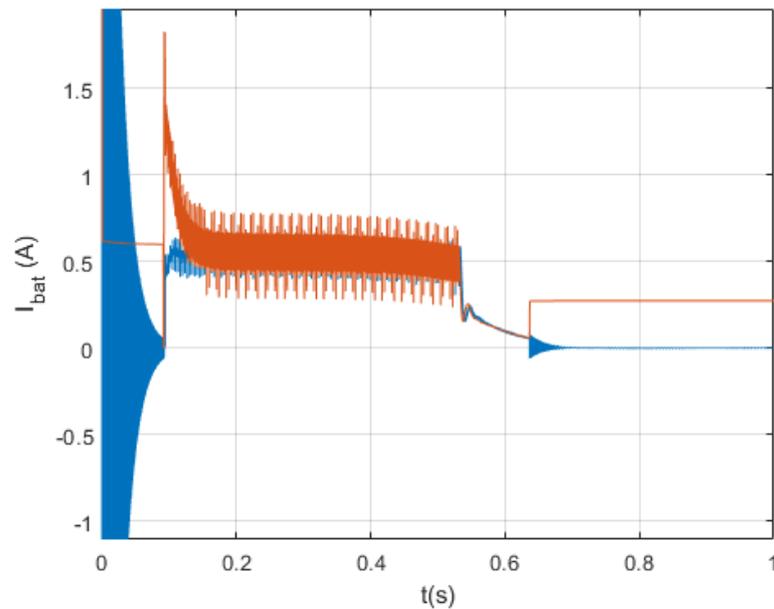


Figura 5-34. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,55 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,55 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,62 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el color azul representa la corriente medida.

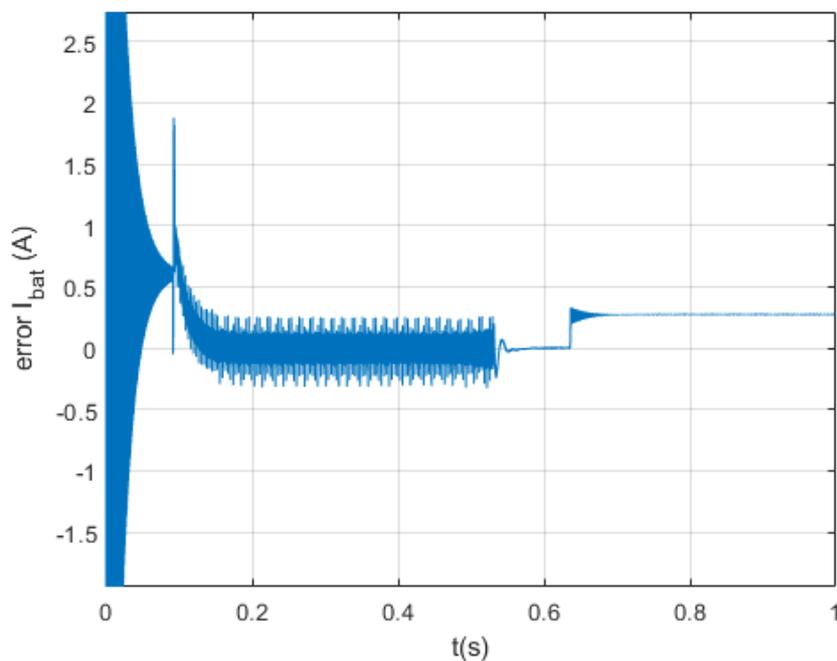


Figura 5-35. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,55 y 0,62 segundos.

En el caso de la potencia de salida de cada convertidor elevador, para 800 W/m^2 es de media de $62,884 \text{ W}$, aunque la instantánea puede variar entre 45 y 70 W una vez superado el transitorio. Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de $65,61 \text{ W}$, se puede calcular el rendimiento con la ecuación 21, que queda, tras sustituir, de la siguiente manera:

$$\eta_{DC/DC} = \frac{62,884 \text{ W}}{65,61 \text{ W}} \cdot 100 = 95,84 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 50% para 800 W/m^2 . Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante. Para el caso descrito, las pérdidas son de $2,726 \text{ W}$.

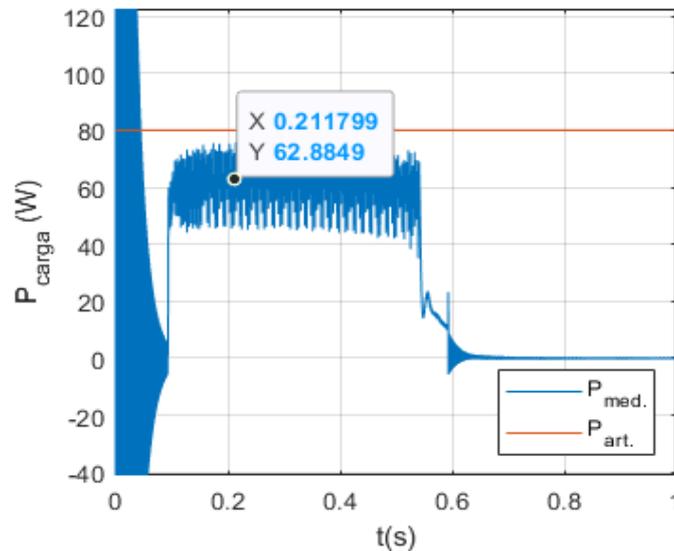


Figura 5-36. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a corriente constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,53 s, el valor de la potencia se sitúa alrededor de $62,88 \text{ W}$, que sería la máxima potencia de carga de la batería para este valor de irradiancia. El color rojo representa la potencia de referencia de 80 W tomada en el artículo, mientras que la línea azul es la potencia calculada a la salida.

La forma de onda de la potencia de salida depende fuertemente de la corriente de salida del convertidor flyback, con unos picos notables y una ligera disminución que hace que, justo antes de pasar al estado de carga a tensión constante, sea de 57 a 60 W . A los $0,53$ segundos, el sistema pasa al modo de carga a tensión constante con una referencia de $117,6 \text{ V}$ para la salida del convertidor flyback.

Para el duty cycle, el valor real es superior al teórico por las pérdidas del sistema, que no se tienen en cuenta para el diseño de un convertidor ideal. Los valores que aparecen en la gráfica oscilan, durante la carga a corriente constante y tras un período en el que el convertidor flyback está apagado, entre $0,45$ y $0,6$, sin contar los picos debidos a los transitorios cada vez que cambia la referencia de tensión.

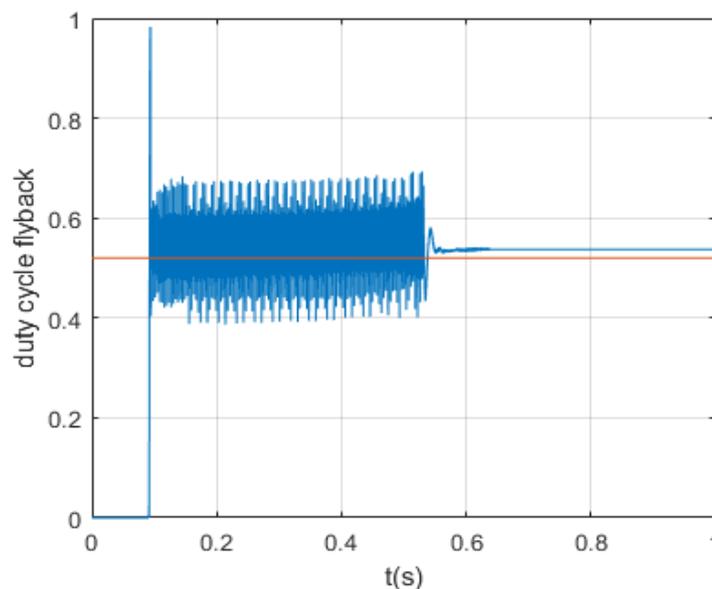


Figura 5-37. Duty cycle del convertidor flyback para 800 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los $0,1 \text{ s}$. El duty cycle presenta oscilaciones entre $0,45$ y $0,6$ durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre $0,55 \text{ s}$ y $0,63 \text{ s}$, el valor presenta un rizado poco apreciable.

Para el modo de carga a tensión constante, el valor es de 0,54 aproximadamente, sin grandes oscilaciones, tras un transitorio que se completa un poco más tarde de los 0,5 segundos.

En la gráfica inferior se aprecia cómo hasta el 97,12% del estado de carga, el porcentaje de batería crece linealmente durante la carga a corriente constante, desde un 38%, volviendo al 50% inicial a los 0,2 s, cuando se obtiene el mayor rendimiento en cuanto a potencia de carga.

El porcentaje de batería máximo que se puede alcanzar a 800 W/m^2 , irradiancia que incide en cada panel durante el experimento y que se muestra más abajo en la misma ilustración, es del 99,0368%, por lo que, a menor irradiancia, el porcentaje de batería que se podrá alcanzar será menor.

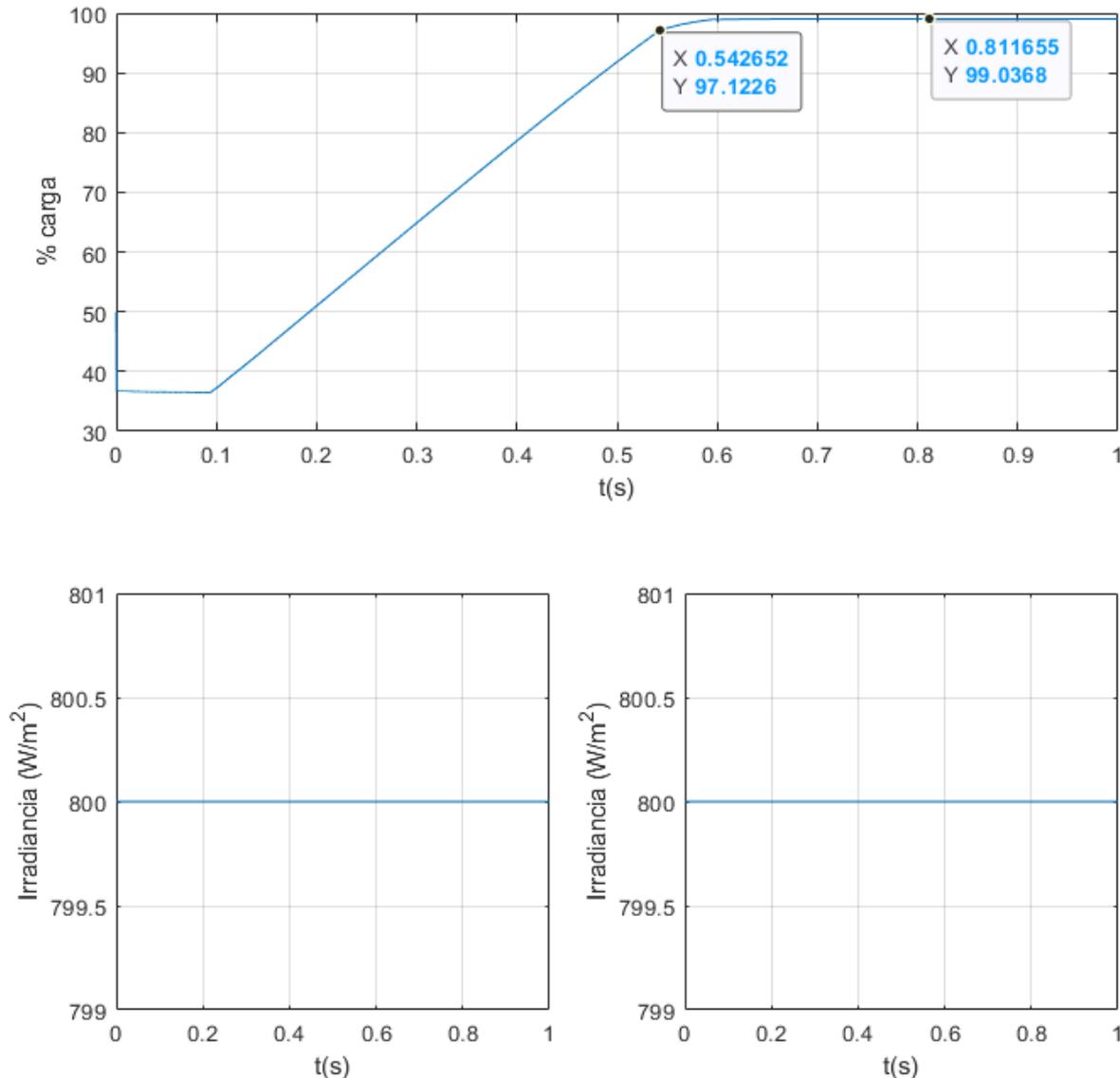


Figura 5-38. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 800 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo más de 0,53 s, el estado de carga crece hasta un 97,12%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,62 s, es del 99,03%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 800 W/m^2 durante toda la prueba.

La tensión máxima que se alcanza con este método de carga es de algo más de 117,6 V, pero esto se debe al corto espacio de tiempo que dura la parte de carga a tensión constante, que ocupa un tiempo de poco más de 0,1 s respecto al total del experimento por la escasa capacidad de la batería del experimento.

Esta tensión se da únicamente en este estado, pues esta es menor en el arranque de los convertidores, donde llega a unos 109-110 V, en el modo de carga a corriente constante y una vez la batería está cargada. Cuando la batería queda cargada la tensión baja de los 117,6 V de referencia para la carga a tensión constante.

Durante la carga a corriente constante, es posible diferenciar la zona lineal de carga de la exponencial, pues a

los 0,35 segundos se ve el cambio de curvatura, cuando ocurre nuevamente la llegada del porcentaje de batería al 70%, según se observa en la gráfica anterior.

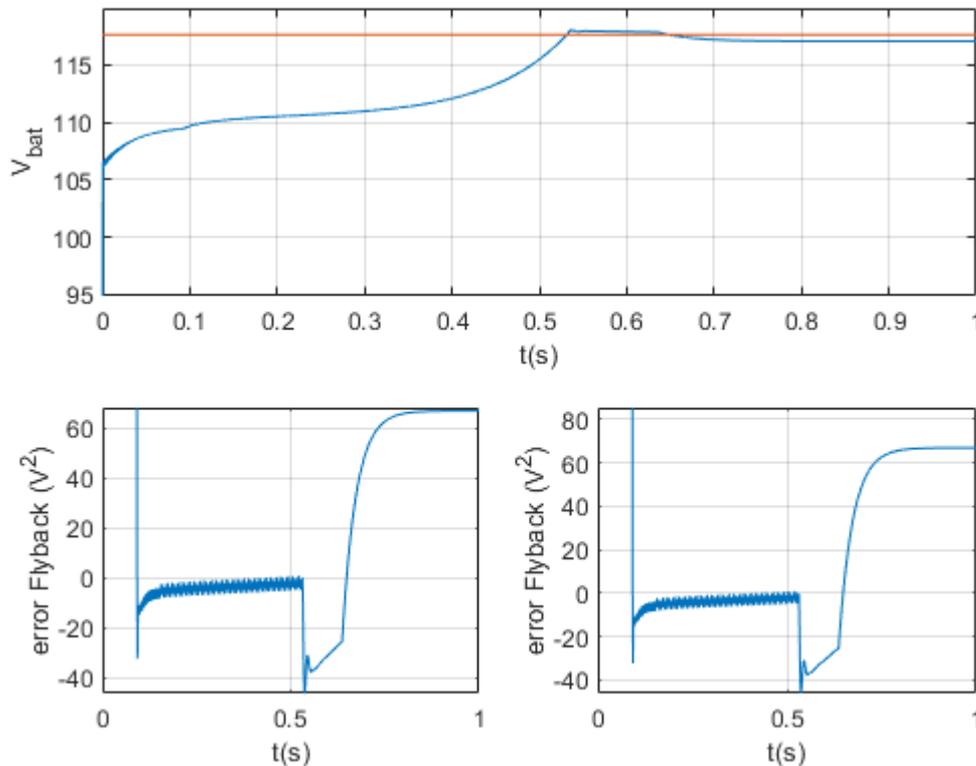


Figura 5-39. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 800 W/m^2 la carga está en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,32 s, a partir de los que la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia para el voltaje de salida del flyback la tensión máxima de la batería.

En las gráficas inferiores de la figura anterior se observa el error existente entre la tensión de referencia y la tensión medida en el sistema. Hasta 0,53 segundos la diferencia entre los 35 V de referencia para el nodo de entrada del flyback y el valor medido es muy pequeña, llegando a cero en el régimen permanente, gracias al controlador PI, llegando a cero poco antes del transitorio.

A partir de 0,5 segundos, el error en régimen permanente se acerca a cero, pero esta tendencia queda interrumpida por el tiempo del experimento respecto a la dinámica del control a tensión constante, que es más lenta, ya que la capacidad de la batería es reducida y el controlador tarda varias décimas de segundo en llegar al régimen permanente, como se verá más adelante en otros experimentos.

5.2.3 Irradiancia de 500 W/m^2

Para una irradiancia de 500 W/m^2 , los estados pasan por las mismas fases que para irradiancias anteriores. El experimento empieza con una fase de arranque, similar al caso anterior, que dura 0,1 s y que incluye la precarga del condensador en un estado de parada durante un corto período de tiempo. La carga a corriente constante dura hasta llegar a unos 0,8 s y la batería está completamente cargada a los 0,88 s.

Con una irradiancia de 500 W/m^2 , el tiempo de simulación es notablemente más largo que en el primer y segundo caso, ya que la irradiancia se aleja de los 1000 W/m^2 .

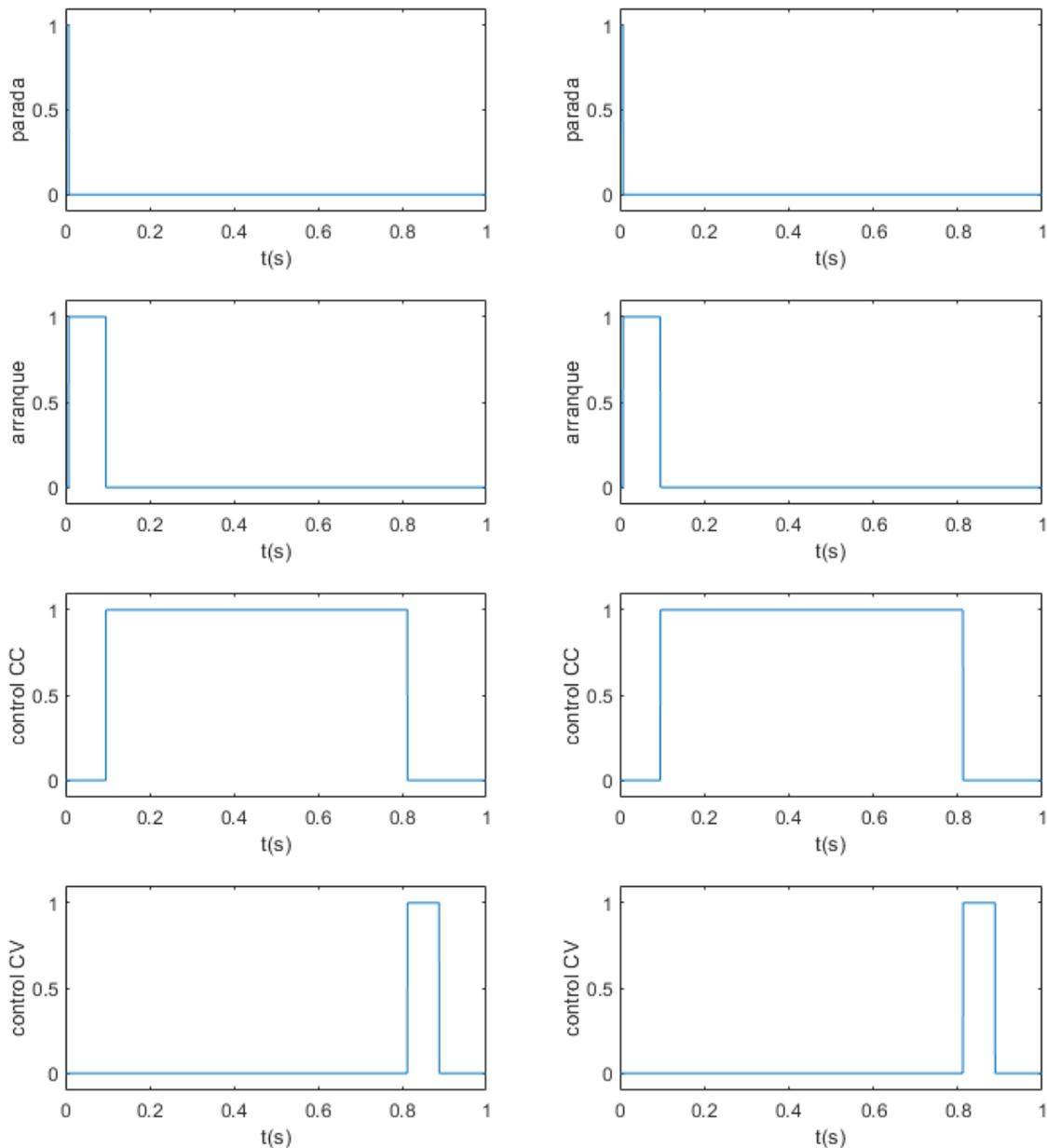


Figura 5-40. Estados de funcionamiento del sistema para el tercer experimento, con una irradiancia de 500 W/m^2 . Tanto la izquierda como la derecha corresponden a la activación de los estados de ambos paneles. De media, hasta $0,1 \text{ s}$ no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a $0,88 \text{ s}$.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador. La tensión de entrada, una vez ha terminado la fase de arranque, se establece, para la carga a corriente constante, en torno a 14 V de nuevo, una tensión que es cercana a la tensión de máxima potencia nominal tomada en las gráficas características del panel fotovoltaico, $13,87 \text{ V}$. Esta fase dura desde los $0,1$ segundos, en cuanto se alcanzan los 35 V en la salida del elevador, hasta los $0,8$ segundos, una vez se ha superado la tensión máxima de la batería durante la carga, que es la referencia de tensión para el modo de carga a tensión constante.

La tensión de salida del convertidor se lleva a 35 V mientras el convertidor elevador esté en marcha, y la referencia se entrega al convertidor elevador durante esta fase de arranque posterior a la primera carga del condensador.

En la carga a tensión constante, tras un transitorio en torno a $0,8$ segundos que se prolonga algunas centésimas de segundo, la tensión toma un valor situado por encima de la tensión de máxima potencia y por debajo de la tensión de circuito abierto, que para este caso es de 16 V , en lugar de los $16,464 \text{ V}$ de tensión nominal de circuito abierto para el panel.

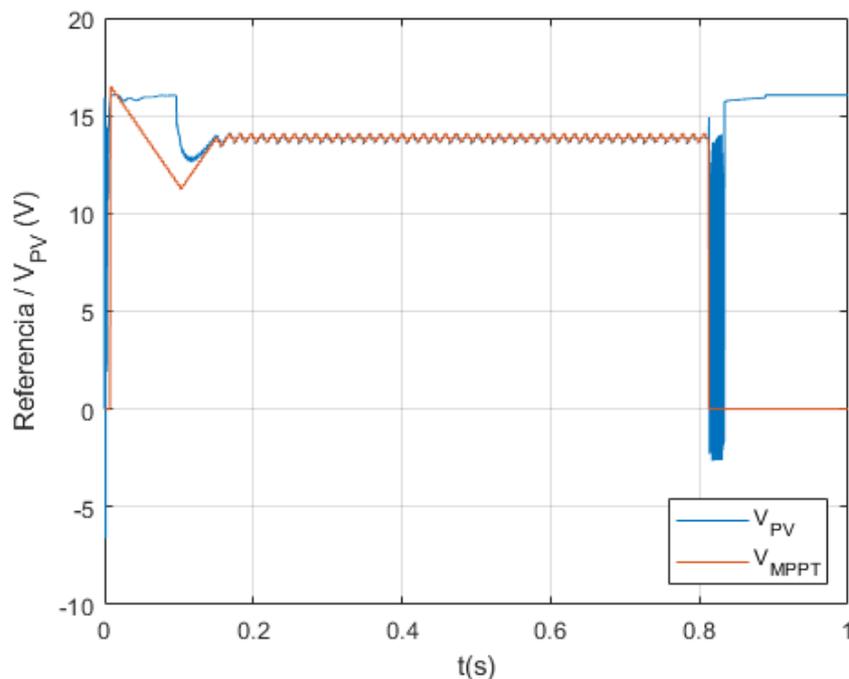


Figura 5-41. Tensión de salida del panel fotovoltaico para $500\text{W}/\text{m}^2$ y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1s y 0,82s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,15 s aprox. Desde 0,84s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva.

La tensión a la salida del convertidor elevador siempre está controlada por alguno de los controladores de los convertidores de potencia que conectan el panel fotovoltaico con la batería.

Durante el arranque, una vez se supera el umbral de 18,01 V para la tensión de salida del elevador, un PI la eleva hasta los 35 V de referencia, manteniendo el flyback apagado hasta que los 35 V quedan superados en torno a los 0,1 segundos de simulación.

Para el control a corriente constante, la tensión de salida sigue la referencia de 35 V fijada por el controlador del convertidor flyback durante este tercer estado del sistema durante los experimentos CC-CV.

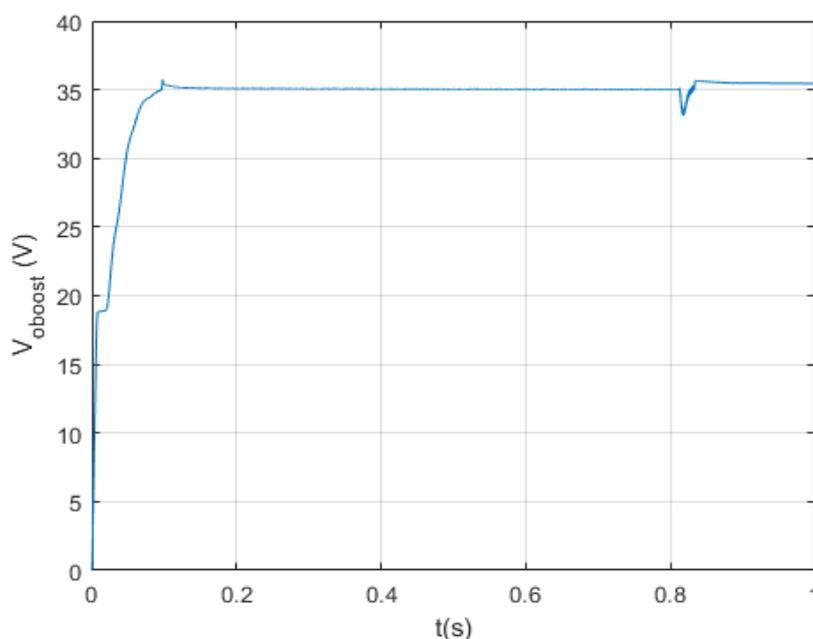


Figura 5-42. Tensión a la salida del convertidor elevador para $500\text{ W}/\text{m}^2$. Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 0,8 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante.

Cuando el experimento llega a los 0,8 segundos, es el controlador del convertidor elevador el que pasa a fijar

la tensión a la salida de este, con una referencia de 35 V, que se intenta seguir, pero permanece por encima de los 35 V de referencia por el mismo motivo que en casos anteriores, que es la corta duración de la fase de carga a tensión constante en los experimentos de carga CC-CV.

Ambos controladores, del tipo PI, aseguran un error en régimen permanente cero, como así queda registrado en la siguiente gráfica de errores para la tensión del convertidor elevador. El primer controlador PI acerca la tensión del convertidor elevador a 35 V, que es el nivel de tensión que deberá mantener en el régimen permanente sea cual sea su estado (arranque, carga a corriente constante o carga a tensión constante).

Esto se cumple, por lo que se puede observar en este experimento, en el estado de carga de la batería a corriente constante, donde el error es cero por los transitorios existentes cuando sube o baja la referencia de tensión dada por el MPPT, y se verá más adelante en los experimentos con carga a tensión constante.

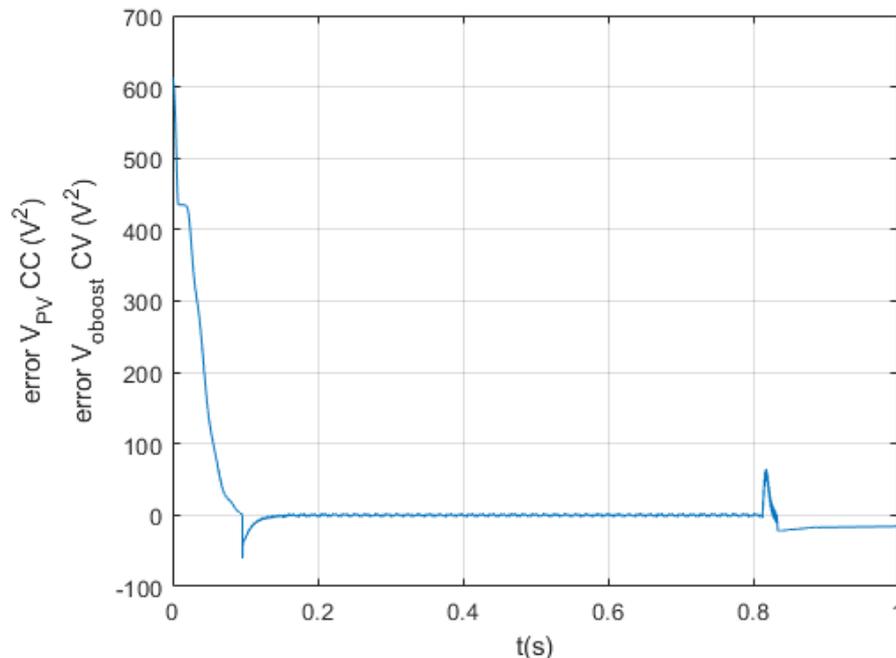


Figura 5-43. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante la prueba a 500 W/m^2 de irradiancia. A partir de 0,1s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están barajando.

La tensión de salida del panel fotovoltaico, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor elevador, al considerar ideales los diodos de bloqueo, presenta, durante el modo de carga de la batería a corriente constante, una serie de oscilaciones debidas al algoritmo MPPT. Las oscilaciones vienen dadas por las variaciones en la referencia de tensión de máxima potencia existentes durante la fase de carga a corriente constante.

Observando con detalle, los niveles de tensión medidos tienen un máximo de 14,07 V y de mínimo 13,63 V, con una variación de 0,44 V entre el valor máximo y mínimo de la tensión de referencia. Respecto a las variaciones de la tensión debidas al ruido y al rizado en la entrada, en los niveles de tensión, máximo, medio y mínimo del régimen permanente, son muy similares y despreciables.

El valor medio de la tensión de salida del panel es de 13,85 V, con un incremento total de 430 mV. Si se tiene en cuenta las variaciones de la tensión una vez se alcanza el valor de referencia dado, el rizado es bastante menor, de 0,025 V. El rizado relativo para este último valor es inferior al 1%, mientras que si se tiene en cuenta el total de las variaciones pasa a ser del 3,1%, tomando en cuenta el valor medio de tensión calculado anteriormente. Este valor es similar a los 13,87 V de tensión de máxima potencia para 500 W/m^2 en condiciones ideales.

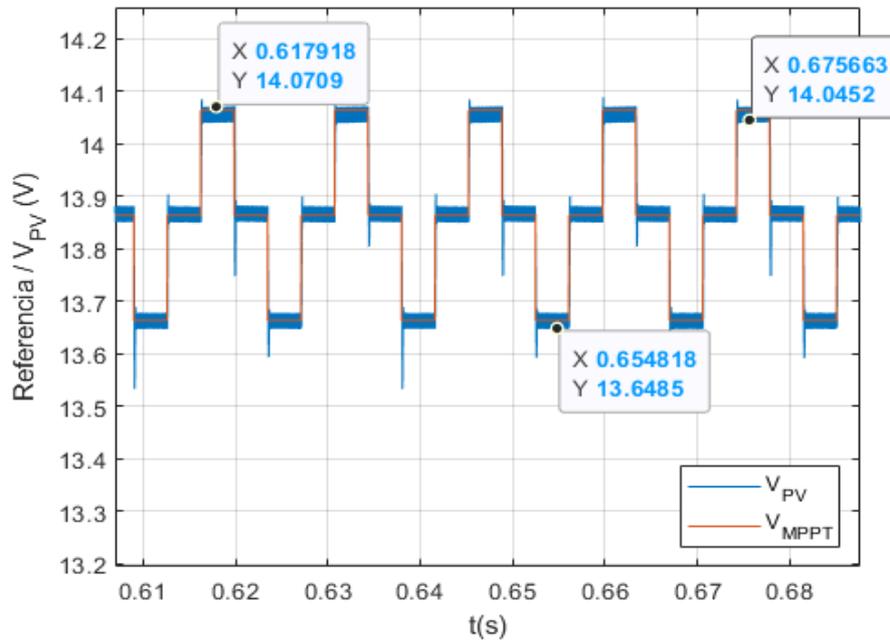


Figura 5-44. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 500W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

La siguiente gráfica muestra cómo la corriente de la bobina del convertidor elevador, que es la misma que la que entra en el convertidor elevador, toma valores cercanos a los 2,95 A especificados para la corriente de salida del panel fotovoltaico durante el régimen permanente del modo de carga a corriente constante de la batería.

Previamente, durante el arranque, la corriente es cero durante casi todo el tiempo, excepto en algunos instantes en los que la tensión a la salida del convertidor elevador crece hacia los 35 V, una vez se ha completado la precarga del condensador.

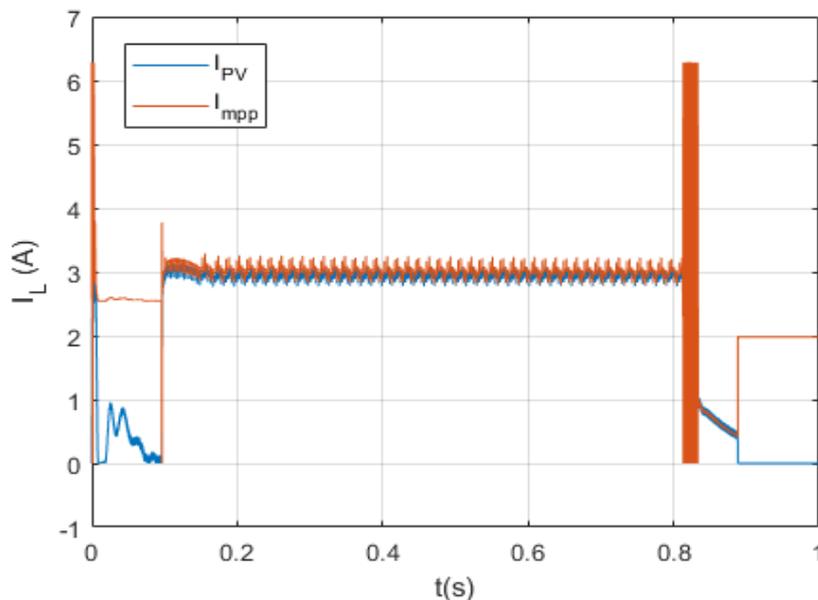


Figura 5-45. Corriente de la bobina del convertidor boost a 500 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente oscila alrededor de 3 A, por el algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 0,88 s la carga de la batería se corta.

Durante el transitorio del control a corriente constante, la corriente en la bobina supera los 3 A levemente, mientras que, en el modo de control a tensión constante, va disminuyendo progresivamente después de un transitorio en el que cae bruscamente de 3 A hasta 1 A aproximadamente. Cuando la corriente llega a un valor situado en aproximadamente 0,5 A, la carga de la batería se corta, tras haber alcanzado la máxima carga.

Si se observa con detalle la corriente durante la carga de la batería a corriente constante, el valor máximo es de 3,044 A y el mínimo de 2,838 A. El rizado total, una vez se tienen en consideración las variaciones debidas por el algoritmo MPPT, este es de 206 mA, casi el doble que el rizado de diseño, lo que en valores relativos supone un 7 % de la corriente que atraviesa la bobina, aunque el rizado del 2% solo aplica para 1000 W/m². La corriente media de la bobina es de 2,941 A en este estado, un valor similar al teórico. Si se tiene en cuenta únicamente uno de los niveles de la corriente (el superior, aunque podría ser cualquiera), el rizado es de 119 mA, el mismo que se calculó al principio.

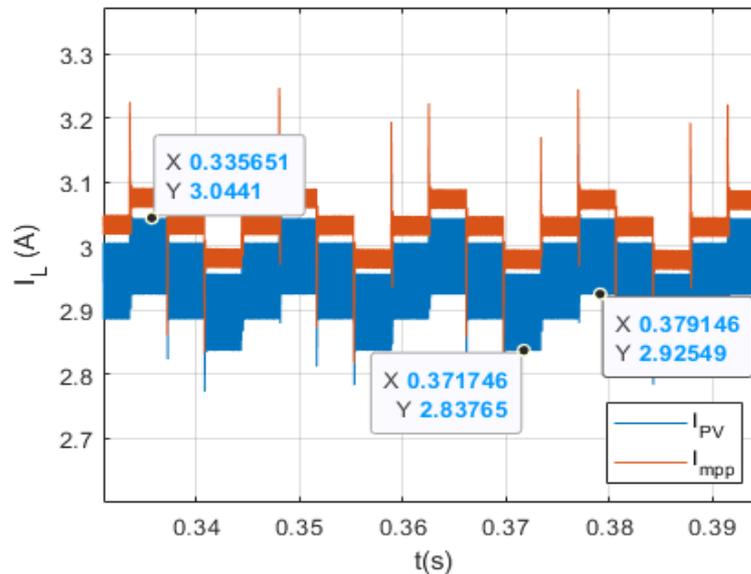


Figura 5-46. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 500W/m² y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

El error en régimen permanente de los modos de control donde interviene un PI en el control de la corriente de la bobina, para fijar la corriente de esta una vez se le entrega una referencia calculada a partir de una potencia de referencia fijada por los controladores PI de tensión, del algoritmo MPPT o no, sea para la tensión de entrada en el primer caso o la de salida del convertidor en el segundo, es cero. Esto se cumple mientras la batería reciba algún tipo de carga en forma de corriente.

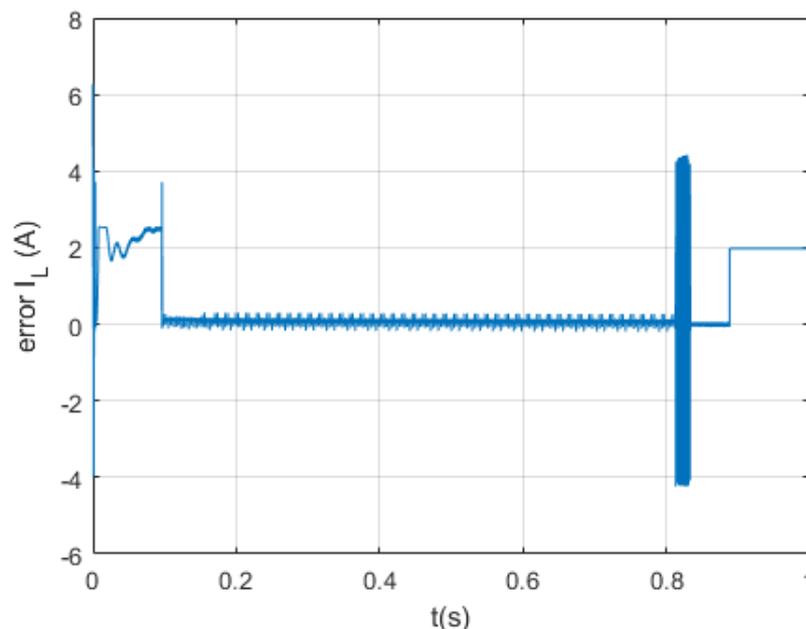


Figura 5-47. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 500 W/m². Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 0,82 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 0,88 s.

El único punto donde el error no es nulo es en los transitorios de arranque y de un modo de carga a otro. En la gráfica de los errores se puede observar también que, durante los modos de parada, arranque y parada por carga completa de la batería, el error no se tiene en cuenta, pues la corriente de la bobina es cero en esos estados del sistema y la referencia no la fija ningún controlador.

El duty cycle del convertidor elevador presenta grandes variaciones, con un valor medio similar al teórico para el convertidor elevador, 0,604 en este caso. El duty cycle satura también cada vez que hay un transitorio.

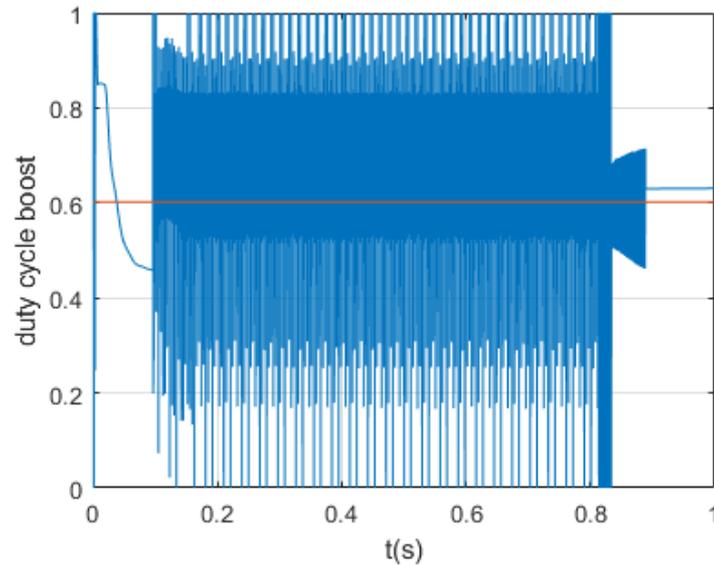


Figura 5-48. Duty cycle del convertidor elevador a 500 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,83 s el duty cycle oscila en torno a 0,7 mientras dure el control a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 0,83 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor y el duty cycle toma un valor de 0,6 de media. En rojo está dibujado el duty cycle teórico, 0,602, mientras que en azul está el duty cycle medido.

Por lo general, según lo que se observa en la gráfica, el duty cycle, si se eliminan los picos, toma valores entre 0,35 y 0,9 la mayor parte del tiempo durante la fase de carga a corriente constante, si se excluyen los transitorios.

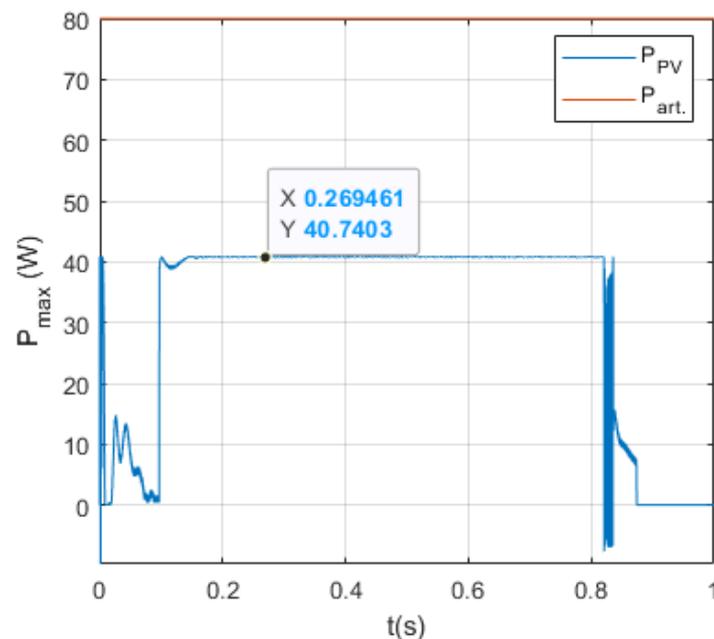


Figura 5-49. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 500 W/m^2 . Entre 0,1s y 0,82s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 40,74 W. En la parte de control a tensión constante, el valor de potencia cae a menos de la mitad al principio de esta fase.

Tras el paso del estado de carga a corriente constante al de carga a tensión constante, las variaciones son menores que en el estado anterior, permaneciendo igual el valor medio. Con estos valores de duty cycle, la potencia máxima es de 40,74 W, valor cercano a la especificación del panel fotovoltaico para esta irradiancia de 500 W/m², de 40,9 W. Para el modo de carga a tensión constante, esta potencia decae rápidamente al principio, tomando valores por debajo de 20 W casi todo el tiempo que el sistema permanece en el estado de carga a tensión constante. El corte se produce por debajo de 10 W, a unos 8 W.

Pasando al convertidor flyback, la corriente de entrada es el primer resultado de los vistos porque la tensión de entrada de este y la de salida del elevador coinciden al medirse en el mismo nodo.

La corriente de entrada del convertidor flyback, que es la que atraviesa el MOSFET de este convertidor, es de unos 2,15 A aproximadamente durante la fase de control a corriente constante. En cuanto el sistema cambia al modo de carga a tensión constante, la corriente de entrada del convertidor flyback va disminuyendo, al igual que pasa para los casos anteriores y para el convertidor elevador.

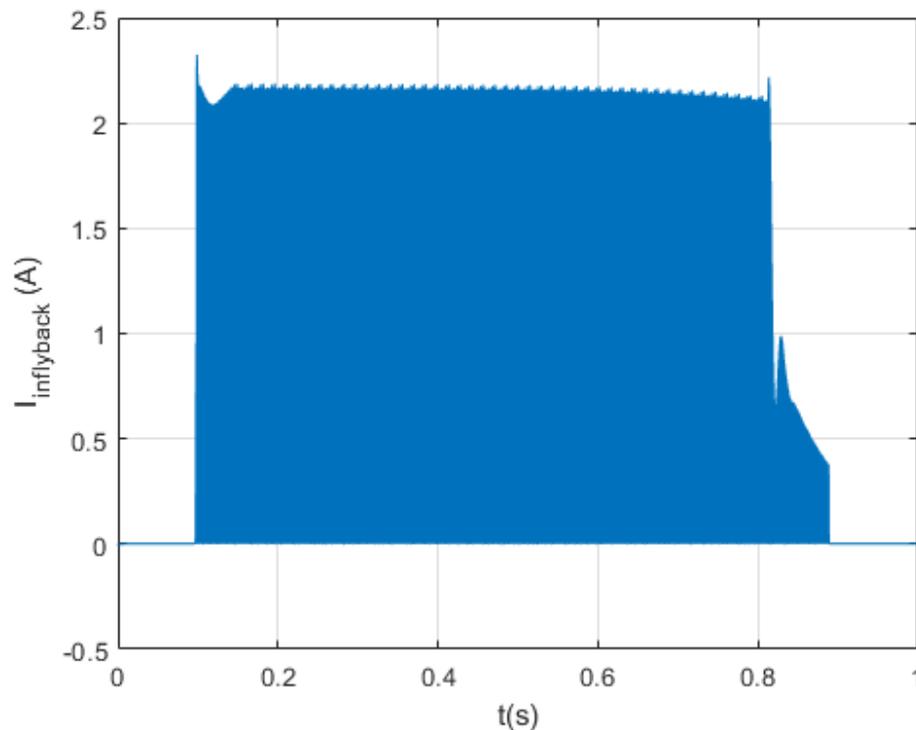


Figura 5-50. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 500 W/m² de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,15 s y 0,82 s, esta corriente supera los 2 A. Entre 0,82 s y 0,88 s se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte.

Si se observa el detalle, durante una fracción del *duty cycle* la corriente de entrada en el flyback es una corriente pulsada, con un rizado propio de una bobina en régimen permanente de conmutación del MOSFET. Esta bobina corresponde al modelo de bobina de magnetización del transformador, que no existe, pero se toma como parte del circuito de un convertidor flyback ideal, para calcular sus parámetros.

Durante este tramo en el que se amplía la gráfica, la corriente de entrada de este convertidor varía, cuando no es cero, entre 2,115 A y 2,162 A de valores mínimo y máximo. Esto supone un rizado, teniendo en cuenta los decimales de las etiquetas, de 47 mA.

El valor relativo se calcula a partir de la corriente media de salida, que para 800 W/m² es de 2,328 A, tal y como se calcula a partir de la corriente de entrada y el duty cycle del convertidor elevador:

$$I_o = 2,95 \text{ A} \cdot (1 - 0,604) = 1,168 \text{ A}$$

El rizado relativo, con los 47 mA de rizado absoluto y el valor de I_o de 1,168 A se queda en un 4,02% del valor medio calculado.

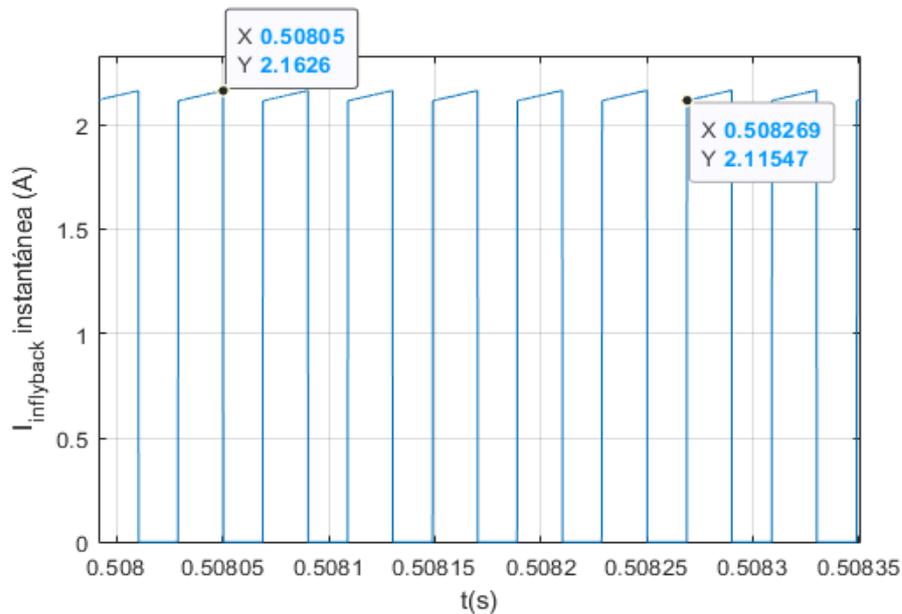


Figura 5-51. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 500 W/m^2 y control a corriente constante en régimen permanente. Los valores señalados son el máximo y el mínimo de la corriente del MOSFET en estado de conducción.

La corriente de la batería es la suma de todas las corrientes que salen de cada uno de los convertidores flyback y no debe ser mayor, por especificaciones, de 1,5 A.

Para dos paneles, esta corriente que entra es de 0,711 A de media, aunque tiene picos causados por el transitorio del control MPPT. Tras una primera fase de precarga y arranque, un transitorio de 0,1 segundos la lleva a su valor máximo, que no supera la corriente máxima de la batería. En este caso, los cuatro paneles podrían alimentar a la vez una sola rama de celdas en serie de la batería.

Entre 0,2 y 0,5 s, la corriente tiene una pequeña disminución derivada de la forma de fijar la referencia de corriente para este estado del sistema a partir de la tensión de entrada del flyback, que se mantiene en 35 V.

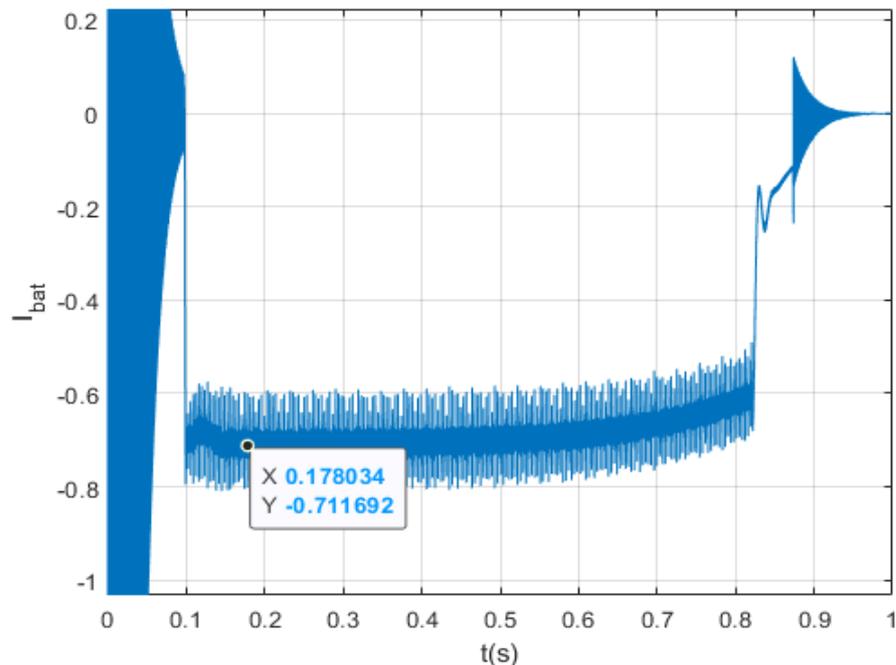


Figura 5-52. Corriente de la batería durante la carga a 500 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 0,82 s. Entre 0,82 s y 0,88 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte.

En el estado de carga a tensión constante, la corriente disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor de corte, unos 110 mA, en el que se considera cargada la batería. Una vez cargada, ambos convertidores se apagan y la corriente de la batería es cero. En la gráfica, el signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando.

Como la corriente anterior es la suma de todas las corrientes de salida de los convertidores, y en el experimento se están teniendo en cuenta dos paneles fotovoltaicos en lugar de los cuatro o más que pueden montarse en la superficie de un turismo, la corriente de salida de un convertidor flyback es la mitad de la corriente anterior, unos 0,355 A.

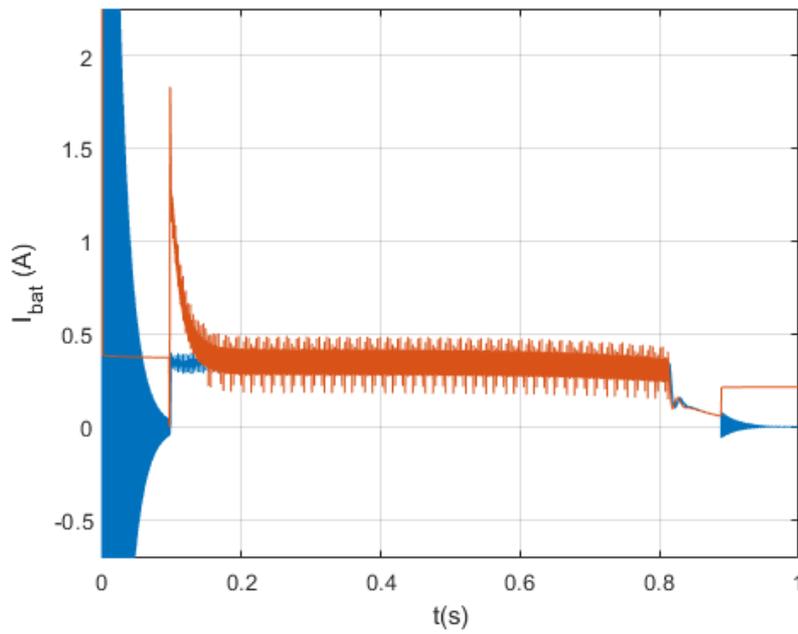


Figura 5-53. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 500 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,82 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 0,82 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 0,88 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga. El color naranja representa la referencia y el color azul la corriente medida.

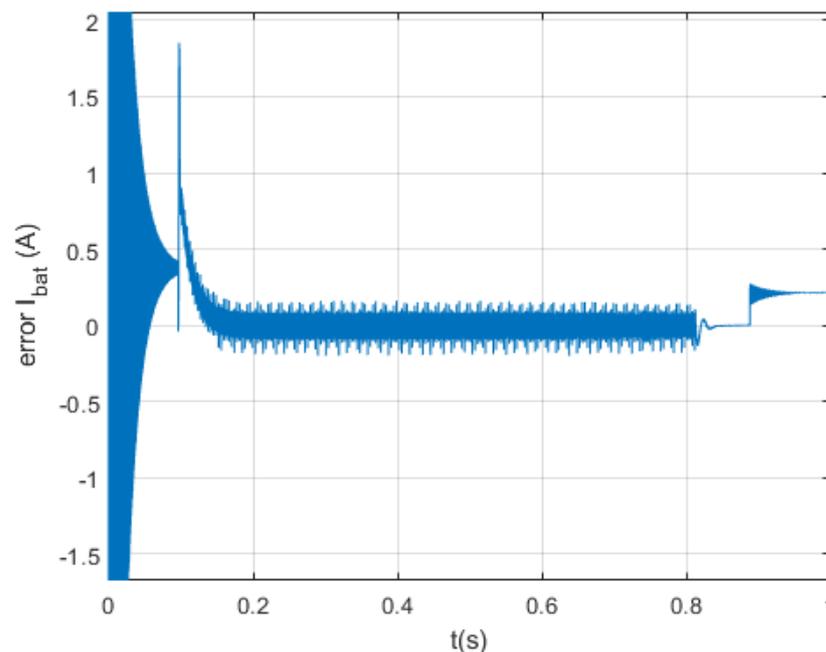


Figura 5-54. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 0,82 y 0,88 segundos.

Tanto los valores de referencia como los medidos coinciden en la mayor parte del tiempo en el modo de control a corriente constante, que comienza a partir de los 0,1 segundos. Como la referencia de corriente va fijada por tensión, hasta que no finaliza el transitorio que existe al principio del tramo de la fase de carga de la batería a corriente constante no hay un seguimiento real de la referencia por parte del controlador.

Si se tienen en cuenta los picos y no únicamente el valor medio, la corriente presenta pequeñas variaciones en torno a un punto situado en el rango de corrientes de 0,35A a 0,4 A, como se observa en la gráfica. Para el control a tensión constante, una vez se pasa el transitorio existente en torno a 0,5 segundos, la corriente disminuye progresivamente hasta 0,055 A, que es la mitad del valor de la corriente de corte de la batería. A partir del corte, la corriente pasa a ser cero.

El error en régimen permanente, que debe tenerse en cuenta únicamente para los estados del sistema donde se carga la batería, es cero, aunque para el estado de carga a corriente constante hay una variación de pico a pico que no supera los 0,15 A de error normalmente, contando a partir del cero.

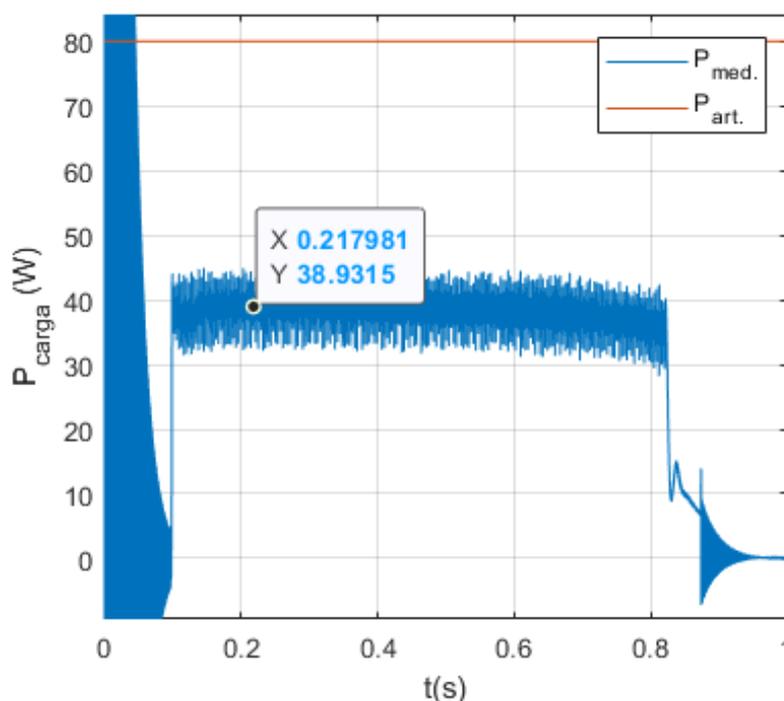


Figura 5-55. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,1 s hasta los 0,82 s, el valor de la potencia se sitúa en 38,93 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería para este nivel de irradiancia.

En el caso de la potencia de salida de cada convertidor elevador, para 500 W/m^2 es de media de 38,93 W, aunque la instantánea puede variar entre 35 y 42 W una vez superado el transitorio. Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de 40,74 W, el rendimiento se calculará con la ecuación 21, vista en el experimento de 1000 W/m^2 . Si se sustituye, el rendimiento calculado es el siguiente:

$$\eta_{DC/DC} = \frac{38,93 \text{ W}}{40,74 \text{ W}} \cdot 100 = 95,55 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 50% para 500 W/m^2 . Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante. Para el caso descrito, las pérdidas son de 1,81 W.

La forma de onda de la potencia de salida depende de lo que haga la corriente de salida del convertidor flyback, ya que presenta, al igual que la corriente de salida del flyback, una ligera disminución que hace que, justo antes de pasar al estado de carga a tensión constante, sea de 35 W de media, aproximadamente. A los 0,82 segundos, el sistema pasa al modo de carga a tensión constante con una referencia de 117,6 V para la salida del convertidor flyback.

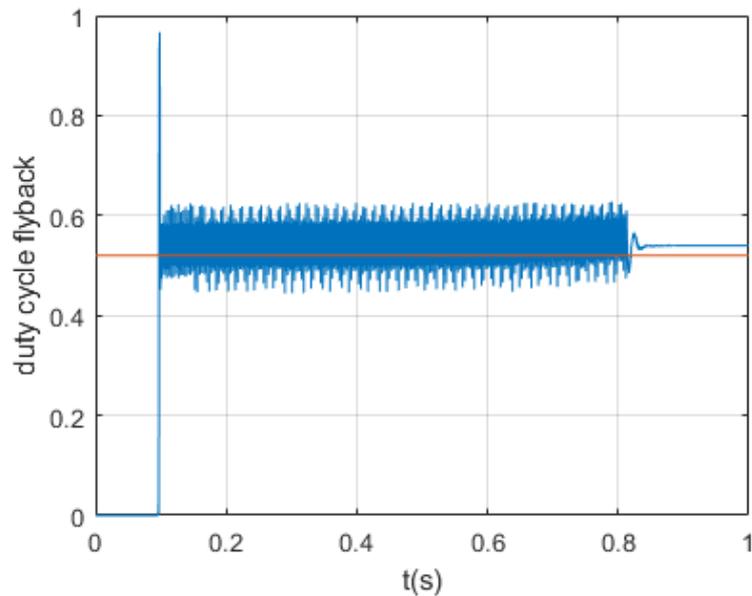


Figura 5-56. Duty cycle del convertidor flyback para 500 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,5 y 0,58 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 0,82 s y 0,88 s, el valor presenta un rizado poco apreciable.

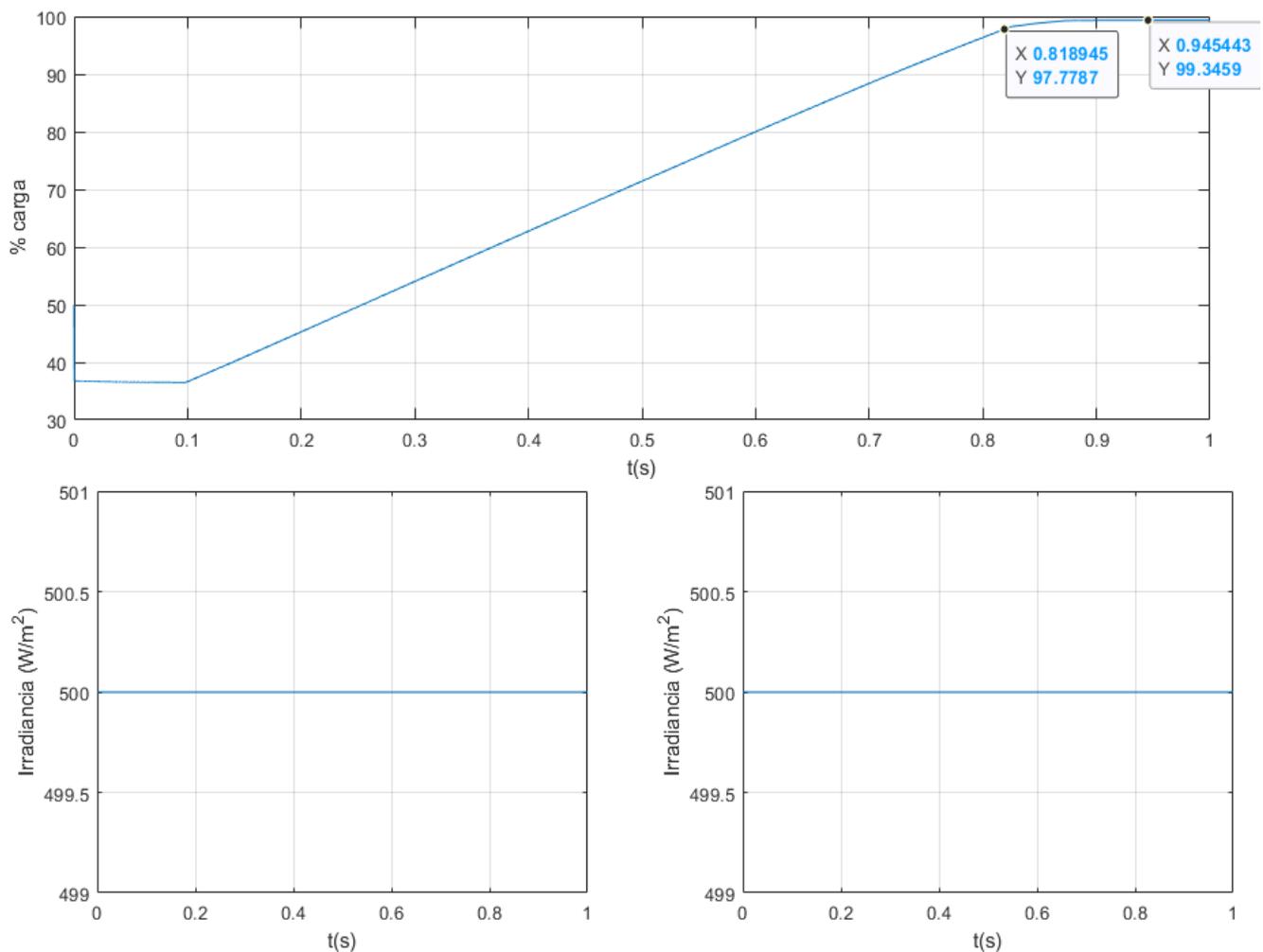


Figura 5-57. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para 500 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y algo más de 0,8 s, el estado de carga crece hasta un 97,78%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 0,88 s, es del 99,34%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 500 W/m^2 durante toda la prueba.

Para el duty cycle, visto en la primera figura de la página anterior, la número 5-56, el valor real es ligeramente superior al teórico, debido principalmente a las pérdidas del sistema, que no se tienen en cuenta para el diseño de un convertidor ideal. Los valores que aparecen en la gráfica oscilan, durante la carga a corriente constante, tras un período en el que el convertidor flyback está apagado, entre 0,5 y 0,6, sin contar los picos debidos a los transitorios cada vez que cambia la referencia de tensión.

Para el modo de carga a tensión constante, el valor es de 0,55 aproximadamente, sin grandes oscilaciones, tras un transitorio que se completa un poco más tarde de los 0,5 segundos.

En la segunda figura de la página anterior, la número 5-57, se aprecia cómo, al 97,78%, el estado de carga o porcentaje de batería crece linealmente hasta este valor, durante la carga a corriente constante, desde un 38%, volviendo al 50% inicial a los 0,25 s, cuando se obtiene el mayor rendimiento en cuanto a potencias.

El porcentaje de batería máximo que se puede alcanzar a 500 W/m^2 , irradiancia que incide en cada panel durante el experimento y que se muestra más abajo en la misma ilustración, es del 99,35%.

La tensión máxima que se alcanza con este método de carga es de algo más de 117,6 V, pero esto se debe al corto espacio de tiempo que dura la parte de carga a tensión constante, debido a la duración de la batería.

Esta tensión se da únicamente en este estado, siendo menor en el arranque de los convertidores, donde llega a unos 109-110 V, en el modo de carga a corriente constante y una vez la batería está cargada. Cuando la batería queda cargada la tensión baja de los 117,6 V de referencia para la carga a tensión constante.

Durante la carga a corriente constante, es posible diferenciar en la siguiente gráfica la zona lineal de carga de la exponencial, que hace su transición a los 0,45 segundos, aproximadamente, cuando el porcentaje de batería se acerca al 70%, según se observa en la gráfica anterior.

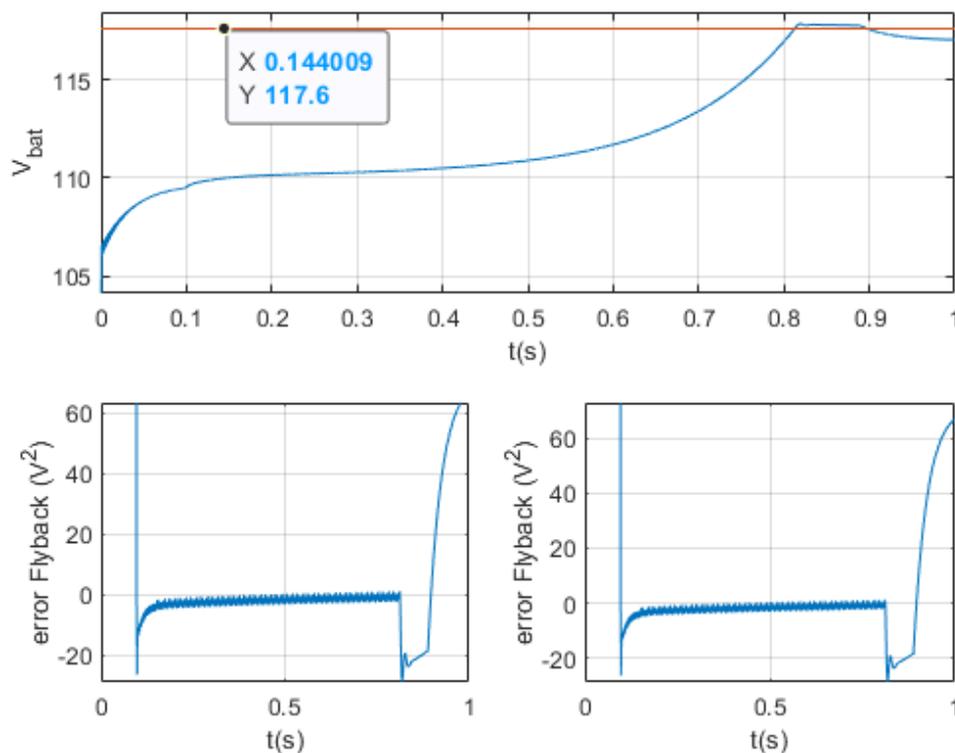


Figura 5-58. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 500 W/m^2 la batería se carga en fase lineal desde los 0,1 s hasta los 0,4 s, cuando la tensión pasa a crecer de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería.

En las gráficas inferiores de la figura anterior se observa el error existente entre la tensión de referencia y la tensión medida en el sistema. Hasta 0,8 segundos la diferencia entre los 35 V de referencia para el nodo de

entrada del flyback y el valor medido es muy pequeña llegando a cero en el régimen permanente, gracias al controlador PI.

A partir de 0,8 segundos, y hasta los 0,88 segundos, el error en régimen permanente se reduce, pero el tiempo del experimento y la capacidad de la batería no dejan ver el momento en el que este llega a cero. Esto significa que la dinámica del controlador de la carga en control CV es lenta respecto a los tiempos de simulación que se consideran para este experimento.

5.2.4 Irradiancia de 300 W/m²

Para una irradiancia de 300 W/m², la máxima potencia generada no será el valor nominal del panel fotovoltaico, pues solo se da para una irradiancia de 1000 W/m². Este experimento es el más largo de todos, y su duración alcanza los dos segundos, ya que a 300 W/m² la potencia generada es muy baja respecto a lo visto en los casos anteriores.

Como se vio en el experimento anterior, los estados pasan por una fase de arranque, similar al caso anterior, que dura 0,1 s y que incluye la precarga del condensador en un estado de parada durante un corto período de tiempo. La carga a corriente constante dura hasta llegar a unos 1,4 s y la batería está completamente cargada poco tiempo después.

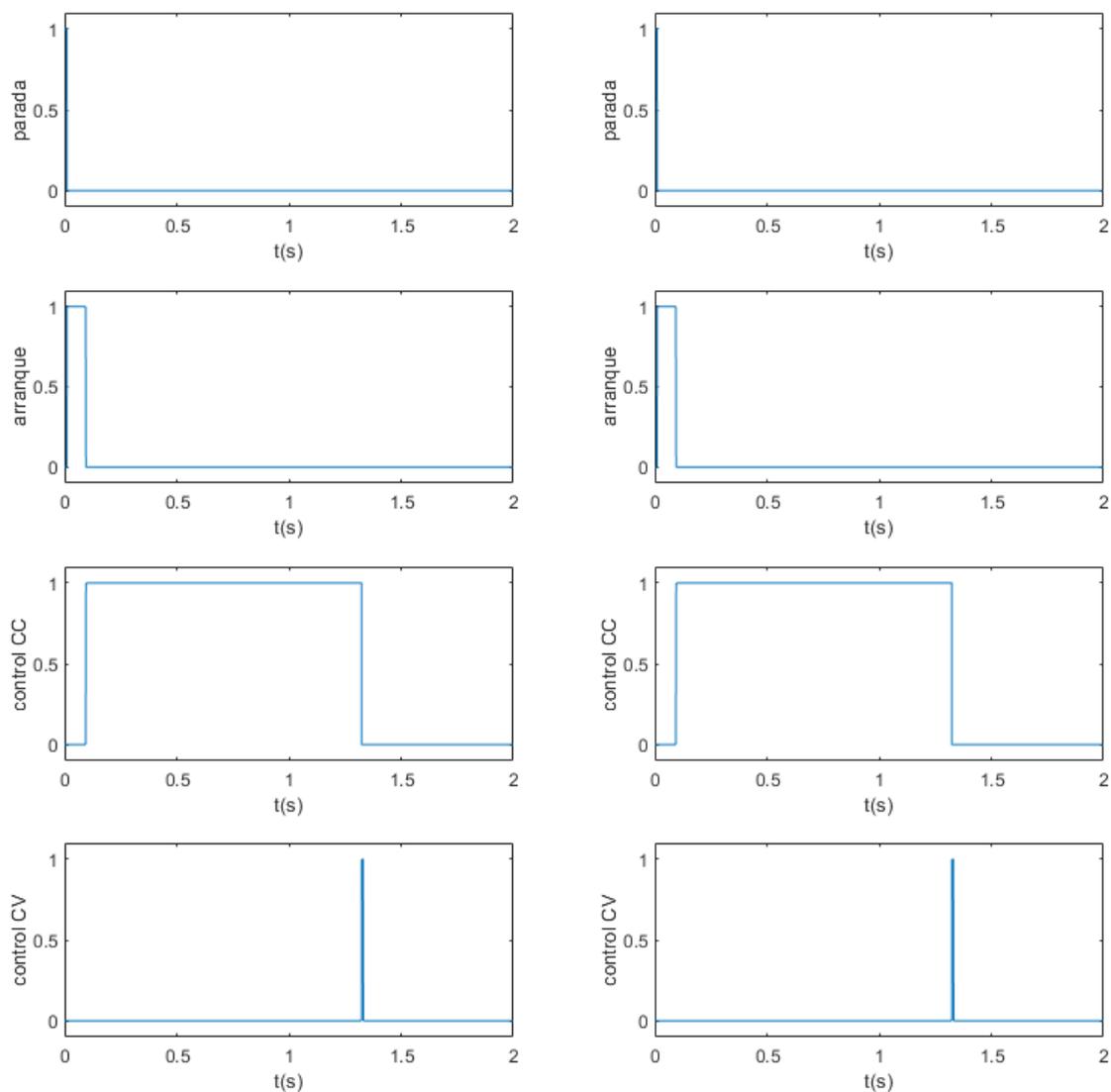


Figura 5-59. Estados de funcionamiento del sistema durante el experimento con irradiancia de 300 W/m². Las gráficas de la izquierda y de la derecha corresponden a los estados de funcionamiento de los dos paneles. De media, hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema al completo, que se detiene al alcanzar la carga completa en torno a 1,42 s.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador. La tensión de entrada, una vez ha terminado la fase de arranque, se establece, para la carga a corriente constante, por debajo de los 14 V todo el tiempo. Con esta irradiancia, la tensión de máxima potencia tiene un valor cercano a los 13,63 V de tensión de máxima potencia nominal. Esta fase dura desde los 0,1 segundos, en cuanto se alcanzan los 35 V en la salida del elevador, hasta los 1,4 segundos, cuando se supera, brevemente, la tensión máxima de la batería durante la carga.

La tensión de salida del convertidor se lleva a 35 V mientras el convertidor elevador esté en marcha, y la referencia se entrega al convertidor elevador durante esta fase de arranque posterior a la precarga del condensador.

En la carga a tensión constante, tras un transitorio en torno a 1,4 segundos que se prolonga unas pocas centésimas de segundo, la tensión toma un valor situado por encima de la tensión de máxima potencia y por debajo de la tensión de circuito abierto, que para este caso es inferior a la nominal, de 15,68 V en lugar de los 16,464 V de tensión de circuito abierto para el panel cuando la irradiancia es de 1000 W/m². La fase de control a tensión constante dura un corto espacio de tiempo, y esto pasa porque el panel no puede generar una potencia que se consume rápidamente por parte del convertidor.

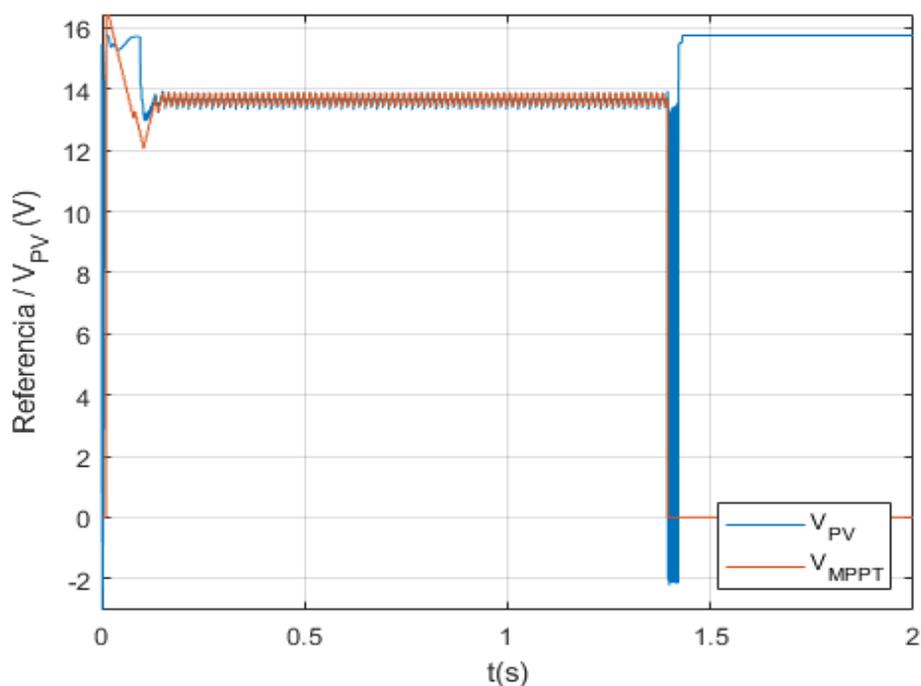


Figura 5-60. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 300W/m² y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,15s y 1,4s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que se alcanza a los 0,1 s aprox. Desde 1,4s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva.

La tensión a la salida del convertidor elevador siempre está controlada por alguno de los controladores de los convertidores de potencia que conectan el panel fotovoltaico con el nodo de salida del flyback, que da a la batería, aunque no lo hace directamente porque existe un filtro LC.

Durante el arranque, una vez se supera el umbral de 21,07 V para la tensión de salida del elevador, un PI lleva esta tensión a 35 V de referencia, con el flyback apagado hasta que se alcanzan en torno a 0,1 segundos.

Para el control a corriente constante, la tensión de salida sigue la referencia de 35 V dada al controlador del convertidor flyback, que fija la referencia de corriente a la salida del flyback en el modo de carga de la batería a corriente constante.

Cuando el control de la carga pasa a ser a tensión constante a los 1,4 segundos, el controlador del convertidor elevador pasa a fijar la tensión a la salida de este, con una referencia de 35 V, que intenta seguir pero que se queda en más de los 35 V dados como referencia por la escasa duración de la carga a tensión constante y por la capacidad definida para la batería en estos experimentos de carga CC-CV destinados a estudiar un comportamiento general de la batería.

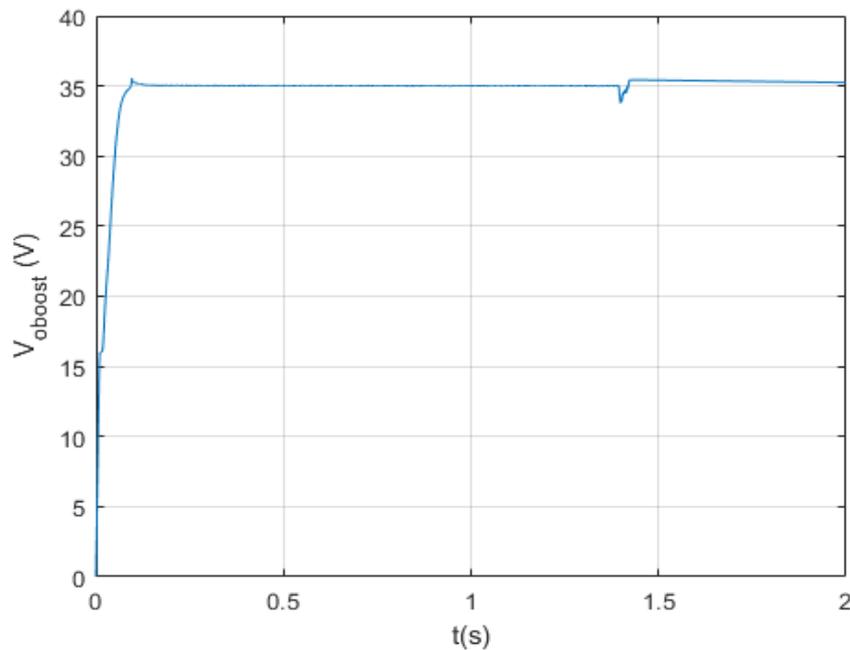


Figura 5-61. Tensión a la salida del convertidor elevador para 300 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V en un tiempo inferior al seguimiento de la referencia MPPT por parte del convertidor elevador e intenta mantenerlos a partir de 1,4 s, tras el transitorio de carga a tensión constante a carga a corriente constante.

Ambos controladores, al ser proporcionales e integrales (PI) aseguran un error en régimen permanente nulo, como así pone de manifiesto la siguiente gráfica de errores. El primer controlador PI acerca la tensión del convertidor elevador a 35 V, que es el nivel de tensión que deberá mantener en el régimen permanente sea cual sea su estado (arranque, carga a corriente constante o carga a tensión constante).

Esto se cumple, por lo que se puede observar en este experimento, en el estado de carga de la batería a corriente constante, donde si el error se aleja de cero es por los transitorios cada vez que sube o baja la referencia de tensión dada por el MPPT, y se verá más adelante en la carga a tensión constante durante los experimentos de carga a alto porcentaje de batería.

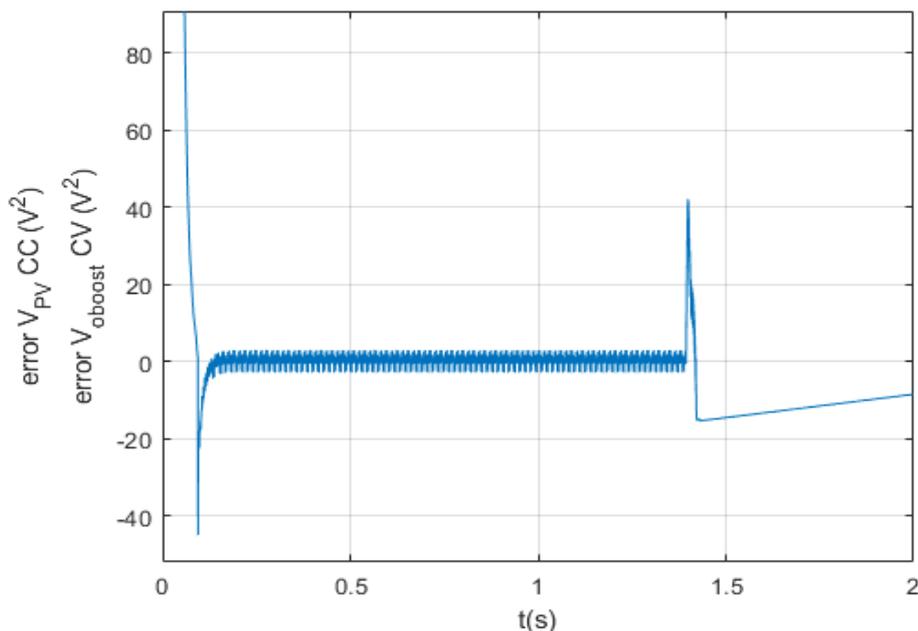


Figura 5-62. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador en el experimento para 300 W/m^2 . A partir de 0,1s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,15s, cuando la referencia de tensión se alcanza para el control MPPT. En la fase de control a tensión constante el error no llega a ser nulo por la lenta dinámica del controlador respecto a los tiempos de simulación que se están empleando.

La tensión de salida del panel fotovoltaico, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor elevador, al considerar ideales los diodos de bloqueo, presenta, durante el modo de carga de la batería a corriente constante, una serie de oscilaciones debidas al algoritmo MPPT. Las oscilaciones vienen dadas por las variaciones en la referencia de tensión de máxima potencia, que tiene un valor que no es constante una vez alcanzado el valor de tensión de máxima potencia.

Los niveles de tensión medidos tienen de máximo 13,87 V y de mínimo 13,44 V, con una variación de 0,4 V entre el valor máximo y mínimo de la tensión de referencia. Respecto a las variaciones de la tensión debidas al ruido y al rizado en la entrada, en todos los niveles de tensión, máximo y mínimo del régimen permanente, son muy similares independientemente de los incrementos o decrementos existentes al deberse al condensador situado en paralelo al panel fotovoltaico.

El valor medio de la tensión de salida del panel es de 13,65 V, con un incremento total de 450 mV. Si se tiene en cuenta las variaciones de la tensión una vez se alcanza el valor de referencia dado, el rizado es bastante menor, de 0,03 V. El rizado relativo para este último valor es inferior al 1%, mientras que si se tiene en cuenta el total de las variaciones pasa a ser del 3,15%, tomando en cuenta el valor medio de tensión calculado anteriormente.

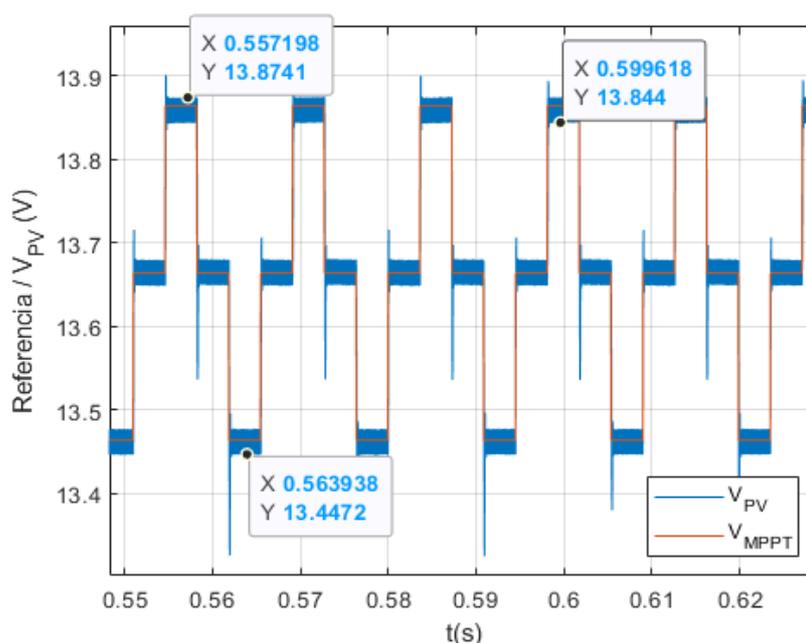


Figura 5-63. Detalle de la tensión de salida del panel y referencia para 300W/m² y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

La siguiente gráfica muestra cómo la corriente de la bobina del convertidor elevador, que es la misma que la que entra en el convertidor elevador, toma valores cercanos a los 2 A especificados para la corriente de salida del panel fotovoltaico durante el régimen permanente del modo de carga a corriente constante de la batería.

Previamente, durante el arranque, la corriente es cero durante casi todo el tiempo, excepto en algunos instantes, principalmente cuando la tensión a la salida del convertidor elevador iba subiendo a los 35 V por primera vez tras la precarga del condensador al inicio del experimento.

Durante el transitorio del control a corriente constante, la corriente en la no llega a superar los 2 A, mientras que, en el modo de control a tensión constante cae bruscamente de 2 A algo menos de 1 A. Cuando la corriente llega a un valor situado en aproximadamente 0,5 A, la carga de la batería se corta, tras haber alcanzado el punto de máxima carga. Como el valor inicial del modo de control a tensión constante se acerca mucho al de corte, este dura muy poco tiempo.

Si se observa con detalle la corriente durante la carga de la batería a corriente constante, el valor máximo es de 1,854 A y el mínimo de 1,684 A. Aunque la bobina esté diseñada para un cierto valor de rizado de 118 mA, el rizado total, una vez se tiene en cuenta las variaciones introducidas por el algoritmo MPPT, este es de 170 mA, lo que en valores relativos supone un 9,61 % de la corriente que atraviesa la bobina. La corriente de la bobina es de 1,769 A en este punto de operación.

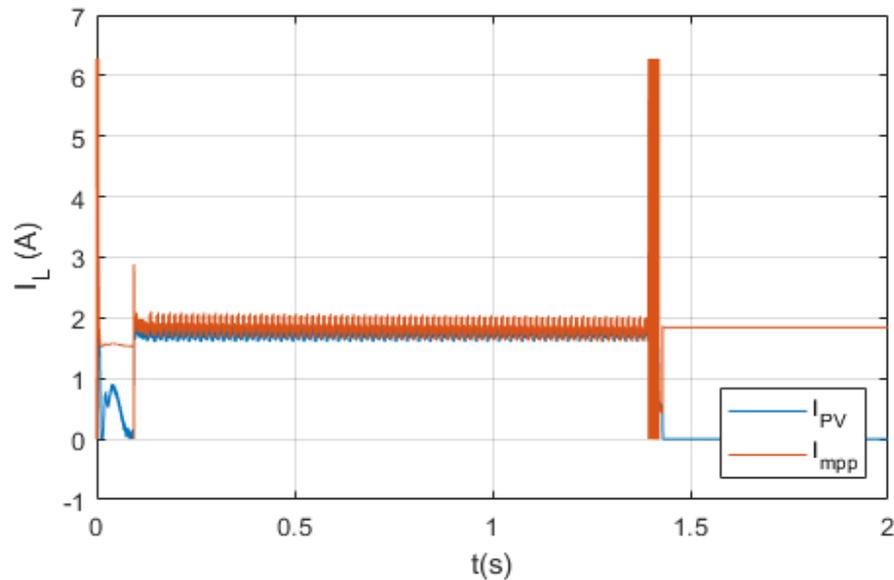


Figura 5-64. Corriente de la bobina del convertidor boost a 300 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control MPPT, la corriente casi alcanza los 2 A, por las oscilaciones del algoritmo MPPT. La corriente disminuye notablemente durante la carga a tensión constante. En 1,42 s la carga de la batería se corta.

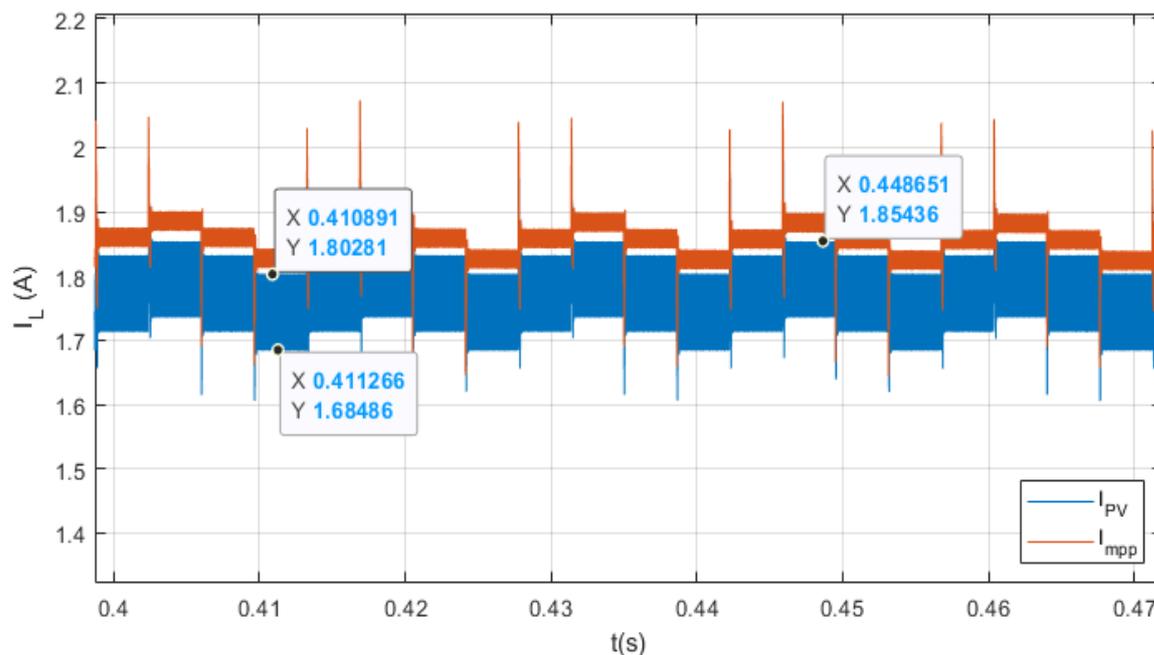


Figura 5-65. Detalle de la corriente de la bobina del convertidor elevador y referencia para 300 W/m^2 y control MPPT, durante el régimen permanente de la carga de la batería a corriente constante.

El error en régimen permanente de los modos de control donde interviene un PI como controlador de lazo abierto, para fijar la corriente de la bobina una vez se le entrega una referencia de corriente calculada como la potencia de referencia fijada por los controladores PI de tensión, sea esta la de entrada o salida del convertidor, es cero. Esto se cumple tanto para el modo de carga a tensión constante como para el modo de carga a corriente constante.

El único punto donde el error no es nulo es en los transitorios. En la gráfica de los errores se puede observar también que, durante los modos de parada, arranque y parada por carga completa de la batería, el error no se tiene en cuenta, pues la corriente de la bobina es cero en esos estados del sistema y la referencia no la fija ningún controlador.

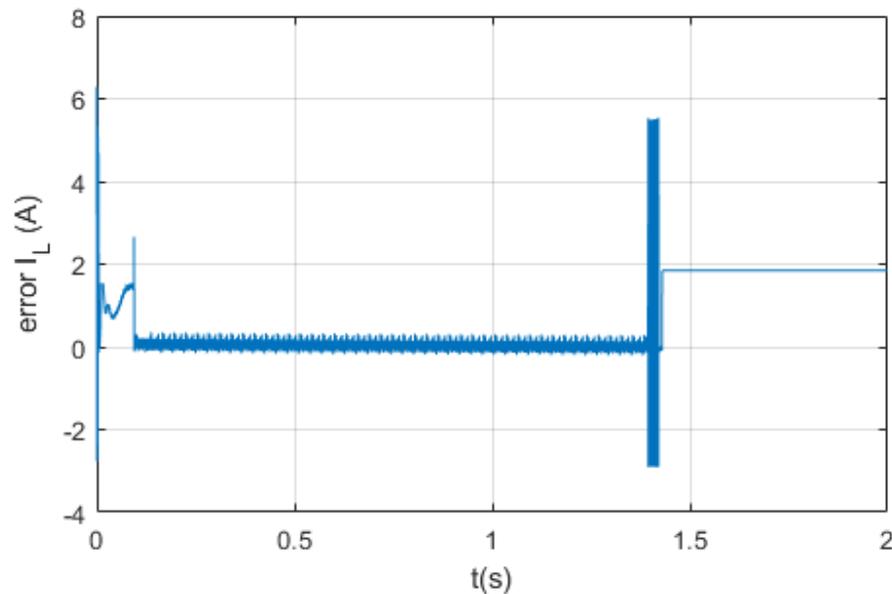


Figura 5-66. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 300 W/m^2 . Este error es prácticamente cero excepto en el transitorio existente entre el control a corriente constante y el control a tensión constante existente alrededor de los 1,4 s. El controlador está habilitado durante el tiempo transcurrido entre 0,1 s y 1,42 s.

El duty cycle del convertidor elevador presenta grandes variaciones, pero su valor medio se sitúa en el valor teórico del duty cycle para el convertidor elevador, 0,602. A pesar de eso, se observa que el duty cycle satura por su valor superior cada vez que hay un transitorio.

Por lo general, según lo que se observa en la gráfica, el duty cycle, si se eliminan los picos, toma valores entre 0,3 y 0,95 la mayor parte del tiempo durante la fase de carga a corriente constante, si se excluyen los transitorios.

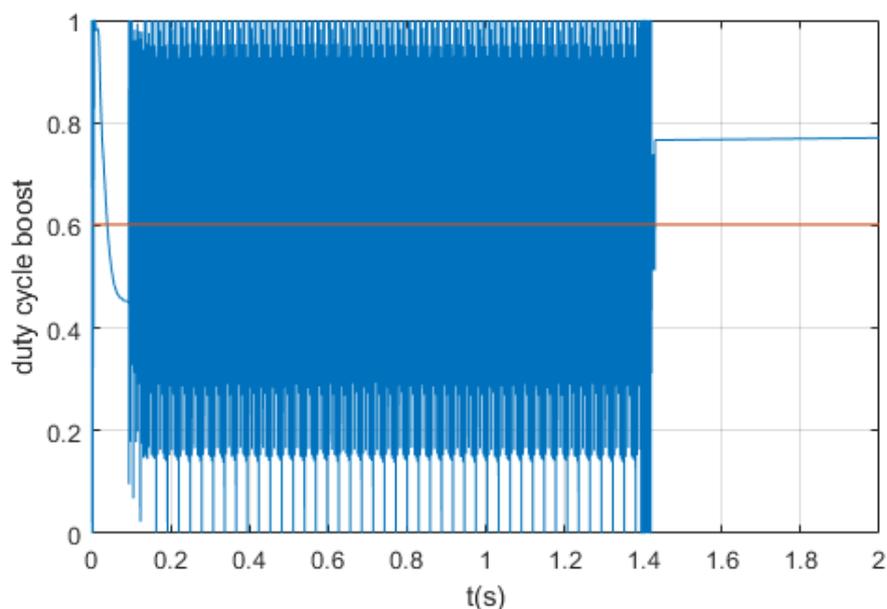


Figura 5-67. Duty cycle del convertidor elevador a 300 W/m^2 . Entre 0,1 s y 1,42 s el duty cycle oscila en torno a 0,7 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Las grandes fluctuaciones existentes entre 0,1 s y 1,4 s se deben a las oscilaciones del algoritmo MPPT del tipo P&O. Para el control a tensión constante la fluctuación es menor.

Tras el paso del estado de carga a corriente constante a carga a tensión constante, la fluctuación es menor que para el estado anterior, tras un transitorio en el que existe saturación. El valor medio crece ligeramente. Con estos valores de duty cycle, la potencia máxima es de casi 25 W, con un valor que muy probablemente

coincida con la especificación del panel fotovoltaico, de 24,25 W. Para el modo de carga a tensión constante, esta potencia decae rápidamente al principio, para producirse el corte a un valor situado en torno a 8 W, que se supone que son consumidos por todos los elementos del convertidor, más los filtros.

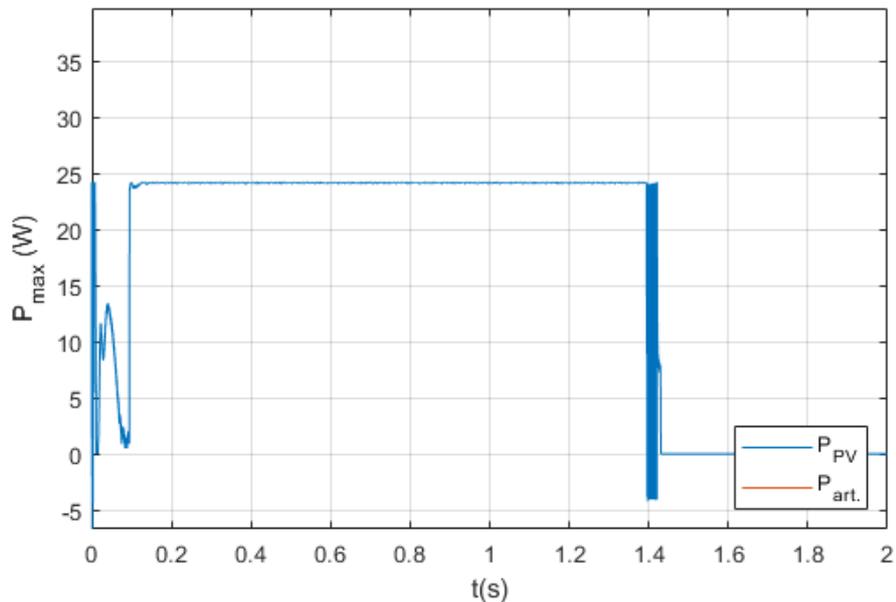


Figura 5-68. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 300W/m^2 . Entre 0,1s y 1,4s aproximadamente, la potencia generada por el panel fotovoltaico alcanza su máximo valor, de 24 W.

Pasando al convertidor flyback, la corriente de entrada es el primer valor del que se verán los resultados, ya que la tensión de entrada de este coincide con la existente a la salida del convertidor elevador.

La corriente de entrada del convertidor flyback, que es la que atraviesa el MOSFET de este convertidor, es de unos 1,2 A aproximadamente durante la fase de control a corriente constante. En cuanto el sistema cambia al modo de carga a tensión constante, la corriente de entrada del convertidor flyback va disminuyendo igual que ocurre en el convertidor elevador.

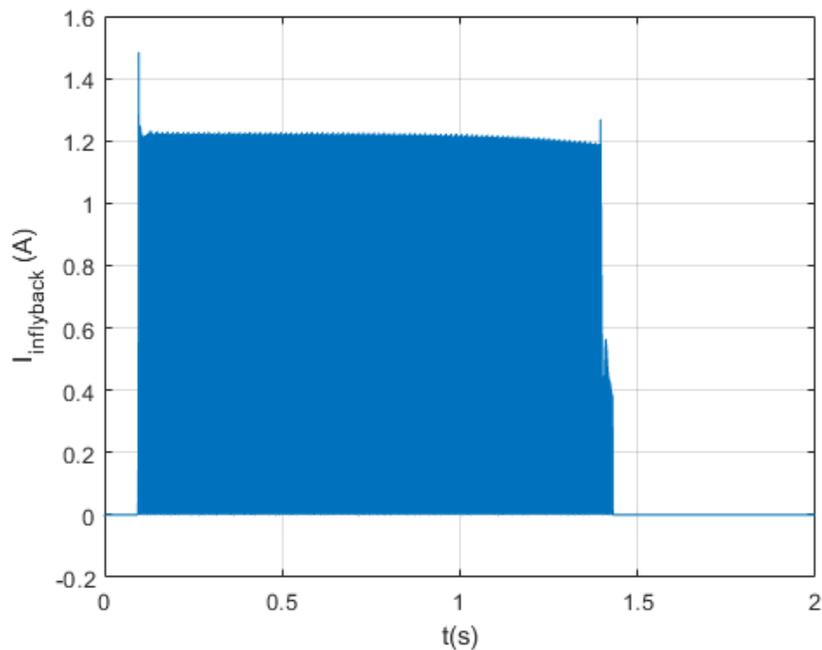


Figura 5-69. Corriente de instantánea entrada del convertidor flyback para 300W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a corriente constante, entre 0,15 s y 1,4 s, esta corriente supera los 4 A. Entre 1,4 segundos y 1,42 segundos se controla a tensión constante hasta llegar a la corriente de corte.

Si se observa con más detalle, durante una fracción del *duty cycle* la corriente instantánea es cero y durante

otra fracción del *duty cycle*, sigue un rizado propio de una bobina, que en el modelo teórico del convertidor *flyback* correspondería a la bobina de magnetización del transformador. Como esta bobina es un modelo y depende del transformador, no se puede medir la corriente que circula por ella.

El rizado, por lo visto anteriormente, se hallará mediante una ampliación en el tramo correspondiente al estado de carga a corriente constante de la corriente de entrada del convertidor *flyback*.

Durante este tramo, la corriente de entrada de este convertidor varía, cuando no es cero, entre 1,21 A y 1,27 A de valores mínimo y máximo. Esto supone un rizado, teniendo en cuenta los decimales de las etiquetas, de 60 mA.

El valor relativo se calcula a partir de la corriente media de salida, que para 300 W/m² es de 1,779 A, tal y como se calcula a partir de la corriente de entrada y el *duty cycle* del convertidor elevador:

$$I_o = 1,779 \text{ A} \cdot (1 - 0,6) = 0,711 \text{ A}$$

El rizado relativo, con los 60 mA de rizado absoluto y el valor de I_o de 0,711 A se queda en un 8,4%.

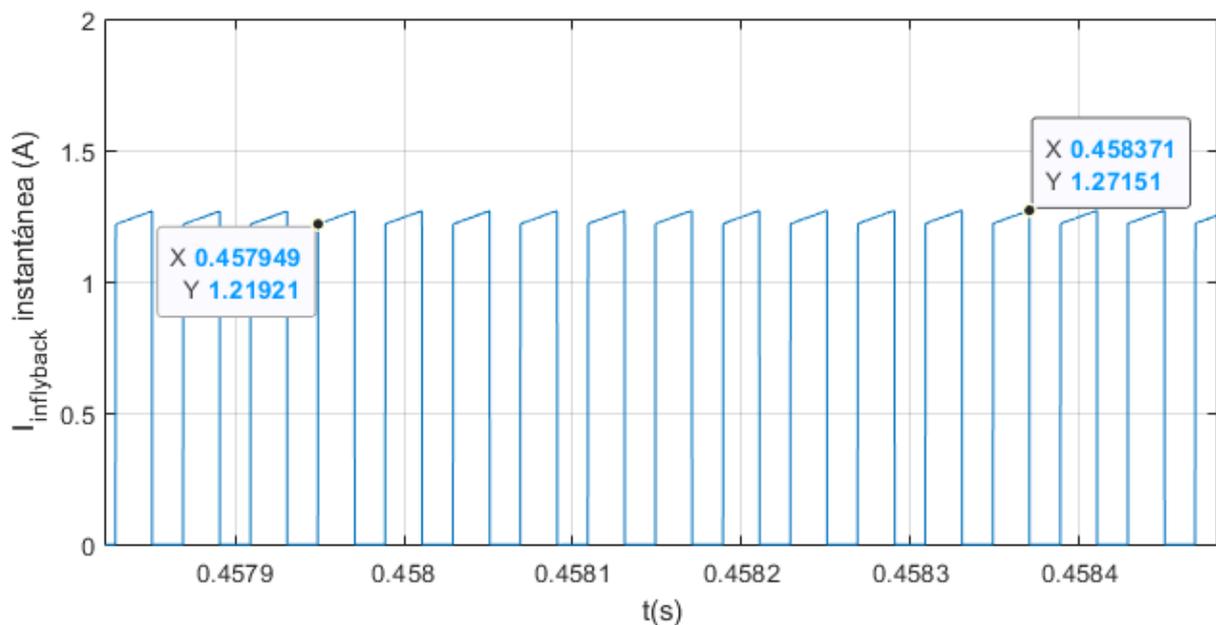


Figura 5-70. Detalle de la corriente instantánea de entrada del flyback para 300 W/m² y control a corriente constante en régimen permanente.

La corriente de la batería, que se detalla en las tres siguientes figuras es la suma de todas las corrientes que salen de cada uno de los convertidores *flyback*. En el caso de la batería, formada por combinaciones en serie y paralelo, esta tiene un máximo de 1,5 A y no puede superarse.

Para dos paneles, esta corriente que entra es de 0,4 A de media, aunque tiene picos causados durante la carga a tensión constante. Tras una primera fase de precarga y arranque, un transitorio de 0,1 segundos la lleva a su valor máximo, que no supera la corriente máxima de la batería.

Entre 0,1 y 1,4 s, la corriente tiene una pequeña disminución derivada de la forma de fijar la referencia de corriente para este estado del sistema, ya que esta se fija a partir de la tensión de entrada del *flyback*, que se desea mantener en 35 V.

En el estado de carga a tensión constante, la corriente disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor de corte, unos 110 mA, en el que se considera cargada la batería. Una vez cargada, ambos convertidores se apagan y la corriente de la batería es cero. En la gráfica, el signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando.

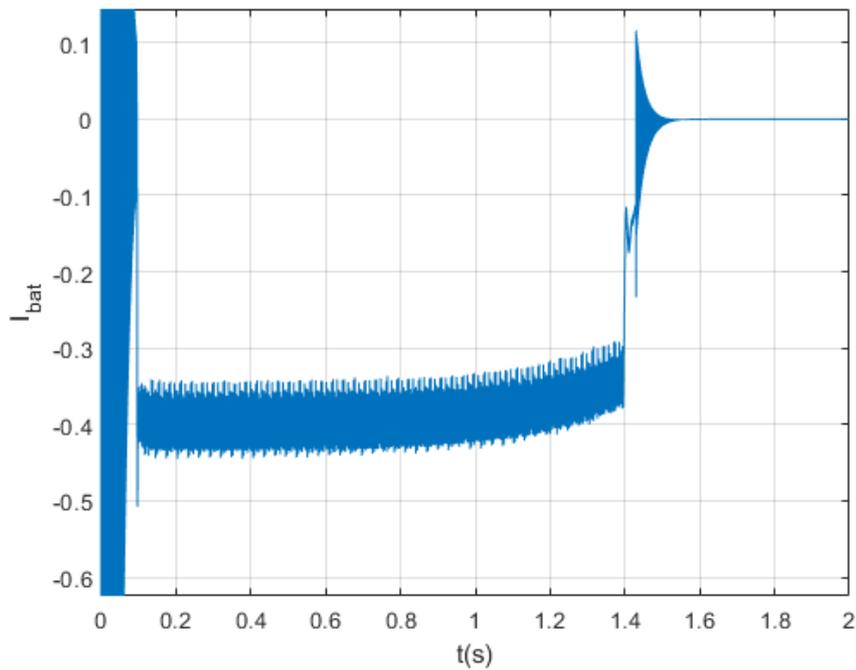


Figura 5-71. Corriente de la batería durante la carga a 300 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Se muestra el valor de la corriente durante la carga a corriente constante, entre 0,1 s y 1,4 s. Entre 1,4 s y 1,42 s la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión, hasta llegar al corte.

Como la corriente anterior es la suma de todas las corrientes de salida de los convertidores, y en el experimento se están teniendo en cuenta dos paneles fotovoltaicos en lugar de los cuatro o más que pueden montarse en la superficie de un turismo, la corriente de salida de un convertidor flyback es la mitad de la corriente anterior, unos 0,2 A.

Tanto los valores de referencia como los medidos coinciden en la mayor parte del tiempo en el modo de control a corriente constante, que comienza a partir de los 0,1 segundos. Como la referencia de corriente va fijada por tensión, hasta que no finaliza el transitorio que existe al principio del tramo de la fase de carga de la batería a corriente constante no hay un seguimiento real de la referencia por parte del controlador.

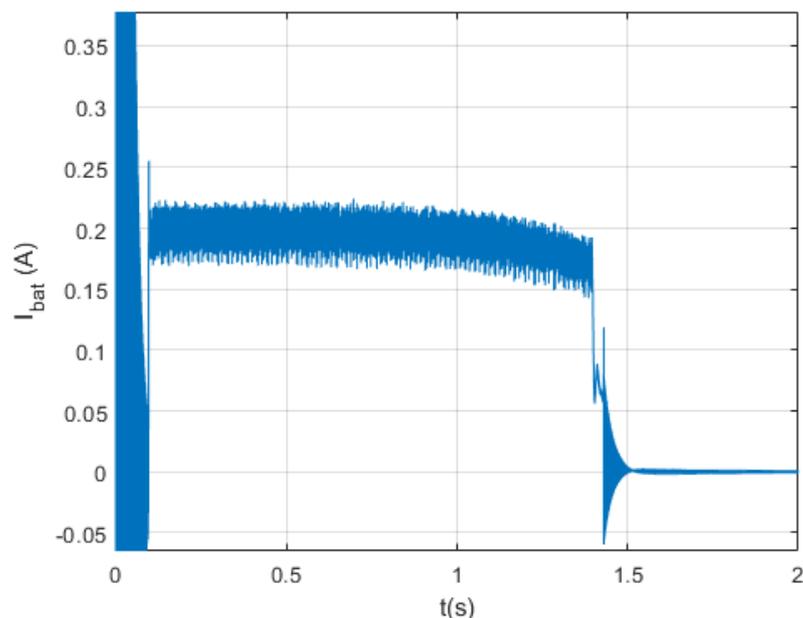


Figura 5-72. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 300 W/m^2 . Entre 0,1 s y 1,4 s, la referencia se ajusta según la tensión a la entrada del flyback, mientras que desde 1,4 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, que permanece constante. A partir de 1,42 s, la batería queda cargada y el sistema se apaga.

Si se tienen en cuenta los picos y no únicamente el valor medio, la corriente no supera los 0,225 A ni baja de 0,15 A, como se observa en la gráfica.

Para el control a tensión constante, una vez se pasa el transitorio existente en torno a 1,4 segundos, la corriente disminuye progresivamente hasta 0,055 A, que es la mitad del valor de la corriente de corte de la batería. A partir del corte, la corriente pasa a ser cero.

El error en régimen permanente, que debe tenerse en cuenta únicamente para los estados del sistema donde se carga la batería, es cero, aunque para el estado de carga a corriente constante hay una variación de pico a pico que no supera los 0,1 A de error normalmente.

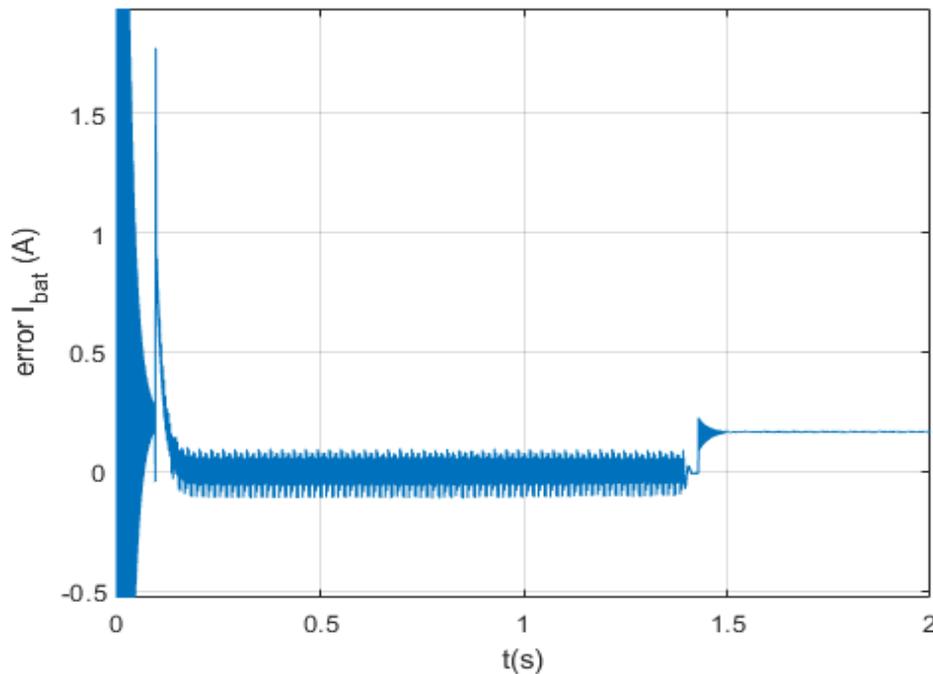


Figura 5-73. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 300 W/m² de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo, pero la corriente presenta un alto nivel de ruido que se debe al algoritmo MPPT y la variación de la corriente de salida del panel fotovoltaico. El error continúa siendo cero en el control a tensión constante, entre 1,4 y 1,42 segundos.

En el caso de la potencia de salida de cada convertidor elevador, para 300 W/m² es de media de 22,6 W, aunque la instantánea puede variar entre 20 y 25 W una vez superado el transitorio. Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de 81,73 W, se puede calcular el rendimiento con la ecuación 21, que al sustituir queda de la siguiente forma:

$$\eta_{DC/DC} = \frac{22,6 \text{ W}}{24,25 \text{ W}} \cdot 100 = 93,19 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 50% para 300 W/m². Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante. Para el caso descrito, las pérdidas son de 1,65 W y el rendimiento del convertidor alcanza su valor mínimo para el control a corriente constante.

La forma de onda de la potencia de salida depende fuertemente de la corriente de salida del convertidor flyback, con unos picos notables y una ligera disminución que hace que, justo antes de pasar al estado de carga a tensión constante, sea de 20 W. A los 0,5 segundos, el sistema pasa al modo de carga a tensión constante con una referencia de 117,6 V para la salida del convertidor flyback.

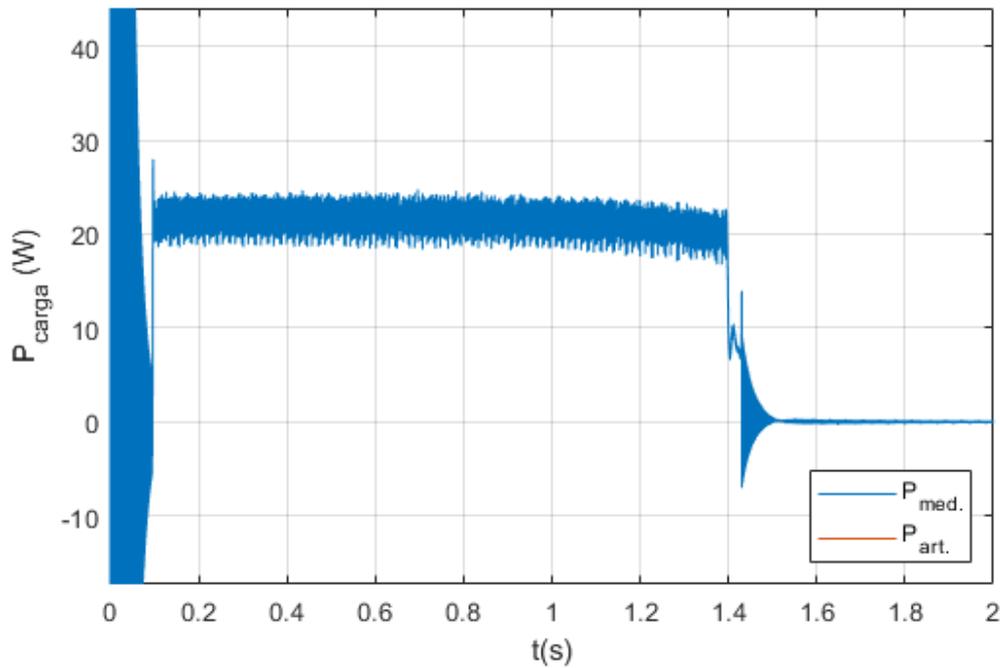


Figura 5-74. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,1 s hasta los 1,4 s, el valor de la potencia se sitúa por encima de 20 W, que sería la máxima potencia de carga de la batería para esta irradiancia.

Para el duty cycle, el valor real es ligeramente superior al teórico, debido principalmente a las pérdidas del sistema, que no se tienen en cuenta para el diseño de un convertidor ideal. Los valores que aparecen en la gráfica oscilan, durante la carga a corriente constante, tras un período en el que el convertidor flyback está apagado, entre 0,52 y 0,6, sin contar los picos debidos a los transitorios cada vez que cambia la referencia de tensión.

Para el modo de carga a tensión constante, el valor es de 0,54 a 0,56 aproximadamente, sin grandes oscilaciones, tras un transitorio que se completa un poco más tarde de los 1,4 segundos.

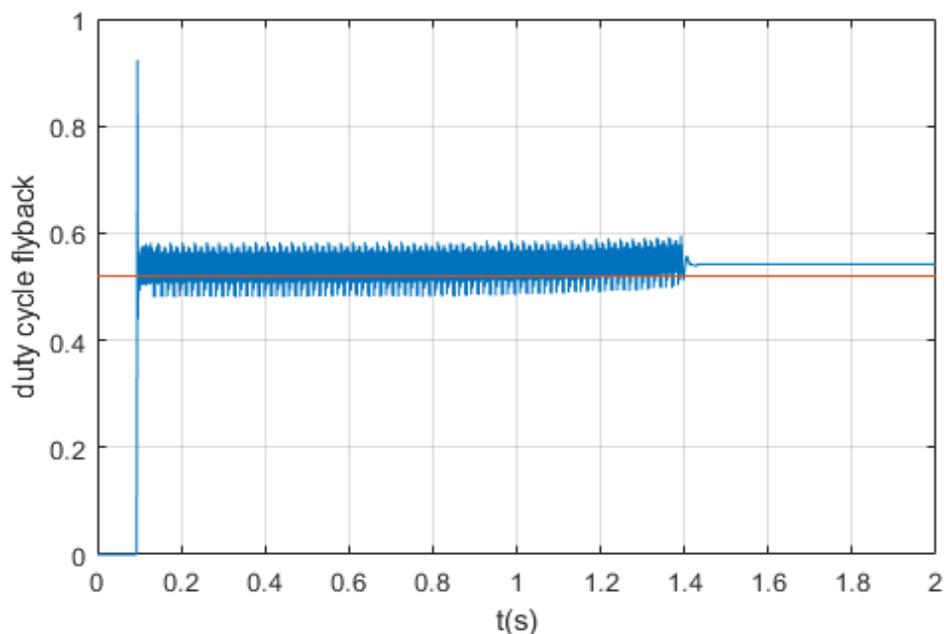


Figura 5-75. Duty cycle del convertidor flyback para 300 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones entre 0,52 y 0,57 durante la carga a corriente constante, algo mayores en los picos. Durante la carga a tensión constante, entre 1,4 s y 1,42 s, el valor presenta un rizado poco apreciable. La línea roja de la gráfica representa el duty cycle teórico y la azul representa el duty cycle medido.

En la gráfica inferior se aprecia cómo, el estado de carga o porcentaje de batería crece linealmente hasta que la simulación llega a los 1,4 s, durante la carga a corriente constante desde un 38%. El estado de carga alcanza de nuevo el 50% inicial a los 0,4 s, aproximadamente.

El porcentaje de batería máximo que se puede alcanzar a 300 W/m^2 , irradiancia que incide en cada panel durante el experimento y que se muestra más abajo en la misma ilustración, es cercano al 99%, pero se hallará en un experimento que se realizará más adelante, durante las pruebas en detalle del controlador de la carga para un régimen a tensión constante.

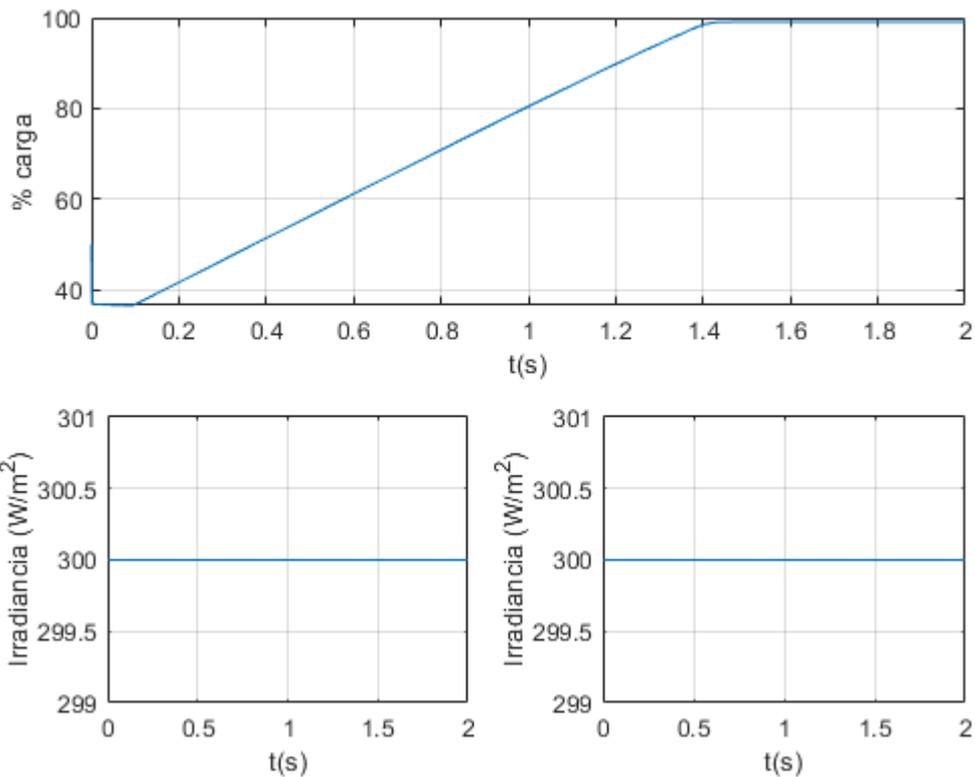


Figura 5-76. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 50%, para una irradiancia de 300 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae al 38%. Una vez se carga a corriente constante, entre 0,1 s y 1,4 s, el estado de carga crece hasta un 98%. El porcentaje máximo, que se alcanza a los 1,42 s, es cercano al 99%. Los porcentajes máximos se podrán observar en una futura prueba. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 300 W/m^2 durante toda la prueba.

La tensión máxima que se alcanza con este método de carga es de poco más de 117,6 V, pero esto se debe al corto espacio de tiempo que dura la parte de carga a tensión constante, que ocupa un tiempo inferior a 0,1 s respecto al total del experimento por la capacidad irreal de la batería especificada en Simulink, de 0,225 mAh.

Esta tensión se da únicamente en este estado, siendo menor en el arranque de los convertidores, donde llega a unos 109-110 V, en el modo de carga a corriente constante y una vez la batería está cargada. Cuando la batería queda cargada la tensión baja de los 117,6 V de referencia para la carga a tensión constante. La tensión puede verse representada en la figura siguiente en la gráfica superior.

Durante la carga a corriente constante, es posible diferenciar la zona lineal de carga de la exponencial, pues en los 0,6 segundos, en cuanto el porcentaje de batería supera el 60% según se observa en la gráfica anterior.

En las gráficas inferiores de la figura siguiente se observa el error existente entre la tensión de referencia y la tensión medida en el sistema. Hasta 1,4 segundos la diferencia entre los 35 V de referencia para el nodo de entrada del *flyback* y el valor medido es muy pequeña llegando a cero en el régimen permanente, gracias al controlador PI.

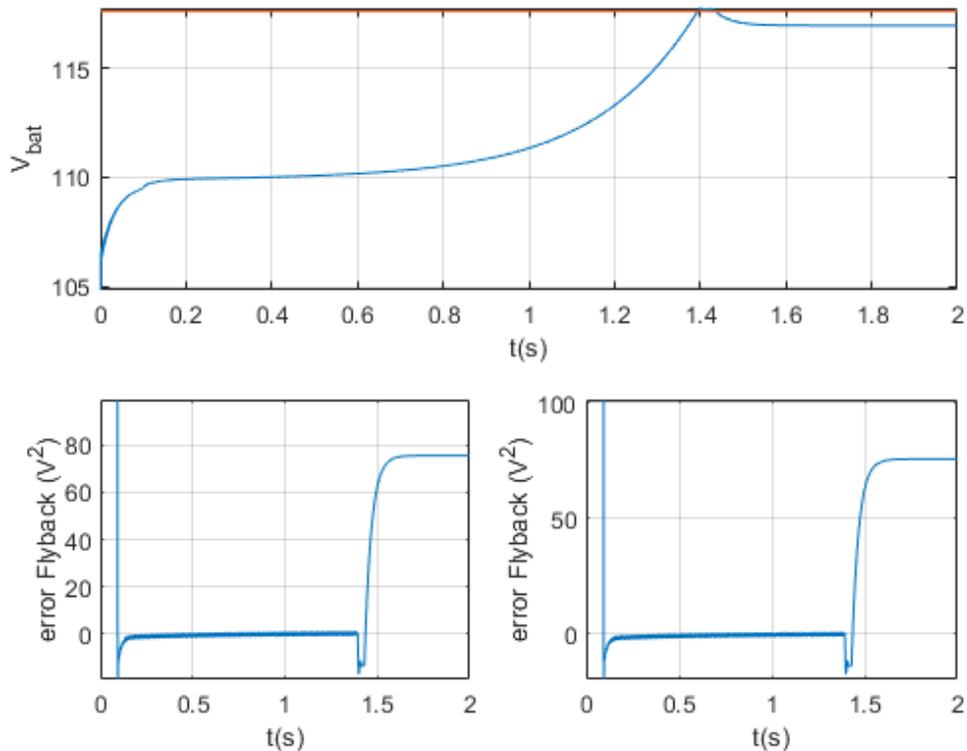


Figura 5-77. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación. A 300 W/m^2 la carga es lineal desde los 0,1 s hasta los 0,6 s, cuando la tensión crece de forma exponencial. Una vez supera el valor de referencia (en rojo), se pasa al control en tensión constante. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. Tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, la tendencia es a que el error en régimen permanente sea cero, dando de referencia la tensión máxima de la batería.

A partir de 1,4 segundos, el error en régimen permanente intenta reducirse, pero el tiempo del experimento y la capacidad de la batería no dejan ver el momento en el que este llega a cero. Esto significa que la dinámica del controlador de la carga en control CV es lenta respecto a los tiempos de simulación que se consideran para este experimento.

Más adelante, se comprobará que la irradiancia de 300 W/m^2 no hace posible mantener una tensión constante en ninguno de los elementos del circuito para la carga mediante la técnica de control CV.

5.3 Pruebas del control a tensión constante

En estas pruebas, a diferencia de las anteriores en las que se estudiaba la evolución del estado de carga partiendo del 50% con una técnica mixta de carga a corriente constante y a tensión constante, se comentarán las gráficas únicamente para el modo de carga a tensión constante, ya que la carga a corriente constante, el arranque y los estados de parada han sido estudiados para los mismos niveles de irradiancia.

Las pruebas de este apartado tienen como objetivo asegurar un buen funcionamiento de los controladores empleados para la técnica de carga de la batería a tensión constante. La dinámica de estos últimos controladores es más lenta que la duración del modo de carga a tensión constante en los primeros experimentos de carga CC-CV, ya que, en los experimentos anteriores, la tensión de la batería no llegaba al valor de referencia en el régimen permanente, quedándose por encima.

La tensión de referencia empleada en estos experimentos es la misma que se estableció para realizar la transición de un modo de carga CC a otro CV, 117,6 V, medidos en el nodo situado entre los filtros LC, uno por cada pareja de convertidores DC/DC boost y flyback conectados en cascada, y la batería.

Las pruebas del controlador para la carga a tensión constante se realizarán en idénticas condiciones de iluminación y temperatura que los experimentos de carga CC-CV, es decir, a 25°C y con una irradiancia

constante, que representa una iluminación uniforme, la misma para todos los paneles fotovoltaicos, que será de 1000 W/m^2 y que irá disminuyendo a 800 W/m^2 , 500 W/m^2 y, finalmente, 300 W/m^2 .

El estado de carga de partida no será del 50%, sino que se comenzará con un 98,5% de estado de carga. La capacidad de la batería pasará a ser la décima parte de la capacidad nominal de la batería Panasonic CGR18650CG, es decir, se harán las pruebas con una capacidad de 225 mAh, que no son los 2250 mAh de una hilera con la batería original ni los 0,225 mAh empleados en los experimentos de carga CC-CV.

5.3.1 Irradiancia de 1000 W/m^2

Para una irradiancia de 1000 W/m^2 , la potencia generada alcanzó su máximo valor al 50% del estado de carga de la batería, disminuyendo progresivamente durante el resto de la carga CC, aunque levemente. Para este caso, la potencia ya no será máxima, sino que será una fracción de la potencia anterior, que puede medirse para el instante en el que la carga de la batería alcanza el 98,5%.

En el caso de que la radiación incidente sea de 1000 W/m^2 , los estados pasan por una fase de arranque que dura 0,1 s y que incluye la precarga del condensador en un estado de parada durante un período de tiempo muy corto. La carga a tensión constante, que se establece cuando la tensión de la batería supera la referencia dada de 116,7 V, comienza a los 0,12 segundos. El estado de carga a tensión constante dura el resto del experimento.

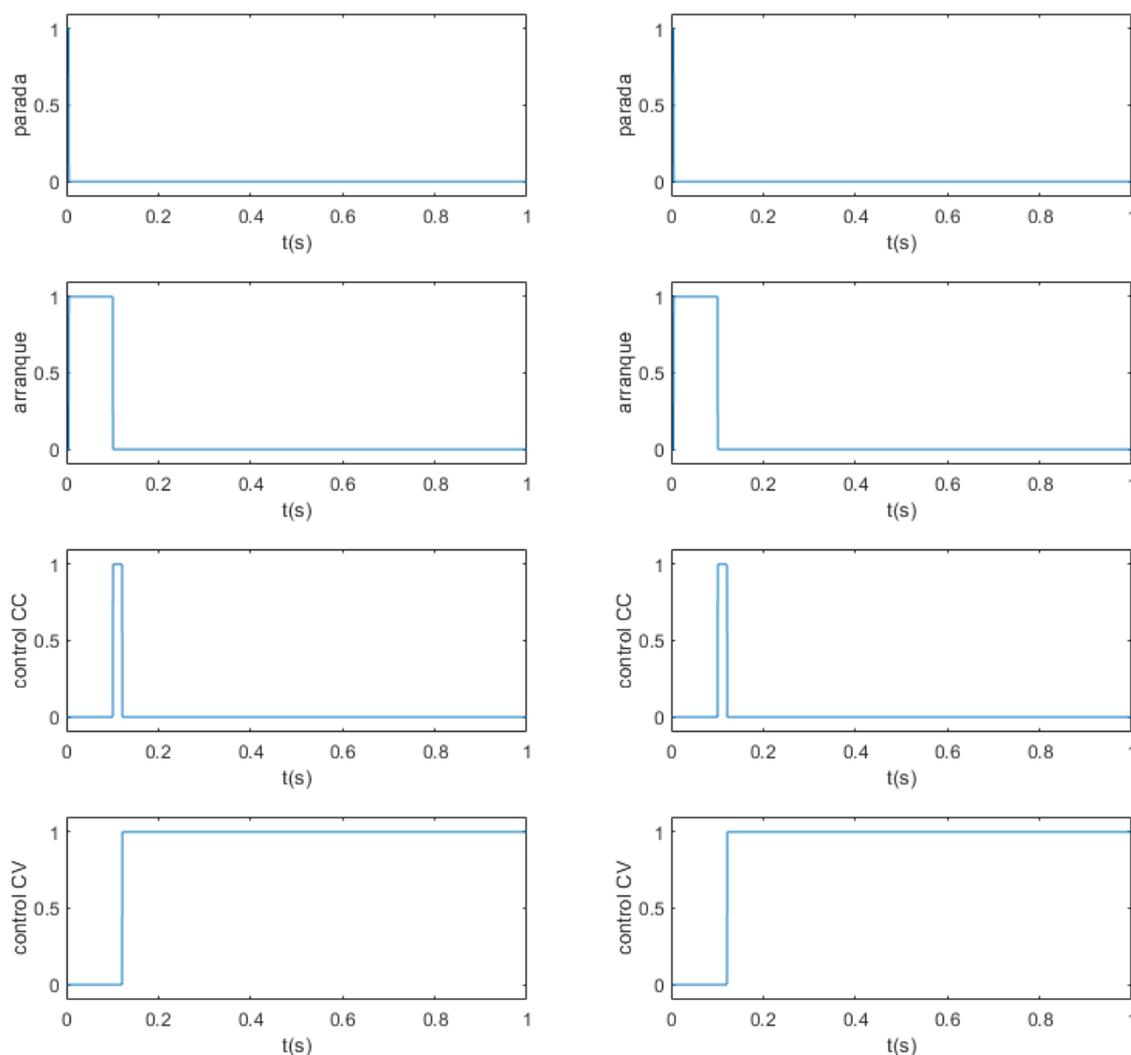


Figura 5-78. Estados de funcionamiento del sistema durante los experimentos de carga CV. Ambos paneles fotovoltaicos pasan por las mismas fases. Hasta 0,1 s no entra en funcionamiento el sistema completo, que mantiene durante el resto del experimento, a partir de los 0,12 s, la carga a tensión constante.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador, así como el error del controlador para la tensión de salida.

La tensión de entrada, una vez se ha entrado en la fase de carga a tensión constante tras una fase de arranque y otra, corta, de carga a corriente constante, se establece, para la carga a tensión constante, en 16,16 V, tal como se puede observar en la siguiente gráfica.

En la carga a tensión constante, no hay seguimiento de una referencia para la tensión de entrada del panel fotovoltaico porque no se establece mediante el control MPPT. La tensión de entrada queda fijada libremente por el *duty cycle* que se obtiene mediante el controlador de tensión de salida del convertidor. La tensión del panel no supera el valor de tensión de circuito abierto de este para 1000 W/m², que es de 16,46 V.

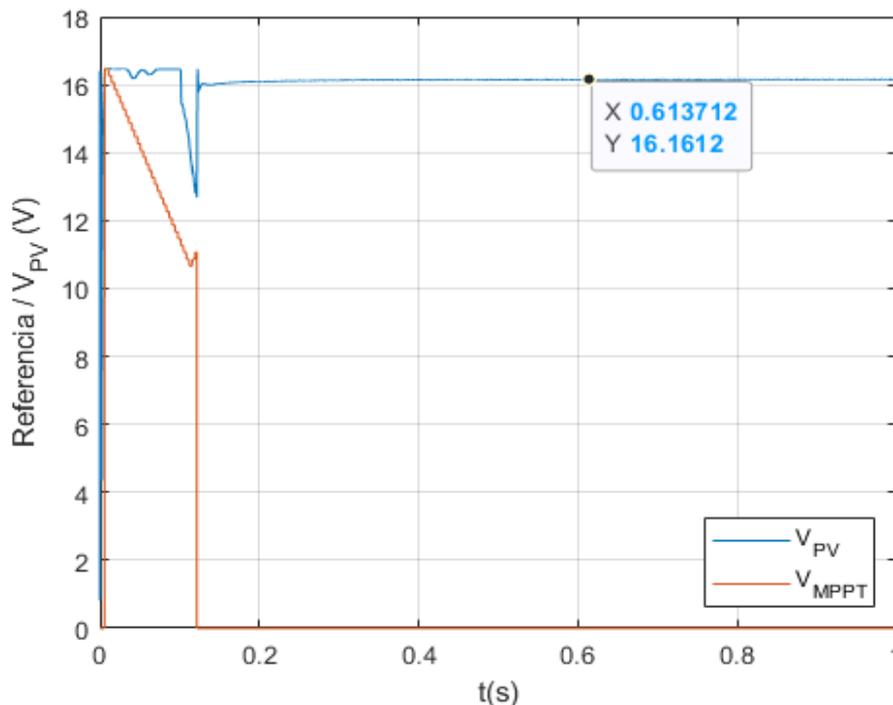


Figura 5-79. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 1000W/m². Desde que se aplica el control CV en el sistema a partir de 0,12 s el control MPPT permanece desactivado. La tensión es inferior a la de circuito abierto, por lo que el sistema está activo.

La tensión de salida tiene una referencia de 35 V, que se alcanzan tras un largo transitorio que dura hasta los 0,6 segundos aproximadamente, poco apreciable en la gráfica anterior de las tensiones de entrada, pero que se puede observar con más claridad en las gráficas sucesivas.

Durante este modo de control a tensión constante se puede observar con más precisión el alcance del controlador, ya que no existen grandes oscilaciones, y el rizado de tensión para la tensión de entrada y de salida del convertidor elevador ya no es tan notable como para el control a corriente constante, al no aplicarse el control MPPT, responsable de las oscilaciones existentes durante el modo de control a corriente constante.

Finalmente, los 35 V se alcanzan en el régimen permanente tras un transitorio de 0,28 segundos contados a partir de los 0,12 segundos de simulación, en los que la tensión de salida del convertidor elevador, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor flyback, alcanza un valor muy cercano a 35 V, que se termina alcanzando a los 0,6 segundos especificados anteriormente. Esto se observa con claridad en la primera de las siguientes gráficas.

En la segunda gráfica, correspondiente al error existente en el controlador, que fija la tensión a la salida del convertidor elevador para el modo de carga de la batería a tensión constante, se observa cómo este se va acercando a cero en el régimen permanente hasta alcanzar el cero en cuanto la simulación supera los 0,4 segundos.

La referencia fijada para la tensión de salida del convertidor boost es de 35 V, que se siguen por parte del

controlador durante todo el experimento a partir de los 0,12 segundos, una vez el controlador ha arrancado.

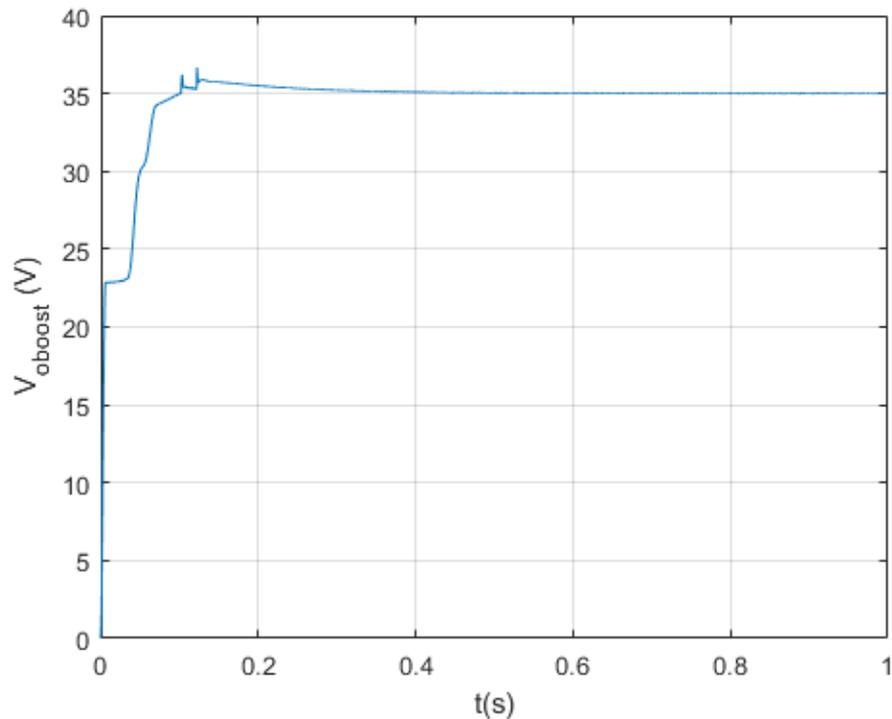


Figura 5-80. Tensión a la salida del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Esta alcanza los 35 V de referencia para la tensión a los 0,4 s, desde que entra en funcionamiento el control CV a los 0,12 s.

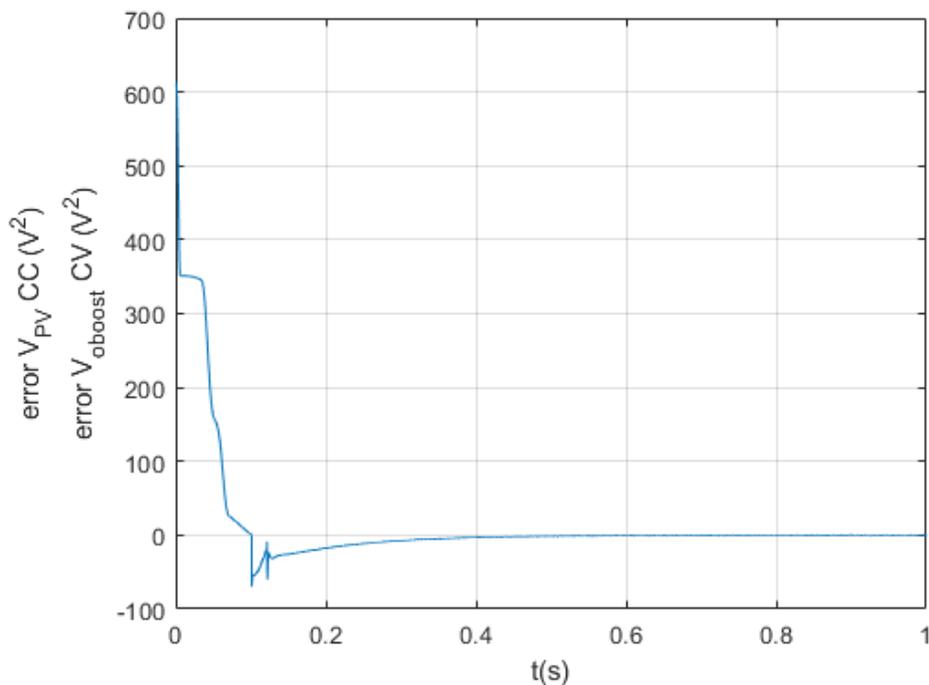


Figura 5-81. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador para 1000 W/m^2 en control CV. A partir de 0,12s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser prácticamente cero en 0,4 s, cuando la referencia de tensión y la tensión a la salida del convertidor coinciden.

En el caso de la corriente de la bobina, va decreciendo lentamente una vez se alcanza el régimen permanente en algún punto entre los 0,4 y 0,6 segundos de la simulación. El valor se sitúa en torno a 1,4 A, un valor apropiado para el estado de carga a tensión constante, ya que la corriente en este modo de conducción va disminuyendo progresivamente conforme el estado de carga se acerca al 100%, por lo que la potencia de carga

disminuye hasta el corte.

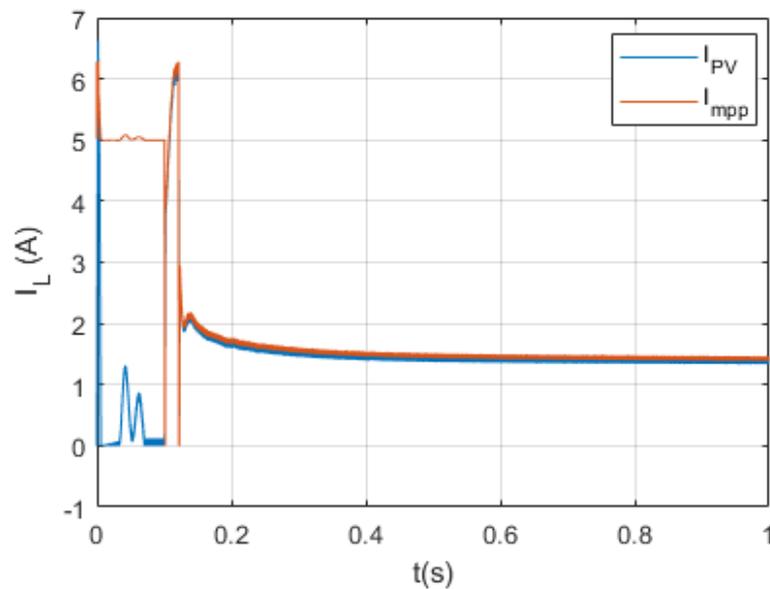


Figura 5-82. Corriente de la bobina del convertidor boost a 1000 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente solo se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a tensión constante, la corriente desciende lentamente después de llegar al régimen permanente a los 0,4 s del experimento.

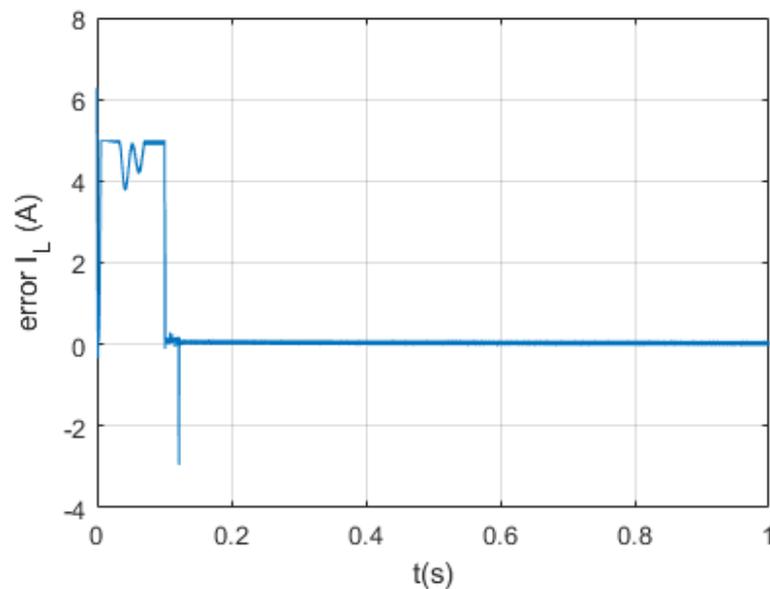


Figura 5-83. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 1000 W/m^2 . Este error es cero durante el tiempo transcurrido desde que el control CV entra en funcionamiento.

Como el controlador de la corriente de salida del convertidor elevador es el mismo que en los anteriores experimentos de carga CC-CV, el error en régimen permanente sigue siendo cero, aunque la gráfica del error, resultante de restarle a la referencia de 35 V la tensión medida a la salida del convertidor elevador, no permite apreciar el transitorio al alcanzar la corriente medida rápidamente a la referencia.

El *duty cycle*, que se muestra en la siguiente gráfica, sigue la tendencia que existía para el estado de carga a tensión constante en los experimentos de carga CC-CV. Tras un transitorio que dura hasta un instante entre 0,4 y 0,6 segundos, el *duty cycle* toma desde un valor mínimo ligeramente superior a 0,5 hasta un valor máximo situado en un punto medio entre 0,6 y 0,7.

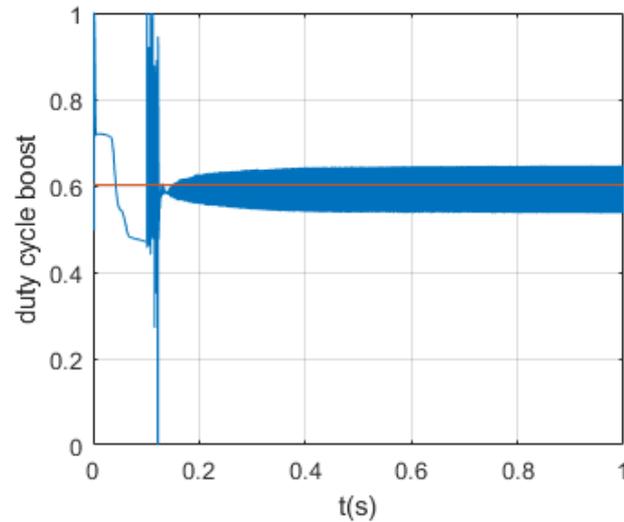


Figura 5-84. *Duty cycle* del convertidor elevador a 1000 W/m^2 para el control a tensión constante. A partir de $0,12 \text{ s}$ el *duty cycle* toma un valor entre $0,51$ y $0,65$ para la carga a tensión constante. En rojo, está dibujado el valor teórico del *duty cycle*, $0,602$, mientras que en azul está dibujado el resultado del control.

En cuanto a la potencia calculada en la entrada del convertidor elevador, que es la misma que la existente a la salida del panel fotovoltaico porque se considera ideal el diodo de bloqueo, esta es una parte de la potencia que puede llegar a generar el panel fotovoltaico para las condiciones de iluminación dadas.

Para 1000 W/m^2 , la potencia generada por el panel fotovoltaico para una carga del $98,5\%$ de la batería es de $23,40 \text{ W}$, que se alcanza tras un largo transitorio que dura entre los $0,12$ segundos y los $0,6$ segundos de simulación. Esta potencia va disminuyendo conforme aumenta la carga de la batería, al igual que las corrientes anteriormente vistas.

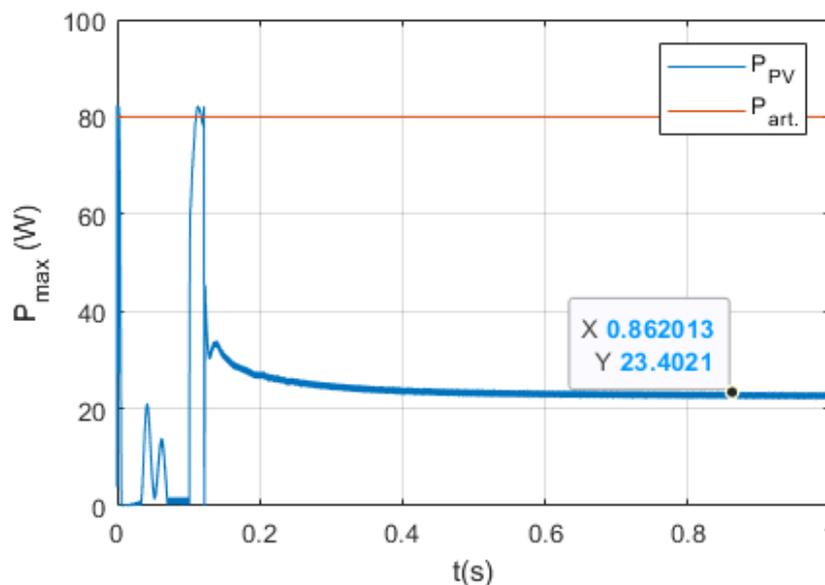


Figura 5-85. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 1000 W/m^2 . La potencia durante la carga a tensión constante, a partir de $0,12 \text{ s}$, es inferior a la máxima potencia, y muy similar para los mismos porcentajes de batería sea cual sea la irradiancia, siempre que sea suficiente. Esta potencia se compara con los 80 W teóricos, señalados en rojo.

El convertidor flyback tiene para la entrada una corriente pulsada, que es la que circula por el MOSFET de este convertidor en la rama de baja tensión del transformador. La corriente instantánea de entrada en régimen permanente, alcanzado a los $0,6$ segundos y en el que desciende progresivamente, toma un valor ligeramente superior a 1 A , muy probablemente situado entre $1,1 \text{ A}$ y $1,2 \text{ A}$.

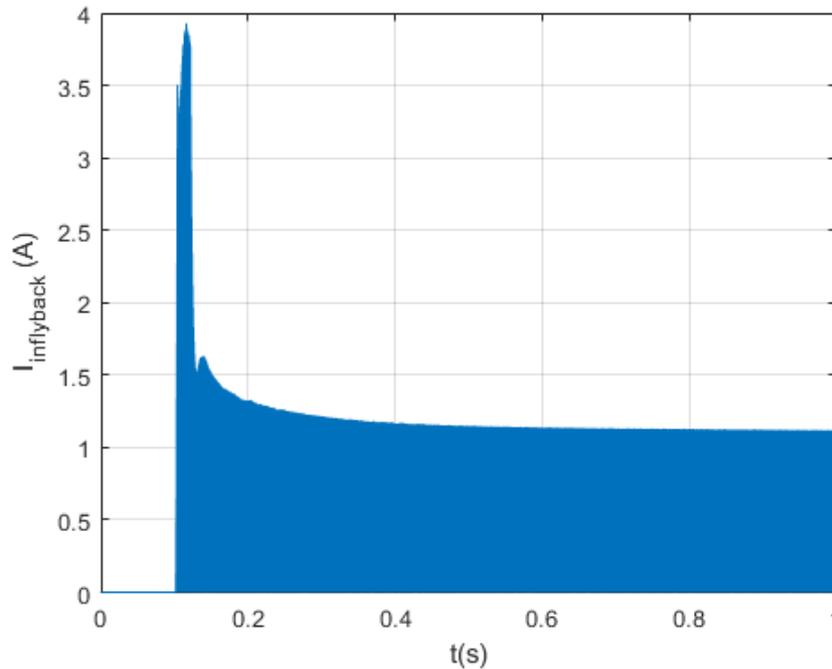


Figura 5-86. Corriente de instantánea de entrada del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de $0,4 \text{ s}$, esta corriente supera levemente 1 A .

La corriente que entra en la batería, que es la suma de todas las corrientes salientes de cada uno de los convertidores flyback, el doble de la corriente que sale de un solo convertidor flyback en este sistema concreto al contar con dos paneles fotovoltaicos, de los cuatro inicialmente propuestos.

La corriente que entra en la batería se muestra en la siguiente gráfica, y es de $0,34 \text{ A}$. Esta corriente va disminuyendo conforme la batería se va cargando, hasta llegar al valor mínimo de 110 mA especificado en la batería, cuando la carga no continúa tras haberse alcanzado el máximo de la capacidad de la batería.

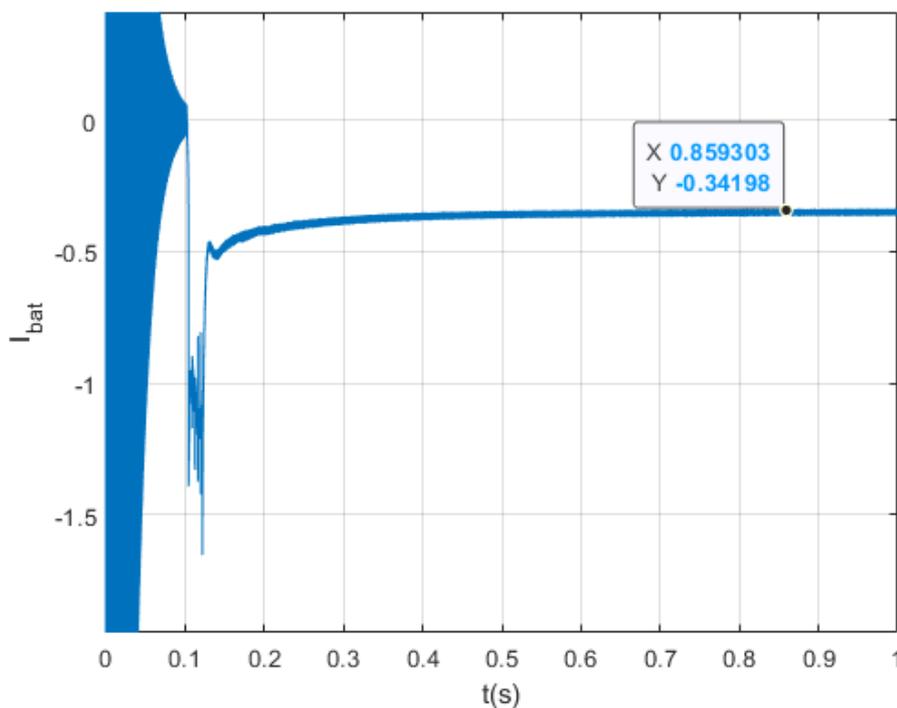


Figura 5-87. Corriente de la batería durante la carga a 1000 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de $0,15 \text{ s}$ la corriente va disminuyendo, en valor absoluto, proporcionalmente a la potencia en cuanto se alcanza el régimen permanente en $0,4 \text{ s}$.

En el caso de la corriente de salida para un solo convertidor flyback, basta con dividir la corriente de la batería entre el número de convertidores existentes, dos en este caso, al realizarse las pruebas en condiciones de iluminación uniforme, sin zonas sombreadas.

La corriente de salida, que se muestra en la gráfica de más abajo, toma un valor comprendido entre 0,15 A y 0,2 A. Como ambos paneles fotovoltaicos tienen idénticas condiciones de iluminación y emplean convertidores de potencia idénticos para cargar la batería, la corriente es la mitad del valor medido en la gráfica anterior, es decir, la corriente de salida de un convertidor flyback es de 0,17 A.

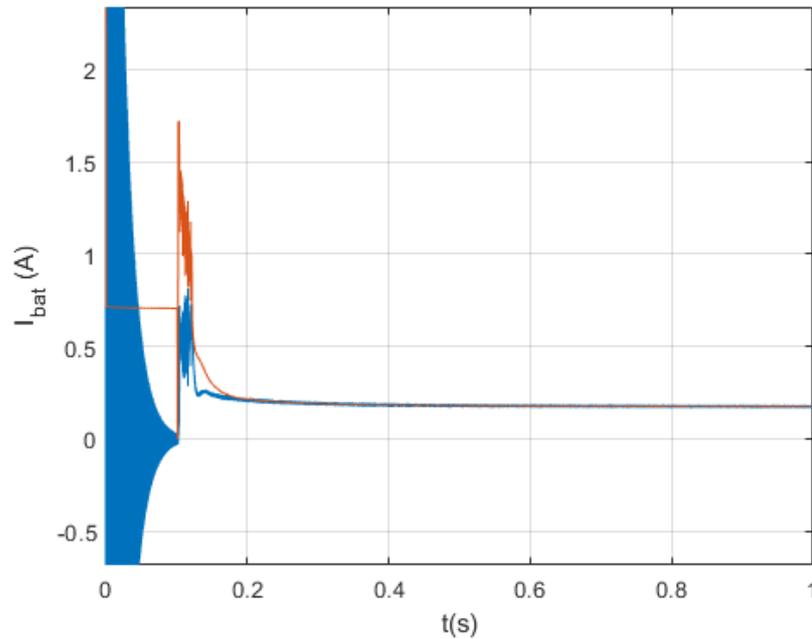


Figura 5-88. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 1000 W/m^2 , en la carga a tensión constante. Este valor va disminuyendo lentamente en el régimen permanente, a partir de 0,4 s, y es la mitad de la corriente que entra en la batería, por lo que esta no alcanza apenas los 0,2 A. El color naranja representa la referencia y el color azul la corriente medida a la salida del flyback.

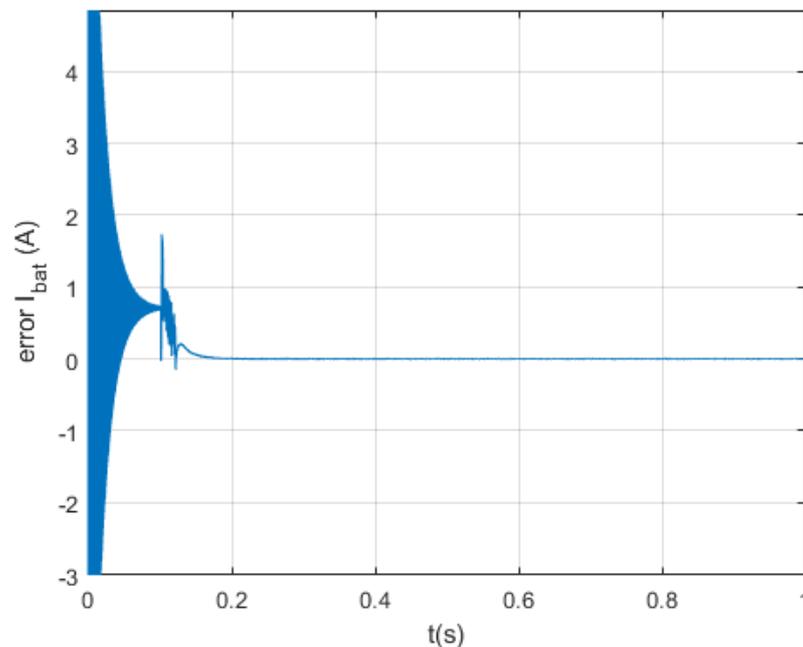


Figura 5-89. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a tensión constante, el error es nulo, aunque no se aprecia el transitorio de la corriente hasta llegar al régimen permanente.

El error en régimen permanente para la corriente de salida, que es igual a la diferencia existente entre la referencia de corriente para la salida del flyback (en naranja en la gráfica de la figura 5-88) y la corriente medida en este punto (en azul en la figura 5-88), es nulo, como ocurría en los experimentos de carga de la batería usando una técnica de control CC-CV. Si se observa con detalle la gráfica de la figura 5-89, se confirma la afirmación anterior. El controlador es el mismo que el empleado en los experimentos anteriores.

La potencia a la salida, que se compara con la potencia teórica máxima para el mismo convertidor para 1000 W/m^2 de irradiancia si todos los elementos del circuito fueran ideales, señalada en rojo en la gráfica siguiente, es de $21,10 \text{ W}$, un valor inferior al visto para la potencia en la salida del panel fotovoltaico.

Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de $23,40 \text{ W}$, se puede calcular el rendimiento con la ecuación 21, en la que se sustituyen los valores correspondientes a P_{flyback} y P_{inboost} por sus valores.

$$\eta_{DC/DC} = \frac{21,10 \text{ W}}{23,40 \text{ W}} \cdot 100 = 90,17 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 98,5% para 1000 W/m^2 . Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante, tras un transitorio que finaliza completamente en 0,6 segundos. Para el caso descrito, las pérdidas son de $2,3 \text{ W}$. Si se compara con el valor de rendimiento calculado para el 50% de batería, se observa que el rendimiento desciende a un mayor porcentaje de carga.

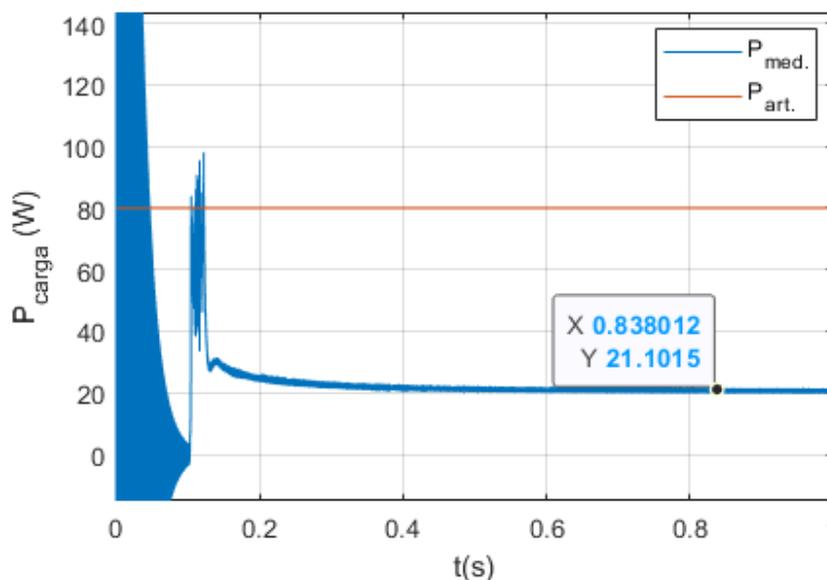


Figura 5-90. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 1000 W/m^2 de irradiancia. La potencia observada alcanza su régimen permanente a los 0,4 s y es notablemente menor de la máxima para este valor de irradiancia, unos 80 W , potencia que se muestra en rojo.

El duty cycle es mayor que el calculado teóricamente, de 0,53 para una tensión de entrada del flyback de 35 V y una tensión de salida del flyback de $116,7 \text{ V}$. Esto se debe al modelado de pequeñas pérdidas que hacen que este valor real, que es de unos 0,55 o 0,56, no sea igual que el teórico.

Este valor de duty cycle se establece rápidamente, aproximadamente en la mitad del tiempo que dura el transitorio.

El duty cycle teórico se calculó con la fórmula del duty cycle para un convertidor flyback imponiendo una tensión a la entrada de 35 V y una tensión a la salida de $117,6 \text{ V}$, que son las tensiones en ambos extremos del convertidor. Sustituyendo en la ecuación 12, nos queda que el duty cycle es el siguiente:

$$D_{\text{teórico}} = \frac{1}{1 + \frac{102}{35} \cdot \frac{35 \text{ V}}{117,6 \text{ V}}} = 0.53$$

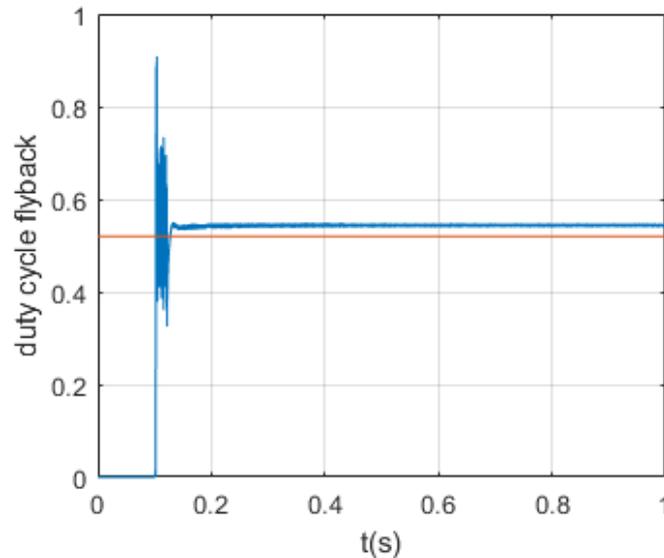


Figura 5-91. Duty cycle del convertidor flyback para 1000 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta un valor constante en torno a 0,55 durante la fase de carga a tensión constante. En rojo, está dibujado el valor teórico del duty cycle, 0,53, mientras que en azul está dibujado el resultado del control.

Tras el duty cycle, mostrado en la gráfica anterior, quedan por observar dos de los datos que dan información acerca del estado de la batería.

Entre estos datos, que dan muchísima información acerca del comportamiento de la batería a altos porcentajes de carga, están el estado de carga de la batería, que parte de un 98,5%, aunque durante el arranque este baja algunas centésimas. Una vez comienza la fase de transición entre la fase de arranque y la de carga a tensión constante, la batería comienza a cargar.

A partir de los 0,2 segundos, la carga se hace de forma lineal, y el estado de carga va subiendo lentamente hasta que la batería queda cargada. La dinámica lenta de la batería se debe a que la capacidad se ha multiplicado por mil respecto de la capacidad elegida para los experimentos de análisis de carga CC-CV.

Como se vio en los experimentos anteriores, para una irradiancia de 1000 W/m^2 el porcentaje máximo supera el 99%, por lo que no se han observado comportamientos extraños y el control de la carga de la batería a tensión constante ha sido estable.

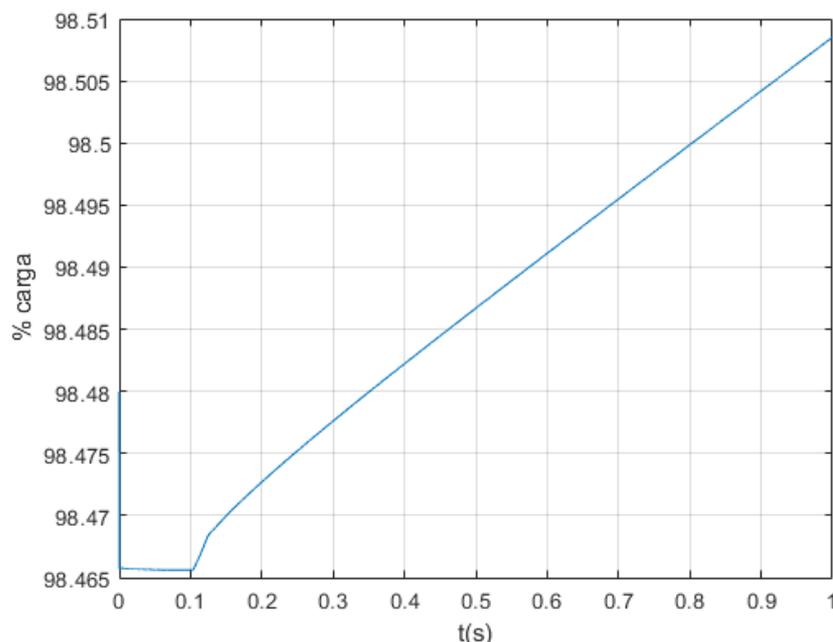


Figura 5-92. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 1000 W/m^2 . El crecimiento del estado de carga es notable a partir de los 0,12 s.

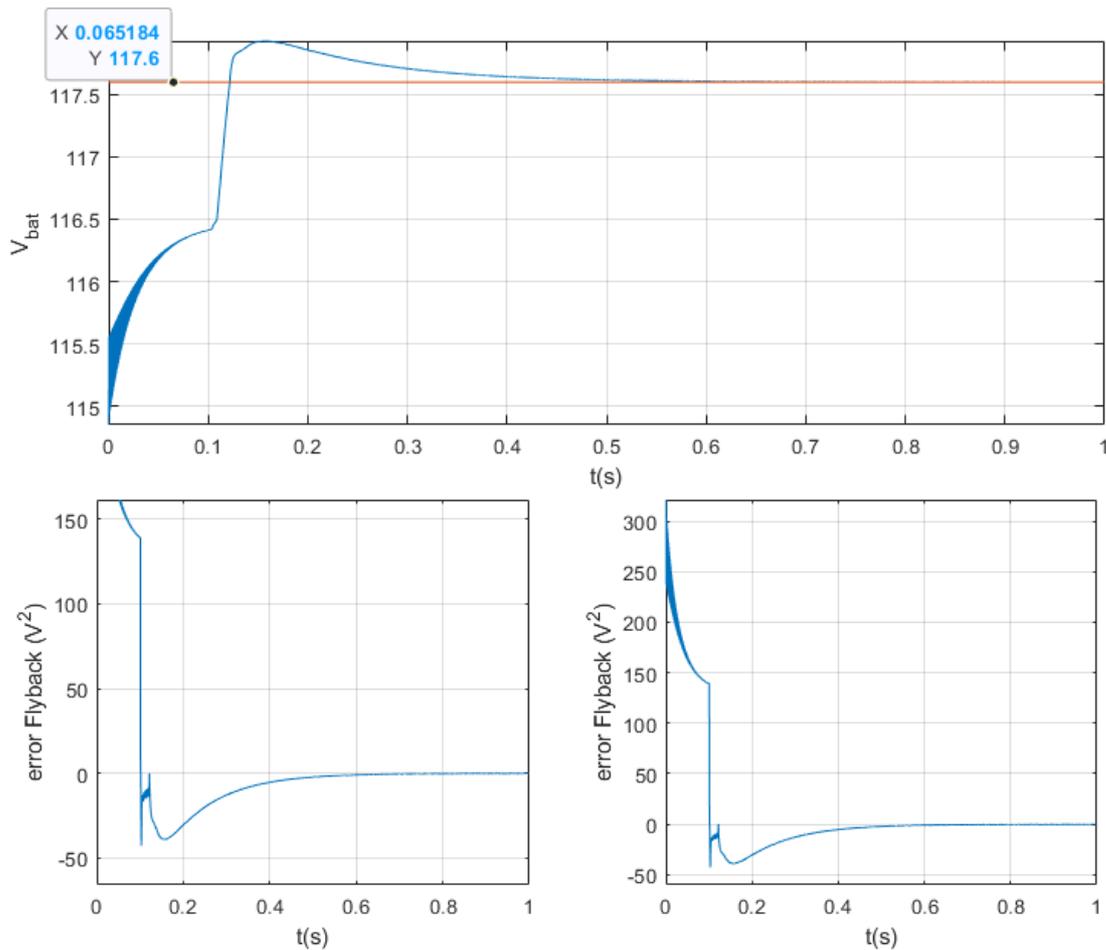


Figura 5-93. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación.

A 1000 W/m^2 la tensión de referencia, de $117,6 \text{ V}$, se alcanza a los $0,12 \text{ s}$, si bien se estabiliza, tras la sobreoscilación, a los $0,6 \text{ s}$. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, se observa en las gráficas que el error en régimen permanente es cero para el control a tensión constante en ambos paneles, como se ve a partir de los $0,6 \text{ s}$.

La gráfica anterior da información acerca de la tensión de carga de la batería. Para todos los valores de irradiancia considerados para estos experimentos, la tensión de referencia para el modo de control a tensión constante es la misma, la tensión máxima de la batería, establecida en $117,6 \text{ V}$, como se muestra en la etiqueta de la primera gráfica superior que señala a la línea roja o de referencia.

La línea azul en la primera gráfica muestra la evolución de la tensión desde un valor inicial de 115 V , que en el transitorio crece hasta $116,5 \text{ V}$. Una vez entra en funcionamiento el control a corriente constante, la forma exponencial de la curva la lleva a su valor de pico una vez supera la tensión de referencia. A partir de aquí, el control se realiza a tensión constante fijando de referencia la tensión explicada anteriormente.

Tras la sobreoscilación, que supone el punto de inicio de la etapa de carga a tensión constante, el sistema entra en una fase transitoria que dura desde los $0,15$ segundos hasta los $0,6$ segundos de simulación, donde finalmente se encuentran referencia y valor medido en la entrada de la batería.

En el régimen permanente, el error es cero, y no solo se demuestra con el encuentro de las dos líneas de datos de las gráficas, sino que en las gráficas inferiores se puede observar cómo el error de régimen permanente de la tensión del nodo de salida, común a los dos convertidores, es cero, algo que se cumple a partir de los $0,6$ segundos de simulación.

5.3.2 Irradiancia de 800 W/m^2

Para una irradiancia de 800 W/m^2 , en estos experimentos la potencia generada será una fracción de la potencia máxima generada, que se va a medir para el instante en el que la carga de la batería alcanza el $98,5\%$.

En el caso de que la radiación incidente sea de 800 W/m^2 , los estados pasan por una fase de arranque que dura $0,1 \text{ s}$ y que incluye la precarga del condensador durante un período de tiempo muy corto. La carga a tensión constante, que se establece cuando la tensión de la batería supera la referencia dada de $116,7 \text{ V}$, comienza a los $0,12 \text{ s}$ de nuevo. La carga a tensión constante dura el resto del experimento.

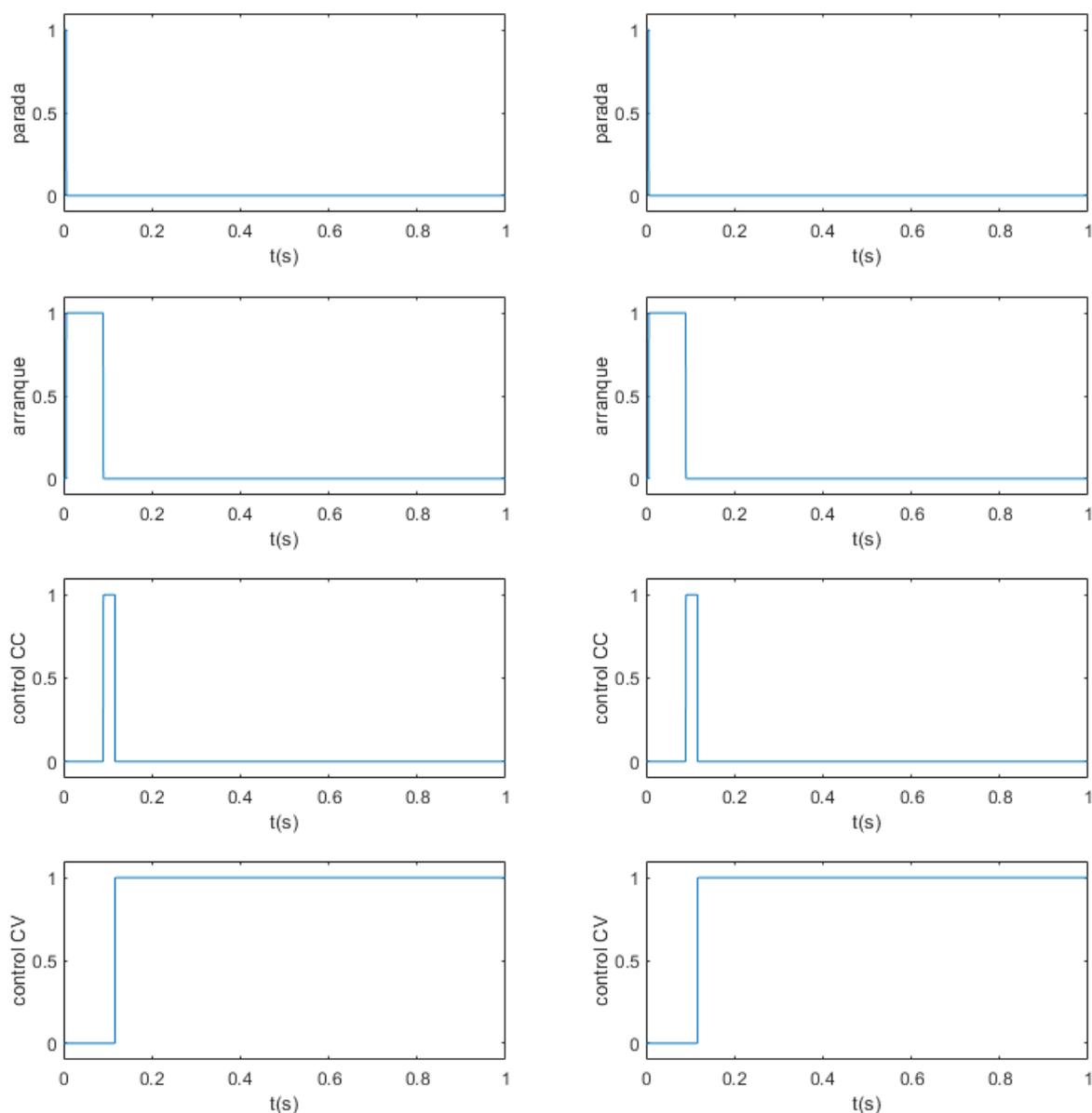


Figura 5-94. Estados de funcionamiento del sistema durante el segundo experimento de carga a tensión constante, con una irradiancia de 800 W/m^2 . Tanto las gráficas de la izquierda como las de la derecha muestran los estados de funcionamiento de ambos paneles fotovoltaicos. A los $0,12 \text{ s}$ entra en funcionamiento el control en tensión constante, que es el régimen permanente de la carga de la batería al porcentaje especificado en estos experimentos.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador, así como el error del controlador para la tensión de salida.

La tensión de entrada, una vez se aplica el control a tensión constante para la carga de la batería a alto porcentaje, en régimen permanente se mide en la salida del panel fotovoltaico una tensión de $15,95 \text{ V}$, como pone de manifiesto la siguiente gráfica.

En la carga a tensión constante, no se fija referencia de tensión para la entrada del elevador porque no hay control MPPT. La tensión de entrada queda fijada libremente por el duty cycle que se obtiene mediante el controlador de tensión de salida del convertidor elevador, quedándose con una tensión que supera la de máxima potencia y no llega a la de circuito abierto, de $16,30 \text{ V}$ para 800 W/m^2 .

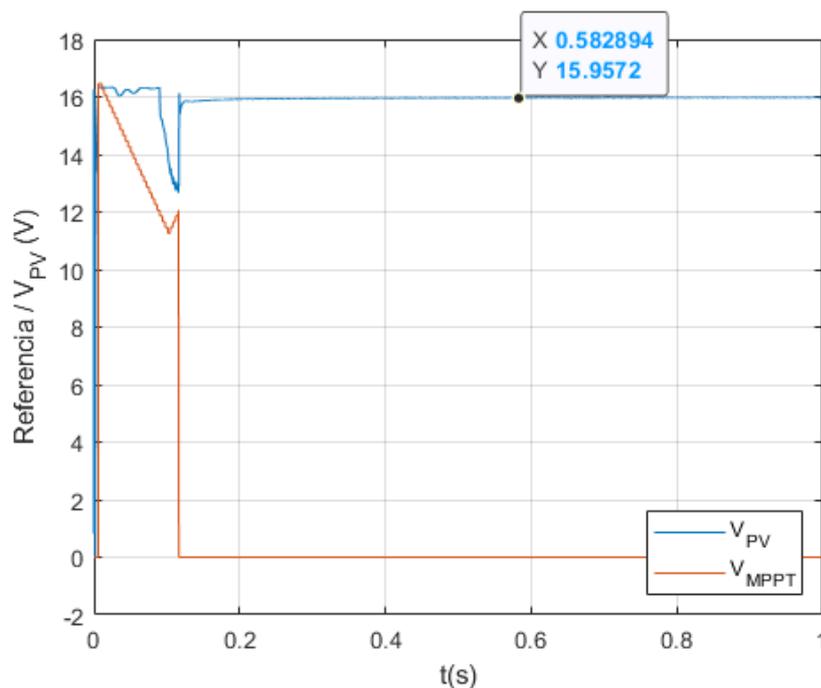


Figura 5-95. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 800W/m^2 . Después del arranque y el transitorio, que finaliza a los 0,12 s, el control no es MPPT y la referencia de tensión no se emplea en la entrada del convertidor elevador. La tensión fijada se acerca al valor de circuito abierto.

La tensión de salida sufre pocos cambios en la dinámica respecto al experimento anterior y tiene de nuevo una referencia de 35 V, que se alcanzan tras un largo transitorio que dura hasta los 0,4 segundos, muy similar a lo visto en experimentos anteriores.

La respuesta del controlador para esta irradiancia de 800W/m^2 en este experimento es similar a la del anterior, ya que no existen grandes sobreoscilaciones en el período transitorio, y el rizado de tensión para la tensión de entrada y de salida del convertidor boost es muy pequeño porque no se aplica el control MPPT. Finalmente, los 35 V se alcanzan para la tensión de salida tras un transitorio de 0,28 segundos, contados a partir de los 0,12 segundos de simulación.

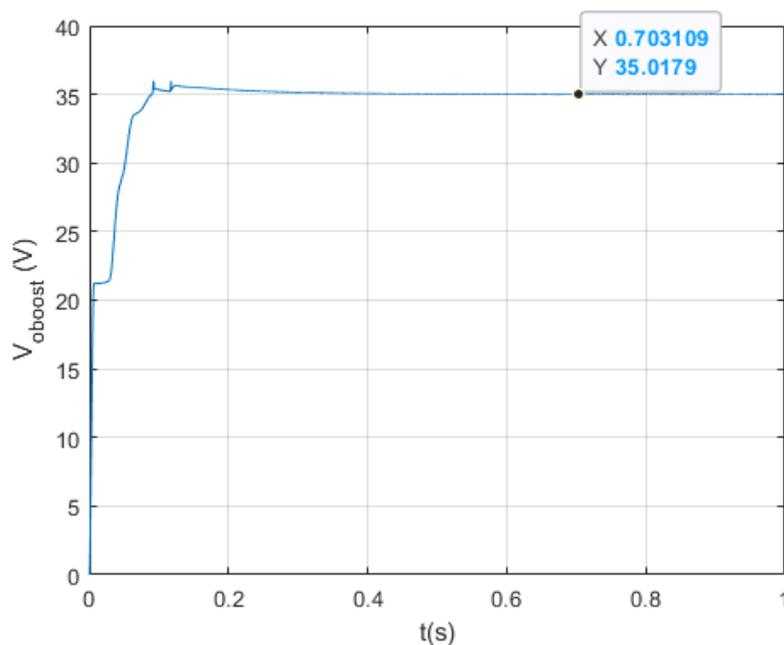


Figura 5-96. Tensión a la salida del convertidor elevador para 800W/m^2 . Esta alcanza definitivamente los 35 V de referencia a los 0,4 s, tras una fase de arranque de 0,1 s en la que los alcanza por primera vez. La dinámica del control a tensión constante es más lenta, de nuevo, que la del control a corriente constante.

En la siguiente gráfica, correspondiente al error existente en el controlador que fija la tensión a la salida del convertidor elevador mientras se carga la batería a tensión constante, se observa cómo este tiende a cero una vez finaliza el arranque, hasta alcanzarlo en cuanto la simulación supera los 0,4 segundos.

La referencia fijada para la tensión de salida del convertidor boost es de 35 V, que se siguen por parte del controlador durante todo el experimento a partir de los 0,12 segundos, una vez el controlador de tensión para la carga a tensión constante ha arrancado.

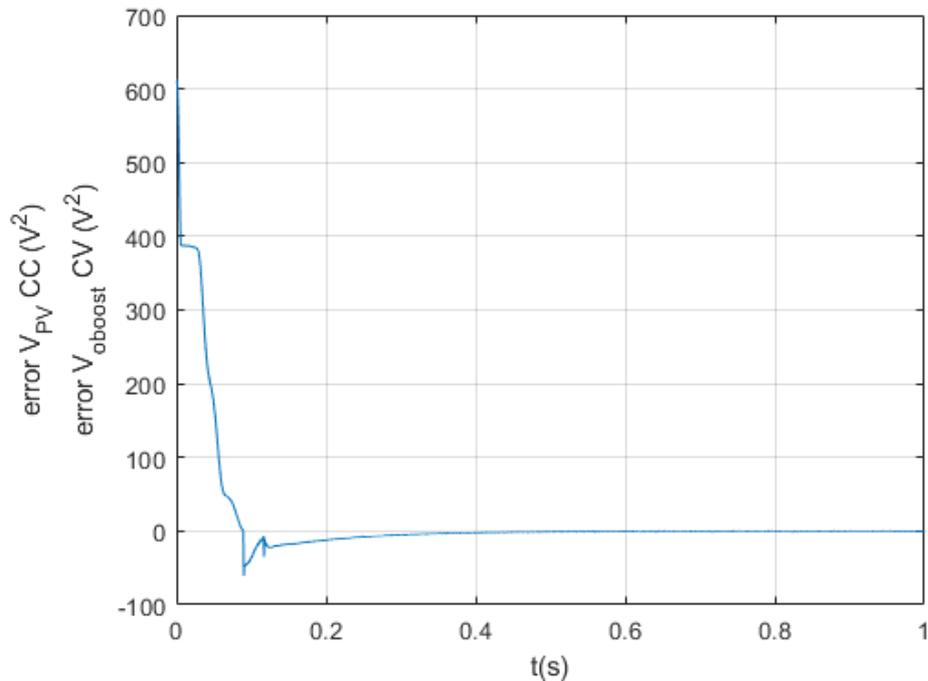


Figura 5-97. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento de carga a tensión constante para una irradiancia a 800 W/m^2 . A partir de 0,12 s se puede observar cómo va disminuyendo la desviación hasta ser cero en 0,6 s, si bien en 0,4 s ya es muy pequeña.

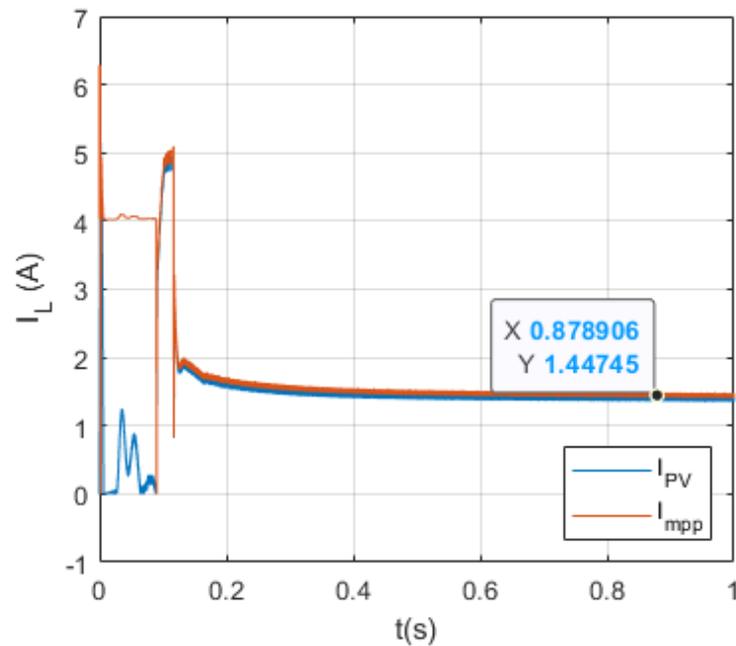


Figura 5-98. Corriente de la bobina del convertidor boost a 800 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante la carga a tensión constante, a partir de 0,12s, corriente y referencia van disminuyendo rápidamente hasta llegar al régimen permanente a los 0,4 s de simulación, punto a partir del que la disminución de la corriente es menos acusada.

En el caso de la corriente de la bobina, va decreciendo lentamente una vez se alcanza el régimen permanente para este valor en algún punto entre los 0,4 y 0,6 segundos de la simulación. El valor se sitúa en torno a 1,44 A, un valor apropiado para el estado de carga a tensión constante con este porcentaje de batería, ya que la tendencia de la corriente corriente en este modo de conducción es ir disminuyendo progresivamente mientras el estado de carga se acerque al 100%, por lo que la potencia de carga disminuye lentamente hasta el corte.

Como el controlador es exactamente el mismo que el empleado en los experimentos de carga, en la gráfica del error en régimen permanente, que es la que está justo debajo de la gráfica de corrientes, se observa que el error en régimen permanente es cero.

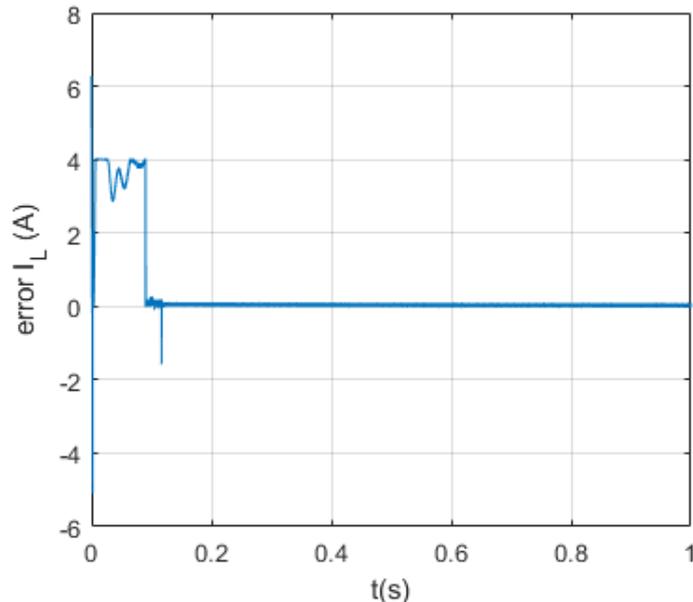


Figura 5-99. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 800 W/m^2 . Este error es cero durante la última parte del transitorio y cuando alcanza el régimen permanente, excepto en los picos. No se aprecia la evolución de la referencia de corriente para la bobina del convertidor elevador.

El error medido a través de la gráfica anterior resulta de restarle a la referencia, fijada en 35 V, la tensión medida a la salida del convertidor elevador, pero el transitorio no se aprecia porque la corriente medida alcanza rápidamente a la referencia.

El duty cycle, que se muestra en la siguiente gráfica, sigue la tendencia que existía para el estado de carga a tensión constante en los experimentos de carga CC-CV. Tras un transitorio que dura hasta un instante situado entre 0,4 y 0,6 segundos, el duty cycle oscila entre un valor mínimo cercano a 0,55 hasta un valor máximo situado en un punto medio entre 0,6 y 0,7.

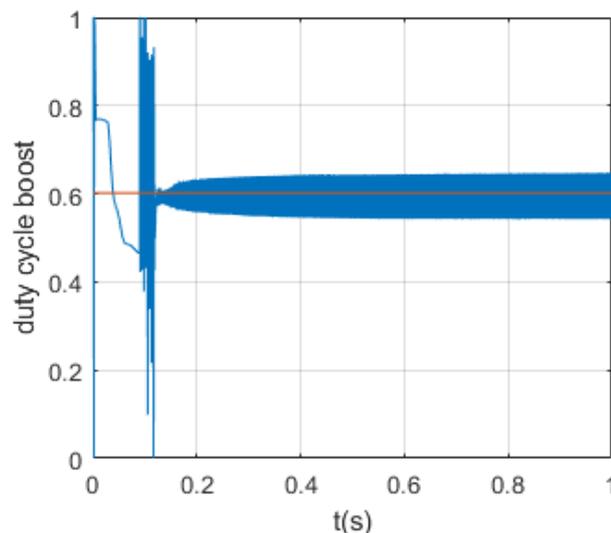


Figura 5-100. Duty cycle del convertidor elevador a 800 W/m^2 para la fase de control a tensión constante. A partir de 0,12 s, para la carga a tensión constante, el duty cycle toma valores situados entre 0,55 y 0,65.

En cuanto a la potencia calculada en la entrada del convertidor elevador, que tiene el mismo valor que la potencia de salida del panel fotovoltaico porque se considera ideal el diodo de bloqueo, esta es una parte de la potencia que generaría el panel fotovoltaico para las condiciones de iluminación dadas si el control se realiza a corriente constante.

Para 800 W/m^2 , la potencia generada por el panel fotovoltaico para una carga del 98,5% de la batería es de $23,127 \text{ W}$, que se alcanza tras un largo transitorio que dura entre los $0,12$ segundos y los $0,5$ segundos de simulación. Esta potencia va disminuyendo lentamente hasta que la corriente de la batería alcance el valor de corte, de 110 mA .

La potencia generada por el panel fotovoltaico, fijada por un duty cycle dado por el controlador del elevador, que toma de referencia 35 V para la tensión de salida del convertidor elevador, es muy similar a la generada para 1000 W/m^2 . El porcentaje de batería inicial es el mismo que para el experimento anterior.

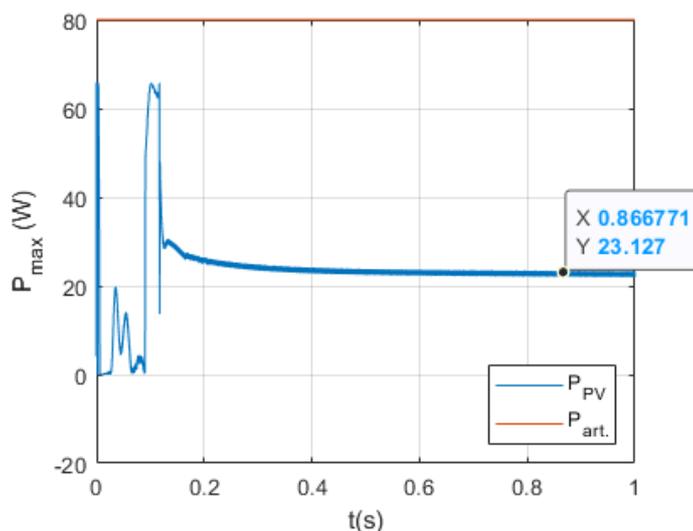


Figura 5-101. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 800 W/m^2 para la carga a tensión constante. Al igual que se ha visto en las gráficas anteriores, hasta $0,4 \text{ s}$ no hay una disminución notable de la pendiente de la potencia, que es siempre descendente.

El convertidor flyback tiene en la entrada una corriente pulsada, la misma que circula por el MOSFET de este convertidor en la rama de baja tensión del transformador. La corriente instantánea de entrada en régimen permanente, alcanzado algo antes de los $0,6 \text{ s}$, toma un valor ligeramente superior a 1 A , muy probablemente situado entre $1,1 \text{ A}$ y $1,2 \text{ A}$. esta corriente, al igual que las anteriores, desciende progresivamente.

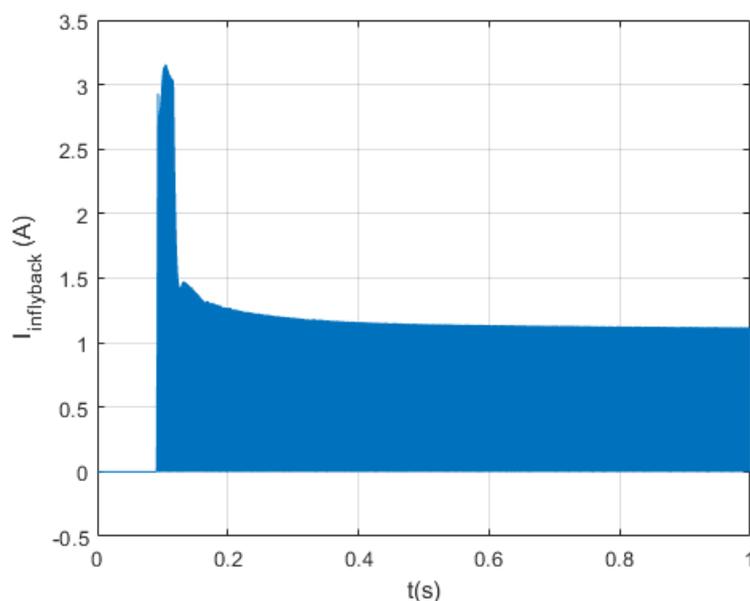


Figura 5-102. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de $0,4 \text{ s}$, esta corriente supera por poco 1 A .

La corriente de la batería, que es la suma de las corrientes que salen de cada uno de los convertidores flyback, es el doble de la corriente de salida de uno de los convertidores flyback que existen en este sistema. El total de convertidores de este sistema era de dos.

La corriente de entrada de la batería se muestra en la siguiente gráfica, y es de 0,34 A. Esta corriente va disminuyendo lentamente hasta llegar al valor mínimo de 110 mA, que es el límite inferior de corriente para mantener la batería en el estado de carga. Por debajo de este límite, se considera que la batería ha llegado a su máxima capacidad, siempre que la tensión tenga el valor máximo.

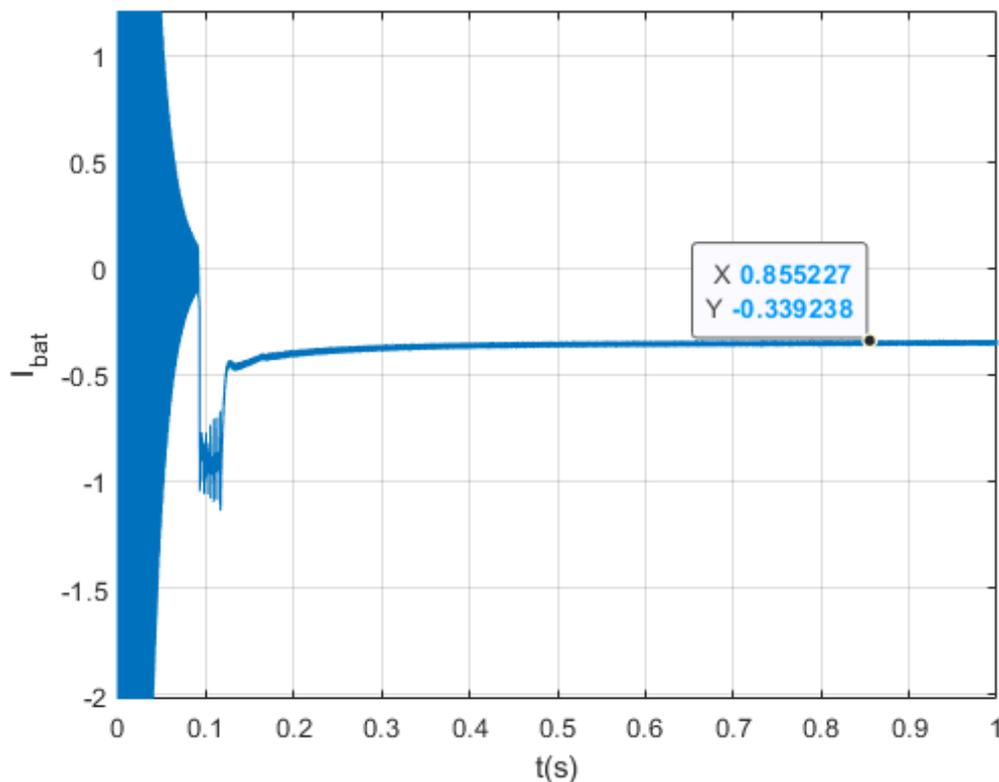


Figura 5-103. Corriente de la batería durante la carga a 800 W/m^2 de irradiancia para el segundo experimento de carga a tensión constante. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. Desde los 0,12 s, cuando se aplica el control a tensión constante para la carga de la batería, la corriente va disminuyendo en valor absoluto proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión. Esto ocurre cuando se alcanza el régimen permanente a los 0,4 s.

En el caso de la corriente de salida para un solo convertidor flyback, basta con dividir la corriente de la batería entre los dos convertidores que existen en el sistema de este proyecto, sobre todo porque la iluminación es la misma para todos los paneles durante las pruebas.

La corriente de salida, que se muestra en la gráfica de más abajo, es de 0,17 A durante la mayor parte del experimento. Se cumple que la corriente que sale de un convertidor Flyback es la mitad de

El error en régimen permanente para la corriente de salida, que es igual a la diferencia existente entre la referencia de corriente para la salida del flyback (en naranja en la siguiente gráfica) y la corriente medida en este punto (en azul), es nulo, como ocurría en los experimentos de carga de la batería usando una técnica de control CC-CV. Si el error es nulo, como se observa en la figura 5-105, se debe a que el controlador es el mismo que el empleado en los experimentos anteriores.

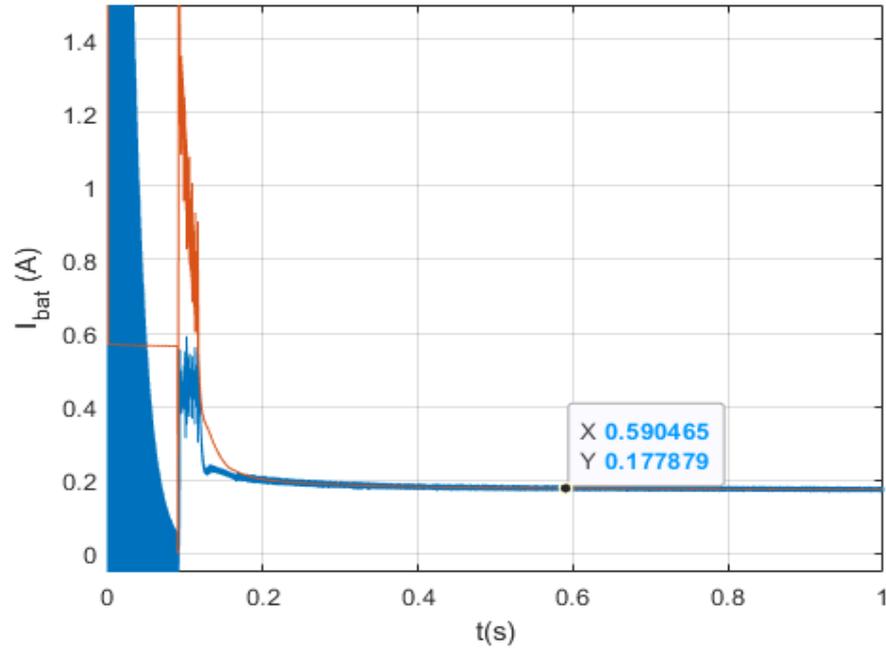


Figura 5-104. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 800 W/m^2 . Entre 0,1 s y 0,4 s hay un transitorio desde que arranca el convertidor hasta que se alcanza el régimen permanente de carga a tensión constante, donde la corriente disminuye más lentamente.

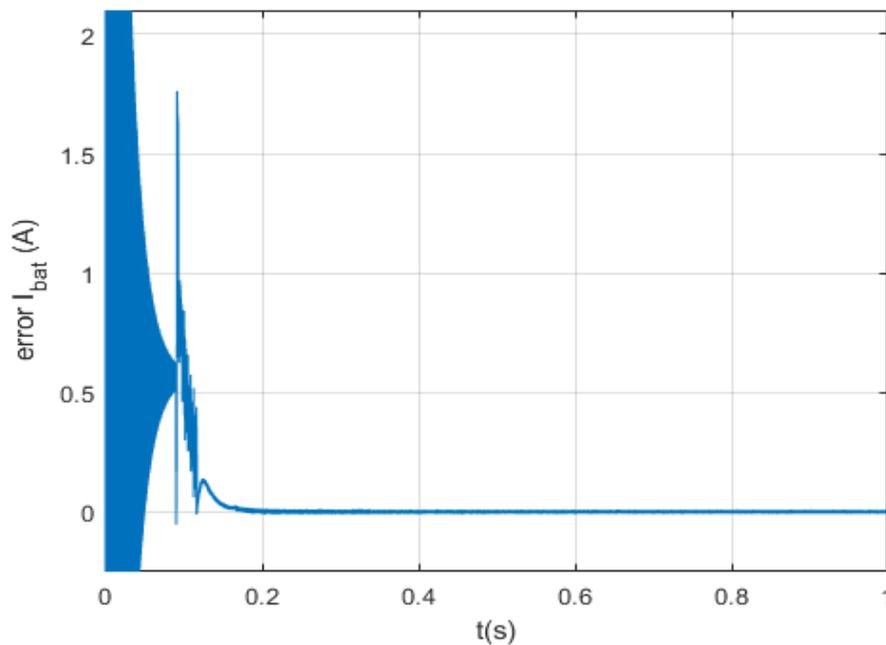


Figura 5-105. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 800 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a tensión constante el error es nulo, algo notable a partir de 0,2 s. Esto significa que la corriente sigue la referencia dada por la tensión de la batería.

La potencia a la salida es de 21,02 W, un valor inferior al visto para la potencia en la salida del panel fotovoltaico, que era de 23,127 W.

Si la potencia medida a la entrada del convertidor elevador era de 23,127 W, se puede calcular el rendimiento

con la ecuación 21, en la que se sustituyen los valores correspondientes a P_{oflyback} y P_{inboost} por sus valores.

$$\eta_{DC/DC} = \frac{21,02 \text{ W}}{23,127 \text{ W}} \cdot 100 = 90,88 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 98,5% para una irradiancia de 800 W/m². Conforme el porcentaje de batería crece, la potencia disminuye ligeramente durante la carga a tensión constante, tras un transitorio que finaliza completamente algo antes de transcurrir 0,6 segundos de experimento. Para el caso descrito, las pérdidas son de 2,107 W. Si se compara con el valor de rendimiento calculado para el 50% de batería, se observa que el rendimiento es menor cuanto mayor es el estado de carga.

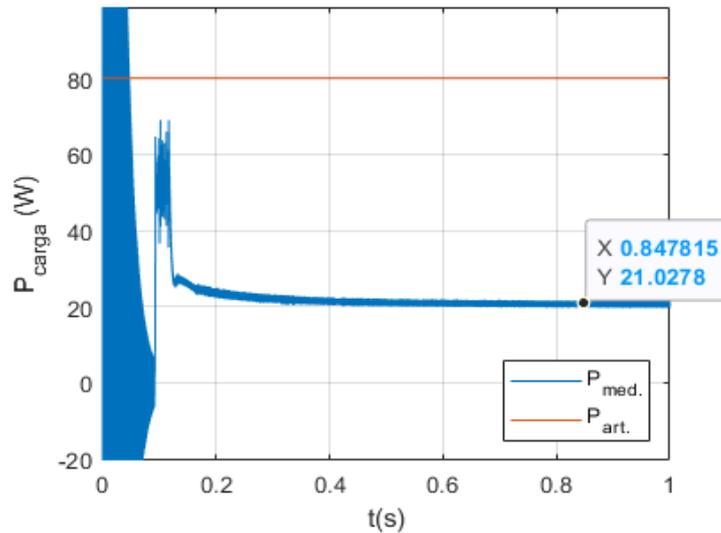


Figura 5-106. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 800 W/m² de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,12 s hasta el final, el valor de la potencia vuelve a ser una fracción de la potencia máxima, como se vio para 1000 W/m². La potencia se compara con el valor teórico de máxima potencia, 80W, marcado en rojo.

El duty cycle es mayor que el calculado teóricamente, de 0,53 para una tensión de entrada del flyback de 35 V y una tensión de salida del flyback de 116,7 V. Esto se debe al modelado de pequeñas pérdidas que hacen que este valor real, que es de unos 0,55 o 0,56, no sea igual que el teórico.

Este valor de duty cycle se establece rápidamente, aproximadamente en la mitad del tiempo que dura el transitorio.

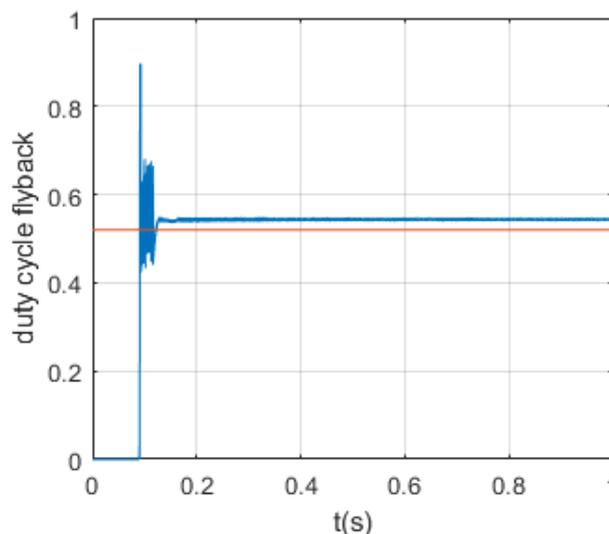


Figura 5-107. Duty cycle del convertidor flyback, que empieza a funcionar a los 0,1 s, para 800 W/m² durante el experimento a tensión constante. El duty cycle se queda en un valor situado entre 0,5 y 0,6, con poco rizado. Aproximadamente, el duty cycle es de 0,55.

Entre estos datos, que dan muchísima información acerca del comportamiento de la batería a altos porcentajes

de carga, están el estado de carga de la batería, que parte de un 98,5%, aunque durante el arranque este baja algunas centésimas. Una vez comienza la fase de transición entre las fases de arranque y de carga a tensión constante, la batería comienza a cargar.

A partir de los 0,2 segundos, la carga se hace de forma lineal, y el estado de carga va subiendo lentamente hasta que la batería queda cargada. La dinámica lenta de la batería se debe a que la capacidad se ha multiplicado por mil respecto de la capacidad elegida para los experimentos de análisis de carga CC-CV.

Como se vio en los experimentos anteriores, para una irradiancia de 800 W/m^2 el porcentaje máximo supera el 99%, por lo que no se han observado comportamientos extraños y el control de la carga de la batería a tensión constante ha sido estable.

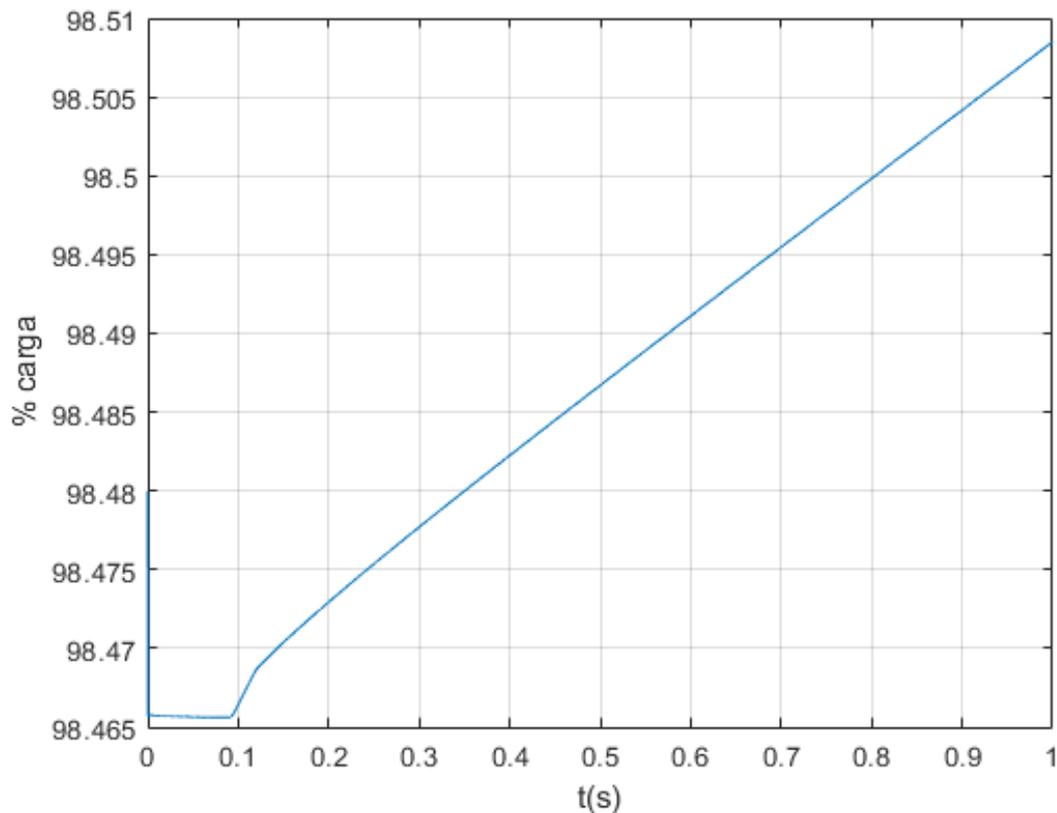


Figura 5-108. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 800 W/m^2 . Durante la fase de arranque, la carga cae algo. Una vez se carga a tensión constante, a partir de 0,12 s, el estado de carga crece hasta que la carga se complete.

La gráfica siguiente da información acerca de la tensión de carga de la batería. Para todos los valores de irradiancia considerados para estos experimentos, la tensión de referencia para el modo de control a tensión constante es la misma, la tensión máxima de la batería, establecida en 117,6 V, como se muestra en la etiqueta de la primera gráfica superior que señala a la línea roja o de referencia.

La línea azul en la primera gráfica muestra la evolución de la tensión desde un valor inicial de 115 V, que en el transitorio crece hasta 116,5 V. Una vez entra en funcionamiento el control a corriente constante, la forma exponencial de la curva la lleva a su valor de pico una vez supera la tensión de referencia. A partir de aquí, el control se realiza a tensión constante fijando de referencia la tensión explicada anteriormente.

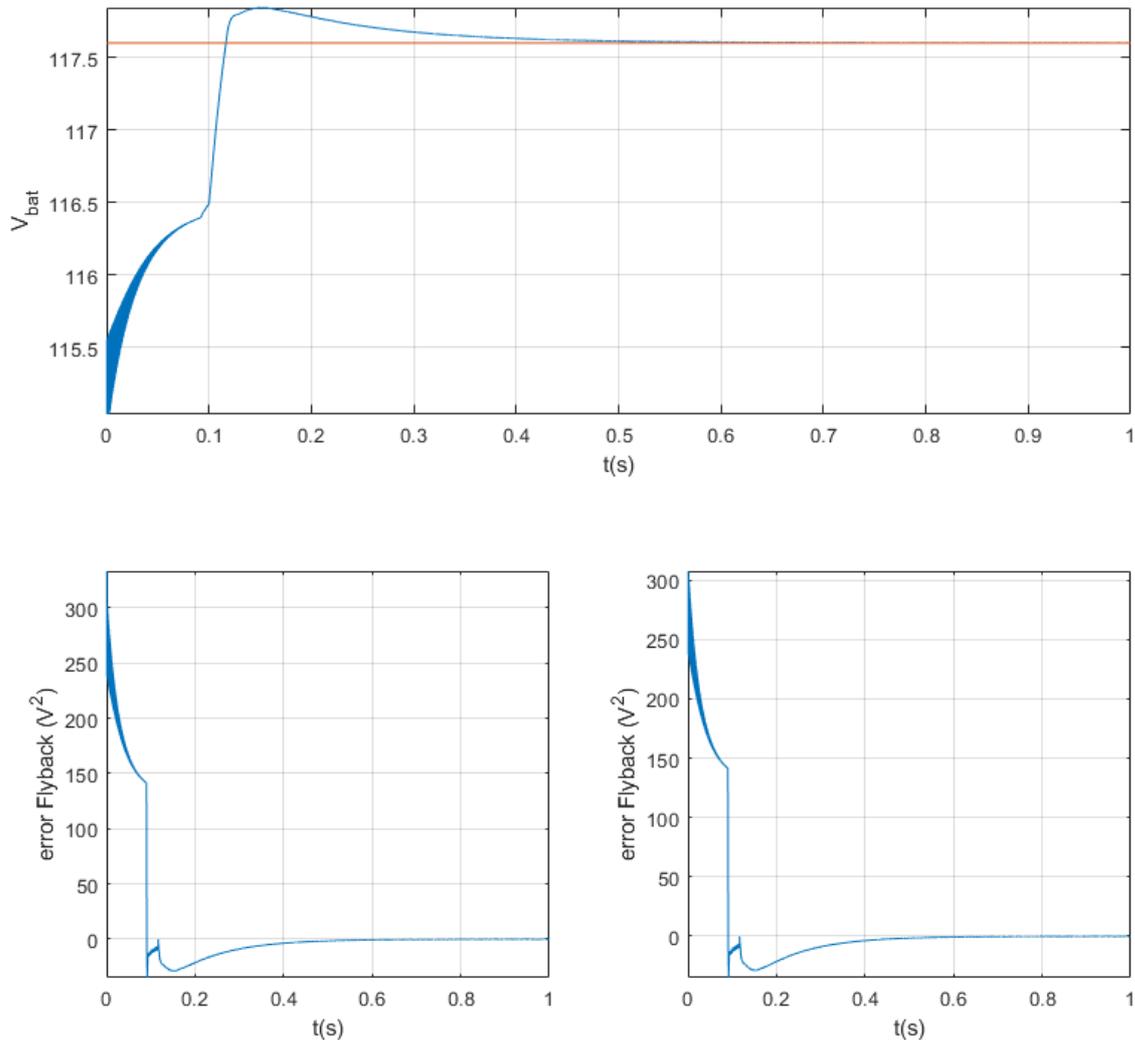


Figura 5-109. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la simulación con una irradiancia de 800 W/m^2 . La tensión llega por primera vez al valor de referencia a los $0,12 \text{ s}$, pero presenta una sobreoscilación antes de llegar a su valor definitivo a los $0,5 \text{ s}$. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, el error en régimen permanente es nulo en la fase de control a tensión constante, a partir de los $0,6 \text{ s}$.

Si se observa en la gráfica superior de la figura anterior, tras la sobreoscilación, que supone el punto de inicio de la etapa de carga a tensión constante, el sistema entra en una fase transitoria que dura desde los $0,15 \text{ s}$ segundos hasta los $0,5 \text{ s}$ segundos de simulación, donde finalmente se encuentran referencia y valor medido en la entrada de la batería.

En el régimen permanente, el error es cero, y no solo se demuestra con el encuentro de las dos líneas de datos de las gráficas, sino que en las gráficas inferiores se puede observar cómo el error de régimen permanente de la tensión del nodo de salida, común a los dos convertidores, es cero, algo que se cumple a partir de los $0,6 \text{ s}$ segundos de simulación.

5.3.3 Irradiancia de 500 W/m^2

Para una irradiancia de 500 W/m^2 , en estos experimentos la potencia generada será una fracción de la potencia máxima del panel. Para esta irradiancia se van a repetir todas las medidas, tomadas en el instante en el que la carga de la batería alcanza el $98,5\%$.

En este experimento, los estados pasan por una fase de arranque que dura $0,1 \text{ s}$ y que incluye la precarga del condensador. La carga a tensión constante, que se establece cuando la tensión de la batería supera la referencia dada de $116,7 \text{ V}$, comienza transcurridos $0,12 \text{ s}$. La carga a tensión constante dura el resto del experimento.

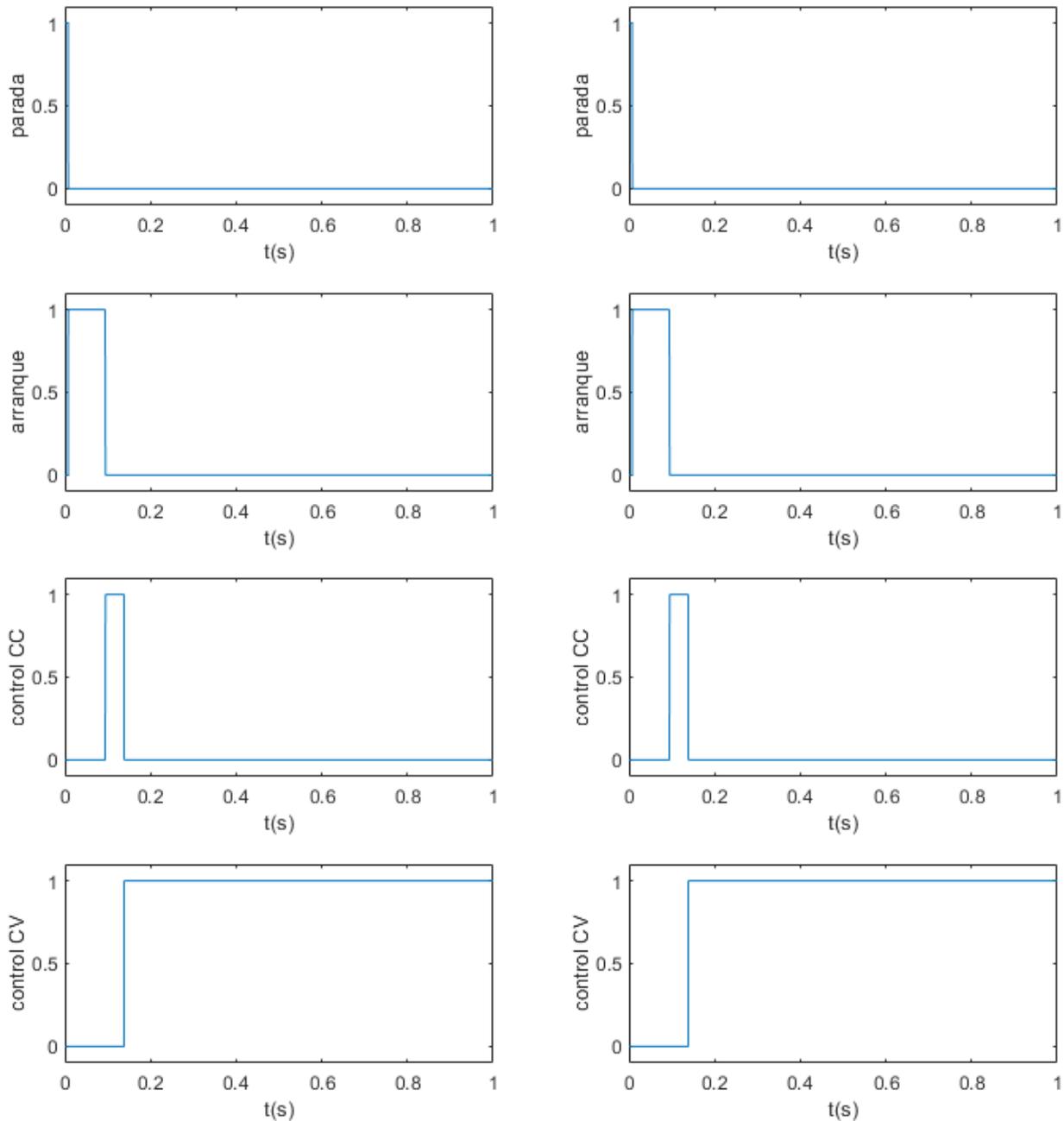


Figura 5-110. Estados de funcionamiento del sistema para el tercer experimento, con 500 W/m^2 de irradiancia. Las gráficas de izquierda y derecha muestran los estados por los que pasa cada panel fotovoltaico. A los 0,1 s entra en funcionamiento el sistema al completo, que entra en el estado de activación del control a tensión constante cuando transcurren 0,15 s desde el inicio del experimento.

En primer lugar, se muestran las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador, y el error del controlador para la tensión de salida, ya que es la que se fija mediante referencia en estos experimentos.

La tensión de entrada, una vez se ha entrado en la fase de carga a tensión constante, se establece en 15,519 V, y se acerca poco a poco, tal como se puede observar en la siguiente gráfica.

La tensión de entrada se establece libremente mediante el duty cycle calculado por el controlador de tensión a la salida del convertidor, sin intervención del control MPPT. Esta tensión toma un valor situado entre el de tensión de máxima potencia y el de tensión de circuito abierto, que es de 16 V para 500 W/m^2 .

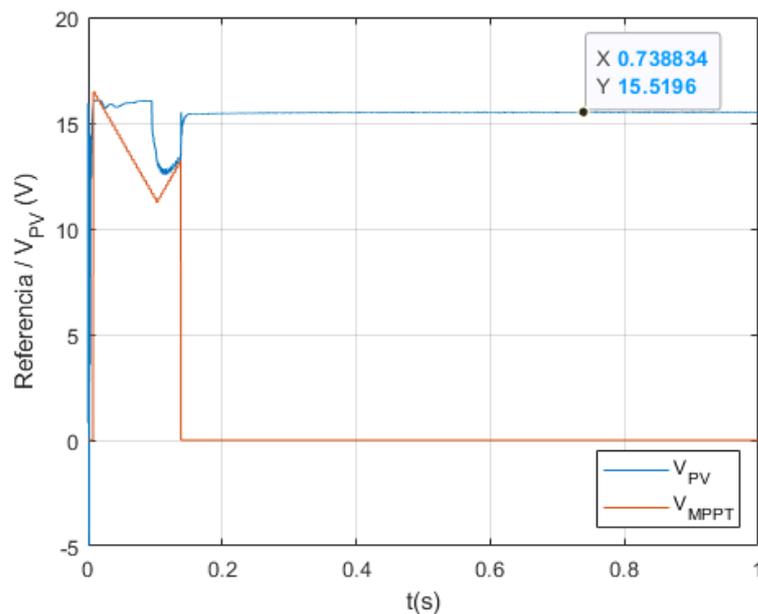


Figura 5-111. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 500W/m^2 y referencia. Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre $0,1\text{s}$ y $0,15\text{s}$, el controlador busca el punto de máxima potencia. Finalmente, a partir de $0,15\text{s}$ la tensión del panel no está regulada por ningún controlador y depende del duty cycle, tomando un valor cada vez más cercano a V_{OC} .

La tensión de salida tiene una referencia de 35V , que se alcanzan tras un largo transitorio que dura hasta los $0,4$ segundos aproximadamente, poco apreciable en la gráfica anterior de las tensiones de entrada, pero que se puede observar con más claridad en las gráficas sucesivas.

La referencia de 35V se alcanza en el régimen permanente tras un transitorio de $0,28$ segundos, que se cuentan a partir de los $0,12$ segundos de simulación, en los que la tensión de salida del convertidor elevador, que es la misma que se mide a la entrada del convertidor flyback, alcanza un valor muy cercano a 35V , concretamente en la gráfica aparece en la etiqueta $35,015\text{V}$.

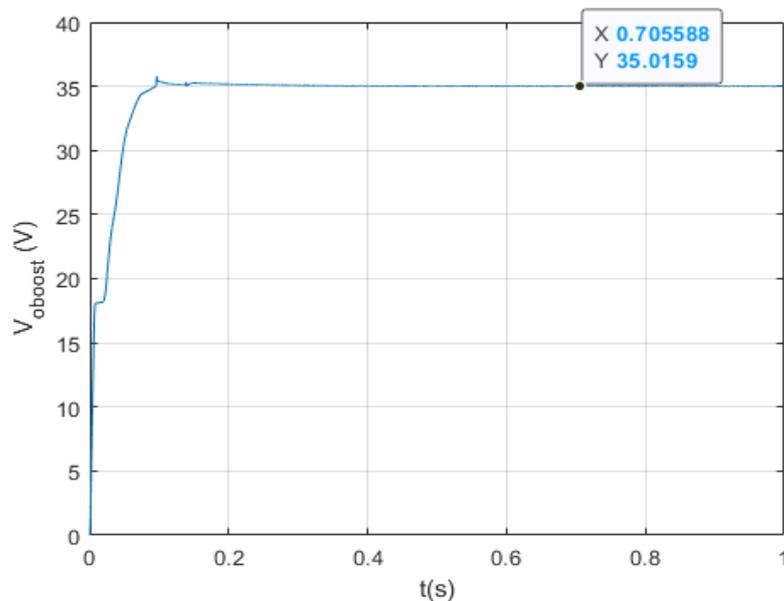


Figura 5-112. Tensión a la salida del convertidor elevador para 500W/m^2 . Los 35V de referencia para el modo de carga a tensión constante se alcanzan a los $0,4\text{s}$, si bien el error ya era pequeño una vez realizada la transición y el arranque de convertidores.

En la siguiente gráfica, correspondiente al error existente en el controlador, que fija la tensión a la salida del convertidor elevador para el modo de carga de la batería a tensión constante, se observa cómo este se va acercando a cero en el régimen permanente hasta alcanzar el cero en cuanto la simulación supera los $0,4$

segundos.

La referencia fijada para la tensión de salida del convertidor boost es de 35 V, que se siguen por parte del controlador durante todo el experimento a partir de los 0,12 segundos, una vez el controlador ha arrancado.

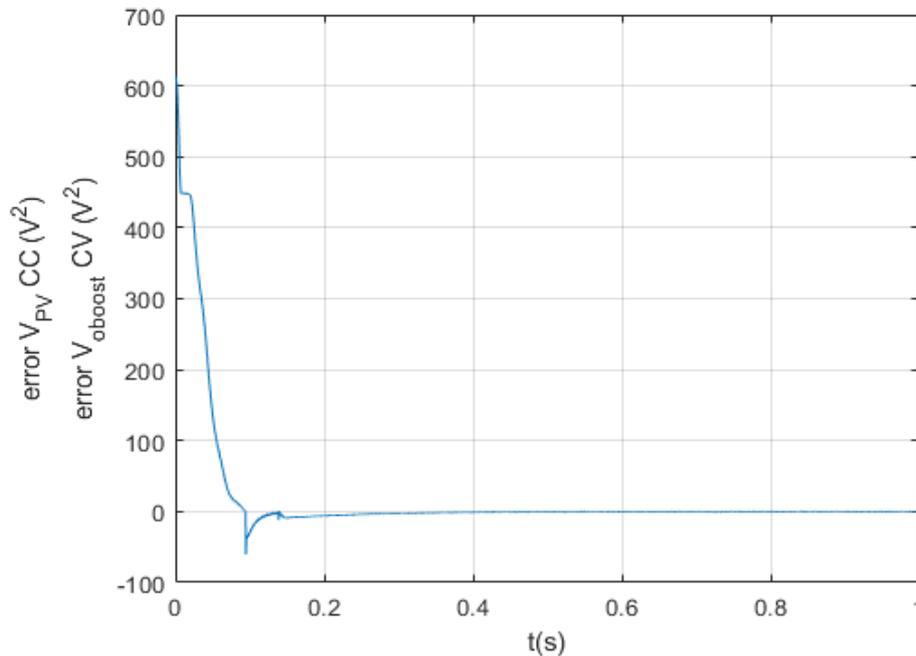


Figura 5-113. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento a 500 W/m^2 . A partir de 0,4 s el error de régimen permanente es nulo, tras una pequeña desviación en 0,15 s, cuando se produce el cambio de control.

En el caso de la corriente de la bobina, va decreciendo lentamente una vez se alcanza el régimen permanente en algún punto entre los 0,4 y 0,6 segundos de la simulación. El valor se sitúa en torno a 1,49 A, un valor apropiado para el estado de carga a tensión constante, ya que la corriente en este modo de conducción va disminuyendo progresivamente conforme la batería va llenando su capacidad, por lo que la potencia de carga disminuye hasta llegar al valor de corriente de corte.

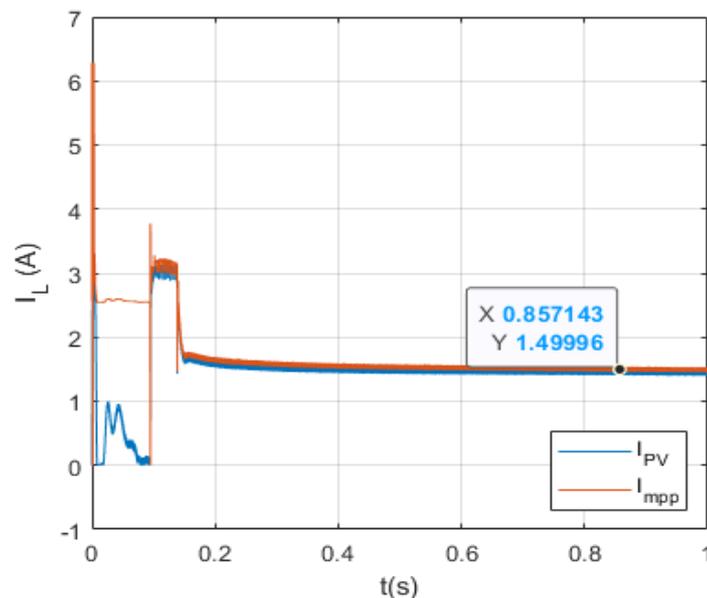


Figura 5-114. Corriente de la bobina del convertidor boost a 500 W/m^2 de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. Durante el control CV, la corriente deja de disminuir rápidamente una vez se alcanza el régimen permanente en 0,4 s. Si se compara con el valor de corriente para el modo de carga a corriente constante, esta era de 2,85 A teóricos,

que se cumplieran en los experimentos de carga CC-CV, por lo que esta corriente vuelve a ser una parte de la corriente que circula por la bobina cuando se aplica el algoritmo MPPT.

Como el controlador de la corriente de salida del convertidor elevador es el mismo que el empleado para los experimentos CC-CV, el error en régimen permanente es nulo. Este error se obtiene cuando se le resta a la tensión de referencia la tensión medida a la salida del convertidor elevador. En la gráfica, la corriente medida alcanza rápidamente a la referencia, por lo que el transitorio en el que la corriente alcanza su valor definitivo no es apreciable.

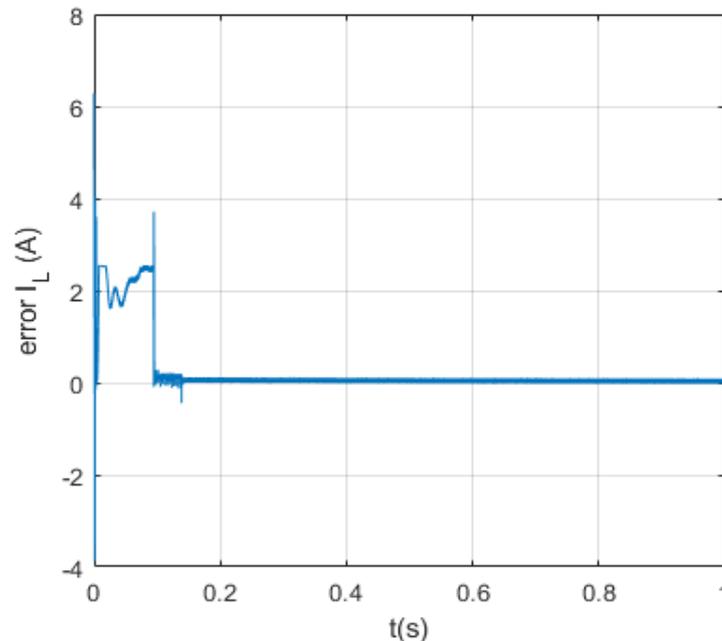


Figura 5-115. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 500 W/m^2 . Este error es prácticamente cero, excepto en los transitorios de un estado a otro, durante la carga a tensión constante a partir de los 0,15 s.

El duty cycle, que se muestra en la siguiente gráfica, es el visto en los experimentos de carga CC-CV en la parte de control a tensión constante. En el régimen permanente del experimento, el duty cycle oscila entre un mínimo de 0,55 aproximadamente y un máximo situado en un punto medio entre 0,6 y 0,7.

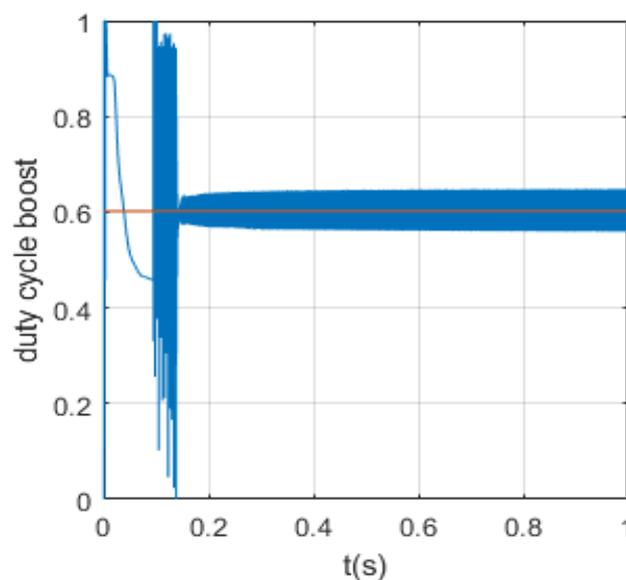


Figura 5-116. Duty cycle del convertidor elevador a 500 W/m^2 . A partir de 0,4 s el duty cycle oscila en torno a 0,6 para el control de la carga a tensión constante, con pequeñas variaciones entre 0,55 y 0,65.

En cuanto a la potencia calculada en la entrada del convertidor elevador o de salida del panel fotovoltaico, con

un diodo de bloqueo ideal, que coinciden por el motivo anterior, es una parte de la potencia máxima que genera el panel fotovoltaico para las condiciones de iluminación dadas.

Para 500 W/m^2 , la potencia generada por el panel fotovoltaico para una carga del 98,5% de la batería es de 23,23 W, muy similar a la vista en los experimentos anteriores, alcanzada tras un transitorio que dura entre los 0,12 segundos y los 0,5 segundos de simulación. Esta potencia va disminuyendo conforme la batería va llenando su capacidad.

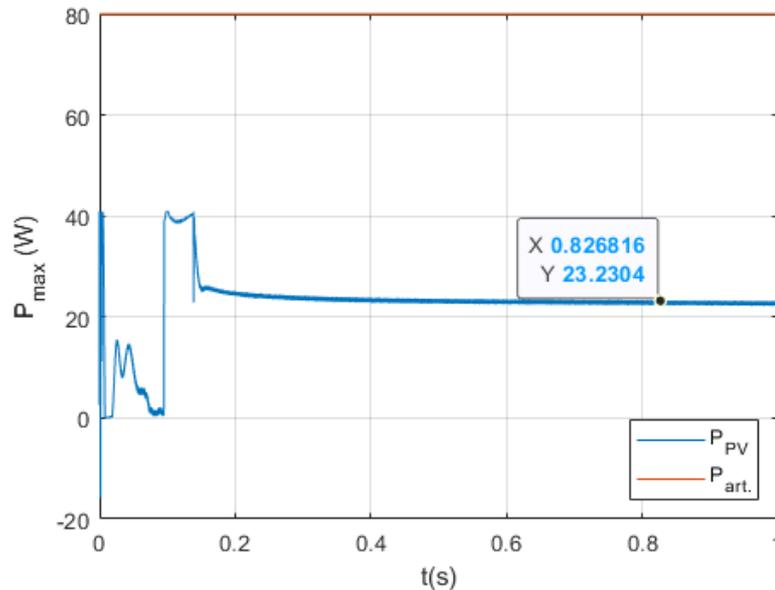


Figura 5-117. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 500 W/m^2 durante la fase de carga a tensión constante. Una vez superado a los 0,4 s la fase de arranque y el transitorio, la potencia generada es una fracción de la máxima potencia, y va descendiendo lentamente conforme la batería se carga.

El convertidor flyback tiene en su entrada una corriente pulsada, que es la que circula por el MOSFET de este convertidor en la rama de baja tensión del transformador. La corriente instantánea de entrada en régimen permanente, al que se llega a los 0,5 segundos, toma un valor ligeramente superior a 1 A, muy probablemente situado entre 1,1 A y 1,2 A. Esta corriente, al igual que las demás, desciende progresivamente conforme la batería se va cargando.

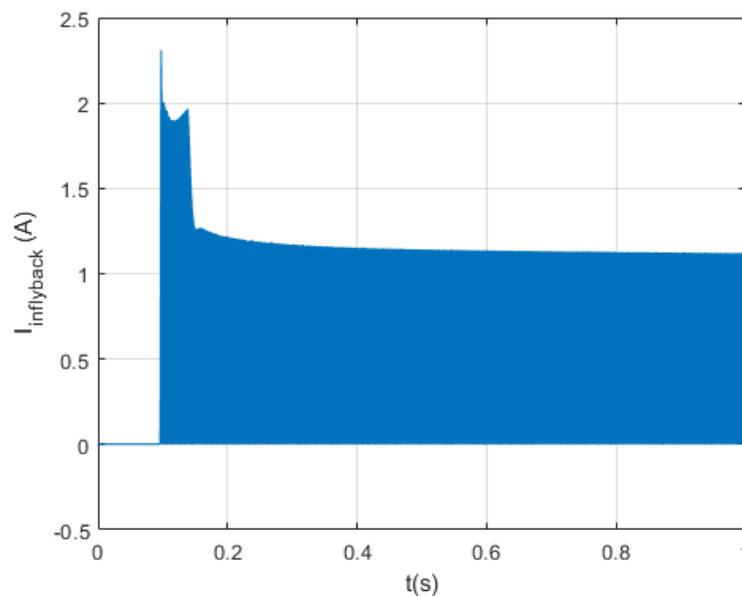


Figura 5-118. Corriente instantánea de entrada del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de 0,4 s tras el transitorio, esta corriente supera levemente 1 A.

La corriente de la batería consta de la suma de todas las corrientes que salen de cada uno de los convertidores

flyback. Como se vio anteriormente, al haber dos paneles fotovoltaicos en el proyecto, la corriente es el doble de la corriente que sale de uno solo de los convertidores.

La corriente que entra en la batería se muestra en la siguiente gráfica, y es de 0,349 A. Esta corriente disminuye lentamente al avanzar el experimento. No se llega a ver, pero cuando esta llega al mínimo de 110 mA, valor de corte especificado en la batería, la carga no continúa, pues se considera llena una vez se corta la carga.

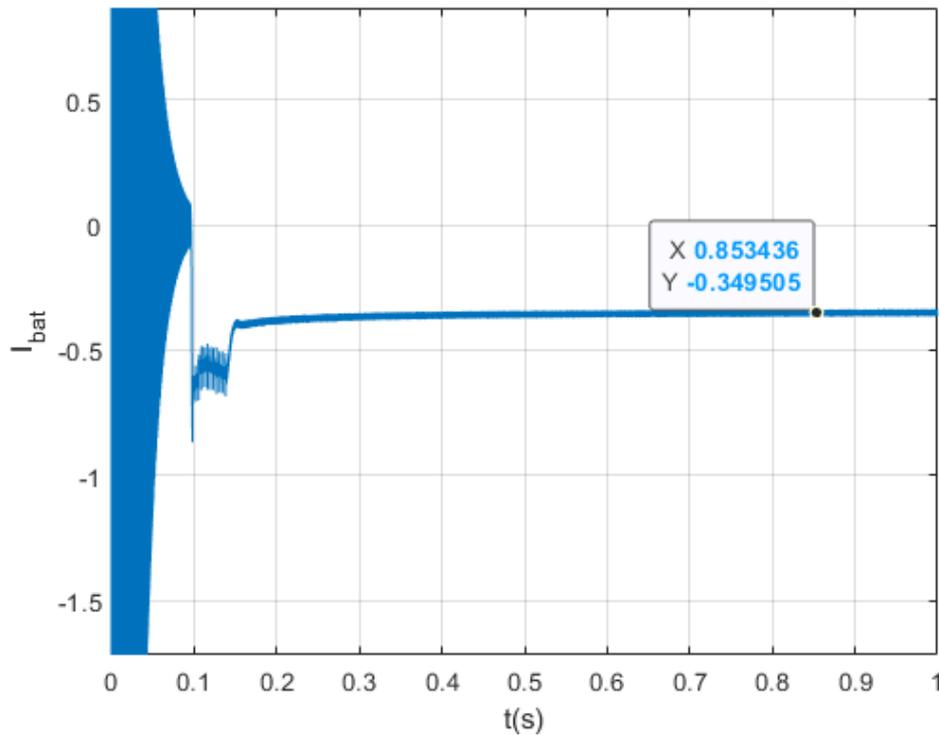


Figura 5-119. Corriente de la batería durante la carga a 300 W/m^2 de irradiancia para el tercer experimento de carga a tensión constante. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de 0,4 s, cuando se alcanza el régimen permanente la corriente va disminuyendo proporcionalmente a la potencia, permaneciendo constante la tensión.

La corriente de salida para un solo convertidor flyback es la mitad de la corriente anterior. En la gráfica de más abajo, el valor medido (en la curva azul) es de 0,177 A. La corriente es la mitad porque los paneles tienen las mismas condiciones de iluminación y emplean los mismos convertidores de potencia con los mismos controladores. La corriente sigue en todo momento la referencia, calculada a partir de la tensión de referencia de la batería. Los controladores no han cambiado respecto al experimento anterior.

El error en régimen permanente para la corriente de salida, que es igual a la diferencia existente entre la referencia de corriente para la salida del flyback (en naranja en la siguiente gráfica) y la corriente medida en este punto (en azul), es nulo, como ocurría en los experimentos de carga de la batería usando una técnica de control CC-CV.

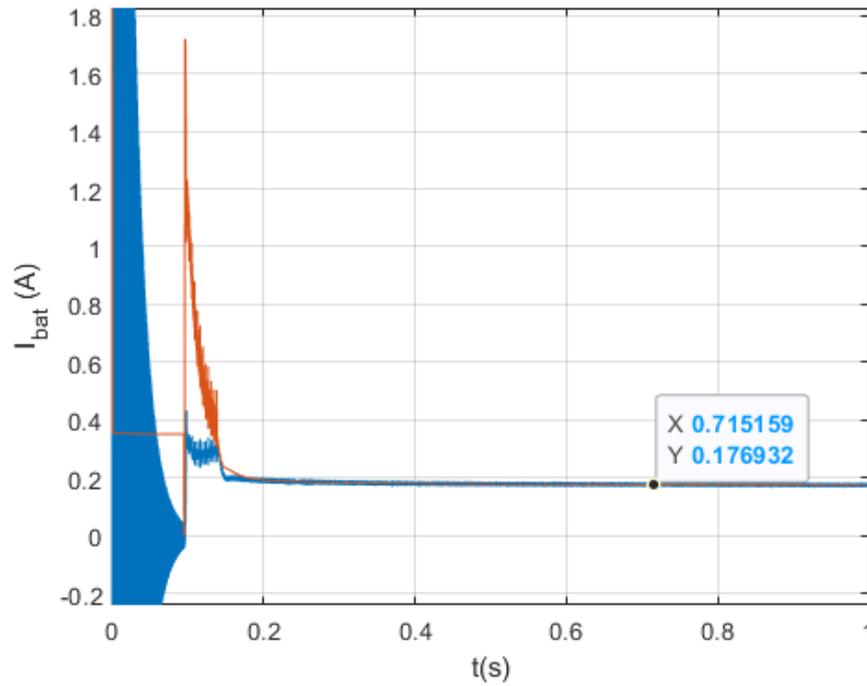


Figura 5-120. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 500 W/m^2 . Una vez se pasa al control a tensión constante, al llegar a 0,2 s la referencia y la corriente coinciden durante el experimento. A partir de 0,4 s, la corriente desciende lentamente.

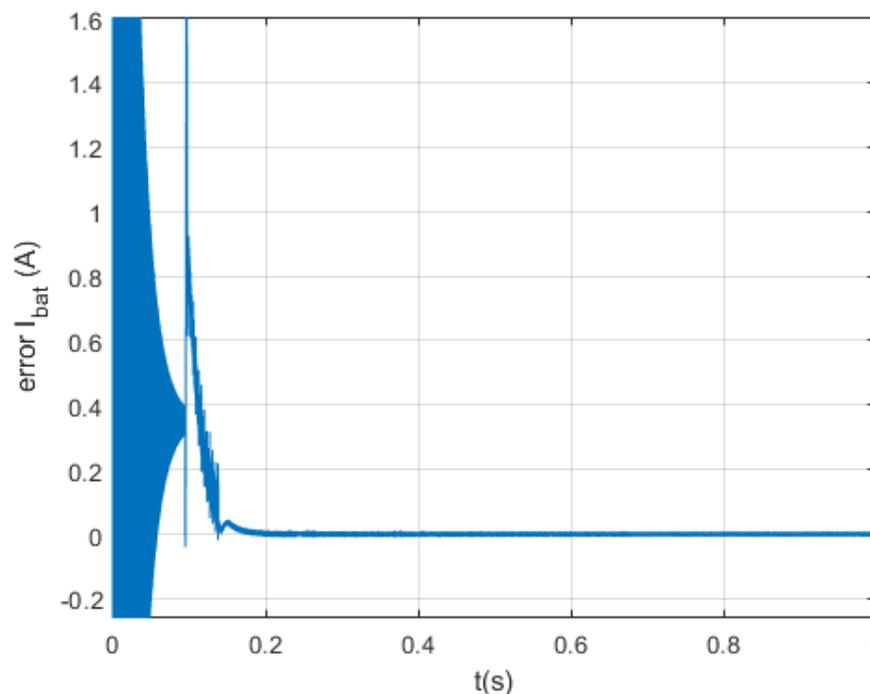


Figura 5-121. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 500 W/m^2 de irradiancia. El error en régimen permanente de la corriente es nulo una vez se ha alcanzado la referencia antes de llegar a 0,2 s, pero no se aprecia la evolución de la corriente en el transitorio una vez se llega al modo de control a tensión constante.

La potencia a medida a la salida del convertidor flyback es de 21,07 W, un valor inferior al visto para la potencia en la salida del panel fotovoltaico.

Como se conoce que la potencia medida a la entrada del convertidor elevador es de 23,23 W, se puede calcular el rendimiento total del sistema con la ecuación 21, en la que se sustituyen los valores correspondientes a P_{oflyback} y P_{inboost} por sus valores.

$$\eta_{DC/DC} = \frac{21,07 \text{ W}}{23,23 \text{ W}} \cdot 100 = 90,71 \%$$

Este rendimiento calculado es válido para un estado de carga en torno al 98,5% para 500 W/m². Cuanto mayor es el porcentaje de batería, la potencia disminuye lentamente durante la carga a tensión constante, tras un transitorio que finaliza completamente en 0,5 segundos. Para el caso descrito, las pérdidas son de 2,16 W. Si se compara con el valor de rendimiento calculado para el 50% de batería, se observa que el rendimiento desciende a un mayor porcentaje de carga.

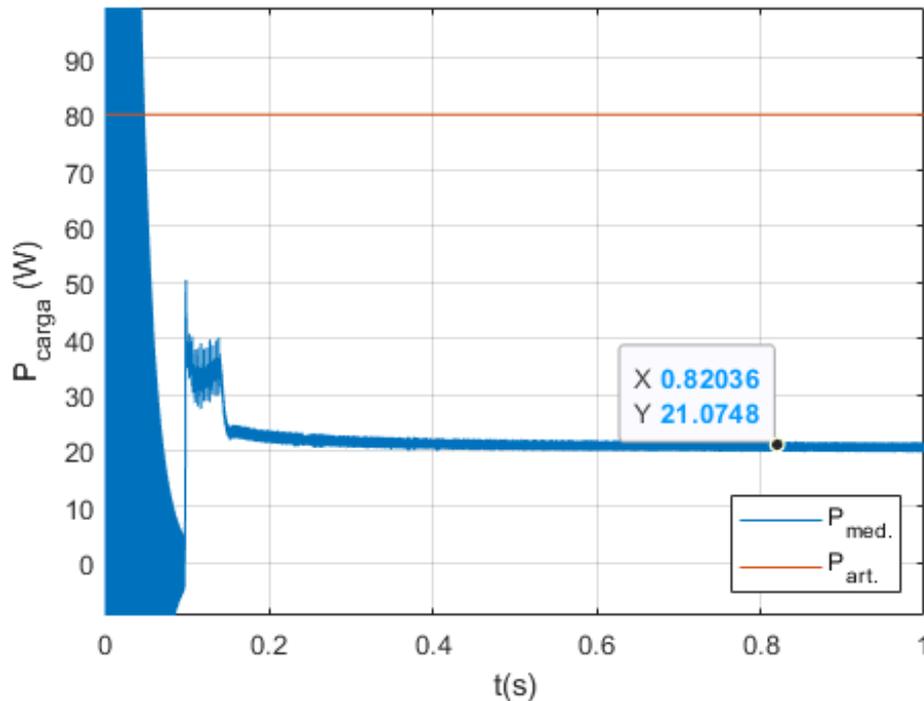


Figura 5-122. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 500 W/m² de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 0,15 s hasta el final, el valor de la potencia es una fracción de los 40 W alcanzados a corriente constante. La pendiente se hace menos acusada a partir de 0,5 s.

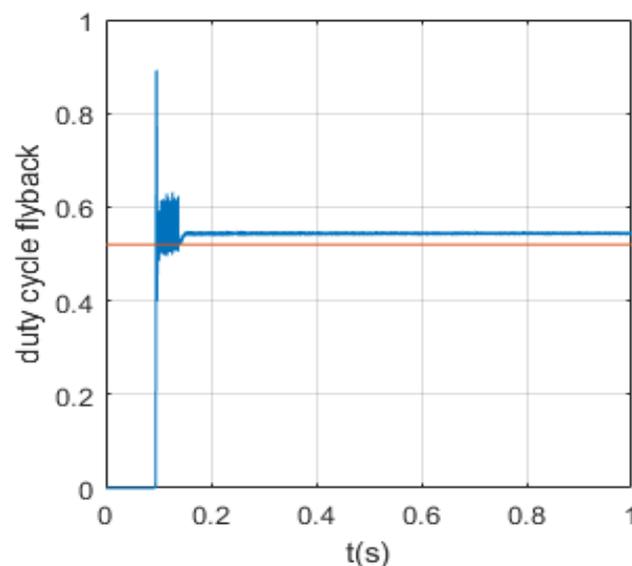


Figura 5-123. Duty cycle del convertidor flyback para 500 W/m², que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta un valor de 0,55, con pocas oscilaciones en régimen permanente.

El duty cycle visto en la gráfica anterior es mayor que el calculado teóricamente, que es 0,53 para una tensión de entrada del flyback de 35 V y una tensión de salida del flyback de 116,7 V. Esto se debe al modelado de pérdidas en elementos activos y pasivos del sistema que hacen que este valor del duty cycle, que es de unos 0,55 o 0,56, no coincida con el teórico. Este valor se establece rápidamente, en menos la mitad del tiempo que dura el transitorio.

Tras el duty cycle, queda por observar la evolución de dos de los datos que dan información acerca del estado de la batería. Uno es el estado de carga de la batería, que parte de un 98,5%, aunque durante el arranque este baja algunas centésimas. Una vez comienza la fase de transición entre la fase de arranque y la de carga a tensión constante, la batería comienza a cargar.

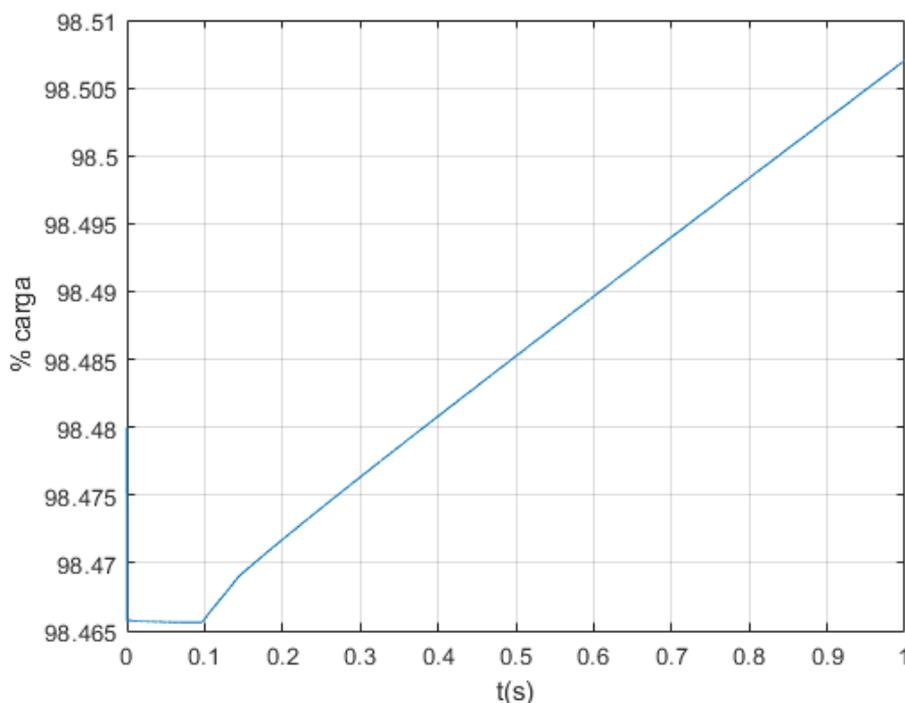


Figura 5-124. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 500 W/m². Durante la fase de carga a tensión constante, a partir de 0,1 s el estado de carga crece hasta llegar a la carga máxima.

Como se observa en la gráfica anterior, partir de los 0,2 segundos, la carga se hace de forma aparentemente lineal, y el estado de carga va subiendo lentamente hasta que la batería queda cargada, aunque la llegada al valor máximo de carga no se ve en los tiempos de este experimento. La capacidad de la batería sigue siendo 1000 veces mayor que en los experimentos de carga CC-CV.

Al igual que en los experimentos de carga CV anteriores, para una irradiancia de 500 W/m² el porcentaje máximo supera el 99%, por lo que no se han observado comportamientos extraños y el control de la carga de la batería a tensión constante ha sido estable.

La gráfica siguiente muestra cómo evoluciona la tensión de carga de la batería, partiendo del 98,48%. La tensión de referencia se establece nuevamente en 117,6 V, señalados en la gráfica superior por una línea roja que marca esta referencia.

La línea azul en la primera gráfica muestra la evolución de la tensión desde un valor inicial de 115 V, que crece hasta 116,5 V en la fase de arranque. Una vez entra en funcionamiento el control a corriente constante, la forma exponencial de la curva a altos porcentaje de batería lleva la tensión a su valor de pico, alcanzado una vez supera la tensión de referencia. A partir de aquí, el control se realiza a tensión constante fijando de referencia la tensión explicada anteriormente.

Tras la sobreoscilación, que supone el inicio de la carga a tensión constante, etapa de la que interesa estudiar la cantidad, el sistema entra en una fase transitoria que dura desde los 0,15 segundos hasta los 0,5 segundos de simulación, donde finalmente se encuentran referencia y valor medido en la entrada de la batería.

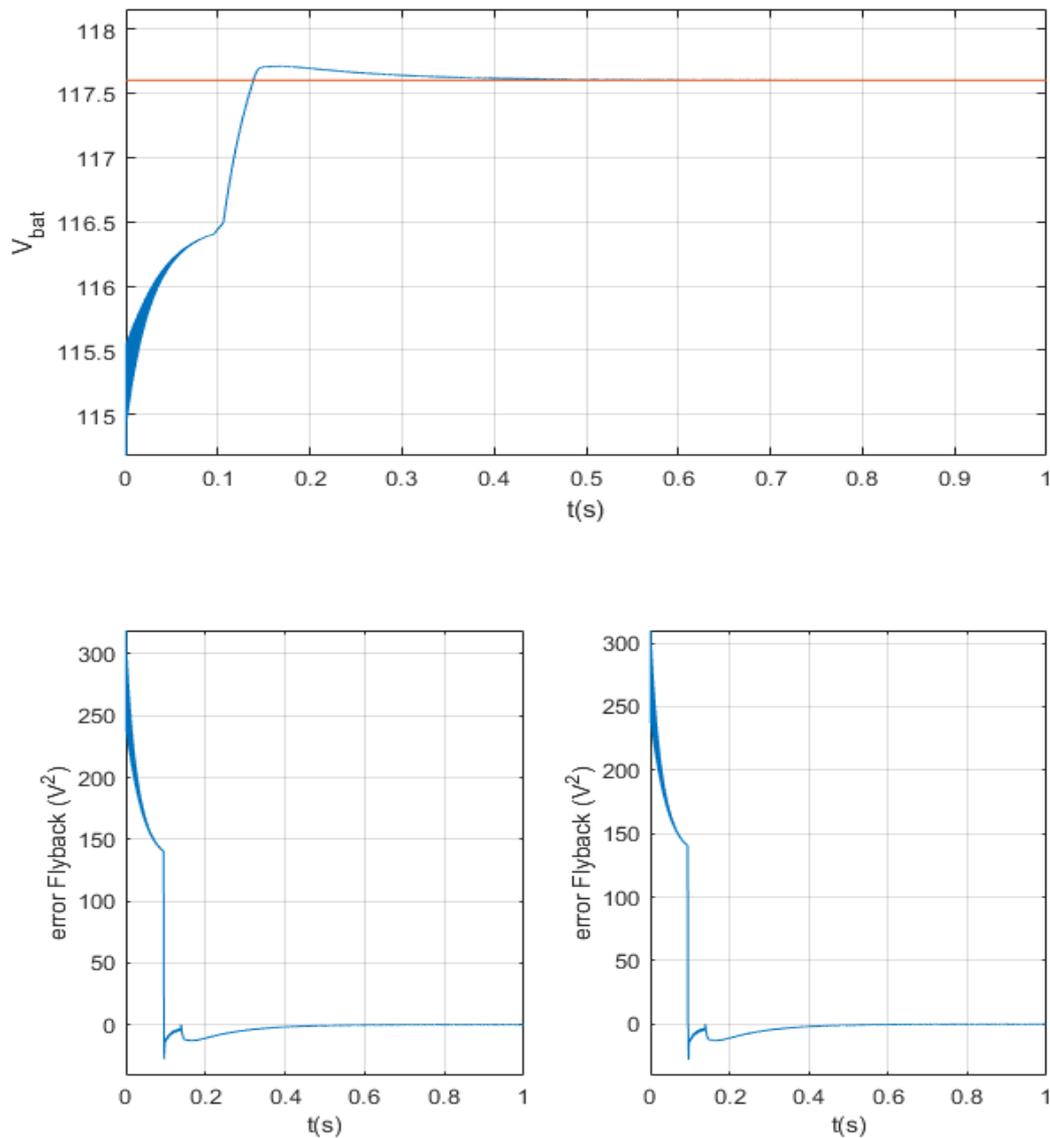


Figura 5-125. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la tercera simulación, con una irradiancia de 500 W/m^2 a tensión constante. El valor de referencia se supera por primera vez a los 0,13 s, pero se estabiliza, tras la sobreoscilación, en torno a 0,5 s. Las gráficas inferiores muestran el error de control para el cuadrado de la tensión. A la izquierda y a la derecha, el error es nulo para el control a tensión constante en régimen permanente.

En el régimen permanente, el error es cero, y no solo se demuestra con el encuentro de las dos líneas de datos de las gráficas, sino que en las gráficas inferiores se puede observar cómo el error de régimen permanente de la tensión del nodo de salida, común a los dos convertidores, es cero, algo que se cumple a partir de los 0,5 segundos de simulación.

5.3.4 Irradiancia de 300 W/m^2

Para una irradiancia de 300 W/m^2 y un estado de carga del 98,5%, se realizarán los mismos experimentos que para las irradiancias anteriores, aunque esta irradiancia es tan baja que los paneles fotovoltaicos podrían no entregar potencia suficiente al sistema. Esto pasa principalmente porque la corriente a la salida podría llegar al valor de corte.

En primer lugar, se describirán los resultados de las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador, así como el error del controlador para la tensión de salida.

La tensión de entrada, una vez se ha entrado en la fase de carga a tensión constante tras una fase de arranque y

otra de carga a corriente constante, más larga que para los experimentos anteriores, esta presenta un transitorio caótico en el que baja a unos niveles de tensión muy bajo, llevando el panel a una corriente de cortocircuito, lo que se traduce en pérdidas de potencia, hasta que la tensión sube cuando se corta la carga de la batería.

Como en los experimentos anteriores, no hay seguimiento de una referencia para la tensión de entrada del panel fotovoltaico porque no se establece mediante el control MPPT. La tensión de entrada queda fijada libremente por el duty cycle que se obtiene mediante el controlador de tensión de salida del convertidor. La tensión del panel no se queda estabilizada en un valor inferior a la tensión de circuito abierto para 300 W/m^2 , que es de $15,68 \text{ V}$.

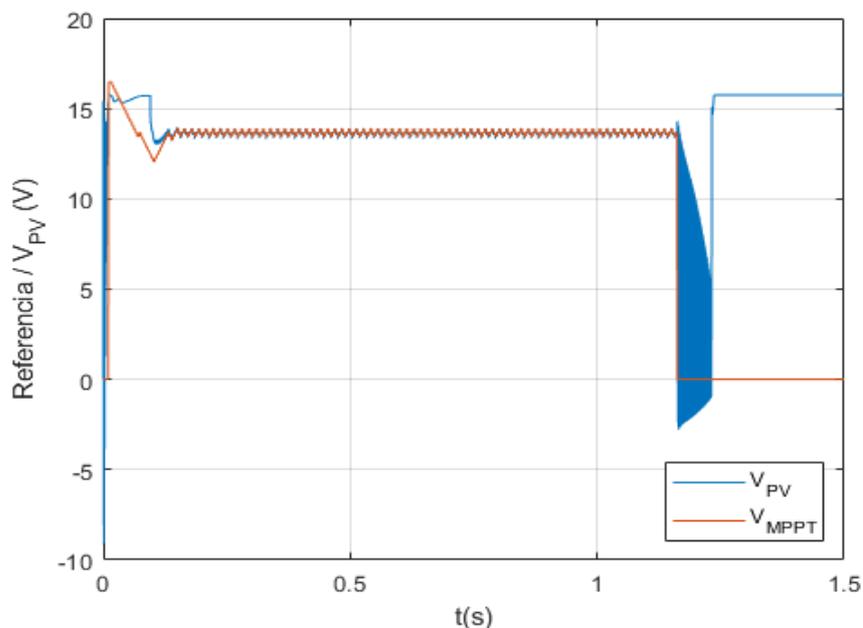


Figura 5-126. Tensión de salida del panel fotovoltaico para 300 W/m^2 . Durante la fase de arranque no hay seguimiento de la referencia. Entre 0,1 s y 1,2 s, el controlador busca el punto de máxima potencia, que alcanza en 0,15 s aprox. Desde 1,2 s hasta la plena carga, el control MPPT se desactiva. El resultado de la tensión del panel fotovoltaico es muy dispar para el control a tensión constante.

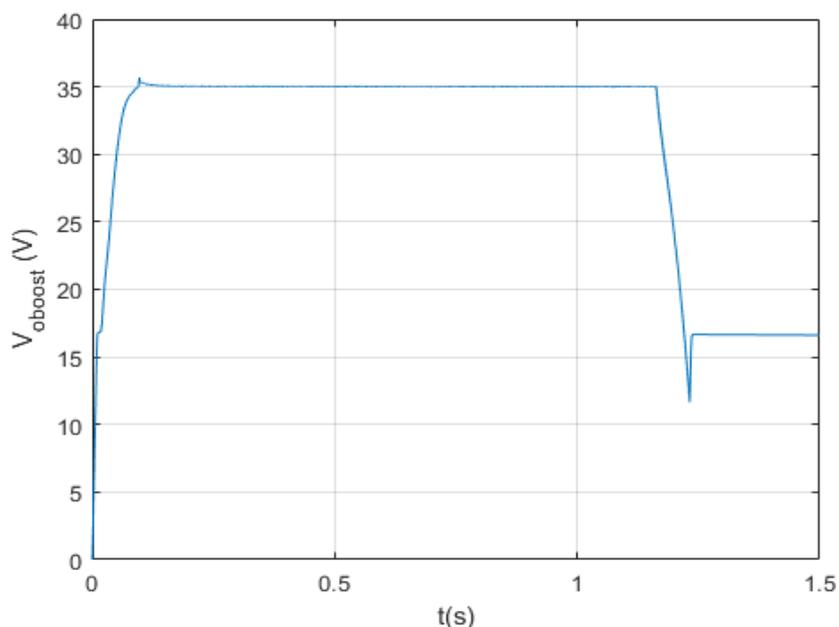


Figura 5-127. Tensión a la salida del convertidor elevador para 300 W/m^2 . A partir de 1,2 s, cuando el control de carga de la batería pasa a ser a tensión constante, la tensión a la salida del convertidor elevador cae bruscamente y se aleja del valor de referencia.

La tensión de salida vista en la gráfica de la figura 5-127 tiene una referencia de 35 V para el modo de control

a tensión constante, fijada para el convertidor boost. Pero esta referencia no se sigue en ningún momento una vez se pasa al control a tensión constante a partir de los 1,2 segundos de experimento, una vez finaliza la fase de control a tensión constante. Este no seguimiento produce un error igualmente grande en la última fase de control.

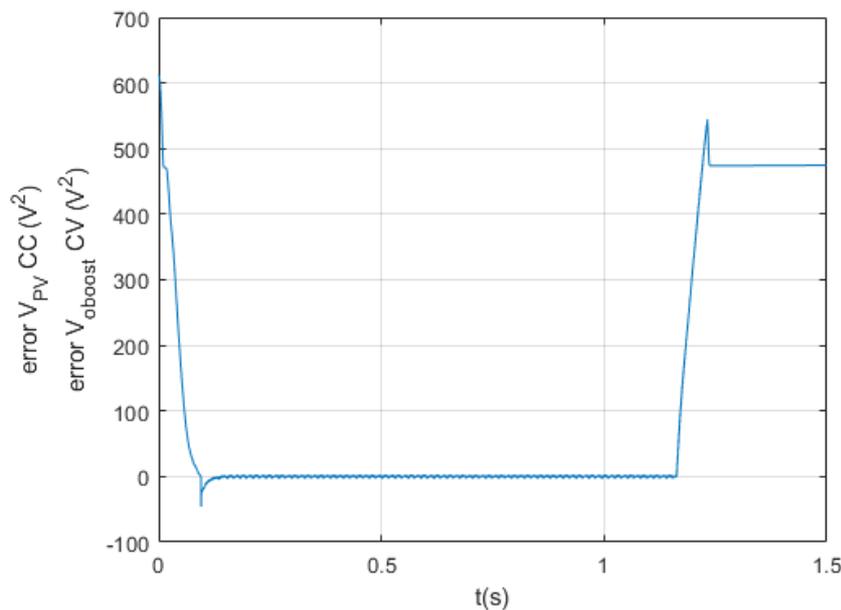


Figura 5-128. Error medido en la entrada del controlador del convertidor elevador durante el experimento con irradiancia de 300 W/m². A partir de 1,2s se puede observar cómo en la fase de control a tensión constante el sistema no puede controlar la tensión de 35 V a la salida del elevador y el error se dispara. El error es cero durante el control CC.

La corriente de la bobina presenta una situación similar a la vista para la tensión de entrada del convertidor elevador en el modo de control a tensión constante. Existen grandes oscilaciones para una tensión que mantiene valor medio respecto a la carga a corriente constante, pero con un gran rizado, llegando a tener variaciones desde 0,6 A hasta 3 A.

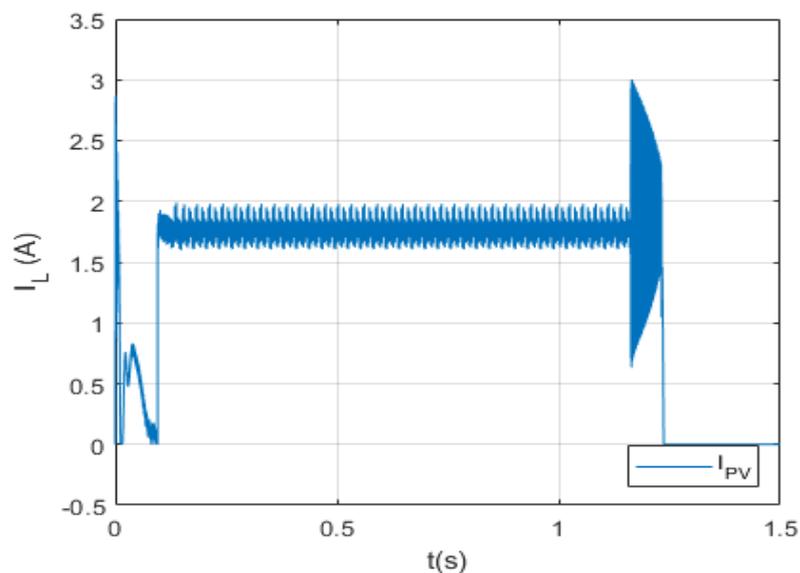


Figura 5-129. Corriente de la bobina del convertidor boost a 300 W/m² de irradiancia. La referencia de corriente únicamente se sigue durante los modos de carga a tensión constante y a corriente constante. La corriente presenta grandes oscilaciones a partir de 1,2 s, cuando la carga se hace a tensión constante.

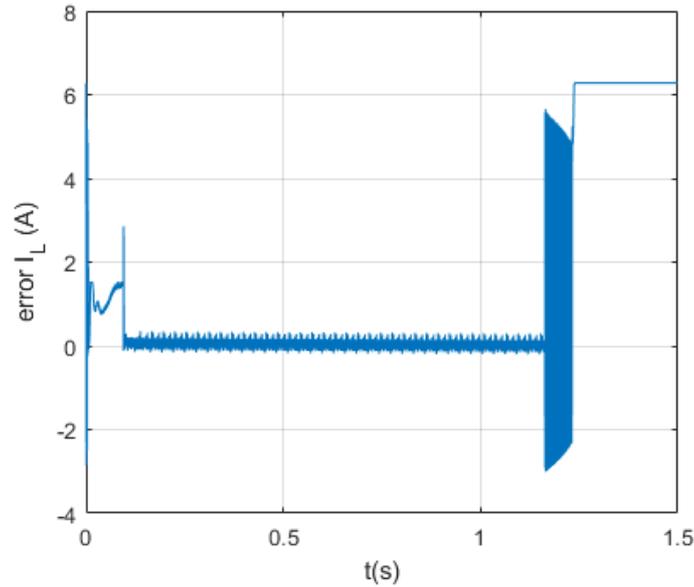


Figura 5-130. Error de control de la corriente de la bobina del convertidor elevador para 300 W/m^2 . Este error deja de ser cero en cuanto el sistema pasa a controlar la carga de la batería a tensión constante a partir de 1,2 s. En la gráfica anterior se comprueba también que el error en este modo de conducción tampoco hay un error en régimen permanente nulo para 300 W/m^2 . El control de tensión y de corriente para el convertidor elevador entra en una fase inestable, tal como lo pone de manifiesto la gráfica del duty cycle.

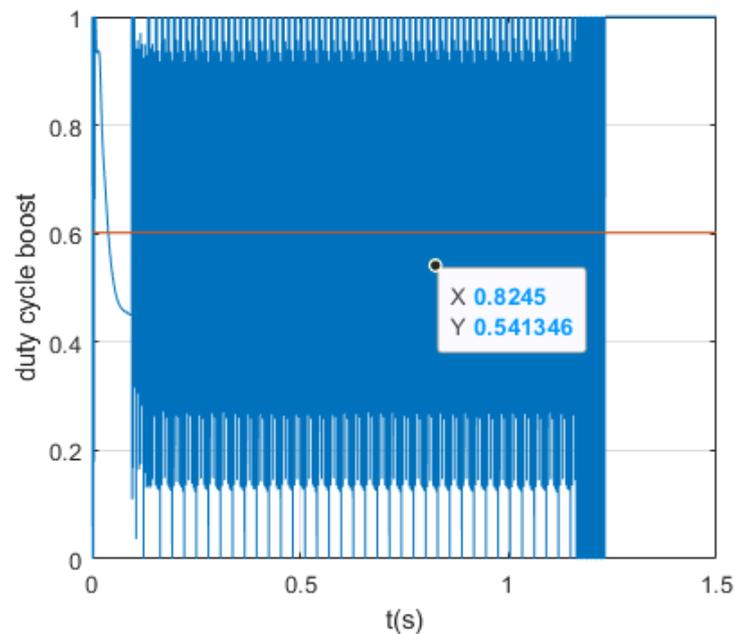


Figura 5-131. Duty cycle del convertidor elevador a 300 W/m^2 . Entre 0,1 s y 1,2 s el duty cycle oscila en torno a 0,54 para ambos controles de carga a tensión constante y a corriente constante. Para el control a tensión constante existe saturación del controlador únicamente con esta irradiancia.

El duty cycle, que se muestra en la gráfica anterior, sigue la tendencia que existía para el estado de carga a corriente constante en los experimentos de carga CC-CV, hasta que llega al modo de control de la carga de la batería a tensión constante.

De un duty cycle en torno a 0,6 de media si no se cuentan los picos, o de 0,54, tal como se ha señalado en la gráfica, que varía entre 0,2 y 0,95, un rango absurdamente amplio, pasa a saturar en cuanto el modo de control de la carga de la batería a corriente constante satura, con un control todo-nada hasta que se produce el corte.

En cuanto a la potencia calculada en la entrada del convertidor elevador, que es la misma que la existente a la

salida del panel fotovoltaico porque se considera ideal el diodo de bloqueo, esta es una parte de la potencia que puede llegar a generar el panel fotovoltaico para las condiciones de iluminación dadas.

Para 300 W/m^2 , no puede medirse de una forma tan clara como para los casos anteriores. La potencia para el control a corriente constante es de $24,16 \text{ W}$, pero en cuanto llega al modo de control a tensión constante, esta baja hasta una media inferior a 10 W , niveles cercanos al corte de la carga. En consecuencia, la batería corta nada más llegar a los $1,3$ segundos de experimento.

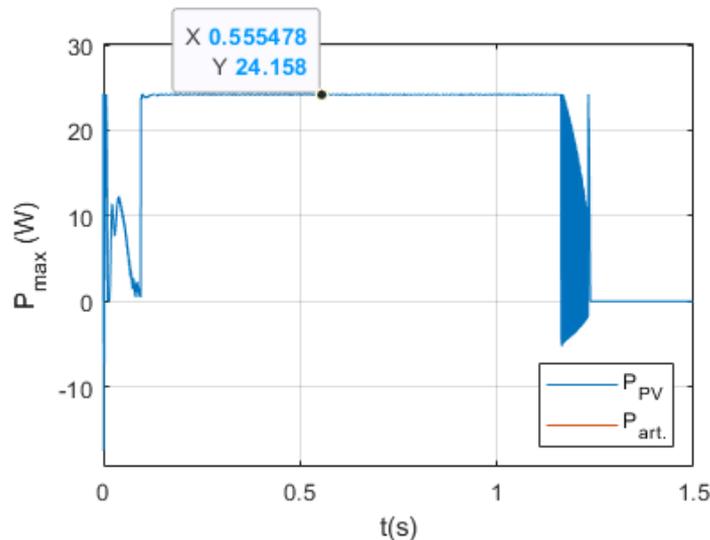


Figura 5-132. Potencia generada por el panel fotovoltaico con una irradiancia de 300 W/m^2 . A partir de $1,2 \text{ s}$, con la carga a tensión constante, la potencia decae rápidamente y no puede mantenerse la carga.

El convertidor flyback tiene para la entrada una corriente pulsada, que es la que circula por el MOSFET de este convertidor en la rama de baja tensión del transformador. La corriente instantánea de entrada en régimen permanente tiene a los $1,2$ segundos una ligera bajada que luego se estanca a un nivel no muy inferior al que tenía anteriormente.

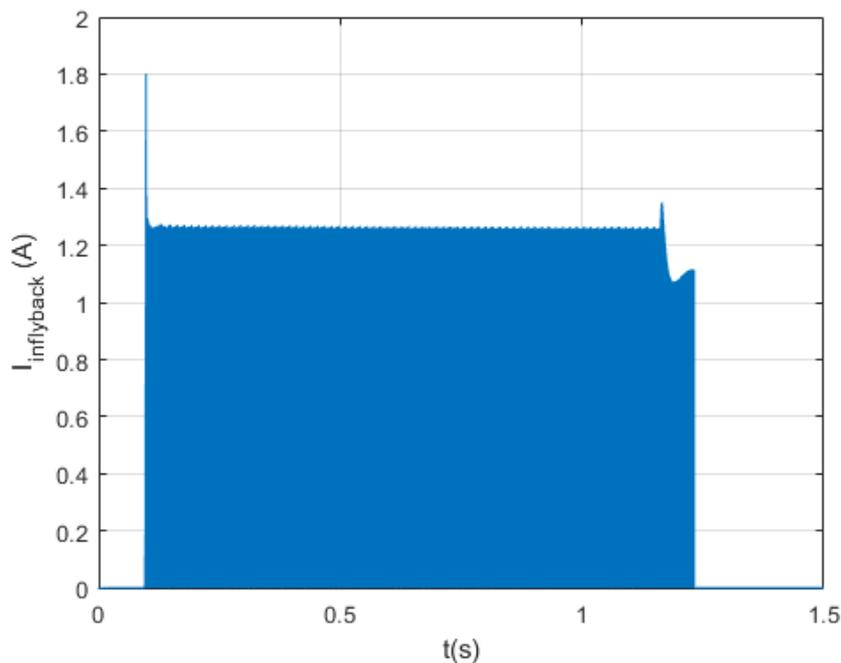


Figura 5-133. Corriente de entrada instantánea del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. En el régimen permanente de carga a tensión constante, a partir de $1,2 \text{ s}$, la corriente alcanza un valor de $1,10 \text{ A}$ justo en el corte, tras una sobreoscilación negativa poco después de cambiar el control de carga de la batería.

La corriente que entra en la batería, que es la suma de todas las corrientes salientes de cada uno de los convertidores flyback, el doble de la corriente que sale de un solo convertidor flyback en este sistema concreto

al contar con dos paneles fotovoltaicos, de los cuatro inicialmente propuestos.

La corriente que entra en la batería se muestra en la siguiente gráfica. A partir de los 1,2 segundos la corriente que entra en la batería, que inicialmente era de 0,4 A, va disminuyendo rápidamente conforme la batería se va cargando.

Esta corriente, lejos de mantenerse en un valor que disminuye lentamente hasta llegar al valor mínimo de 110 mA, especificado en la batería, una vez se ha alcanzado el máximo de la capacidad de la batería, disminuye rápidamente hasta llegar al valor de corriente de corte.

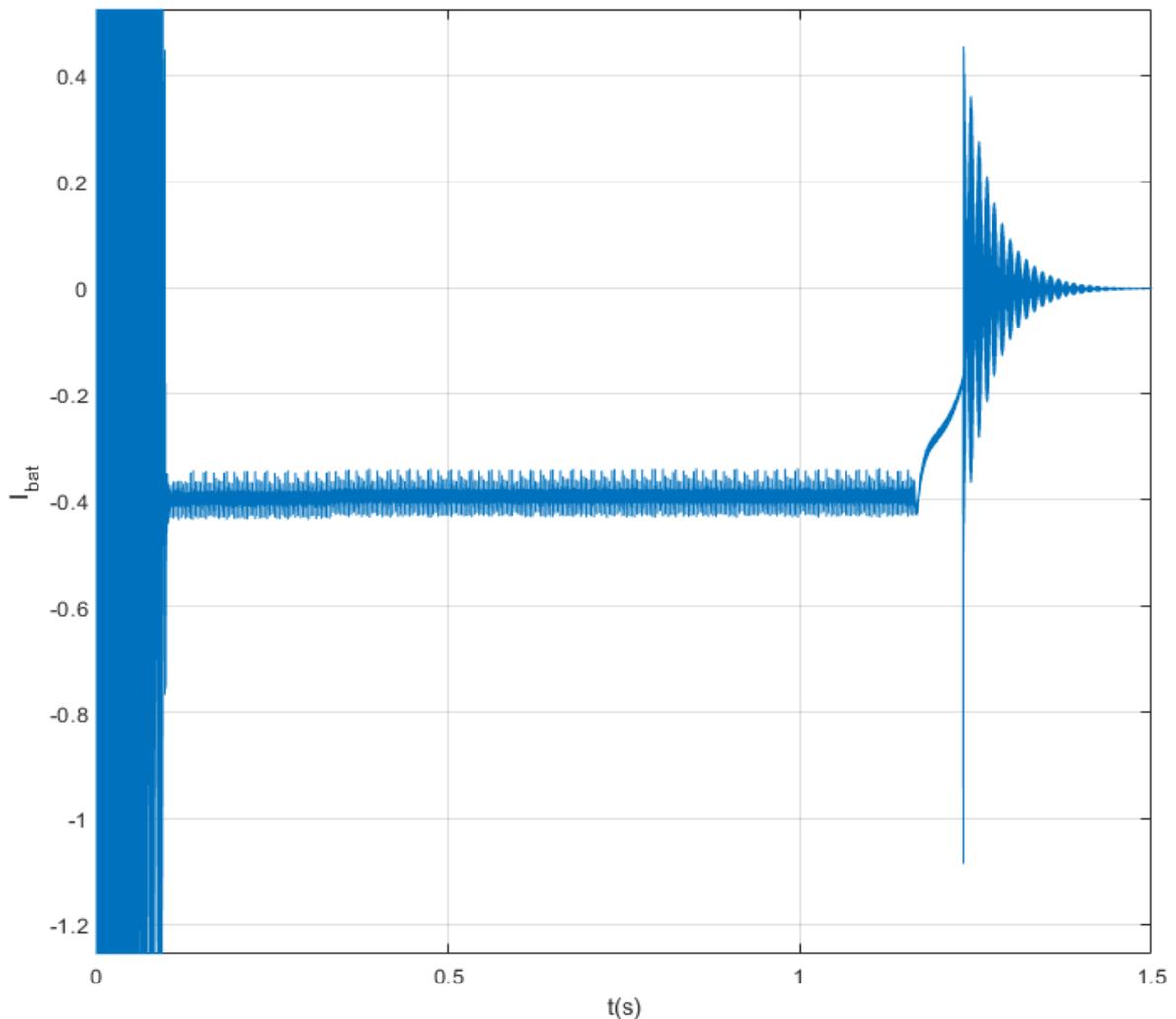


Figura 5-134. Corriente de la batería durante la carga a tensión constante con 300 W/m^2 de irradiancia. El signo negativo de la corriente indica que la batería está cargando. A partir de 1,2 s, con la carga a tensión constante, la corriente disminuye en valor absoluto hasta llegar al valor de corte a los 1,25 s.

La corriente de salida para un solo convertidor flyback se halla al dividir la corriente de la batería entre el número de convertidores existentes, dos en este caso, algo que es posible porque se están realizando los experimentos con condiciones de iluminación uniforme.

Ambos paneles se prueban bajo unas condiciones de iluminación uniforme e idéntica para los dos paneles fotovoltaicos, es decir, empleando la misma irradiancia. La corriente de salida del convertidor flyback se mide para un estado de carga inicial del 98,5%. Para 300 W/m^2 , se observa que la corriente de la batería decae rápidamente hasta llegar al corte, situado por debajo de los 0,1 A, en lugar de llevar una dinámica más lenta, como en los casos anteriores. El error del controlador deja de ser cero en cuanto entra en funcionamiento el control de carga a tensión constante.

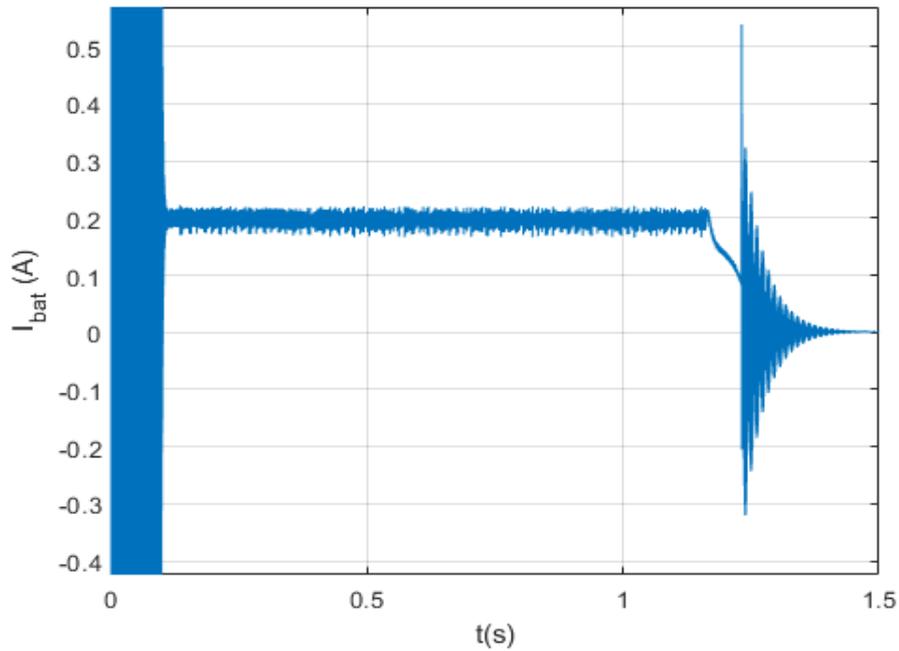


Figura 5-135. Corriente de salida del convertidor flyback para una irradiancia de 300 W/m^2 . Desde que entra en la fase de carga a tensión constante a los 1,2 s hasta el corte la referencia se ajusta según la tensión de la batería, aunque la potencia decae rápidamente y no puede mantenerse la tensión de referencia en la salida.

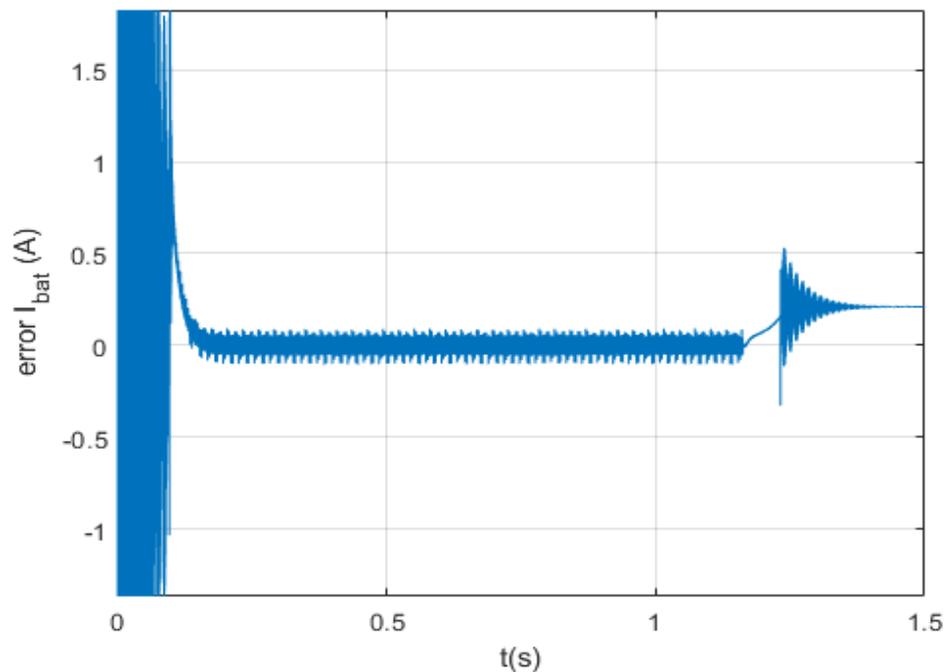


Figura 5-136. Error de la corriente de salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la carga a corriente constante, el error es nulo. El error en régimen permanente deja de ser cero en cuanto la corriente desciende por debajo del valor de corte a los 1,25 s.

La potencia a la salida, que para la fase de carga a corriente constante tiene un valor de 22,89 W, para el modo de carga a tensión constante, el valor instantáneo de la potencia cae a gran velocidad hasta llegar al valor mínimo, unos 10 W, valor a partir del que la carga se corta.

Debido a lo anterior, no se puede calcular el rendimiento de la batería para el modo de control a tensión

constante, pero como el estado de carga inicial es del 98,5%, sí se puede hacer a partir de los valores medidos para la carga a corriente constante, sustituyendo en la ecuación 21:

$$\eta_{\text{convertidores}} = \frac{22,89 \text{ W}}{24,15 \text{ W}} = 94,78\%$$

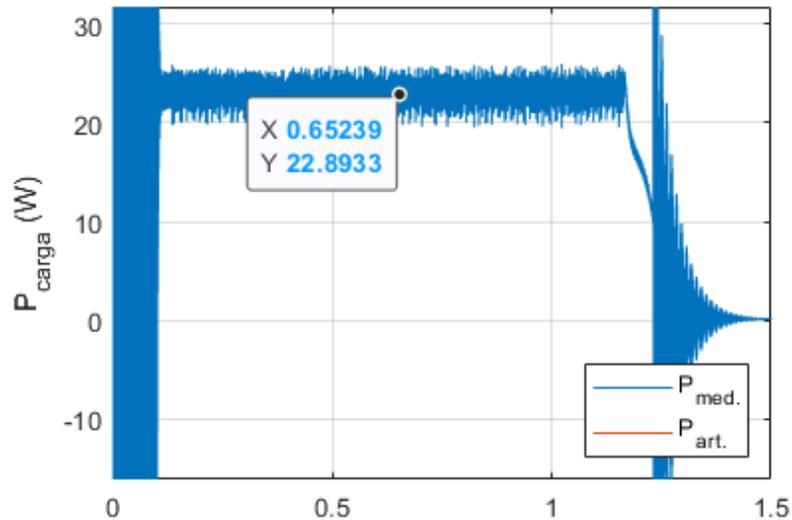


Figura 5-137. Potencia instantánea a la salida del convertidor flyback para 300 W/m^2 de irradiancia. Durante la fase de control a tensión constante, que dura desde 1,2 s hasta el corte, el valor de la potencia desciende rápidamente hasta que la corriente de la batería llega al valor de corte.

El duty cycle es mayor que el calculado teóricamente, de 0,5484 para una tensión de entrada del flyback de 35 V, durante la carga a corriente constante. Pero, para la carga a tensión constante, el control es inestable, ya que el duty cycle tiende a subir de forma exponencial.

El límite inferior de corriente, que corta la carga de la batería, evita que el valor del duty cycle alcance el punto de saturación.

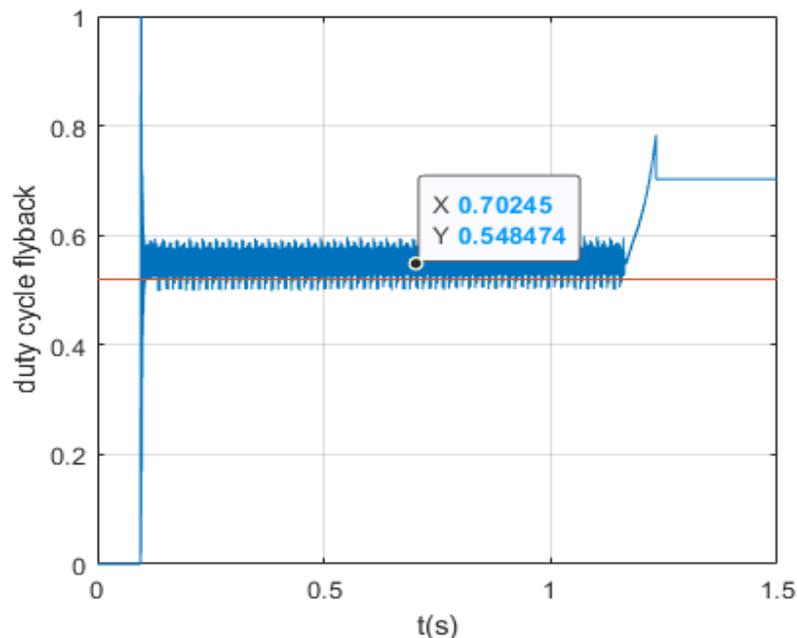


Figura 5-138. Duty cycle del convertidor flyback para 300 W/m^2 , que entra en funcionamiento a los 0,1 s. El duty cycle presenta oscilaciones durante la carga a corriente constante hasta llegar a los 1,2s, con un valor medio de 0,54. Durante la carga a tensión constante, entre 1,2 s y 1,25 s, el duty cycle no se estabiliza.

El duty cycle teórico se calculó con la fórmula del duty cycle para un convertidor flyback imponiendo una

tensión a la entrada de 35 V y una tensión a la salida de 116,5 V, medida en la siguiente gráfica de V_{bat} que son las tensiones en ambos extremos del convertidor. Sustituyendo en la ecuación 12, nos queda que el duty cycle es el siguiente:

$$D_{\text{teórico}} = \frac{1}{1 + \frac{102}{35} \cdot \frac{35 \text{ V}}{117 \text{ V}}} = 0.5342$$

Tras el duty cycle, quedan por observar dos de los datos que dan información acerca del estado de la batería. Entre estos datos, que dan muchísima información acerca del comportamiento de la batería a altos porcentajes de carga, están el estado de carga de la batería, que parte de un 98,5%, aunque durante el arranque este baja algunas centésimas. Una vez comienza la fase de transición entre la fase de arranque y la de carga a corriente constante constante, la batería comienza a cargar.

A partir de los 0,2 segundos, la carga se hace de forma lineal, y el estado de carga va subiendo lentamente hasta que la batería queda cargada. La dinámica lenta de la batería se debe a que la capacidad se ha multiplicado por mil respecto de la capacidad elegida para los experimentos de análisis de carga CC-CV.

Como se vio en los experimentos anteriores, para una irradiancia de 300 W/m² el porcentaje máximo no supera el 98,54% debido a la falta de eficacia del controlador para este valor de irradiancia.

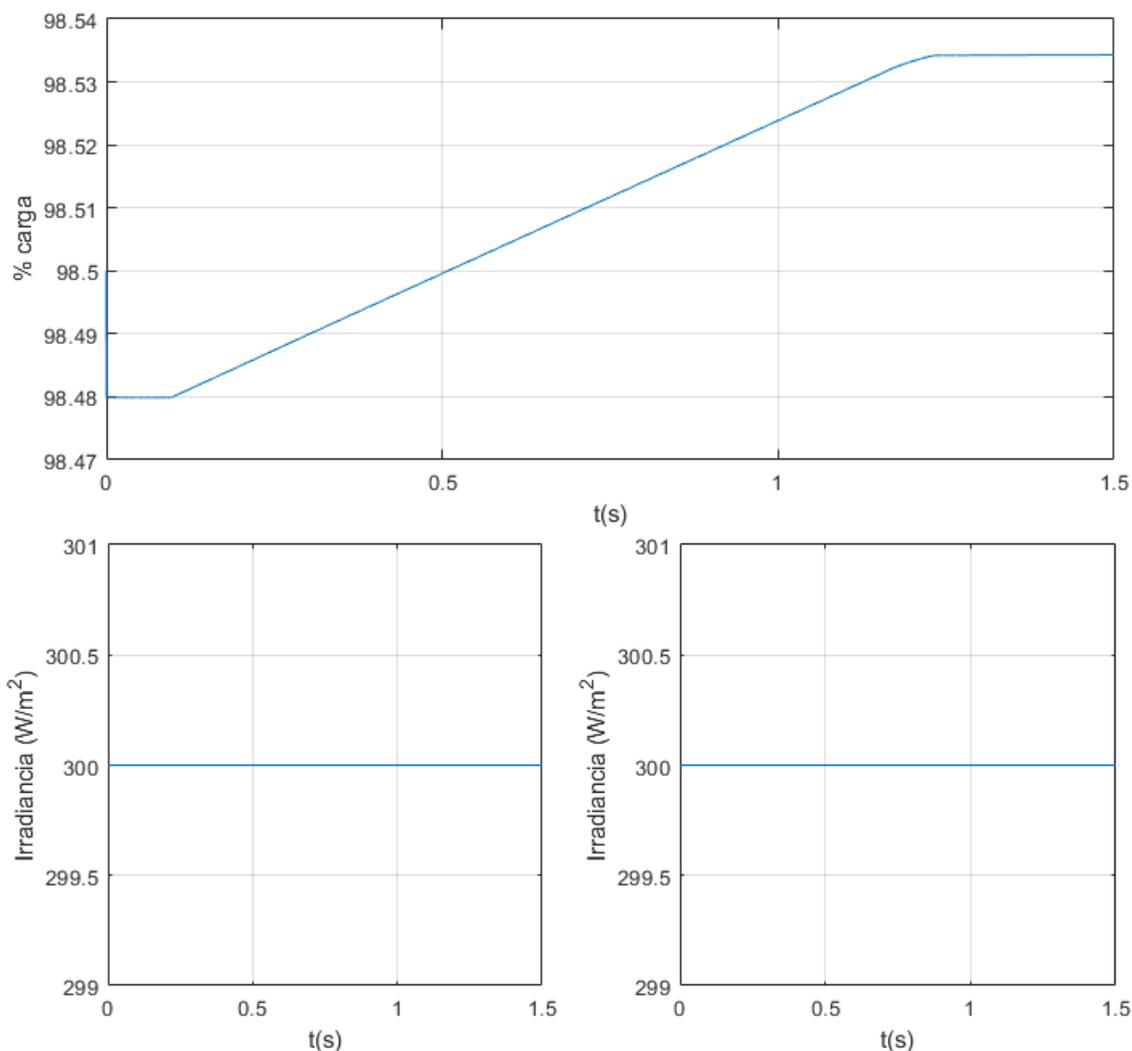


Figura 5-139. En la gráfica superior se muestra el estado de carga de la batería, partiendo del 98,5%, para 300 W/m². Una vez la batería arranca a los 0,1 s se carga a corriente constante hasta llegar a los 1,2 s, llegando el estado de carga hasta un máximo situado entre 98,53% y 98,54%. La irradiancia se muestra en las gráficas inferiores, y es de 300 W/m² durante toda la prueba.

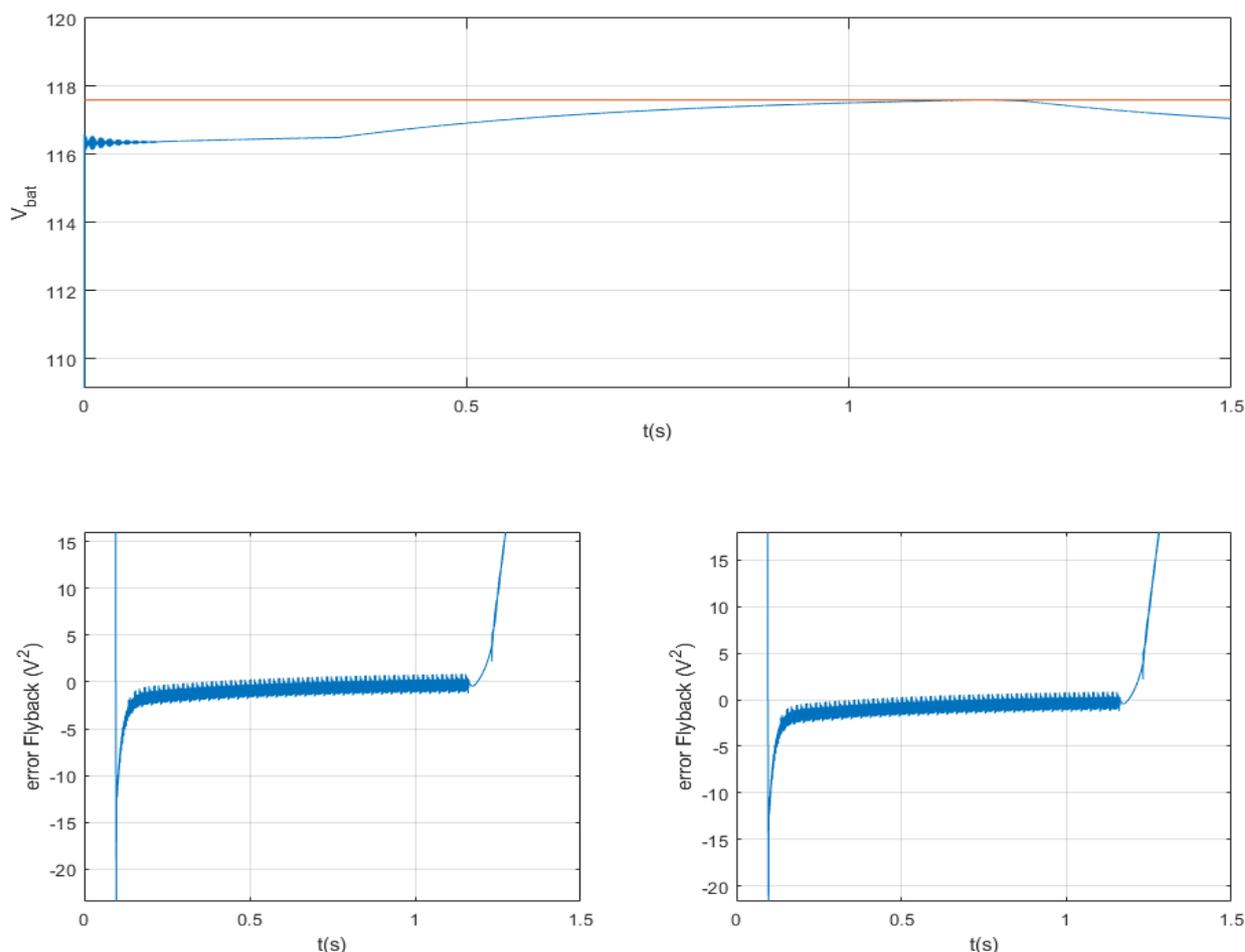


Figura 5-140. La gráfica superior representa la evolución de la tensión de la batería a lo largo de la prueba de control para la carga a tensión constante a una irradiancia de 300 W/m^2 . La fase de arranque dura hasta algo menos de 0,2 s y le sigue una fase de carga a corriente constante hasta una vez superados los 1,2 s, hasta que el controlador corta algo antes del segundo y medio una vez la batería se da por cargada. Abajo, tanto a la izquierda como a la derecha, el error es nulo para el control a corriente constante, donde se emplea 35 V como referencia para la tensión de entrada del flyback. En la fase de control a tensión constante, una vez alcanzada la referencia de 117,6 V no se puede mantener por más de 0,05s antes de cortar la carga.

La gráfica anterior da información acerca de la tensión de carga de la batería. Para todos los valores de irradiancia considerados para estos experimentos, la tensión de referencia para el modo de control a tensión constante es la misma, la tensión máxima de la batería, establecida en 117,6 V, como se muestra en la etiqueta de la primera gráfica superior que señala a la línea roja o de referencia.

La línea azul en la primera gráfica muestra la evolución de la tensión desde un valor inicial de 116 V, que en el transitorio crece hasta 116,5 V. Esto ocurre a los 0,4 segundos aproximadamente, donde la tensión comienza a crecer hasta llegar a 117,6 V, la tensión de referencia para el control a tensión constante, que es la máxima de la batería.

En lugar de la sobreoscilación esperada, por lo visto para otras irradiancias, una vez se alcanza el máximo valor de tensión de batería, la tensión medida en la batería llega a coincidir con la referencia durante unos segundos en torno al período comprendido entre 1,1 y 1,2 segundos de simulación, con un transitorio suave, sin sobreoscilar. Una vez pasan 1,2 segundos de simulación, la carga de la batería se corta tras haber llegado al máximo de su capacidad para 300 W/m^2 , principalmente porque la corriente generada por el panel fotovoltaico a la salida es insuficiente para mantener la carga de la batería.

En el régimen permanente, el error es muy pequeño durante el modo de carga de la batería a tensión constante, pero como llega al máximo del estado de carga a los 1,3 segundos de simulación, el controlador deja de actuar y se ve un aumento en el error existente entre la tensión de referencia y la medida a la entrada de la batería.

6 CONCLUSIONES

Una vez realizados todos los experimentos, y hay varios factores cruciales a la hora de diseñar un sistema de carga de baterías basado en energía solar fotovoltaica, especialmente por el limitado espacio existente en la superficie de cualquier vehículo. La característica anterior es aún más restrictiva en los automóviles de turismo, que podrían alojar los cuatro paneles de veinticuatro células fotovoltaicas propuestos en la fase de diseño.

Otro de los factores importantes que se debe tener en cuenta cuando se diseña un sistema de estas características, aparte del aprovechamiento del espacio, es la cantidad de energía total que podría llegar a generar, algo que puede cuantificarse a partir de la potencia total generada por estos cuatro paneles fotovoltaicos. Si todos están situados en el techo del vehículo y este posee una curvatura mínima, la potencia generada será mayor, especialmente si todas las células fotovoltaicas reciben la misma radiación. Aunque esto es difícil que pase, el análisis iría sobre la potencia máxima que es posible generar.

Luego también habría que tener en cuenta otros datos, como el cumplimiento de las especificaciones iniciales y rizados establecidos, algo que solo se va a cumplir para las condiciones estándar, por lo que a irradiancias inferiores a 1000 W/m^2 habrá que determinar si se aceptan o no las condiciones de funcionamiento mediante el establecimiento de tolerancias, aunque la solución no sea óptima.

Por último, antes de cerrar con los posibles usos de este sistema y con las propuestas de mejora y construcción de este sistema en la realidad, también se hará un análisis de las tensiones y corrientes de estrés que puede soportar el sistema de cara a elegir los modelos de semiconductores adecuados.

6.1 Rendimiento del sistema

El rendimiento, con el que se mide el porcentaje de energía aprovechado en el uso final del sistema, es uno de los factores principales que se suelen tener en consideración para el diseño. Como el espacio de instalación de este cargador de baterías solar es limitado, se busca minimizar las pérdidas que sí se pueden controlar, como las debidas a los elementos del circuito.

Desde el primer momento, se ha tratado de elegir la tecnología de generación fotovoltaica más eficiente, sin dejar de tener en cuenta el factor del coste económico. De todas las tecnologías estudiadas, la más viable por ser la más extendida en las instalaciones de generación fotovoltaica, aunque no sea la más eficiente en la actualidad, es la de silicio monocristalino.

Los paneles fotovoltaicos, con una eficiencia del 22,4%, según la hoja de datos de la célula fotovoltaica publicada por SunPower, pueden generar 82,27 W de potencia, según su valor nominal. En realidad, las pérdidas debidas a los errores del algoritmo MPPT a la hora de fijar una referencia reducen la potencia generada a 81,73 W, tras ser probado el panel bajo condiciones estándar, es decir, a 1000 W/m^2 de irradiancia y 25°C de temperatura.

Este panel sufre unas pérdidas debidas al algoritmo MPPT, si se compara la potencia generada con la nominal, de solo un 0,6%. Esto es posible porque el incremento o decremento de la tensión de referencia es de 0,2 V, lo que permite una alta precisión a la hora de ajustar la tensión. Aun así, no se contabilizan otras pérdidas, como las existentes en el diodo de bloqueo del panel, que se ha puesto como un simple modelo ideal, o las debidas a la temperatura, que no se tienen en cuenta en el modelo.

En todos los experimentos, en la fase de medida de la potencia generada por el sistema y absorbida por la batería para su carga, se ha tenido en cuenta que parte de la potencia generada se pierde en los convertidores, por lo que toda ella, como es de esperar, no llega completamente a la salida. Estas pérdidas de los convertidores se han simulado empleando una impedancia de $0,1 \Omega$ en cada elemento semiconductor y en el transformador, aunque podría haberse realizado un modelo más preciso.

Lo anterior no ha sido impedimento para que se cumplan las especificaciones del sistema, ya que el empleo de transistores MOSFET de bajo consumo permite que las pérdidas en los convertidores sean mínimas, especialmente durante la fase de control a corriente constante.

El rendimiento de los convertidores fue calculado durante los experimentos realizados con el sistema en el apartado anterior. Los datos de potencia generada y potencia de carga se pueden ver, junto al rendimiento del sistema calculado, en la **tabla 6-1**.

Tabla 6-1. Rendimiento de los convertidores en una rama del sistema, hallado a partir de las medidas de potencia generada y potencia de carga en los experimentos del apartado anterior.

| Irradiancia | 1000 W/m ² | | 800 W/m ² | | 500 W/m ² | | 300 W/m ² |
|--------------------------|-----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
| Potencia generada | 81,73 W | 23,40 W | 65,61 W | 23,12 W | 40,74 W | 23,23 W | 24,25 W |
| Potencia de carga | 77,15 W | 21,10 W | 62,88 W | 21,02 W | 38,93 W | 21,07 W | 22,89 W |
| Rendimiento | 94,396 % | 90,17 % | 95,84 % | 90,88 % | 95,55 % | 90,71 % | 93,19 % |

Como se deduce de la tabla anterior, el rendimiento del sistema es siempre superior al 90%, tanto en el modo de carga de la batería a corriente constante como en el modo de carga a tensión constante. Además, el rendimiento sigue la tendencia vista en la gráfica de la figura 6-2, en el primer punto del apartado 2, donde se exploraba el paradigma de la generación fotovoltaica aplicada a EV.

En esa gráfica anteriormente mencionada, se observaba cómo la eficiencia del sistema iba aumentando progresivamente de forma proporcional a la potencia generada hasta llegar a un valor máximo. A partir de ese punto, la eficiencia decae ligeramente conforme aumenta la potencia generada. Si se observan la tabla anterior, se puede vislumbrar la tendencia anteriormente descrita si se compara el rendimiento de cada uno de los puntos de operación del sistema.

6.2 Potencia máxima generada vs potencia máxima de carga

Aparte del rendimiento, existen otros factores útiles para estimar la viabilidad del sistema. Uno de ellos es la potencia máxima generada bajo diversas condiciones, favorables o no, de iluminación, y esta depende fuertemente de la irradiancia.

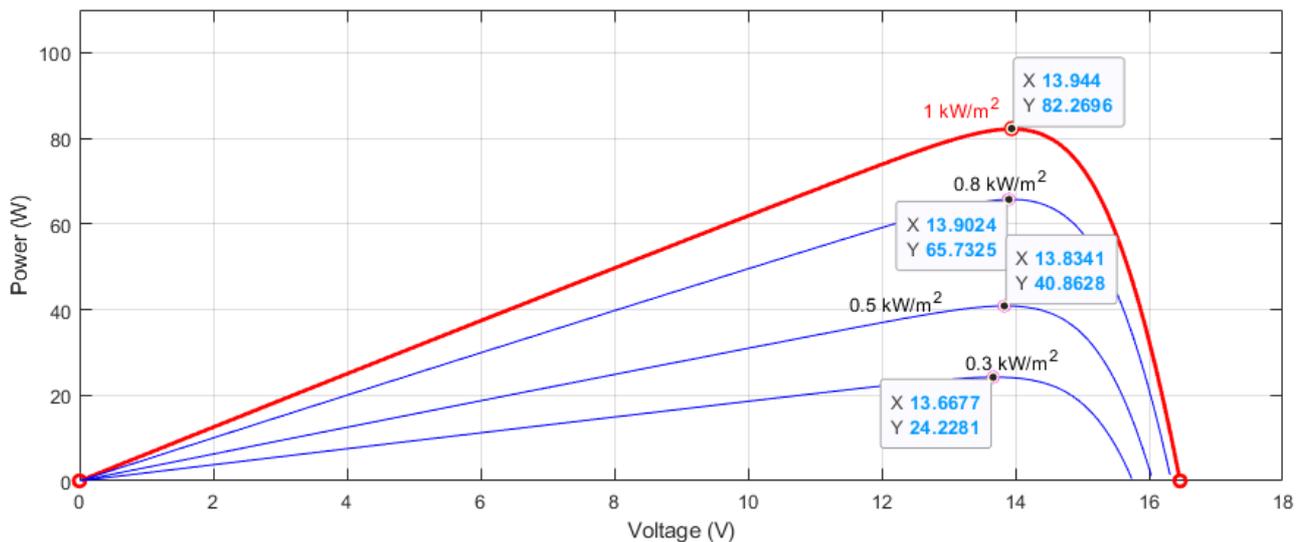


Figura 6-1. Curva característica de potencia de los paneles fotovoltaicos en función de la tensión de salida del panel PV y la irradiancia. Esta gráfica muestra la potencia teórica generada para las irradiancias comprendidas entre 300 y 1000 W/m².

Si se comparan las etiquetas de esta gráfica de la figura 6-1 con los datos de la tabla 6-1, se observa que la potencia generada por el panel fotovoltaico es muy similar a la potencia teórica, con pequeñas diferencias, lo que confirma que las pérdidas del algoritmo MPPT son pequeñas comparadas con el resto.

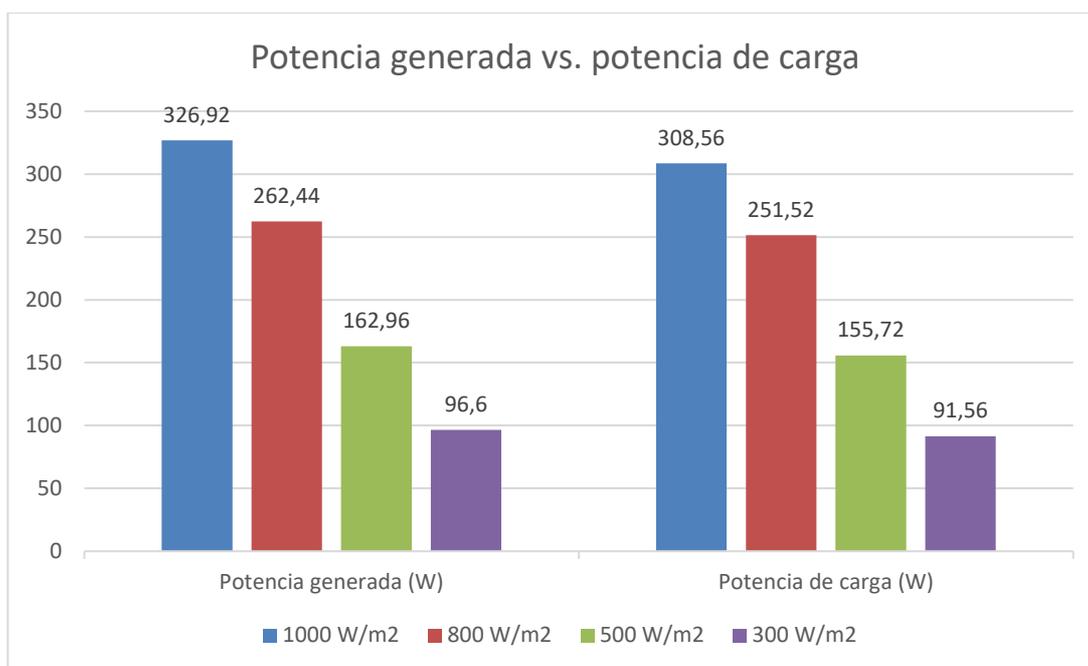


Figura 6-2. Comparativa entre la potencia generada y la potencia de carga de los cuatro paneles que se plantearon para el sistema, calculados para todos los niveles de irradiancia estudiados anteriormente entre 300 y 1000 W/m². Esta gráfica permite visualizar cuánta potencia se podría generar como máximo con cuatro paneles fotovoltaicos flexibles, formados por 24 células fotovoltaicas en serie, y visualizar qué parte de esta potencia termina llegando a la batería tras pasar por los convertidores. Los valores reales podrían disminuir.

Si se comparan, en el mismo punto de generación, la potencia que genera un solo panel fotovoltaico durante el control de carga de la batería a corriente constante se tiene que a 1000 W/m² cada panel genera 81,73 W, de los que 77,14 W llegan a la batería debido a las pérdidas causadas por los elementos del convertidor y el control MPPT. En el otro extremo están los 300 W/m², en los que, de 24,15 W generados, solo 22,89 W llegan a la batería, según la tabla 6-1.

Con los datos anteriores, es posible estimar la potencia generada por el número de paneles que se ha planteado inicialmente para el vehículo eléctrico, un total de cuatro. La potencia máxima hallada para el total de paneles fotovoltaicos se calcula multiplicando la tensión de salida, común a todos ellos, por la suma de corrientes que salen de los convertidores *flyback*. Si las corrientes de salida se consideran iguales y los convertidores idénticos, la potencia total se hallaría multiplicando la potencia de salida de uno solo por el total de convertidores.

Tal como se ve en la gráfica de la figura 6-1, vista al principio de este apartado, en la página anterior, como máximo, si los cuatro paneles se instalan en el techo del vehículo y se ignora el problema de las sombras, la potencia generada podría alcanzar 326,92 W y la potencia de carga a 308,56 W para 1000 W/m², con unas pérdidas de 18,36 W.

Si se busca el otro extremo, también observable en la gráfica, el valor calculado para la potencia total decaería hasta los 96,6 W de potencia generada y 91,56 W de potencia de carga para 300 W/m². Al comparar los valores anteriores, la potencia de carga decae hasta un 70% cuando la irradiancia desciende desde 1000 W/m² hasta 300 W/m², algo habitual, porque la potencia generada es proporcional a la irradiancia. Estos valores se han calculado extrapolando la potencia generada por un solo panel y circuito.

Los valores resumidos en la gráfica de la página anterior sirven de máximo para conocer las posibilidades del sistema a máximo rendimiento, es decir, si la irradiancia fuera siempre uniforme. Pero, como se especificaba en los artículos resumidos en el estado del arte, el entorno es el factor más importante de todos los que influyen en la radiación incidente en los paneles. Debido al entorno, en un instante concreto podría, por ejemplo, producirse un sombreado parcial que haga que la corriente que circule por uno de los paneles afectados tome el valor de la célula fotovoltaica con menor irradiancia.

Como última observación, la potencia de carga de la batería solo podría aplicarse si se carga más de una hilera a la vez, y podría verse limitada por la corriente máxima soportada apagando algunos de los convertidores en

un nuevo estado en el que el algoritmo de la máquina de estados permita un encendido parcial del sistema, en el que solo generen los paneles fotovoltaicos con menor sombra, es decir, solo se dejarían encendidos los que más producen.

6.3 Cumplimiento de las especificaciones del sistema

Como parte del análisis de este sistema, se desea comprobar cómo se ajusta la respuesta del sistema a las especificaciones iniciales. Se propuso al principio de la fase de diseño que, como parte de las especificaciones iniciales, los rizados de tensión, a la entrada o a la salida de cada uno de los nodos del circuito, no superara el 5% del valor pico a pico de tensión. Además, para las bobinas del sistema, que funcionan gracias a una diferencia en la corriente, se propuso un rizado no superior al 2%.

Por otro lado, se estableció que el panel PV debía trabajar a la tensión de máxima potencia fijada por el algoritmo MPPT. Los valores teóricos de esta tensión de máxima potencia estaban expresados en la gráfica de la figura 5-1, al principio del apartado de pruebas. Si se tomaban los datos de esta gráfica, la tensión y corriente del punto de máxima potencia se iba desplazando según la irradiancia.

Los valores teóricos de voltaje tomados fueron 13,94 V para el punto de máxima potencia de 1000 W/m², para 800 W/m² este era de 13,9 V, para 500 W/m² este era de 13,87 y para 300 W/m² este era e 13,67 V. Estos valores teóricos se compararán con los valores de tensión obtenidos en el experimento, calculados mediante algoritmo MPPT y resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 6-2. Tensión de máxima potencia calculada en los experimentos mediante algoritmo MPPT y rizados de tensión de panel PV en valor absoluto y relativo, según la irradiancia.

| V_{PV} | 1000 W/m ² | 800 W/m ² | 500 W/m ² | 300 W/m ² |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valor medio | 13,85 V | 13,85 V | 13,85 V | 13,65 V |
| Rizado absoluto | 450 mV | 450 mV | 430 mV | 450 mV |
| Rizado relativo | 3,25 % | 3,25% | 3,1 % | 3,15 % |

El rizado relativo de tensión es el empleado para definir las especificaciones del sistema, y este permanece siempre por debajo del 5%. Este se debe más a las oscilaciones del algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia que al condensador existente a la salida del panel fotovoltaico.

Si se observa con atención, se ve en la tabla que la tensión media coincide para las irradiancias comprendidas entre 500 y 1000 W/m². Esto se debe a que los incrementos y decrementos de la potencia de referencia son de 0,2 V y el sistema pone el valor medio de tensión en el punto más cercano al valor de tensión objetivo.

Por otro lado, a la salida del convertidor elevador, el rizado, establecido inicialmente al 5% del valor de tensión correspondiente para este nodo del sistema, no es tan importante, ya que en los experimentos anteriores la tensión se mantiene constantemente a 35 V, independientemente del modo de carga de la batería que se esté ejecutando en el instante. Para el caso de la tensión en el nodo de interconexión de los dos convertidores, como la capacidad del condensador es muy grande, de 1 mF, el rizado es despreciable.

Para el nodo de salida, al que se conecta la batería, inicialmente se propuso también un rizado relativo máximo del 5% para esta tensión, pero con el filtro, este no se ha apreciado en los experimentos. Durante uno de los experimentos realizados a 1000 W/m² se tomó una medida de la tensión de salida del convertidor *flyback* sin filtrar, representada en la gráfica de la figura 6-3. La tensión, que tiene una tendencia creciente pero poco apreciable, tiene valores de pico comprendidos entre 107,5 y 112 V, aproximadamente, al principio de la gráfica. Esto significa que el rizado sería de 4,5 V, por lo que el rizado relativo respecto al total de esta tensión sin filtrar no llegaría al 5% propuesto. Con el filtro, el rizado anterior se vuelve inapreciable.

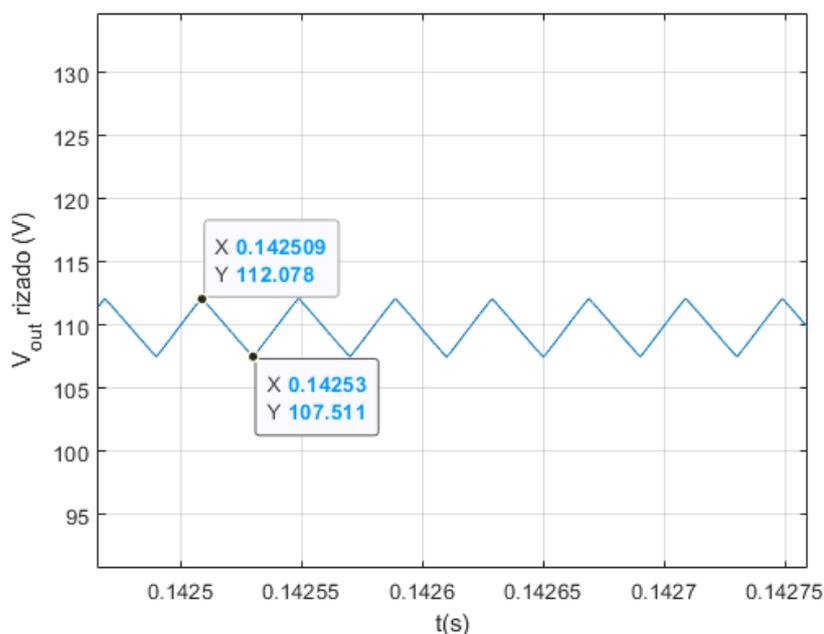


Figura 6-3. Tensión medida a la salida del convertidor *flyback*, sin filtrado para control CC a 1000W/m^2 . En esta gráfica se muestran los valores de pico. Aunque aparentemente sea plana, esta tensión de salida es creciente conforme va pasando el tiempo.

Además de los rizados de tensión, otro de las especificaciones orientativas son el rizado de corriente para la bobina del convertidor elevador y para el transformador, en el que la bobina de magnetización modela las fluctuaciones de corriente existentes a la entrada del convertidor *flyback*. Ambos rizados se han establecido con un límite del 2% del valor medio de la corriente medida.

En la misma gráfica de la figura 5-1, se observaba que la corriente generada por el panel fotovoltaico era, teóricamente de 5,9 A para 1000 W/m^2 de irradiancia, de 4,734 A para 800 W/m^2 , de 2,95 A para 500 W/m^2 y de 1,779 A para 300 W/m^2 .

Tabla 6-3. Resultados experimentales del valor medio y rizados de la corriente de entrada del convertidor elevador, según la irradiancia.

| I_L | 1000 W/m^2 | 800 W/m^2 | 500 W/m^2 | 300 W/m^2 |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Valor medio | 5,9 A | 4,73 A | 2,941 A | 1,769 A |
| Rizado absoluto (total) | 279 mA | 240 mA | 206 mA | 170 mA |
| Rizado relativo | 4,7 % | 5,07 % | 7 % | 9,61 % |

En la tabla anterior, se observa que los rizados relativos tienen un porcentaje mayor al establecido inicialmente. Esto se debe a que el cálculo del rizado de corriente fue realizado para un valor constante e igual al teórico tomado de la gráfica de la figura 5-1.

Si se comparan las medidas del valor medio en el experimento con los valores teóricos, se ve que coinciden prácticamente con estos últimos. Las pérdidas debidas al algoritmo MPPT tienen una mayor componente de tensión que de corriente, pues, mientras la primera se adapta a las exigencias del cálculo de la referencia, la diferencia existente en la corriente que se puede medir en los puntos cercanos al de máxima potencia no es tan acusada, al ser cercanos a la corriente de cortocircuito.

Finalmente, se mostrarán las corrientes calculadas para la entrada del convertidor *flyback*. En estas, el rizado relativo se ha calculado al aplicar la diferencia entre los picos de corriente en régimen permanente al valor medio para calcularlo, como se hizo a la hora de hallar la inductancia de magnetización del transformador.

Lo anterior se ha realizado así para comprobar si el rizado se acerca o no al especificado, que era de 47 mA,

calculado con la corriente media que ingresa en el convertidor *flyback*.

Tabla 6-4. Resultados experimentales del valor medio y rizados de la corriente de entrada del *flyback*.

| $I_{in_flyback}$ | 1000 W/m ² | 800 W/m ² | 500 W/m ² | 300 W/m ² |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valor medio | 2,348 A | 1,877 A | 1,168 A | 711 mA |
| Rizado absoluto | 44,36 mA | 25 mA | 47 mA | 60 mA |
| Rizado relativo | 1,88 % | 1,33 % | 4,02 % | 8,4 % |

En esta tabla anterior, el rizado se cumple para 1000 W/m², como era de esperar. Si se observan irradiancias menores, el rizado relativo comienza a variar, por lo que se deduce que, al igual que se observa en las tablas anteriores, las especificaciones para unas condiciones de prueba estándar no tienen por qué cumplirse para todos los casos.

Los rizados relativos no son más que una forma de comparar qué porcentaje de la tensión o corriente medida puede fluctuar respecto al valor medio medido o estimado, por lo que lo normal es que se definan ciertas tolerancias de incumplimiento, especialmente si las condiciones de medida se alejan de las ideales, por temperatura o por irradiancia. También se observa que las oscilaciones que presenta el algoritmo MPPT, especialmente el P&O, influyen en el rizado de corriente de la entrada del convertidor elevador, un factor que no se ha tenido en cuenta a la hora de calcularlo.

Por último, los rizados anteriores pueden ser ajustados mediante la elección de una bobina con una inductancia mayor que la calculada para el caso de la corriente, o mediante la elección de un condensador con una capacidad mayor que la calculada para el caso de la tensión, como se ha hecho para el nodo existente entre los convertidores. Un cambio en el algoritmo MPPT, ya sea la sustitución del P&O por otro más estable en el régimen permanente o con una reducción de la variación de la referencia, también puede reducir el rizado de tensión en la salida del panel PV y el de la corriente en la entrada del convertidor boost.

6.4 Tensiones y corrientes de estrés

Por último, una vez resumido el cumplimiento de especificaciones del sistema y la comparación de los valores teóricos con los resultados experimentales, llega el momento de mostrar las tensiones y corrientes más altas que deberían soportar los componentes críticos del sistema, en este caso los elementos de conmutación.

En la gráfica de la figura 6-4, en la siguiente página, se observa una simulación de uno de los experimentos realizados durante la fase de pruebas del sistema, en el que se comienza con una irradiancia de 1000 W/m² para posteriormente pasar a 500 W/m², la mitad, a partir de los 0,35 segundos. En esta prueba se ha ejecutado en el modo de control de carga de la batería a corriente constante durante todo el tiempo.

Lo importante de las gráficas de la figura contenida en la página siguiente, además del valor que toman las tensiones o corrientes de estrés en el régimen permanente del sistema, que debe ser tenido en cuenta para que el sistema aguante largos períodos de tiempo con dicha tensión, es el valor de pico medido en los transitorios, con el que se puede establecer una tolerancia que podría incluso ser ampliada según lo ofrecido por el mercado.

Las corrientes de estrés de los diodos que se han medido son 6,20 A, un valor cercano a la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico, que es de 6,27 A, para el diodo del convertidor elevador, y de 1,70 A en un pico de transición en la corriente del diodo del convertidor *flyback*. Este último también soporta una tensión de 219,04 V en el mismo punto que este soportaba su mayor corriente medida en el experimento. Esta tensión máxima soportada depende de la tensión de la batería en el modo de carga CV.

Si se observan los transistores, la tensión de estrés de estos componentes es bastante menor que la vista para el diodo del *flyback* y se observa, igualmente, en los transitorios existentes en las curvas. Para este ejemplo, se ve que, en el caso del convertidor elevador, la tensión soportada va a ser de 36,88 V para el caso de este experimento, y en el MOSFET del convertidor *flyback* la tensión máxima soportada va a ser de 76,547 V.

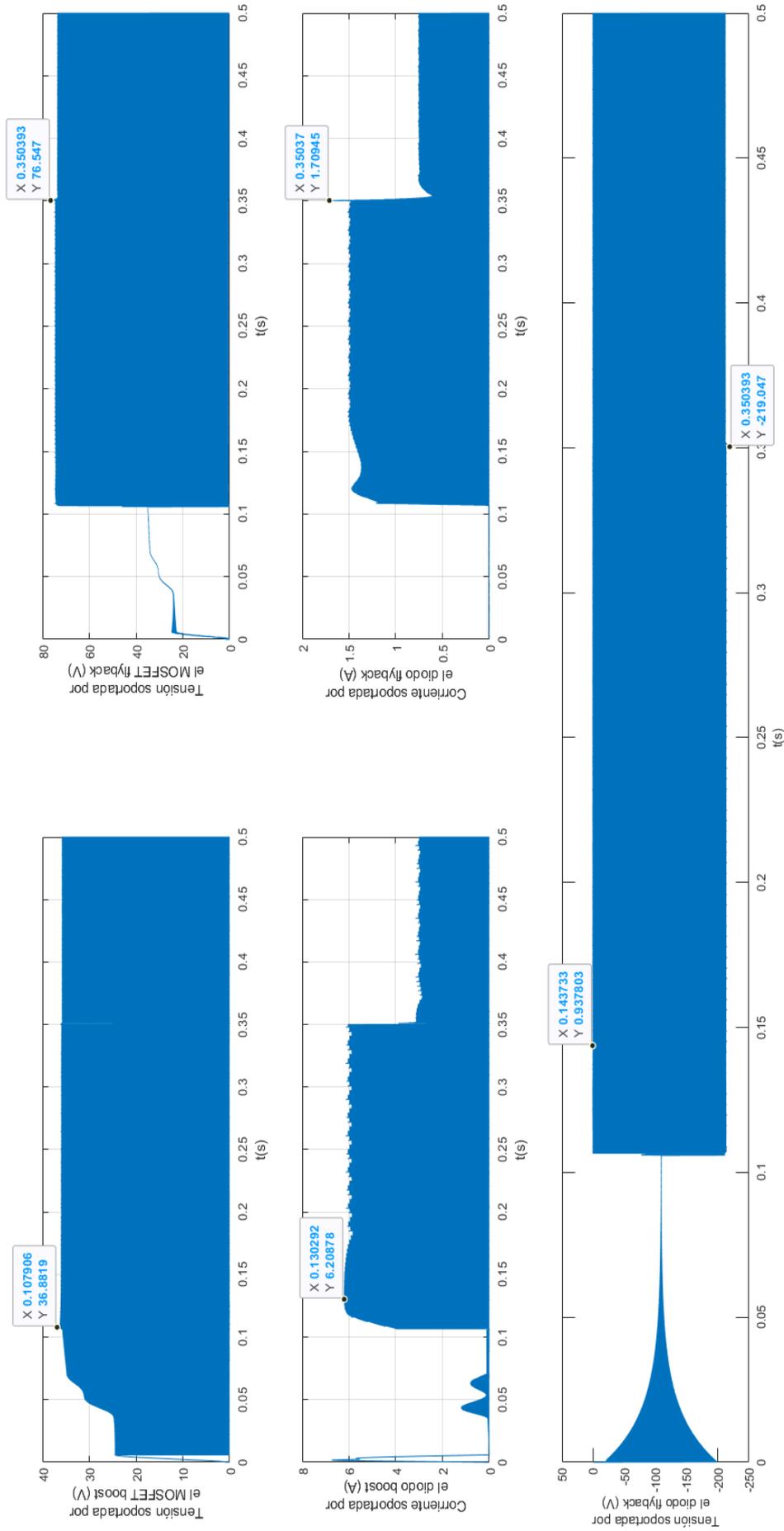


Figura 6-4. Gráfica de las tensiones y corrientes que pueden llegar a soportar los elementos de conmutación del circuito, tanto transistores MOSFET como diodos. Estas medidas se han tomado para una irradiancia de 1000 W/m^2 , en uno de los experimentos realizados para obtener los resultados. Se ve que en parte de este experimento la irradiancia se ve reducida a la mitad.

Como se deduce de la gráfica y los datos anteriormente mostrados, se deberá fijar una tolerancia sobre estos y buscar los componentes más parecidos a los calculados que soporten dichas medidas de tensión y corriente. Una vez conocidos estos datos, se podrá montar un circuito formado por dos convertidores cuyos semiconductores sean capaces de soportar las tensiones y corrientes simuladas.

6.5 Conclusión

En este proyecto se ha simulado un sistema cuyo fin principal es contribuir a un desarrollo sostenible desde el punto de vista de la ingeniería electrónica. Desde que aparecieron los convertidores de potencia, las posibilidades de generación de electricidad se han multiplicado con el paso de los años.

Para aprovechar las posibilidades que ofrece el sistema simulado, se podría desarrollar en hardware e implementar en un vehículo real, tras realizar todos los estudios previos mostrados en el estado del arte, que permitieron conocer cómo se suele componer un sistema de estas características y qué técnicas de control pueden aplicarse, además del desarrollo y estimación de un modelo climático con el que estudiar la viabilidad de estos sistemas.

Este modelo ha sido pensado, simulado y validado para ofrecer una idea del comportamiento que podría tener un sistema de carga de estas características montado en el limitado espacio de un automóvil de turismo, aunque puede extrapolarse a otra clase de vehículos, o ser extendido en un espacio adicional al visto para el vehículo de ejemplo, con paneles adicionales en puertas y otros elementos opacos de la carrocería, tal como se veía en la fotografía del Sono Sion.

Aunque las pruebas se hayan realizado con una iluminación uniforme, con valores constantes y homogéneos de irradiancia, y a una temperatura constante, un ligero cambio en las condiciones podría afectar al funcionamiento del sistema. En la realidad, la irradiancia suele tener un valor que se aleja del ideal, pudiendo llegar a máximos de 900 W/m^2 y a mínimos de 100 W/m^2 , e incluso traspasar estos límites, según la zona geográfica. Debido a esto, cualquier equipo que desarrolle el sistema deberá prever unas expectativas menos ideales, por causa de la temperatura o de otros factores del entorno. No obstante, por el amplio rango de irradiancias elegido, los resultados de la simulación ayudan a prever qué pasa con la potencia generada cuando la iluminación presenta un patrón irregular o se proyectan sombras sobre los paneles.

Debido a la escasa capacidad de generación que tiene este sistema, unos 300 W, aproximadamente, como máximo, su uso podría aplicarse principalmente a la carga de la batería principal del vehículo mientras esté estacionado en un lugar donde incida una abundante radiación solar, algo que podría realizarse de forma aislada o en combinación con un sistema de carga tradicional conectado a la red eléctrica, que podría ser de corriente alterna o continua.

También podría aprovecharse la electricidad generada por este sistema en el caso de que se dese extender la autonomía algunos kilómetros aprovechando la carga ya existente, teniendo en cuenta que el entorno no garantiza, e incluso perjudica, a la generación de energía fotovoltaica, sobre todo si este es urbano.

REFERENCIAS

- [1] **Reddy, P. Jayarama. 2012.** *Solar power generation : technology, new concepts & policy*. Boca Raton : CRC Press, 2012. ISBN 0-429-18535-9.
- [2] **Pavlovic, Tomislav. 2020.** *The Sun and Photovoltaic Technologies*. s.l. : Springer International Publishing, 2020. Vol. 2. ISBN 3-030-22403-1.
- [3] **Rivera, Sebastián, y otros. 2021.** "Electric Vehicle Charging Infrastructure: From Grid to Battery". *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021, Vol. 15, 2, págs. 37-51.
- [4] **Sono Motors.** Sion - The car that charges itself. [En línea] <https://sonomotors.com/en/sion/>.
- [5] **Schuss, Christian, y otros. 2020.** Impacts on the Output Power of Photovoltaics on Top of Electric and Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Mayo de 2020, Vol. 69, 5.
- [6] **Davis, Brett. 2011.** Performance Drive. *Nissan LEAF in Australia in June priced from \$51,500*. [En línea] 20 de Diciembre de 2011. [Citado el: 8 de Septiembre de 2022.] <https://performancedrive.com.au/nissan-leaf-in-australia-in-june-priced-from-51500-2019/>.
- [7] *Electric Vehicle Driving Range Extension Using Photovoltaic Panels*. **Sorniotti, Aldo, y otros. 2016.** Hangzhou, China : s.n., 2016. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). págs. 1-6. ISBN 978-1-5090-3528-1.
- [8] **STMicroelectronics.** *SPV1020 Interleaved DC DC boost converter with built in MPPT algorithm*.
- [9] *Adaptive control of hybrid photovoltaic generator for onboard automotive application*. **Azib, T., y otros. 2016.** Toulouse, Francia : s.n., 2016. 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). págs. 1-6. ISBN 978-1-5090-0814-8.
- [10] *Optimal CC-CV charging of lithium-ion battery for charge equalization controller*. **Hoque, M. M., Hannan, M. A. y Mohamed, A. 2016.** Putrajaya, Malasia : s.n., 2016. 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES). págs. 610-615. ISBN 978-1-5090-2889-4.
- [11] *An Improved Battery Charger for Electric Vehicle with High Power Factor*. **Kushwaha, Radha y Singh, Bhim. 2018.** Portland, OR, EE.UU. : s.n., 2018. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). págs. 1-8. ISBN 978-1-5386-4536-9.
- [12] *Current Controlled Charging Scheme for off Board Electric vehicle Batteries from Solar PV Array*. **Singh, Harshit Kumar y Kumar, Nishant. 2020.** Noida, India : s.n., 2020. 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). ISBN 978-1-7281-5475-6.
- [13] **Araki, Kenji, y otros. 2018.** "Toward the Standardization of the Car-roof PV – The challenge to the 3-D Sunshine Modeling and Rating of the 3-D Continuously Curved PV Panel". Waikoloa, HI, EE.UU. : s.n., 2018. págs. 368-373. ISBN 978-1-5386-8529-7.

- [14] *Modeling and Standardization Researches and Discussions of the Car-roof PV through International Web Meetings*. **Araki, Kenji, y otros. 2019**. Chicago, IL, EE.UU. : s.n., 2019. 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). págs. 2722-2729. ISBN 978-1-7281-0494-2.
- [15] *Rough and Straightforward Estimation of the Mismatching Loss by Partial Shading of the PV Modules Installed on an Urban Area or Car-Roof*. **Araki, Kenji, y otros. 2019**. Chicago, IL, EE.UU. : s.n., 2019. 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). págs. 1218-1225. ISBN 978-1-7281-0494-2.
- [16] **SunPower Corporation. 2010**. *C60 Solar Cell Mono Crystalline Silicon*. 2010. Document #001-66352.
- [17] **Panasonic. 2008**. *Lithium Ion Batteries: Individual Datasheet CGR18560CG Cylindrical Model*. 2008.