

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Memoria de Título

Sistema de gestión de energía para almacenamiento conectado a red en base a hidrógeno de bajas emisiones

Tesis para optar al grado/título de
Ingeniero Civil Electrónico

Alumno
David Robinson Bravo Oyanadel

Guía de Tesis/Profesor Supervisor
Dr. Samir Kouro

Revisores/Comisión Co-Referente
Dr. Christián Rojas

Enero 28, 2026, Valparaíso, Chile

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Sistema de manejo de energía para almacenamiento conectado a red en base a hidrógeno de bajas emisiones

Nombre del candidato(a): David Robinson Bravo Oyanadel

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Samir Kouro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

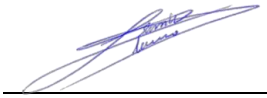
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis: Samir Kouro

Fecha: 18-08-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18/08/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Porque de tal manera amó Dios al mundo, que ha dado a su Hijo unigénito, para que todo aquel que en él cree, no se pierda, mas tenga vida eterna
-Juan 3:16

A mi rey y salvador Jesús. Para él el honor y la gloria.

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZO en primera instancia a Jesús de Nazaret, este logro es en honor y gloria de él. A mis padres Daniel y Lucía, quienes me otorgaron su apoyo incondicional en cada instante y escuchándome cuando más lo necesité. A mi hermano Leonardo, que ha sido mi ejemplo ha seguir y mi fiel compañía.

Agradecer de igual forma a mi profesor guía, Samir Kouro, quien no sólo estuvo guiandome académicamente, sino también aconsejándome. A mi profesor co-referente, Christián Rojas, aportando su ayuda cuando siempre que lo necesité.

A mis amigos de mi ciudad natal. Nicolás, Adio, Diego, Javier, José, René y Maximiliano. Fueron, silenciosamente, mi escape de lo académico cuando lo necesité.

También a mis amigos de la universidad. En ellos, Dream Team, encontré una familia que no pensé era posible. Fueron parte de uno de los procesos más importantes de mi vida.

A mi fiel compañero universitario, Sebatián. Tu compañía como amigo y equipo fue trascendental. Gracias por cada risa y cada conversación, recuerdos inolvidables.

Y por último, pero no menor, a Monster Energy Ultra.

David Robinson Bravo Oyanadel

RESUMEN

ESTE TRABAJO presenta y valida la implementación de un sistema de almacenamiento de energía basado en hidrógeno (H_2ESS) orientado al soporte de redes eléctricas con alta penetración de energías renovables. En el contexto de la transición energética, donde la intermitencia de fuentes renovables introduce desafíos técnicos y operacionales en la red [5], [7], el uso de hidrógeno como vector energético surge como una alternativa con capacidades de almacenamiento, transportabilidad y versatilidad [6], [8]. El sistema propuesto integra un electrolizador (ELZ), una celda de combustible (FC) y un sistema de gestión de energía (EMS), encargado de coordinar los flujos de potencia entre la red y el sistema de almacenamiento.

Se desarrollan modelos y estrategias de control para los convertidores de potencia asociados, junto con una lógica EMS que determina los modos de operación de almacenamiento, consumo o espera según la potencia renovable disponible. A través de distintos casos de estudio, se evalúa el desempeño del H_2ESS frente a variaciones de generación y demanda, demostrando su capacidad para mitigar fluctuaciones de potencia y realizar peak shaving. Asimismo, se consideran restricciones dinámicas propias de la tecnología, tales como los límites de ramp rate en el ELZ [29] y los efectos de degradación por cambios bruscos de potencia en la FC [30], asegurando transiciones suaves y una operación estable del sistema.

Los resultados de simulación evidencian que la coordinación entre los convertidores y el EMS permite mantener la estabilidad de la red, con altas eficiencias de conversión y pérdidas térmicas despreciables en comparación con la potencia procesada. De este modo, se valida la viabilidad del H_2ESS como solución de soporte y flexibilidad para redes eléctricas con alta participación renovable.

Finalmente, se identifican líneas de trabajo futuro orientadas a ampliar las capacidades del sistema, tales como la incorporación de bancos de baterías dentro del EMS, la integración de múltiples fuentes renovables y la inclusión del estado de carga del almacenamiento

de hidrógeno (SOC) como nueva variable de decisión [26]. Asimismo, se propone explorar métodos de control no lineal y distintas topologías de convertidores de potencia, con miras a lograr respuestas dinámicas más precisas y soluciones de implementación más compactas.

Palabras Claves

Hidrógeno, H_2ESS, almacenamiento de energía, sistema de gestión de energía (EMS), electrolizador (ELZ), celda de combustible (FC), energías renovables, convertidores de potencia.

ABSTRACT

THIS WORK presents and validates the implementation of a hydrogen-based energy storage system (H_2ESS) aimed at supporting electrical grids with high penetration of renewable energy sources. In the context of the energy transition, where the intermittency of renewable sources introduces technical and operational challenges to the grid [5], [7], the use of hydrogen as an energy vector emerges as an alternative with storage, transportability, and versatility capabilities [6], [8]. The proposed system integrates an electrolyzer (ELZ), a fuel cell (FC), and an energy management system (EMS), responsible for coordinating power flows between the grid and the storage system.

Models and control strategies are developed for the associated power converters, together with an EMS logic that determines storage, consumption, or standby operating modes according to the available renewable power. Through different case studies, the performance of the H_2ESS is evaluated under generation and demand variations, demonstrating its ability to mitigate power fluctuations and perform peak shaving. Additionally, dynamic constraints inherent to the technology are considered, such as ramp rate limits in the ELZ [29] and degradation effects due to abrupt power changes in the FC [30], ensuring smooth transitions and stable system operation.

Simulation results show that coordination between the converters and the EMS allows grid stability to be maintained, with high conversion efficiencies and negligible thermal losses compared to the processed power. In this way, the feasibility of the H_2ESS as a support and flexibility solution for electrical grids with high renewable participation is validated.

Finally, future work directions are identified to expand system capabilities, such as the incorporation of battery banks within the EMS, the integration of multiple renewable sources, and the inclusion of the hydrogen storage state of charge (SOC) as a new decision variable [26]. Furthermore, the exploration of nonlinear control methods and different power converter topologies is proposed, aiming to achieve more accurate dynamic responses

and more compact implementation solutions.

Keywords

Hydrogen, H_2ESS, energy storage, energy management system (EMS), electrolyzer (ELZ), fuel cell (FC), renewable energy, intermittency, power converters, current control.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS **I**

RESUMEN **II**

ABSTRACT **IV**

ÍNDICE DE FIGURAS **VIII**

ÍNDICE DE TABLAS **XI**

ABREVIACIONES **XII**

SIMBOLOGÍA **XIII**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1. Contexto general, desafíos y soluciones actuales en la transición energética 1

1.2. Contribuciones 2

1.3. Objetivo General, Alcances y Limitaciones 3

2. HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES **4**

2.1. Hidrógeno y sus clasificaciones 4

2.2. Sistemas H_2ESS 6

2.3. Convertidores de potencia en H_2ESS 9

2.4. Sistemas de control aplicados a H_2ESS 14

2.5. Resumen del capítulo 16

3. MODELADO Y CONTROL DEL SISTEMA H_2ESS **17**

3.1. Modelo general, parámetros y dimensionamiento del sistema 17

3.2. Conversión AC/DC 19

3.2.1. Modelado del convertidor AFE 19

3.2.2. Control del AFE mediante VOC 21
3.3. Conversión DC/DC reductora 22
3.3.1. Modelado del convertidor Buck 23
3.3.2. Control de corriente para convertidor Buck 24
3.4. Conversión DC/DC elevadora 24
3.4.1. Modelado del convertidor Boost 25
3.4.2. Control de corriente para convertidor Boost 26
3.5. Modelado de electrolizador y celdas de combustible 26
3.6. Algoritmo de manejo de energía (EMS) 27
3.7. Modelado térmico 28
3.7.1. Modelado módulo PV 30
3.8. Resumen del capítulo 31

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA H_2ESS 33
4.1. Implementación del modelo en PLECS 33
4.2. Casos de estudio 40
4.2.1. Generación de hidrógeno 41
4.2.2. Consumo de hidrógeno 51
4.2.3. Peak shaving 61
4.3. Resumen del capítulo 74

5. CONCLUSIONES 75
5.1. Resumen 75
5.2. Conclusiones 76
5.3. Trabajo Futuro 77

A. PUBLICACIONES GENERADAS 79

B. ANEXO 80
B.0.1. Código algoritmo MPPT 80

BIBLIOGRAFÍA 82

Índice de figuras

1.1. Diagrama general sistema H_2ESS 3

2.1. Resumen de las fuentes de energía y moléculas de hidrógeno, el proceso de producción y las emisiones asociadas con los siguientes colores propuestos para referirse al hidrógeno [9]. 6
2.2. Diagrama general sistema H_2ESS 8
2.3. Standard Buck [18]. 10
2.4. Synchronous Buck [18]. 10
2.5. Quadratic Buck [18]. 10
2.6. Stacked Buck [18]. 11
2.7. Convertidor elevador DC-DC no aislado [20]. 11
2.8. Convertidor elevador DC-DC en cascada [19]. 11
2.9. Convertidor DAB [18]. 12
2.10. DAB en serie para HV y en paralelo para LV [18]. 12
2.11. Rectificador trifásico de dos niveles [22]. 13
2.12. Convertidor NPC [22]. 13
2.13. Convertidor trifásico tipo T [22]. 14
2.14. Control PI para electrolizadores. 14
2.15. Control PI para celdas de combustible apiladas. 15
2.16. Controlador en cascada para ELZ. 15
2.17. Controlador en cascada para FC. 15

3.1. Modelo general H_2ESS propuesto. 18
3.2. Convertidor AFE para sistema H_2ESS 19
3.3. Diagrama de bloques de VOC. 22
3.4. Convertidor Buck de tres canales para sistema H_2ESS 23
3.5. Diagrama de bloques control de corriente para ELZ. 24
3.6. Convertidor Boost de tres canales para sistema H_2ESS. 25

3.7. Diagrama de bloques control de corriente para FC. 26
3.10. Esquema módulo PV. 30
3.11. Diagrama de flujo P&O [31]. 31

4.1. Implementación sistema H_2ESS en PLECS. 34
4.2. Implementación VOC para sistema H_2ESS en PLECS. 37
4.3. Implementación control de corriente para ELZ. 37
4.4. Implementación control de corriente para FC. 37
4.5. Implementación EMS en PLECS. 38
4.6. Implementación VOC para módulo PV en PLECS. 38
4.7. Convertidor AFE con modelado térmico en PLECS. 39
4.8. Convertidor Buck con modelado térmico en PLECS. 39
4.9. Convertidor Boost con modelado térmico en PLECS. 39
4.10. Irradiancia y temperatura de PV para caso de estudio 1. 41
4.11. Potencias de interés caso de estudio 1. 42
4.12. Caso de estudio 1. 43
4.13. Señales de interés de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS caso de estudio 1. 44
4.14. Caso de estudio 1. 45
4.15. Caso 1. 46
4.16. Señales de interés para ELZ caso de estudio 1. 47
4.17. Caso de estudio 1. 48
4.18. Caso 1. 49
4.19. Señales de interés FC caso 1. 50
4.20. Irradiancia y temperatura de PV para caso de estudio 2. 51
4.21. Potencias de interes caso de estudio 2. 52
4.22. Caso de estudio 2. 53
4.23. V_{dc}, i_{gdq}, referencias de conmutación, V_{gabc} e i_{gabc} caso de estudio 2. . . 54
4.24. Caso de estudio 2. 55
4.25. Caso 2. 56
4.26. Señales de interés de FC para caso de estudio 2. 57
4.27. Caso de estudio 2. 58
4.28. Caso 2. 59
4.29. Señales de interés para ELZ en caso de estudio 2. 60
4.30. Variación de temperatura e irradiancia para caso de estudio 3. 62
4.31. Potencias de interés caso de estudio 2. 63
4.32. Caso de estudio 3. 64
4.33. Voltaje dc y señales de interés de la red caso de estudio 3. 65
4.34. Caso de estudio 3. 67
4.36. Señales de interés ELZ caso de estudio 3. 70

4.38. Señales de interés FC caso de estudio 3. 72

Índice de tablas

3.1. Parámetros de diseño del sistema 18

4.1. Parámetros del modelo térmico de Cauer en PLECS. 40

ABREVIACIONES

Mayúsculas

H2ESS	: Hydrogen Energy Storage System
EMS	: energy management system
ELZ	: electrolyzer
FC	: fuel cell
SOC	: state of charge
VOC	: voltage-oriented control
MPC	: model predictive control
TSMC	: terminal sliding mode control
PI	: proportional-integral controller
PWM	: pulse width modulation
IGBT	: insulated-gate bipolar transistor
AFE	: active front end converter
DAB	: dual active bridge converter
NPC	: neutral-point clamped converter
CCUS	: carbon capture, utilization and storage
GEI	: gases de efecto invernadero

Minúsculas

dc	: direct current
ac	: alternating current
pv	: photovoltaic

SIMBOLOGÍA

Matrices

$\mathbf{T}_{abc-\alpha\beta}$: matriz de transformación de Clarke
$\mathbf{T}_{\alpha\beta-dq}$: matriz de transformación de Park

Vectores

$\mathbf{v}_{abc}$: vector de tensiones trifásicas, $\mathbf{v} = [v_a\ v_b\ v_c]^T$
$\mathbf{i}_{abc}$: vector de corrientes trifásicas, $\mathbf{i} = [i_a\ i_b\ i_c]^T$
$\mathbf{v}_{dq}$: vector de tensiones en marco rotante, $\mathbf{v} = [v_d\ v_q]^T$
$\mathbf{i}_{dq}$: vector de corrientes en marco rotante, $\mathbf{i} = [i_d\ i_q]^T$
$\mathbf{u}$: vector de señales de control del convertidor
$\mathbf{S}$: vector de estados de conmutación

Escalares

P_{pv} : potencia generada por el sistema fotovoltaico
P_{elz} : potencia consumida por el electrolizador
P_{fc} : potencia generada por la celda de combustible
P_{grid} : potencia intercambiada con la red
P_{load} : potencia demandada por la carga
V_{dc} : tensión del bus de continua
I_{elz} : corriente del electrolizador
I_{fc} : corriente de la celda de combustible
SOC : estado de carga del sistema de almacenamiento de hidrógeno
η_{elz} : eficiencia del electrolizador

η_{fc} : eficiencia de la celda de combustible
RR_{elz} : límite de *ramp rate* del electrolizador
f_{grid} : frecuencia de la red eléctrica

Subíndices

pv : sistema fotovoltaico
elz : electrolizador
fc : celda de combustible
$grid$: red eléctrica
$load$: carga
dc : lado de corriente continua
ac : lado de corriente alterna
d, q : componentes en marco de referencia síncrono
a, b, c : fases del sistema trifásico

Superíndices

$*$: valor de referencia
máx : valor máximo permitido
mín : valor mínimo permitido
ref : señal de referencia

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto general, desafíos y soluciones actuales en la transición energética

ANTE LA NECESIDAD de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), originados en su mayoría por la combustión de combustibles fósiles, y considerando la importancia de diversificar las fuentes energéticas para disminuir la dependencia de combustibles importados [1], surge la necesidad de una transición energética. Este proceso busca reemplazar los combustibles fósiles por fuentes renovables y de bajas emisiones, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad [2].

A pesar de los avances alcanzados en las últimas décadas, como la reducción de los costos de las energías renovables —lo que ha facilitado su integración a nivel mundial [3]—, el proceso de transición energética aún enfrenta importantes desafíos. Entre ellos destaca la naturaleza intermitente de estas fuentes, que exige desarrollos en sistemas de almacenamiento y redes inteligentes, así como la necesidad de inversiones masivas para escalar la infraestructura energética [4].

La integración de gran escala de energías renovables cumple un rol fundamental en el logro de los objetivos de descarbonización. Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de estas fuentes representa un desafío para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico [5]. Por ejemplo, la generación solar depende de la radiación durante el día, se ve afectada por condiciones climáticas adversas (e.g., días nublados) y no es posible generar energía durante la noche [6]. La energía eólica, por su parte, varía según la velocidad del viento, presentando periodos de baja o alta producción que pueden extenderse por días o

incluso semanas [6]. Estas fluctuaciones, en ausencia de sistemas de almacenamiento adecuados, pueden provocar déficits temporales de generación renovable, lo que obliga en algunos casos a recurrir a fuentes fósiles para satisfacer la demanda energética [5], [6].

En respuesta a esta problemática, los sistemas de almacenamiento energético emergen como una solución clave para mitigar los desafíos mencionados. Estos sistemas permiten capturar el excedente de energía generado durante los periodos de alta producción de fuentes renovables [7], y posteriormente liberarlo en momentos de baja generación o alta demanda [7].

Las baterías de litio, bombeo hidráulico o sistemas de almacenamiento en base a hidrógeno (H_2ESS) son algunas de las tecnologías de almacenamiento energético utilizadas que han permitido aumentar la integración de energías renovables [5], [6]. Además, éstas son compatibles entre sí, logrando sistemas híbridos que, por ejemplo, combinan baterías de litio con almacenamiento de hidrógeno, permitiendo las respuestas rápidas del primero y una capacidad de almacenamiento a largo plazo del último, lo que pretende abordar fluctuaciones diarias y estacionarias [6].

Sumado a los aspectos técnicos que suscitan estos desafíos, también se presentan aquellos económicos, dado que sin la existencia de estos sistemas de almacenamiento, los costos de operación aumentan conforme a la necesidad de mantener plantas de respaldo en base a combustibles fósiles, contrarrestando los beneficios ambientales que pretenden abarcar las energías renovables [7]. Así, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento son una de las prioridades en el proceso de transición energética, para garantizar un suministro eléctrico confiable y sostenible [5], [7]. Este documento subraya la importancia de explorar soluciones innovadoras, como los sistemas H_2ESS, que pueden desempeñar un papel clave en la integración de energías renovables a gran escala [6], [7], dadas sus características de almacenamiento, transportabilidad y versatilidad [8].

1.2. Contribuciones

El proyecto pretende validar el uso del sistema H_2ESS, el cual busca brindar soporte a las redes eléctricas y, a la vez, darle flexibilidad al permitir el uso de un combustible de bajas emisiones como vector energético. Además, se busca validar el hecho de que tanto electrolizadores como celdas de combustibles son capaces de habilitar esta tecnología de almacenamiento, compensando servicios complementarios hacia la red.

Se espera, también, lograr un sistema de alta eficiencia energética bajo los distintos modos de operación y un sistema EMS que logre determinar los momentos óptimos de almacenamiento y producción de electricidad.

1.3. Objetivo General, Alcances y Limitaciones

El objetivo del proyecto es modelar y simular un sistema de almacenamiento de energía basado en hidrógeno de bajas emisiones (Hydrogen Energy Storage System - H_2ESS) conectado a la red eléctrica, i.e., on-grid.

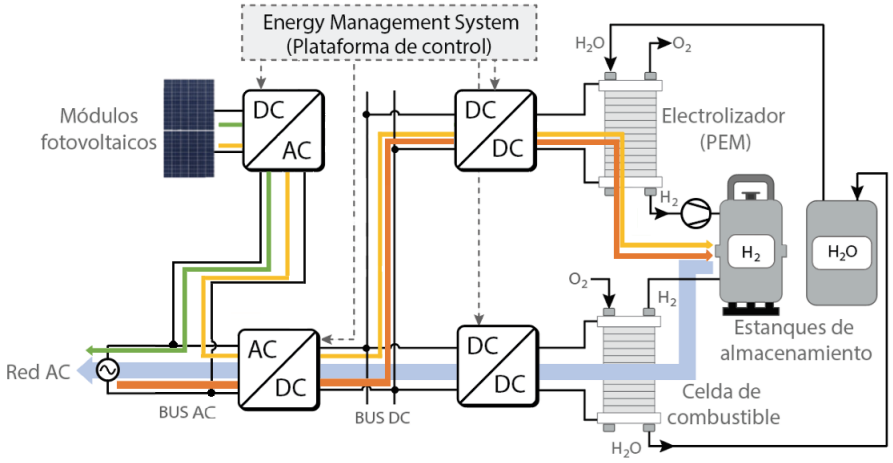


Figura 1.1: Diagrama general sistema H_2ESS

Tal como indica la figura 1.1, un convertidor AC/DC es conectado a la red; luego un electrolizador que, mediante una etapa DC/DC, produce hidrógeno y éste es almacenado en tanques para su posterior conversión en electricidad.

Para el caso de generación de energía , el hidrógeno almacenado es convertido en electricidad mediante celdas de combustible, lo que es conectado a otra etapa DC/DC y devuelto a la red a través del convertidor AC/DC antes mencionado.

A la vez, se propone un sistema de manejo de energía (EMS, por sus siglas en inglés) para optimizar el uso del sistema H_2ESS y sus convertidores asociados.

Capítulo 2

HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES

2.1. Hidrógeno y sus clasificaciones

EL HIDRÓGENO se clasifica empleando colores, los cuales representan el método de producción y su impacto ambiental.

- **Hidrógeno verde**: producido mediante electrólisis del agua con electricidad de fuentes renovables (solar, eólica, hidráulica), tiene cero emisiones de carbono [9].
- **Hidrógeno amarillo**: producido mediante electrólisis del agua utilizando electricidad de la red eléctrica, que incluye una mezcla de fuentes renovables (e.g., solar, eólica) y no renovables (e.g., gas, carbón), con una huella de carbono dependiente de la composición de la red [9].
- **Hidrógeno gris**: producido por reformado con vapor de gas natural sin captura de CO_2, genera aproximadamente 10 kg CO_2/kg H_2 [9].
- **Hidrógeno azul**: producido a partir de combustibles fósiles con captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), reduce emisiones a aproximadamente 1–2 kg CO_2/kg H_2 [9].
- **Hidrógeno turquesa**: producido por pirólisis de metano, genera carbono sólido como subproducto en lugar de CO_2, con bajas emisiones si se usa energía renovable [9].
- **Hidrógeno rosa**: producido por electrólisis usando electricidad de origen nuclear, es bajo en carbono [9].
- **Hidrógeno marrón**: producido por gasificación de carbón, genera altas emisiones de CO_2 (aproximadamente 18–20 kg CO_2/kg H_2) [9].

- **Hidrógeno negro**: producido por gasificación de lignito, similar al marrón, con emisiones comparables (aproximadamente 18–20 kg CO_2/kg H_2) [9].
- **Hidrógeno blanco**: hidrógeno natural extraído de depósitos geológicos subterráneos, con emisiones nulas durante la producción [9].
- **Hidrógeno dorado**: producido mediante procesos biológicos, como la fermentación de biomasa o fotosíntesis microbiana, con bajas emisiones si se gestiona correctamente [9].

Así, de forma gráfica se puede representar esta categoría según la figura 2.1, que muestra un resumen según su fuente energética, proceso de obtención y emisiones de CO_2 del hidrógeno.

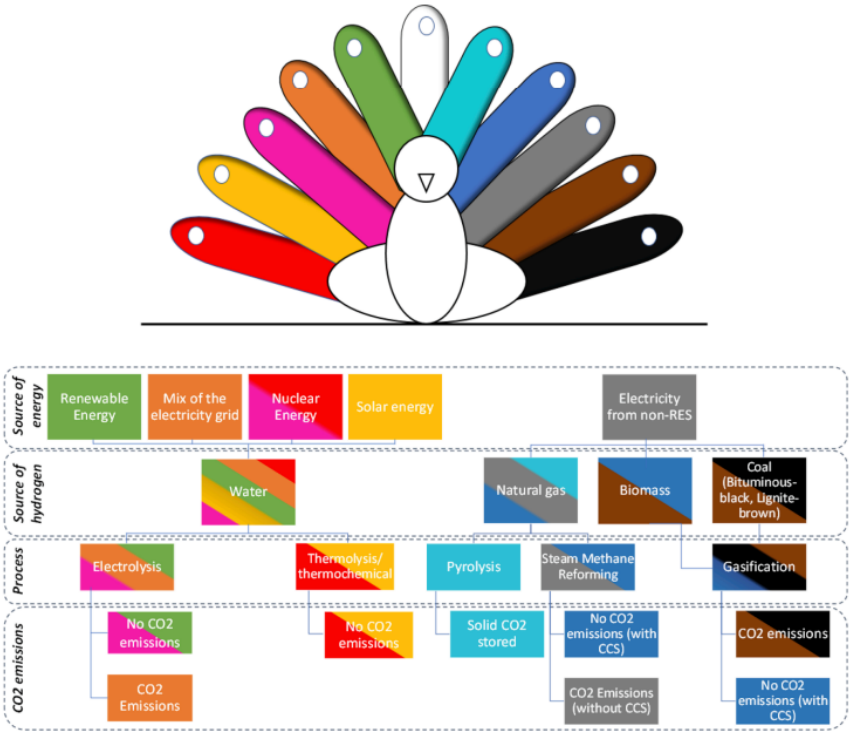


Figura 2.1: Resumen de las fuentes de energía y moléculas de hidrógeno, el proceso de producción y las emisiones asociadas con los siguientes colores propuestos para referirse al hidrógeno [9].

2.2. Sistemas H_2ESS

Los sistemas H_2ESS son tecnologías diseñadas para almacenar el excedente de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, utilizando el hidrógeno como vector energético [7]. Su propósito es reconvertir dicha energía en electricidad cuando la demanda supera a la generación renovable, lo que permite enfrentar las fluctuaciones tanto diarias como estacionales [10].

Además, presenta características de escalabilidad que se adecúan a redes eléctricas, microrredes, y sectores como el transporte y la industria [7], [10]. No obstante, el desarrollo de estos sistema no está exento de desafíos, como la eficiencia de la electrólisis y los costos de almacenamiento, los cuales requieren de innovaciones continuas para su adopción masiva [10].

Éstos se pueden clasificar por su tipo de tecnología de electrólisis (tipo de electrolizador), configuración del sistema, forma de almacenamiento y modo de conexión [7]. Estas clasificaciones se detallan como sigue:

- **Tecnología de electrólisis**: en esta categoría se encuentran los sistemas que están conformados por electrolizadores alcalinos [7], de membrana de intercambio protónico (PEM) [13] y de óxido sólido (SOEC, por sus siglas en inglés) [10].
- **Configuración del sistema**: se encuentran las configuraciones standalone, en donde el sistema de almacenamiento está conformado por sólo H_2ESS [6], [11], y los sistemas híbridos, que combinan otras tecnologías, como baterías [5].
- **Forma de almacenamiento**: el hidrógeno se puede almacenar como hidrógeno comprimido [7], hidrógeno líquido [5], hidruros metálicos [11] y portadores químicos [7].
- **Modo de conexión**: se encuentran los sistemas conectados a la red (on-grid) [7] y los que están aislados (off-grid) [10].

En relación a esta última categoría, los sistemas off-grid priorizan configuraciones híbridas, dada la necesidad de autosuficiencia, combinando el hidrógeno para almacenamiento estacional y las baterías para abordar las fluctuaciones diarias [10]. Estos sistemas aislados buscan garantizar un suministro continuo, mitigando las intermitencias que por antonomasia están presentes en las energías renovables [6].

Dada la naturaleza intermitente de la generación solar y eólica, es que los sistemas off-grid suelen usar electrolizadores PEM, en base a sus propiedades de rápida respuesta y capacidad de operar bajo cargas variables [6], [10]. En situaciones de entornos remotos, donde la infraestructura tiende a ser limitada, el almacenamiento en hidruros metálicos es utilizado, dada su compacidad y operación a bajas presiones [11]. Para microrredes de mayor envergadura, la opción comúnmente utilizada es el hidrógeno comprimido [11]. Luego, para la posterior reconversión del hidrógeno a energía eléctrica, las celdas de combustibles PEM se presentan como la tecnología principal, la cual permite reducir la necesidad de sistemas de refrigeración complejos debido a su baja emisión de calor [6].

En cuanto a los sistemas on-grid, estos son comúnmente diseñados para gestionar los excedentes de energía que puedan generar las energías renovables, logrando un efecto de estabilidad de la red frente a los fenómenos de intermitencia [11] y favoreciendo la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles como método de almacenamiento [5]. Asimismo, suelen emplear electrolizadores alcalinos o PEM junto con almacenamiento de hidrógeno comprimido, con ventajas de potencial escalabilidad [5], [7], [10].

Los sistemas híbridos on-grid conforman otra tecnología emergente, los cuales son parti-

cularmente efectivos en ambientes urbanos o industriales, ambientes que requieren de alta flexibilidad en sus sistemas [5], [7], cubriendo fluctuaciones de corto plazo por las baterías o supercapacitadores y las de largo plazo por el hidrógeno [11].

Así, de forma general se puede representar un sistema H_2ESS como indica la figura 2.2. Éstos componen, principalmente, por elementos como fuentes renovables, baterías, convertidores de potencia, electrolizadores, estanques de almacenamiento, celdas de combustible, plataforma de control y, dependiendo del tipo de conexión, puede haber presencia o no de la red.

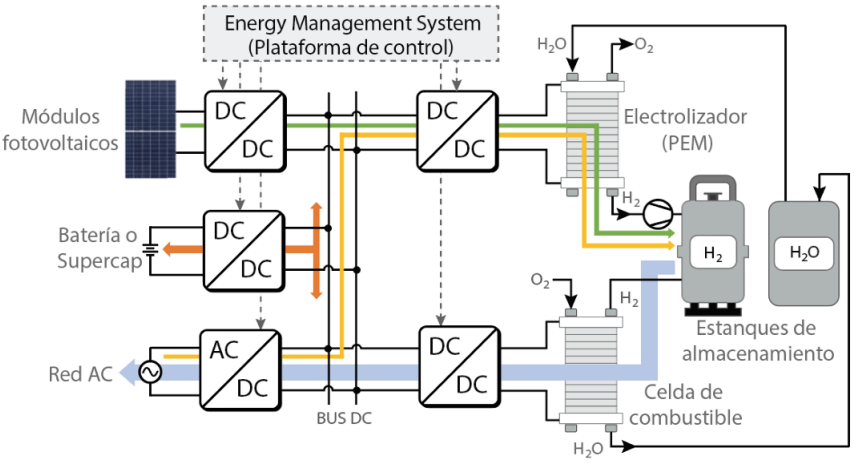


Figura 2.2: Diagrama general sistema H_2ESS

2.3. Convertidores de potencia en H_2ESS

En el contexto de los sistemas H_2ESS, los convertidores de potencia cumplen con la función de procesar los flujos de potencia de la red, electrolizadores, almacenamiento, celdas de combustible y cargas, tanto para sistemas on-grid como off-grid [12]. Entre ellos, los convertidores AC/DC cumplen con convertir corriente alterna de la red en corriente continua (CC) para el enlace DC al que se conectan los sistemas [13]. Los convertidores DC/DC regulan voltajes entre electrolizadores, celdas de combustible, baterías (en HESS híbridos) y el bus de CC [14].

En general, los sistemas on-grid priorizan convertidores que proporcionen una baja distorsión armónica y compatibilidad con estándares de la red [15], mientras que los sistemas off-grid priorizan convertidores que permitan características de flexibilidad para fuentes intermitentes y cargas variables [12]. Estos convertidores son capaces de procesar la potencia debido a la existencia de algoritmos de control que los optimizan [16].

Algunas de las topologías comunes incluyen convertidores reductores (buck), elevadoores (boost) y doble puente activo (dual active bridge, DAB) [17], [18].

- **Convertidores buck:** Los convertidores buck se utilizan principalmente para la reducción de voltaje en electrolizadores, interconexión con buses de corriente continua de alto voltaje y gestión de caídas de voltaje en sistemas de producción de hidrógeno [18]. Los convertidores buck estándar, figura 2.3, conforman la topología básica para reducir voltaje. Los síncronos, figura 2.4 permiten una mayor eficiencia al reemplazar el diodo del estándar por un switch síncrono. El convertidor buck cuadrático, figura 2.5, es utilizado en aplicaciones de alto voltaje y corriente, usualmente en una configuración intercalada (interleaved) para mejorar el desempeño. Por su parte, el convertidor buck apilado, figura 2.6, presenta ventajas para la reducción del ripple de corriente, mediante el uso de un inductor acoplado [18].
- **Convertidores boost:** Los convertidores boost elevan un voltaje más bajo a uno más alto [18]. Éstos elevan el voltaje desde una celda de combustible de bajo voltaje a un voltaje más alto para la conexión a la red u otras aplicaciones, siendo su topología como indica la figura 2.7. La figura 2.8 muestra un convertidor boost aplicado a una celda de combustible PEM, que tiene tanto una mayor ganancia de voltaje como una mayor eficiencia en comparación con el convertidor en cascada convencional y otros convertidores tipo boost [19].
- **Convertidores DAB:** Los convertidores DAB, como el que se muestra en la figura 2.9, se utilizan para conectar buses de corriente continua de alto voltaje con electrolizadores o pilas de celdas de combustible [17], siendo su topología como indica la figura 2.9. Además, para manejar las altas corrientes típicas en estos sistemas, existe un enfoque

alternativo, es decir, usar estos convertidores como módulos, permitiendo que las altas corrientes fluyan a través de n convertidores [17]. La topología de este último se muestra en la figura 2.10.

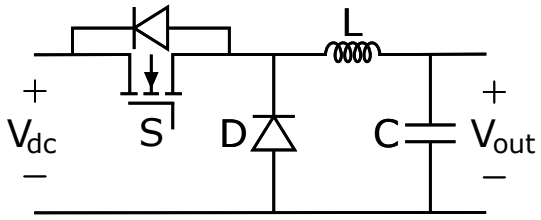


Figura 2.3: Standard Buck [18].

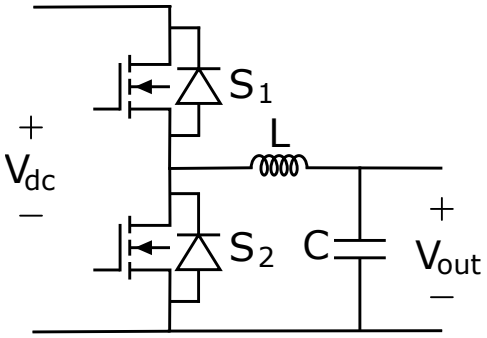


Figura 2.4: Synchronous Buck [18].

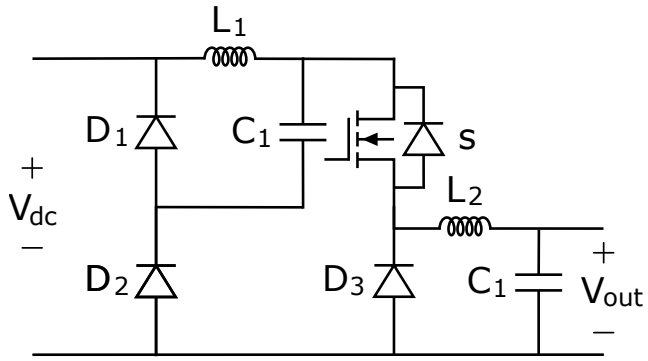


Figura 2.5: Quadratic Buck [18].

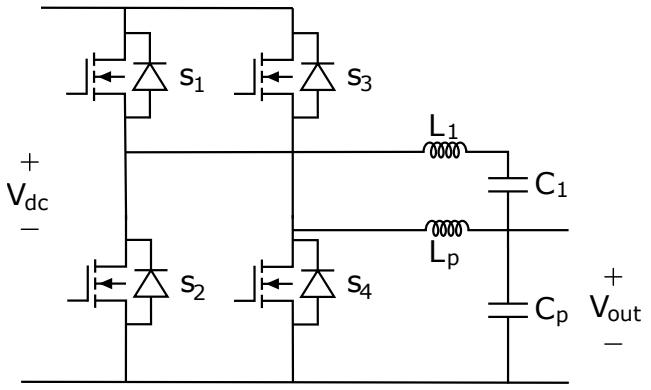


Figura 2.6: Stacked Buck [18].

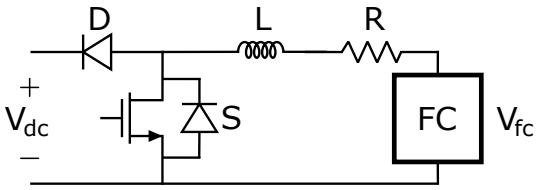


Figura 2.7: Convertidor elevador DC-DC no aislado [20].

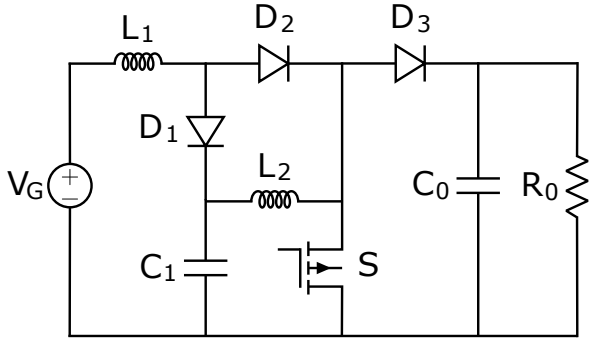


Figura 2.8: Convertidor elevador DC-DC en cascada [19].

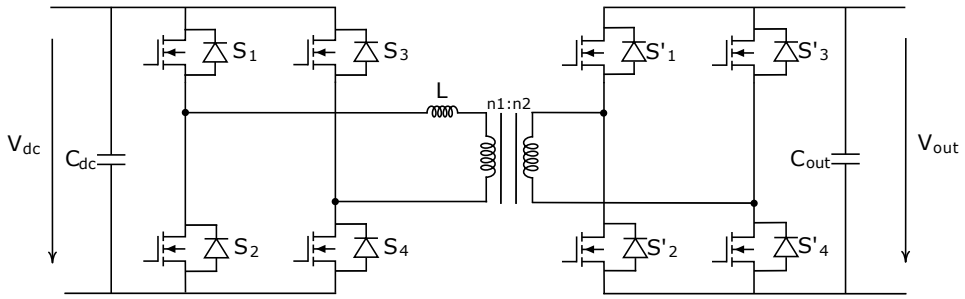


Figura 2.9: Convertidor DAB [18].

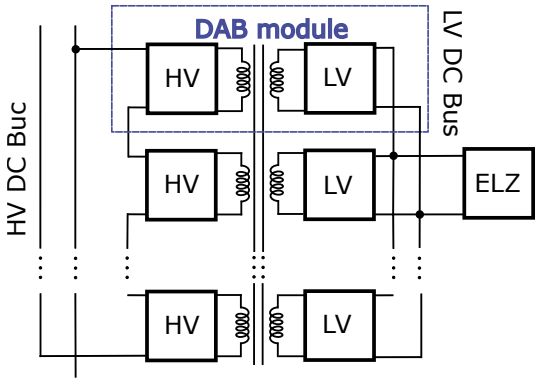


Figura 2.10: DAB en serie para HV y en paralelo para LV [18].

En relación a los convertidores AC/DC aplicados a sistemas de hidrógeno, éstos presentan una vasta variedad. Uno de ellos es el rectificador trifásico de dos niveles para aplicaciones con electrolizadores [22], presentado en la figura 2.11, que dependeindo del flujo de potencia puede ser denominado convertidor de frente activo (AFE). En la figura 2.12 se muestra el convertidor trifásico con punto de neutro activo (NPC) natural. También se encuentra la configuración de convertidor trifásico tipo T para aplicaciones con electrolizadores, mostrado en la figura 2.13.

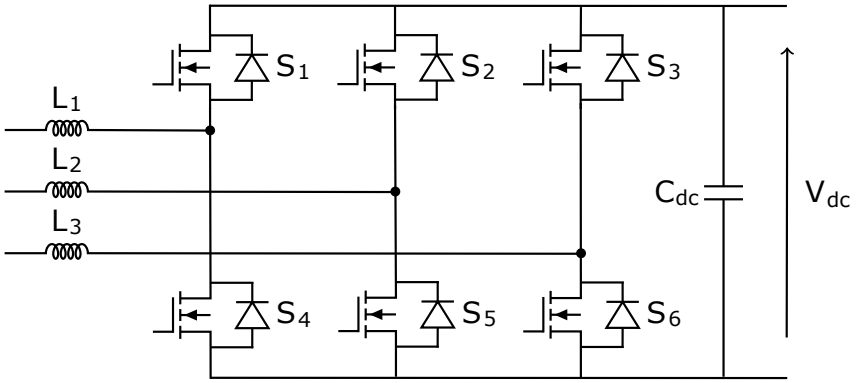


Figura 2.11: Rectificador trifásico de dos niveles [22].

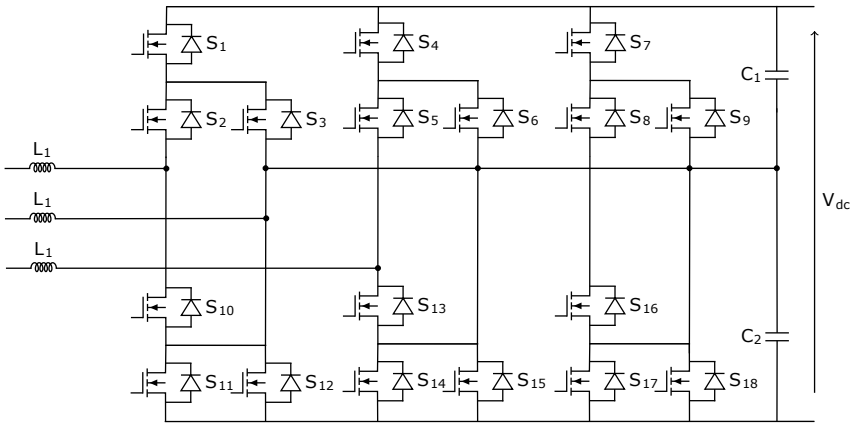


Figura 2.12: Convertidor NPC [22].

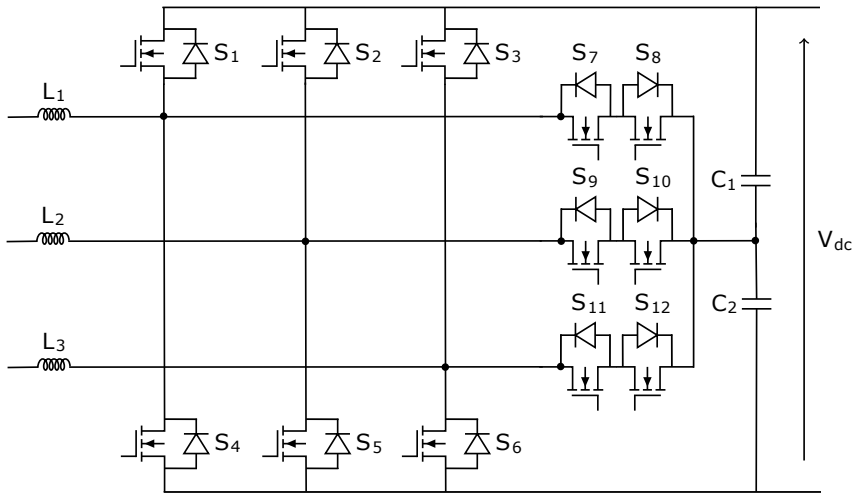


Figura 2.13: Convertidor trifásico tipo T [22].

2.4. Sistemas de control aplicados a H_2ESS

Con el fin de optimizar la distribución de energía entre generadores, electrolizadores, celdas de combustible, baterías (en sistemas híbridos) y cargas, se requiere una gestión eficiente que minimice los costos y mejore la fiabilidad del sistema. En este contexto, surgen los sistemas de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) como solución para cumplir dicha función [14].

El controlador ampliamente utilizado es el controlador proporcional–integral (PI), ya que es eficaz y sencillo de desarrollar sin requerir un modelado matemático o físico extenso [20]. La figura 2.14 muestra el diagrama de bloques al aplicar este método hacía los electrolizadores. Por su parte, el controlador PI aplicado hacía las celdas de combustible se encuentra en la figura 2.15.

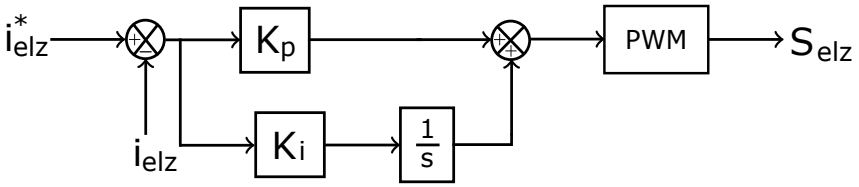


Figura 2.14: Control PI para electrolizadores.

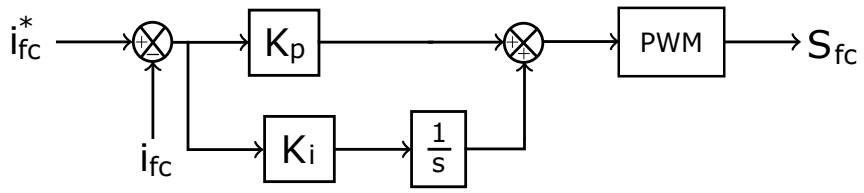


Figura 2.15: Control PI para celdas de combustible apiladas.

También, es posible utilizar el método PI en cascada, donde el lazo externo genera una referencia para la corriente del electrolizador (ELZ), como se muestra en la figura 2.16 [20]. De forma análoga se muestra este mismo método para las celdas de combustible (FC), en la figura 2.17 [20].

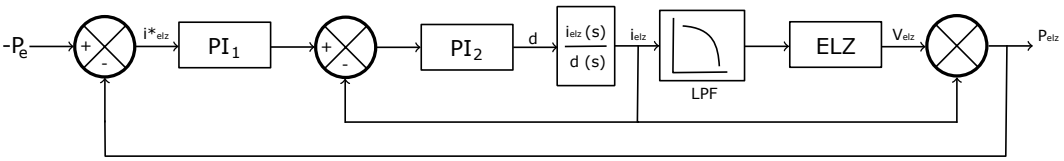


Figura 2.16: Controlador en cascada para ELZ.

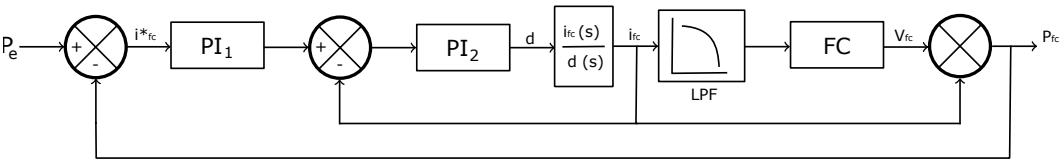


Figura 2.17: Controlador en cascada para FC.

En cuanto al control de la conversión AC/DC, lo métodos de control varían según el convertidor utilizado y la preferencia del usuario. Una forma ampliamente desarrollada es el uso de control orientado por voltaje (VOC, por sus siglas en inglés). Éste permite un control proporcional a la potencia, dado que la entrada al controlador es el voltaje DC al cuadrado.

Sumado a lo anterior, se encuentra el método de control predictivo por modelo (Model Predictive Control, MPC, por sus siglas en inglés). Este enfoque ha sido aplicado en microrredes off-grid con sistemas H_2ESS y almacenamiento híbrido (hidrógeno y baterías) [14] También, puede ser implementado un control multi-escala, integrando optimización estocástica y control no lineal (modo deslizante terminal, TSMC por sus siglas en inglés), que se presenta en escenarios de microrredes DC con sistemas H_2ESS [23].

Mediante los controladores mencionados, es que se desarrollan los EMS que optimizan la

asignación de carga considerando restricciones dinámicas, como la intermitencia de las fuentes solar y eólica, así como la capacidad de almacenamiento y el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) de los elementos que almacenan el hidrógeno[14].

2.5. Resumen del capítulo

El hidrógeno puede clasificarse según su método de producción y su impacto ambiental, empleando una nomenclatura basada en colores que distingue tecnologías y niveles de emisiones asociados [9]. Entre ellos, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis con energías renovables y presenta emisiones nulas de carbono, mientras que variantes como el gris o marrón se obtienen a partir de combustibles fósiles con altas emisiones de CO_2 [9]. Otras alternativas, como el hidrógeno azul, turquesa, rosa, blanco y dorado, se diferencian por sus procesos productivos y niveles intermedios o bajos de emisiones [9].

Los sistemas H_2ESS utilizan el hidrógeno como vector energético para almacenar excedentes de electricidad renovable y reconvertirlos posteriormente en energía eléctrica cuando la demanda lo requiere, permitiendo enfrentar fluctuaciones diarias y estacionales [7], [10]. Estos sistemas presentan características de escalabilidad que permiten su aplicación en redes eléctricas, microrredes, transporte e industria, aunque aún enfrentan desafíos relacionados con eficiencia y costos de almacenamiento [7], [10].

Los H_2ESS pueden clasificarse según la tecnología de electrólisis empleada, la configuración del sistema, la forma de almacenamiento del hidrógeno y su modo de conexión (on-grid u off-grid) [7], [10], [11]. En sistemas conectados a red, el objetivo principal es gestionar excedentes renovables y aportar estabilidad al sistema eléctrico, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles [5], [7], [11]. Asimismo, los esquemas híbridos combinan baterías para respuesta rápida y almacenamiento en hidrógeno para respaldo de largo plazo, logrando mayor flexibilidad operativa [6], [11].

Capítulo 3

MODELADO Y CONTROL DEL SISTEMA H_2ESS

3.1. Modelo general, parámetros y dimensionamiento del sistema

EL DIAGRAMA mostrado en la figura 3.1 muestra el modelo general propuesto para el sistema H_2ESS. A éste se le aplicarán métodos de control lineal, que se desarrollarán en las secciones siguientes, con el fin de optimizar los flujos de potencias entre sus componentes. Finalmente, se implementa un sistema de manejo de energía (EMS), con el fin de gestionar los flujos de potencia de forma eficiente e inteligente.

El sistema a modelar, se conforma de la red eléctrica seguido de un convertidor AC/DC de frente activo (AFE). La salida de éste se conecta a un bus DC, el cual es el punto de conexión entre los otros componentes del sistema (PV, FC y ELZ). La conversión hacia el electrolizador (ELZ) se realiza a través de un convertidor reductor (Buck) interleaved de tres canales. De forma análoga se realiza la conversión desde las celdas de combustible (FC), esto mediante un convertidor elevador (Boost) interleaved de tres canales.

Para el desarrollo de este sistema, es necesario dimensionar el sistema mediante la definición de ciertos parámetros. La tabla 3.1 muestra aquellos valores necesarios para el modelamiento.

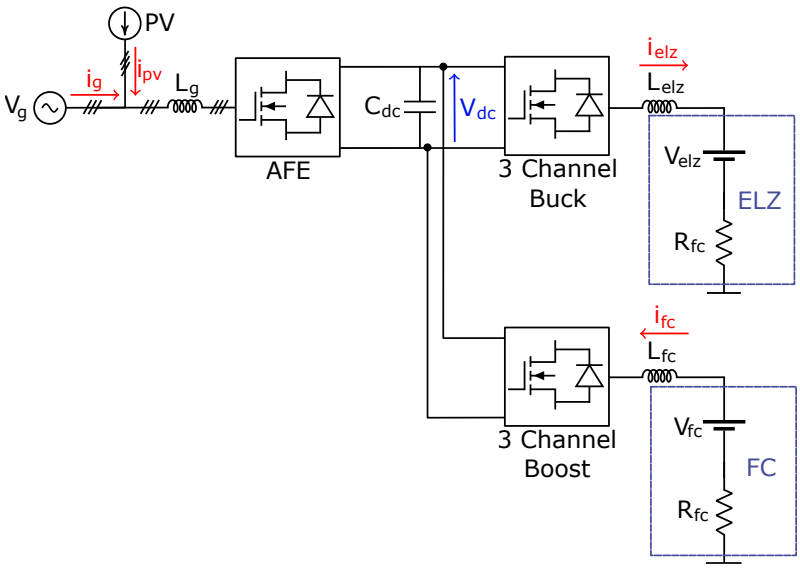


Figura 3.1: Modelo general H_2ESS propuesto.

Tabla 3.1: Parámetros de diseño del sistema

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Voltaje de la red	$V_{g,LL}$	380 $[V_{LL,RMS}]$
Frecuencia de la red	f_g	50 [Hz]
Voltaje del DC-link	V_{dc}	800 [V]
Potencia del sistema	P_{out}	10 [kW]
Factor de potencia etapa AC/DC	fp	0.98
Capacitancia DC link	C_{dc}	4.2 [mH]
Ripple de corriente bus DC	k	15 %
Variación de voltaje bus DC	ΔV_{dc}	5 %
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	10 [kHz]
Voltaje ELZ	V_{elz}	250 [V]
Voltaje FC	V_{fc}	350 [V]
Eficiencia del electrolizador	η_{elz}	75 %
Eficiencia de la celda de combustible	η_{fc}	50 %
Ripple de corriente ELZ	k_{elz}	10 %
Ripple de corriente FC	k_{fc}	5 %
Inductancia de la red	L_g	3 [mH]
Inductancia de ELZ	L_{elz}	3 [mH]
Inductancia de FC	L_{fc}	3 [mH]
Inductancia de PV	L_{pv}	3 [mH]

3.2. Conversión AC/DC

Como es mencionado anteriormente, la conversión AC/DC se hace mediante un convertidor AFE, mostrado en la figura 3.2. Éste es capaz de actuar como rectificador e inversor, dependiendo del flujo de la potencia. Su modelo matemático se deriva a partir de transformaciones de coordenadas y las leyes fundamentales de la electrónica.

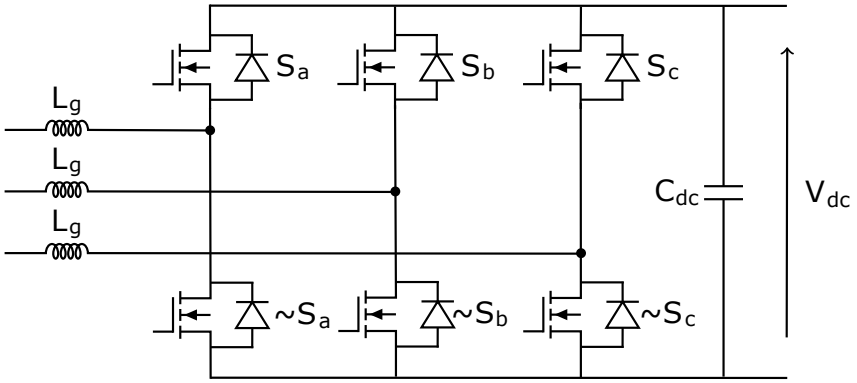


Figura 3.2: Convertidor AFE para sistema H_2ESS

3.2.1. Modelado del convertidor AFE

Las transformaciones de coordenadas permiten operar con cantidades continuas en el marco de referencia síncrono rotatorio (dq). Así, se definen los vectores de variables que componen un sistema trifásico:

$$x_{abc} = \begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \end{bmatrix}^T$$
$$x_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_\alpha & x_\beta \end{bmatrix}^T$$
$$x_{dq} = \begin{bmatrix} x_d & x_q \end{bmatrix}^T$$

Las variables eléctricas de la configuración trifásica se llevan a un sistema de referencia ortogonal estacionario $\alpha\beta$, preservando la información del sistema original. Esto se realiza mediante la Transformada de Clarke, que se define como sigue:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$$

$$x_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta} x_{abc}$$

Con el fin de simplificar el análisis AC del sistema se realiza transformación lineal que convierte las variables eléctricas $\alpha\beta$ a un sistema de referencia rotante síncrono dq, así las

variables sinusoidales en régimen permanente se transforman en componentes constantes. Esto conforma la Transformada de Park, que se define como sigue:

$$T_{dq} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_g) & \sin(\theta_g) \\ -sin(\theta_g) & cos(\theta_g) \end{pmatrix}$$

donde θ_g es el ángulo del vector de voltaje v_g y se cumple que:

$$x_{dq} = T_{dq} x_{\alpha\beta}$$

Se define la relación entre las variables en coordenadas $\alpha\beta$ y las coordenadas rotatorias como sigue:

$$\frac{dx_{\alpha\beta}}{dt} = T_{dq}^{-1}\frac{dx_{dq}}{dt} + \frac{dT_{dq}^{-1}}{dt}x^{dq} = T_{dq}^{-1}(\omega_g J x_{dq} + \frac{dx_{dq}}{dt}) \tag{3.1}$$

donde ω_g es la frecuencia de la red y J es la matriz de rotación:

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

A partir de lo anterior y basado en Ley de Voltaje de Krichhoff (LVK), se modela matemáticamente el lado AC del AFE.

Se resuelven las ecuaciones de voltaje del sistema para el lado AC, llegando a la expresión:

$$0 = v_{gabc} - L_g\frac{di_{gabc}}{dt} - R_g i_{gabc} - v_{abc} - v_{Nn} \tag{3.2}$$

en donde v_{gabc} corresponde al voltaje trifásico, L_g a la inductancia de línea, R_g la resistencia de la línea -que para este caso se evalúa como cero-, v_{abc} es el voltaje del convertidor y V_{Nn} el voltaje de la barra negativa del convertidor al neutro de la red.

Asumiendo que el sistema está balanceado, es posible definir v_{Nn} como:

$$v_{Nn} = -\frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \tag{3.3}$$

Al evaluar el resultado de (3.3) a la ecuación (3.2) y utilizar la Transformada de Clarke, resulta:

$$0 = v_{g\alpha\beta} - L_g\frac{di_{g\alpha\beta}}{dt} - R_g i_{g\alpha\beta} - v_{\alpha\beta} \tag{3.4}$$

Seguido de expresar el sistema en coordenadas $\alpha\beta$, se aplica la Transformada de Park, resultando:

$$0 = v_{gdq} - L_g\frac{di_{gdq}}{dt} - L_g\omega_g J i_{gdq} - R_g i_{gdq} - v_{dq} \tag{3.5}$$

La ecuación (3.5) se puede reescribir como sigue:

$$L_g\frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - v_{dq} + v_{gdq} - L_g\omega_g J i_{gdq} \tag{3.6}$$

$$L_g\frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - v_{dq} + ff_{dq} \tag{3.7}$$

donde los términos de prealimentación ff_{dq} son:

$$ff_d = v_{gd} + L_g\omega_g i_{gq} \tag{3.8}$$

$$ff_q = v_{gq} - L_g\omega_g i_{gd} \tag{3.9}$$

Así, asumiendo que ff_{dq} es igual a cero y que R_g es cercano al mismo valor, es posible expresar la función de transferencia que describe al AFE según:

$$H_{i_{gdq}}(s) \approx \frac{I_{gdq}(s)}{V_{dq}(s)} = -\frac{1}{L_g s + R_g} \approx -\frac{1}{L_g s} \tag{3.10}$$

Además, es necesario modelar el lado DC del AFE. Siendo S el estado de conmutación del convertidor, es posible representar la corriente del lado DC según:

$$S_{dq}^T i_{gdq} = i_{dc} + C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} \tag{3.11}$$

Luego, asumiendo que $v_{gq} = 0$, las potencias activa y reactiva se definen como sigue:

$$p(t) = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) \approx \frac{3}{2}v_{gd}i_{gd} \tag{3.12}$$

$$q(t) = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gq} - v_{gq}i_{gd}) \approx \frac{3}{2}v_{gd}i_{gq} \tag{3.13}$$

donde el factor de potencia instantáneo se relaciona con las corrientes:

$$\phi(t) \approx arctan(i_{gq}/i_{gd}) \tag{3.14}$$

Al relacionar, entonces, el lado AC con el lado DC, resulta la siguiente igualdad:

$$P_{ac} \approx P_c + P_{dc} \tag{3.15}$$

$$\frac{3}{2}v_{gd}i_{gd} \approx \frac{1}{2}C_{dc}\frac{dv_{dc}^2}{dt} + P_{dc} \tag{3.16}$$

Con lo anterior, se forma la función de transferencia que describe el comportamiento del voltaje en el DC link como sigue:

$$H_{dc}(s) \approx \frac{V_{dc}^2(s)}{I_{gd}(s)} = \frac{3V_{gd}}{C_{dc}s} \tag{3.17}$$

3.2.2. Control del AFE mediante VOC

A partir de las funciones de transferencia definidas en la sección anterior, es posible sintonizar los controladores PI que conforman el VOC. Este tipo de control lineal es descrito en la figura 3.3. Mediante este método, es posible controlar la potencia activa y reactiva de forma independiente, mediante las corrientes i_{gd} e i_{gq} y las tensión del enlace DC mediante un lazo externo.

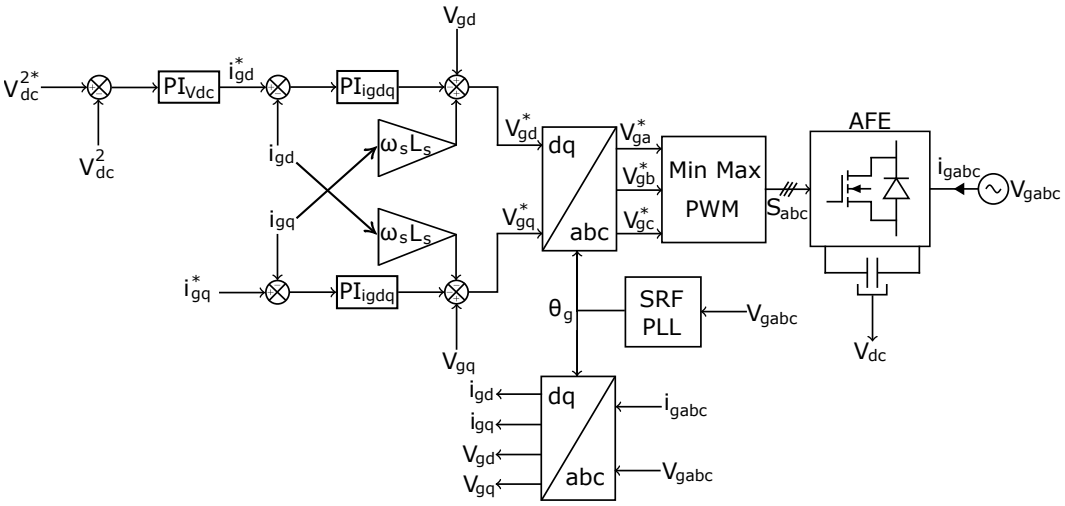


Figura 3.3: Diagrama de bloques de VOC.

El VOC utiliza un lazo externo de voltaje, controlado por un PI, y luego un lazo interno de corriente, el cual utiliza dos controladores PI independientes para cada coordenada de ésta.

Los tres controladores PI tiene como función de transferencia:

$$PI = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{3.18}$$

donde K_p es la constante de proporción al error de control, y K_i es la constante de proporción a la integral del error.

El primer PI, que regula el voltaje DC, será definido como PI_{vdc}. Éste genera una referencia de corriente en el eje d, orientada con la tensión de la red y, por lo tanto, proporcional a la potencia activa. Esto se expresa como:

$$i^*_{gd} = PI_{vdc}(s)(v^{2*}_{dc} - v^2_{dc}) \tag{3.19}$$

Por su lado, la corriente en cuadratura con la tensión de la red, i.e., el eje q, es proporcional a la potencia reactiva. Se establece igual a cero ($i^*_{gq} = 0$). Esto permite un factor de potencia de uno. Así, los controladores de corrientes, definidos como $PI_{i_{gdq}}$ -que ocupan el mismo valor en ambos casos-, utiliza i^*_{gdq} e i_{gdq} para calcular el voltaje de referencia v^*_{dq} del convertidor, compensando los términos de acoplamiento ff_{dq}.

3.3. Conversión DC/DC reductora

La conversión de potencia hacia ELZ se realiza por medio del convertidor mostrado en la figura 3.4. Esta topología es un convertidor buck de tres canales. La suma de las tres

corrientes hacía la entrada del ELZ se expresa como:

$$i_{elz} = i_1 + i_2 + i_3 \tag{3.20}$$

de esta forma, se puede gestionar un tercio de la potencia por cada una de ellas.

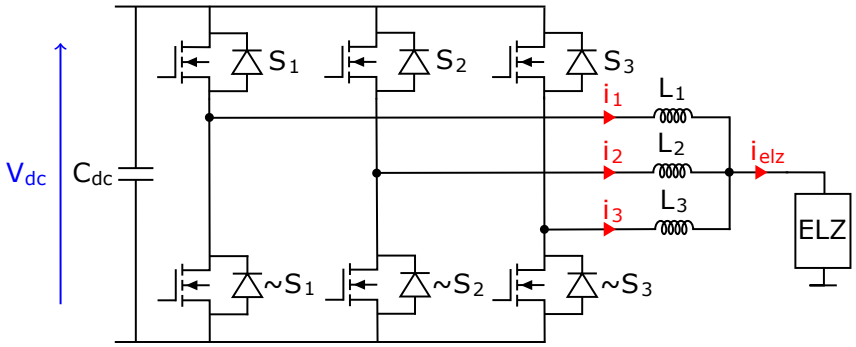


Figura 3.4: Convertidor Buck de tres canales para sistema H_2ESS

3.3.1. Modelado del convertidor Buck

Para el modelado matemático de un convertidor Buck, se considera la resistencia en serie del inductor R_{elz}. V_{dc} es el voltaje de entrada - que es el voltaje del DC link -, V_{elz} es el voltaje de salida, i_n es la corriente del inductor (con $n \in \{1, 2, 3\}$), y d_{elz} es el ciclo de trabajo.

Es necesario estudiar los modos de operación del inductor según el estado en que se encuentren los switches (cerrado y abierto). Se definen los estados del switch S y se plantean las ecuaciones que describen al inductor

- **Estado 1 (S cerrado, tiempo $d_{elz}T$):**

$$L_{elz}\frac{di_n}{dt} = V_{dc} - V_{elz} - R_{elz}i_n \tag{3.21}$$

- **Estado 2 (S abierto, tiempo $(1 - d_{elz})T$):**

$$L_{elz}\frac{di_n}{dt} = -V_{elz} - R_{elz} \tag{3.22}$$

Las ecuaciones 3.21 y 3.22 pueden ser representadas mediante la igualdad:

$$L_{elz}\frac{di_n}{dt} = d_{elz}V_{dc} - V_{elz} - R_{elz}i_n \tag{3.23}$$

Se le aplica una perturbación de pequeña señal sobre el punto de operación de estado estacionario. Esto, al linealizarlo queda expresado según:

$$L_{elz}\hat{i}_n(s) = \hat{d}(s)v_{dc} + D\hat{v}_{dc} - \hat{v}_{elz}(s) - R_{elz}\hat{i}_n(s) \tag{3.24}$$

Considerando que se controla el sistema mediante un controlador de corriente,este lazo es mucho más rápido que el lazo de voltaje. Así, se puede reescribir 3.24 según:

$$L_{elz}s\hat{i}_m(s) \approx \hat{d}(s)V_{dc} - R_{elz}\hat{i}_n(s) \tag{3.25}$$

A partir de 3.25, es posible representar al convertidor Buck según la función de transferencia:

$$G_{elz}(s) = \frac{\hat{i}_n(s)}{\hat{d_{elz}}(s)} = \frac{V_{dc}}{L_{elz}s + R_{elz}} \tag{3.26}$$

3.3.2. Control de corriente para convertidor Buck

La planta descrita por (3.26) es utilizada para sintonizar el controlador de corriente asociado al ELZ. Éste será un PI genérico, es decir, de la forma descrita en (3.18). La figura 3.5 presenta el diagrama de bloques a ser implementado para el control del convertidor Buck de tres niveles.

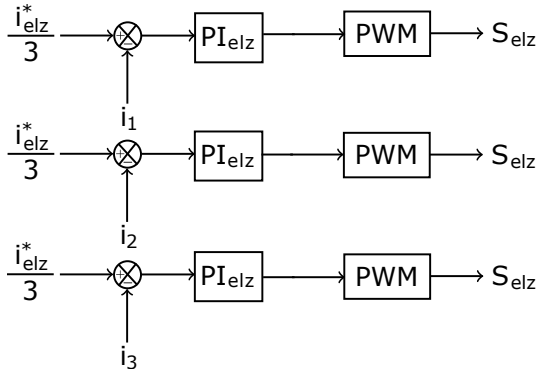


Figura 3.5: Diagrama de bloques control de corriente para ELZ.

3.4. Conversión DC/DC elevadora

De forma análoga a la sección anterior, la conversión de potencia proveniente de FC se realiza mediante un convertidor boost de tres canales, como muestra la figura 3.6. Éste será controlado como tres convertidores Boost independientes en configuración interleaved. De esta forma, al igual que en la etapa reductora, cada línea gestiona un tercio de la corriente. Esto se traduce en un menor estrés en los semiconductores.

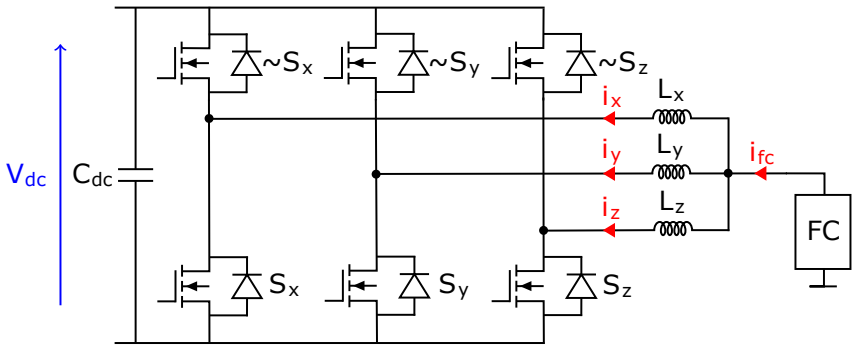


Figura 3.6: Convertidor Boost de tres canales para sistema H_2ESS.

3.4.1. Modelado del convertidor Boost

El convertidor Boost eleva un voltaje de entrada V_{fc} a un voltaje de salida V_{dc} y se modela mediante el promedio de sus estados de conmutación. Las variables de estado son la corriente del inductor i_m (con $m \in \{x, y, z\}$).

Se considera la resistencia en serie del inductor como R_{fc} y el ciclo de trabajo promedio como d_{fc}. De esta forma se puede expresar, en base a LVK:

$$L\frac{di_m}{dt} = d_{fc}(V_{fc} - R_{fc}i_m) + (1 - d_{fc})(V_{fc} - V_{dc} - R_{fc}i_m) \tag{3.27}$$

$$L\frac{di_m}{dt} = d_{fc}V_{fc} - d_{fc}R_m i_m + V_{fc} - V_{dc} - R_{fc}i_m - d_{fc}V_{dc} + d_{fc}V_{dc} + d_{fc}R_{fc}i_m \tag{3.28}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L}\left(V_{fc} - (1 - d_{fc})V_{dc} - R_{fc}i_m\right) \tag{3.29}$$

en donde la ecuación (3.29) representa la derivada de la corriente del inductor i_m.

Por su parte, del voltaje V_{dc} se puede obtener, según LCK, de la forma:

$$C_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} = d_{fc}\left(-\frac{V_{dc}}{R_{fc}}\right) + (1 - d_{fc})\left(i_m - \frac{V_{dc}}{R_{fc}}\right) \tag{3.30}$$

$$C_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{d_{fc}V_{dc}}{R_{fc}} + (1 - d_{fc})i_m - \frac{(1 - d_{fc})V_{dc}}{R_{fc}} \tag{3.31}$$

$$C_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} = (1 - d_{fc})i_m - \frac{V_{dc}}{v}(d_{fc} + 1 - d_{fc}) \tag{3.32}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}}\left((1 - d_{fc})i_m - \frac{V_{dc}}{R_{fc}}\right) \tag{3.33}$$

donde la ecuación (3.33) es la derivada del voltaje del DC link, V_{dc}.

Luego, se aplica una perturbación de pequeña señal a las ecuaciones (3.29) y (3.33), en

torno a un punto de operación estacionario. Esto resulta en la expresión:

$$L_{fc}s\hat{i}_m = V_{dc}\hat{d} - R_{fc}\hat{i}_m \tag{3.34}$$

De (3.34), se define entonces la función de transferencia

$$G_{fc}(s) = \frac{\hat{i}_m(s)}{\hat{d_{fc}}(s)} = \frac{V_{dc}}{L_{fc}s + R_{fc}} \tag{3.35}$$

que describe al convetidor Boost. Ésta es utilizada para sintonizar el controlador asociado.

3.4.2. Control de corriente para convertidor Boost

De la misma forma que las secciones anteriores, el convertidor elevador asociado a la celda de combustible se hará mediante tres controladores PI genéricos. Estos serán de la forma expresada en la ecuación (3.18), utilizando la planta de la expresión (3.35). La figura (3.7) muestra el diagrama de bloques a implementar para el control del convertidor.

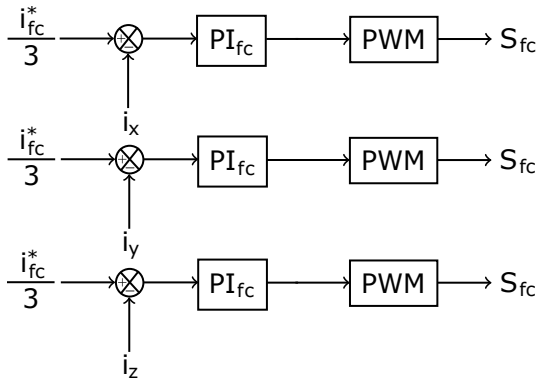


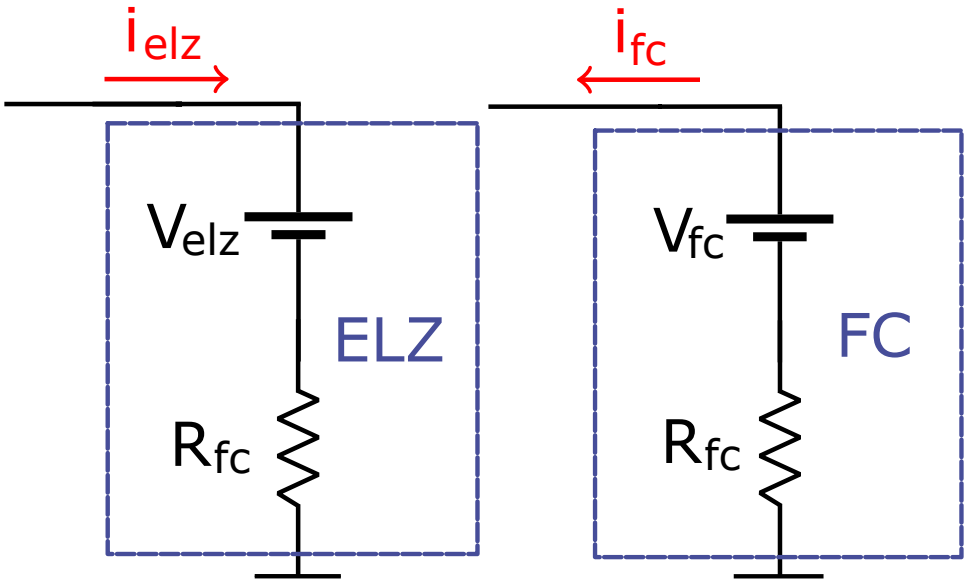
Figura 3.7: Diagrama de bloques control de corriente para FC.

3.5. Modelado de electrolizador y celdas de combustible

El electrolizador (ELZ) a utilizar en este sistema H_2ESS corresponde a aquel con tecnología de electrólisis PEM. Su modelo se conforma por una fuente de voltaje en serie con la resistencia asociada a las pérdidas del mismo [24]. Mediante este modelo, es posible una aproximación cercana a su funcionamiento, además de facilitar su modelamiento. Así, la figura 3.8a representa el modelo a utilizar para este elemento, en donde la fuente de voltaje V_{elz} representa la tensión termodinámica para que ocurra la reacción de electrólisis y la resistencia representa las pérdidas internas del electrolizador [24].

La celda de combustible también es modelada como una fuente de voltaje en serie con su resistencia asociada a las pérdidas de la misma [25]. A su vez, la tecnología de reacción

electroquímica será PEM. Al igual que para ELZ, el modelamiento descrito resulta una aproximación cercana y facilita la implementación. De esta manera, la figura 3.8b muestra el modelo eléctrico de la celda de combustible a implementar en el sistema H_2ESS, donde la fuente de voltaje representa el potencial electromotriz termodinámico de la reacción electroquímica y la resistencia representa las pérdidas internas de la celda de combustible.



(a) Modelo ELZ para sistema H_2ESS. (b) Modelo FC para sistema H_2ESS.

3.6. Algoritmo de manejo de energía (EMS)

Para una gestión eficiente e inteligente de los flujos de potencia, es que se propone un algoritmo de manejo de energía (EMS). Éste se modela en base a la potencia que recibe la red eléctrica desde alguna fuente intermitente de energía, que emula aquellas de fuentes renovables [26].

Dado que algunos de estos sistemas renovables vierten un porcentaje de la potencia que producen, es que el EMS de este trabajo pretende presentar un modelo de manejo de ésta para aprovecharlo [27].

La lógica del algoritmo se basará en que ingresa una potencia, desde una fuente renovable, hacia la red (P_{pv}). Ésta luego es comparada con la una referencia, P^*_{pv}, que corresponde a el porcentaje que ingresa a la red posterior al vertimiento. Luego, dependiendo del total que iba a ser vertida, esto se almacena en tanques de hidrógeno comprimido, mediante el ELZ. En caso de que la potencia P_{pv} se encuentre por debajo de la referencia descrita, es

que la red requiere de una inyección extra de potencia. Ésta, entonces, será suminstrada desde tanques, a través de la FC. Por su parte, cuando la P_{pv} se encuentre en la referencia, el sistema H_2ESS no operará.

Así, la lógica del EMS descrita anteriormente se puede resumir como:

1. **Almacenamiento**: La lógica utilizada para la operación del ELZ está dada por:
$$P_{pv} > P_{pv}^* \Rightarrow i_n^* = \frac{P_{pv}}{V_{elz}} \tag{3.36}$$
2. **Consumo**: La lógica utilizada para la operación de la FC está dada por:
$$P_{pv} < P_{pv}^* \Rightarrow i_m^* = \frac{P_{pv}}{V_{fc}} \tag{3.37}$$
3. **Stand-by**: La lógica utilizada para no operar con ELZ o FC está dada por:
$$P_{pv} = P_{pv}^* \Rightarrow i_n^* \wedge i_m^* = 0 \tag{3.38}$$

3.7. Modelado térmico

El modelado térmico permite establecer una relación crítica entre las pérdidas de potencia y la temperatura de la juntura del semiconductor (T_j), siendo esta última el principal factor que determina la fiabilidad y la vida útil de los dispositivos.

La dinámica de la transferencia de calor se describe mediante ecuaciones de difusión análogas a las de los circuitos eléctricos compuestos por elementos resistivos y capacitivos (redes RC). Esta analogía permite analizar el flujo de calor utilizando herramientas estándar de análisis de circuitos.

Se puede representar una equivalencia para cada una de las cantidades físicas como sigue:

- Temperatura (T) $\longleftrightarrow$ Voltaje (V)
- Flujo de Calor (P_{loss}) $\longleftrightarrow$ Corriente (I)
- Resistencia Térmica (R_{th}) $\longleftrightarrow$ Resistencia Eléctrica (R)
- Capacitancia Térmica (C_{th}) $\longleftrightarrow$ Capacitancia Eléctrica (C)

Por su parte, las pérdidas de potencia generadas en la unión del semiconductor actúan como una fuente de calor y se modelan como una fuente de corriente ideal que inyecta el calor (P_{loss}) en el nodo de la unión. La temperatura ambiente ($T_{ambient}$) se representa como una fuente de voltaje constante que establece el potencial térmico final [28].

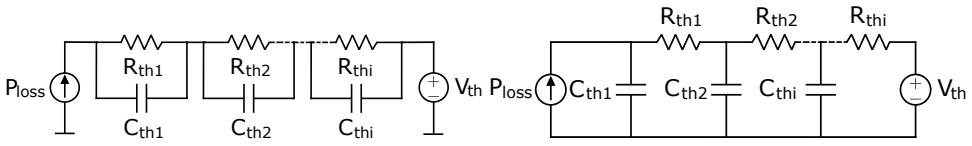
La impedancia térmica transitoria (Z_{th}) representa la oposición al flujo de calor desde la unión (T_j) hasta un punto de referencia (e.g., carcasa o disipador) [28]. Se modela mediante cadenas de elementos RC.

1. **Resistencia y Capacitancia Térmica:**

   - La Resistencia Térmica (R_{th}) modela la dificultad con la que el calor atraviesa un material o una capa (ej., el silicio o la soldadura) [28].
   - La Capacitancia Térmica (C_{th}) modela la capacidad de una capa material para almacenar energía térmica (masa térmica) [28].

2. **Estructuras de Redes RC:**

   - **Modelo Foster:** Consiste en una cadena de elementos RC en paralelo. Es una representación matemática conveniente que suma funciones de primer orden. Se utiliza frecuentemente para ajustar datos experimentales de calentamiento debido a su facilidad de cálculo [28].
   - **Modelo Cauer:** Consiste en una cadena de elementos RC en serie. Esta estructura tiene una correlación directa con la física del dispositivo, ya que cada par RC representa una capa material específica del módulo (unión, soldadura, substrato). Es la representación preferida para el análisis de fiabilidad y la optimización del diseño térmico. Los modelos Cauer se pueden derivar de los coeficientes del modelo Foster mediante una transformación matemática [28].



(a) Modelo térmico Foster. (b) Modelo térmico Cauer.

La fuente de calor que alimenta el modelo térmico (P_{loss}) es la suma de las pérdidas de conducción y conmutación. Las pérdidas de conducción (P_{cond}) son las pérdidas óhmicas que ocurren mientras el dispositivo está encendido. Se modelan mediante curvas de tensión-corriente (I-V) que son sensibles a la temperatura [28].

En cuanto a las pérdidas de Conmutación (P_{sw}), son pérdidas instantáneas de energía (E_{sw}) que ocurren durante los transitorios de encendido y apagado [28].

La figura 3.9a presenta el modelo térmico Foster, compuesto de una fuente de corriente que representa P_{loss}, la cadena de elementos RC_{th} en paralelo y la fuente de voltaje V_{th} que equivale a la temperatura ambiente. De forma análoga, la figura 3.9b muestra el modelo térmico Cauer, compuesto de una fuente de corriente que equivale a P_{loss}, la cadena de elementos RC_{th} en serie y la fuente de voltaje V_{th} que representa la temperatura ambiente.

3.7.1. Modelado módulo PV

Para la inyección de potencia, proveniente de energías de fuentes renovables, a la red y el sistema H_2ESS propuesto, se utiliza un módulo fotovoltaico de la figura 3.10. Éste, como indica la figura, se compone de un panel solar, un enlace DC seguido de un convertidor AFE el cual gestiona la potencia inyectada a la red.

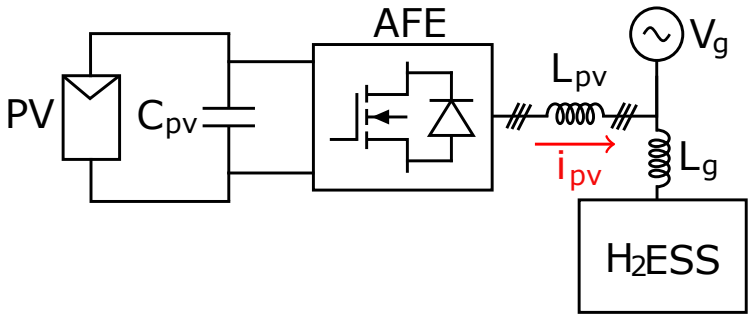


Figura 3.10: Esquema módulo PV.

El convertidor AFE de este módulo es controlado mediante VOC, donde la referencia de voltaje al cuadrado se obtiene a partir de un algoritmo de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT, por suis siglas en inglés). Este algortimo se hace en base al método de perturbar y obserbar (P&O), dado que este es de implementación simple y rentable, en comparación al método de capacitancia incremental. Esta última, si bien cuenta con mayor precisión, su complejidad aumenta y no es tan rentable como el método de P&O [31].

La lógica del MPPT con P&O se describe como:

1. **Inicialización:** El controlador MPPT comienza estableciendo un punto de operación inicial óptimo, normalmente cercano al punto de máxima potencia [31].

2. **Medición de potencia:** La potencia instantánea de salida de los paneles solares se mide o calcula a partir de las mediciones de corriente y voltaje [31].

3. **Perturbación:** El voltaje o la corriente de operación se incrementa o disminuye ligeramente, generalmente mediante un pequeño tamaño de paso fijo (ΔV o ΔI). La dirección de la perturbación depende de la medición de potencia anterior [31].

4. **Comparación de potencia:** La potencia se mide nuevamente en el punto de operación perturbado y el nuevo valor de potencia se compara con el valor de potencia previo [31].

5. **Toma de decisiones:** Si la nueva potencia es mayor que la potencia anterior, la perturbación se realizó en la dirección correcta, lo que indica que el algoritmo MPPT

se está acercando al punto de máxima potencia. En este caso, el MPPT continúa perturbando en la misma dirección [31].

6. **Si la nueva potencia es menor que la potencia anterior:** La perturbación ha sobrepasado el punto de máxima potencia. El MPPT invierte la dirección de la perturbación y continúa ajustando el punto de operación en la dirección opuesta [31].

7. **Iteración:** Los pasos 3 al 5 se repiten de forma iterativa para seguir continuamente el punto de máxima potencia. El proceso de perturbación continúa hasta que el MPPT converge al punto de máxima potencia [31].

La figura 3.11 muestra el diagrama de flujo que utiliza el método de P&O para su implementación para un MPPT.

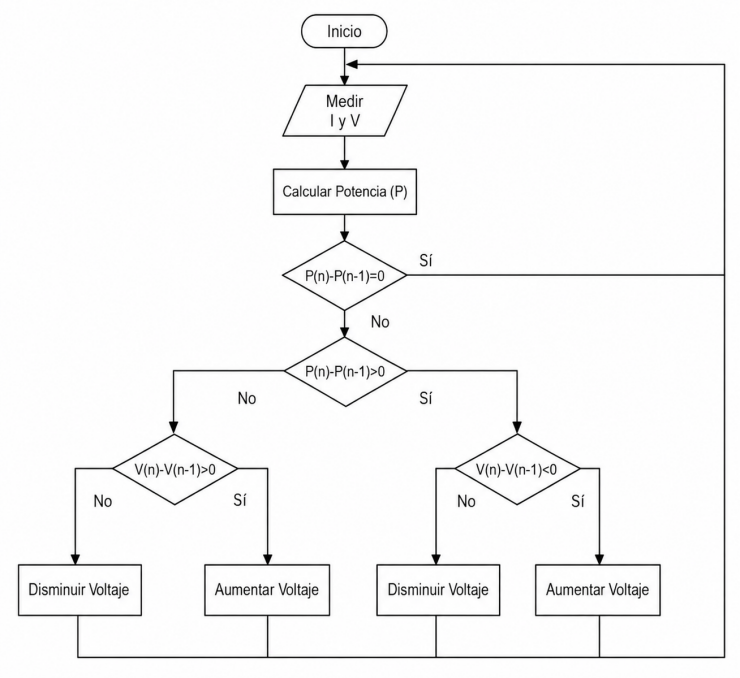


Figura 3.11: Diagrama de flujo P&O [31].

3.8. Resumen del capítulo

El sistema H2ESS propuesto se modela como una estructura conectada a red compuesta por un convertidor AC/DC de frente activo (AFE), un bus DC común y dos convertidores DC/DC que interfazan con el electrolizador (ELZ) y la celda de combustible (FC), respectivamente. El convertidor asociado al ELZ opera como reductor tipo Buck, mientras que el de la FC opera como elevador tipo Boost, utilizándose topologías de tres niveles para unificar

el hardware y facilitar la gestión de potencia.

Se desarrollan modelos matemáticos para cada etapa de conversión, empleando transformaciones de coordenadas para el modelado del AFE en marcos de referencia síncronos, lo que permite aplicar estrategias de control lineal orientadas a regular corrientes y tensiones del sistema. Asimismo, se modelan eléctricamente el electrolizador y la celda de combustible mediante representaciones simplificadas que capturan su comportamiento dinámico principal y permiten su integración en simulaciones de sistema. Además, se define el método a utilizar para el seguimiento del punto de máxima potencia del módulo fotovoltaico.

El dimensionamiento del sistema se realiza a partir de parámetros eléctricos y de potencia nominal, definidos para asegurar una operación estable del bus DC, niveles de rizado acotados y compatibilidad entre las distintas etapas de conversión. Finalmente, se incorpora un modelo térmico basado en redes equivalentes que permite estimar pérdidas y comportamiento térmico de los convertidores, integrando así tanto el desempeño eléctrico como el térmico en el análisis del sistema.

Capítulo 4

SIMULACIÓN DEL SISTEMA H_2ESS

4.1. Implementación del modelo en PLECS

LA IMPLEMENTACIÓN del modelo propuesto en el capítulo 3 se realiza mediante el software PLECS. El modelo queda dispuesto de la forma que indica la figura 4.1. Luego de implementar el modelo del sistema, son evaluados los parámetros definidos en la tabla 3.1 según corresponda.

Seguido de lo anterior, se definen los valores de los controladores PI utilizados tanto para el VOC del AFE del sistema H_2ESS, el VOC para el módulo PV y para los controladores de corrientes de los convertidores Buck y Boost. Estos son sintonizados mediante la herramienta *rltool* de Matlab, una vez definidas las funciones de transferencia.

1. **VOC para AFE de H_2ESS:** Los controladores asociados al VOC del AFE del sistema H_2ESS corresponden a tres PI genéricos. El primero guarda relación con el voltaje del DC link, cuya planta, al evaluar los parámetros correspondientes en la ecuación (3.17), resulta:

$$H_{dc} = \frac{3 \cdot 310}{4{,}2e - 3 \cdot s} \tag{4.1}$$

Con esto, al sintonizar el controlador PI asociado a la expresión (4.1) mediante *rltool*:

$$PI_{vdc} = 0{,}01 + \frac{1{,}3649443}{s} \tag{4.2}$$

Por su parte, la planta que corresponde a la corriente activa y reactiva del AFE resulta de evaluar los parámetros correspondientes en la expresión (3.10). Así, esto

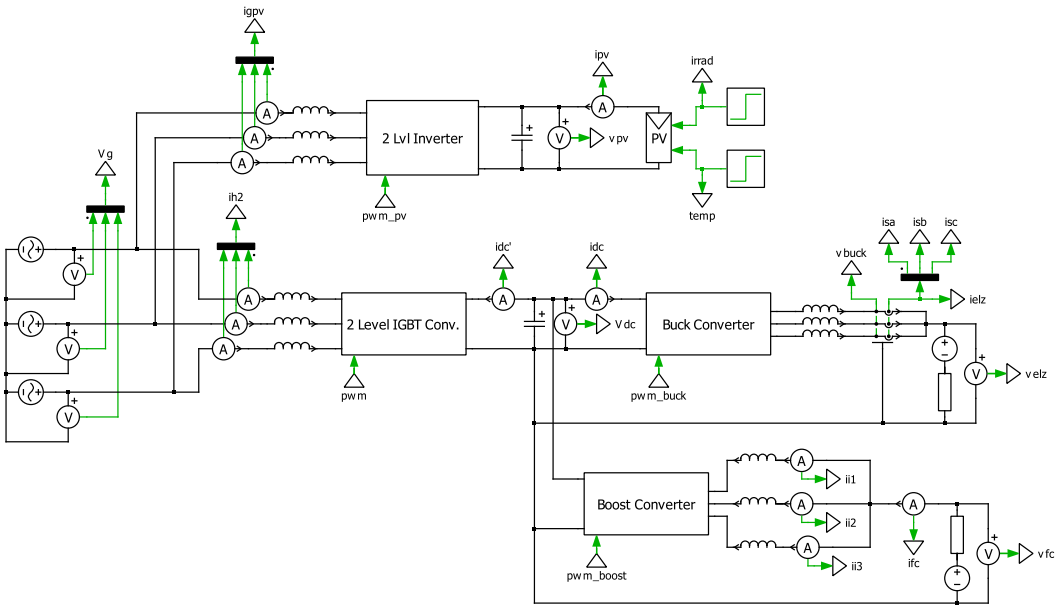


Figura 4.1: Implementación sistema H_2ESS en PLECS.

queda expresado como

$$H_{igdq} = \frac{1}{3e-3\cdot s} \tag{4.3}$$

Luego, al ingresar la planta expresada en (4.3) a la herramineta de Matlab mencionada, los controladores PI_{igdq} resultan:

$$PI_{igdq} = 20 + \frac{1000}{s} \tag{4.4}$$

Esto queda implementado en PLECS según la figura 4.2.

2. **Control de corriente ELZ:** Para sintonizar el controlador de corriente de ELZ es necesario expresar la función de transferencia de éste. Al evaluar los parámetros en la expresión (3.26) resulta:

$$G_{elz} = \frac{800}{3e-3\cdot s+1{,}56} \tag{4.5}$$

Así, el controlador PI de corriente queda:

$$PI_{elz} = 0{,}23381 + \frac{175{,}84472}{s} \tag{4.6}$$

Esto queda implementado en PLECS según la figura 4.8.

3. **Control de corriente FC:** De forma análoga al controlador anterior, al evaluar los parámetros respectivos a la planta de la expresión (3.35):

$$G_{fc} = \frac{800}{3e-3 \cdot s + 0{,}56} \tag{4.7}$$

Resulta entonces, al utilizar la herramienta *rltool* el controlador

$$PI_{fc} = 0{,}23998 + \frac{45{,}92242}{s} \tag{4.8}$$

Esto queda implementado en PLECS según la figura 4.9

4. **VOC para módulo PV:** El controlador de voltaje del enlace DC C_{pv} está dado por:

$$PI_{Vpv} = 0{,}001 + \frac{0{,}1}{s} \tag{4.9}$$

Por su parte, los controladores de corriente del lazo interno del VOC se componen como:

$$PI_{ipv} = 10 + \frac{2000}{s} \tag{4.10}$$

Ambas expresiones, (4.9) y (4.10), son obtenidas mediante la herramienta *rltool* de MATLAB. Esto queda implementado en PLECS según la figura 4.6

Por su parte, el algoritmo EMS es implementado mediante el bloque *C-Script* que proporciona PLECS. En éste es dispuesto un código en lenguaje C para programar el algoritmo mencionado, el cual pretende una gestión inteligente y eficiente de la potencia. La lógica que este comprende está definida en el capítulo 3. En relación a la potencia de referencia con la que el EMS funciona, se define que del total de la potencia que pueden generar las fuentes renovables - lo que corresponde a 10 [kW] - se dispone que el 85 % de éste se dirija a la red. Así, el restante 15 % se utiliza en la producción de hidrógeno. Es importante destacar que, si la porducción renovable está por debajo del 85 % del total, el H_2ESS debe dejar de operar con ELZ y lo haga entonces con FC. Así, el código utilzado para el algoritmo EMS es:

```
1  // ------------------------------------------------------------------
2  // lstlisting: EMS Algorithm
3  // ------------------------------------------------------------------
4
5  // ------------------------------------------------------------------
6  // Code declarations
7  #include <float.h>
8  #include <math.h>
9
10 #define power_ref Input(0)
11 #define velz      Input(1)
12 #define vfc       Input(2)
```

```
13
14 #define buck_ref  Output(0)
15 #define boost_ref Output(1)
16 // ------------------------------------------------------------------------
17
18
19 // ------------------------------------------------------------------------
20 // Start function code
21 buck_ref = 0;
22 boost_ref = 0;
23 // ------------------------------------------------------------------------
24
25
26 // ------------------------------------------------------------------------
27 // Output function code
28
29 /* ================================
30    ALMACENAMIENTO: sobre 8.5 kW
31    ================================ */
32 if (power_ref > 0){
33   buck_ref = power_ref/velz;
34   boost_ref = 0;
35 }
36
37 /* ================================
38    CONSUMO: bajo 8.5 kW
39    ================================ */
40 if (power_ref < 0){
41   buck_ref = 0;
42   boost_ref = fabs(power_ref)/vfc;
43 }
44
45 /* ================================
46    STANDBY: 8.5 kW
47    ================================ */
48 if (power_ref == 0){
49   buck_ref = 0;
50   boost_ref = 0;
51 }
52
53 // ------------------------------------------------------------------------
```

De forma similar al EMS, el algoritmo MPPT con el método de P&O se presenta en el Anexo. Su lógica está definida en el capítulo 3. Su implementación se presenta en la figura 4.6, siendo parte del VOC para el módulo fotovoltaico.

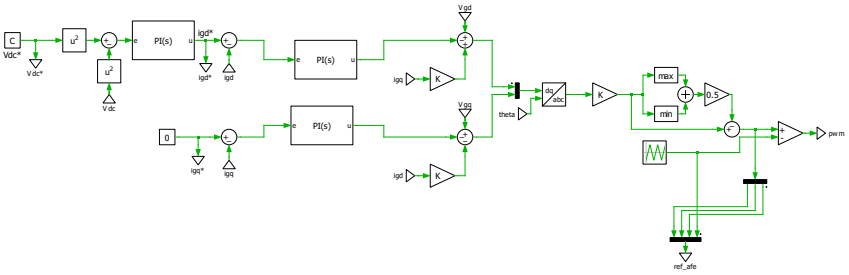


Figura 4.2: Implementación VOC para sistema H_2ESS en PLECS.

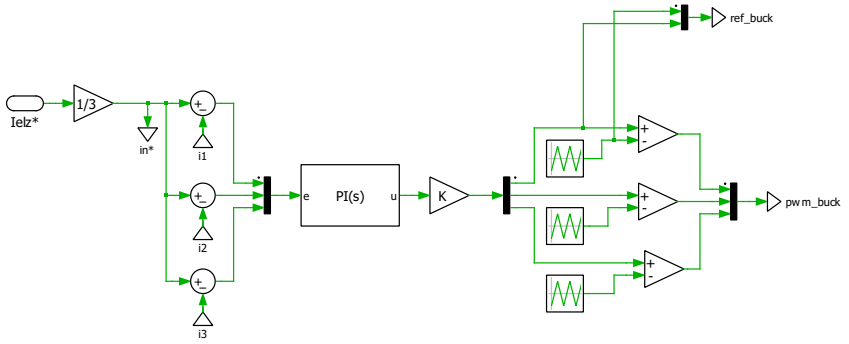


Figura 4.3: Implementación control de corriente para ELZ.

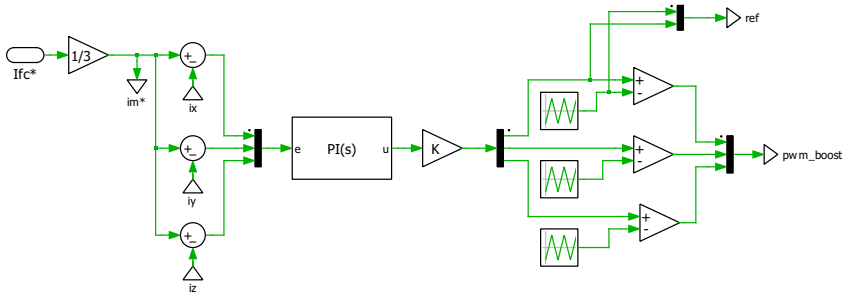


Figura 4.4: Implementación control de corriente para FC.

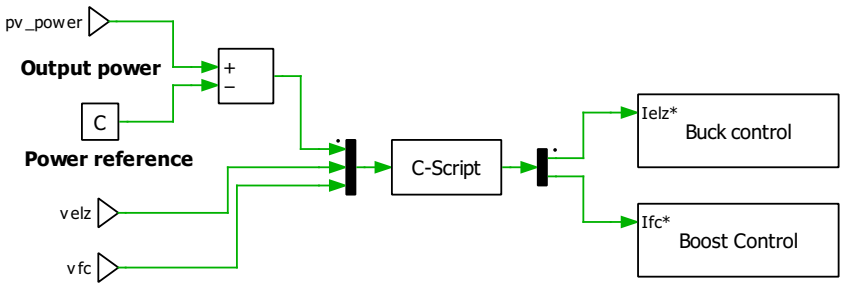


Figura 4.5: Implementación EMS en PLECS.

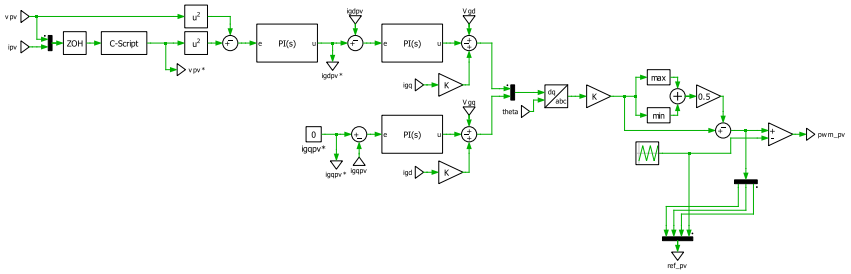


Figura 4.6: Implementación VOC para módulo PV en PLECS.

En cuanto a la implementación del modelado térmico, éste se hace mediante el uso de elementos semiconductores encontrados en Infineon. Se selecciona el diodo IKQ40N120CH3 e IGBT IGW15N120H3. Estos se colocan según la disposición descrita en el capítulo 3. Sobre ellos se coloca un Heat Sink, y de ellos se obtienen las pérdidas por calor mediante la estructura Cauer, para cada diodo e IGBT por separado. Seguido de esto, se presenta la fuente de voltaje que emula la temperatura ambiente. Las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 muestra la implementación de esto en los convertidores AFE, Buck y Boost, todos del sistema H_2ESS respectivamente.

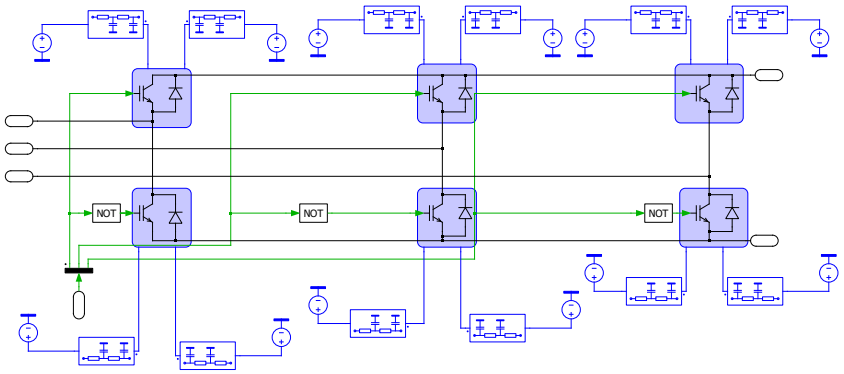


Figura 4.7: Convertidor AFE con modelado térmico en PLECS.

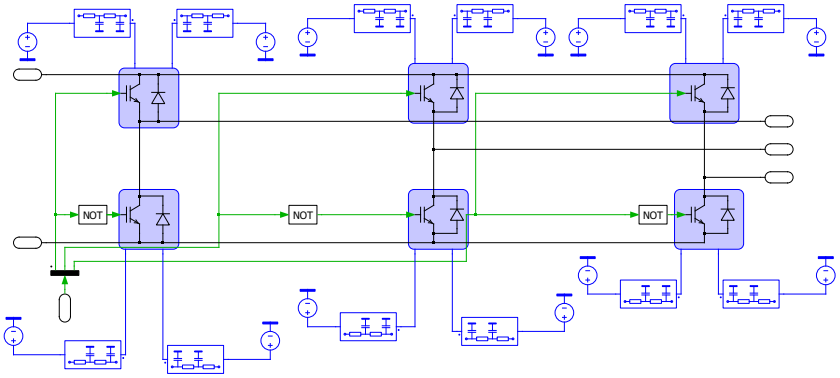


Figura 4.8: Convertidor Buck con modelado térmico en PLECS.

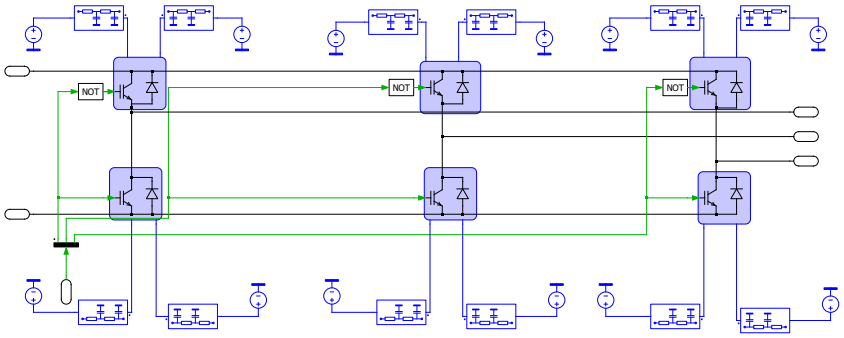


Figura 4.9: Convertidor Boost con modelado térmico en PLECS.

En cuanto a los parámetros utilizados por los semiconductores seleccionados, estos se encuentran en la tabla 4.1. Estos representan sus características físicas en forma de elementos

resistivos y capacitivos que representan cantidades fisicas ya descritas.

Tabla 4.1: Parámetros del modelo térmico de Cauer en PLECS.

Elemento semiconductor	**Valor**
IGBT	$R_{\text{th},1} = 0{,}045671172576079666$ [K/W]
	$R_{\text{th},2} = 0{,}18355007717412783$ [K/W]
	$R_{\text{th},3} = 0{,}2826346336027251$ [K/W]
	$R_{\text{th},4} = 0{,}16695439710485585$ [K/W]
	$R_{\text{th},5} = 0{,}011989219542212198$ [K/W]
	$C_{\text{th},1} = 0{,}0011544441780404768$ [J/K]
	$C_{\text{th},2} = 0{,}0006041522923124328$ [J/K]
	$C_{\text{th},3} = 0{,}01025487336437342$ [J/K]
	$C_{\text{th},4} = 0{,}07430210981347192$ [J/K]
	$C_{\text{th},5} = 13{,}106414989928377$ [J/K]
Diodo	$R_{\text{th},1} = 0{,}11802958426763653$ [K/W]
	$R_{\text{th},2} = 0{,}22371942469947595$ [K/W]
	$R_{\text{th},3} = 0{,}15288873460833471$ [K/W]
	$R_{\text{th},4} = 0{,}004889647974551902$ [K/W]
	$R_{\text{th},5} = 0{,}00486264905599174$ [K/W]
	$C_{\text{th},1} = 0{,}005523748137339255$ [J/K]
	$C_{\text{th},2} = 0{,}007163211581558365$ [J/K]
	$C_{\text{th},3} = 0{,}08554656685768013$ [J/K]
	$C_{\text{th},4} = 82{,}44831804714819$ [J/K]
	$C_{\text{th},5} = 32382{,}161142528148$ [J/K]

4.2. Casos de estudio

Para analizar el comportamiento del sistema propuesto, se proponen tres casos de estudio. Éstos pretenden abracar una variedad de casos en el que puede aplicarse el sistema H_2ESS.

El primer caso corresponde a la generación de hidrógeno. Mediante éste se estudia el funcionamiento del EMS, es decir, verificar la lógica propuesta en la expresión (3.36). El segundo caso corresponde al consumo de hidrógeno, mediante el cual se pretende verificar la lógica descrita en (3.37). El tercer caso estudia el comportamiento del H_2ESS a través de diversos niveles de potencia que transicionan por sobre y por debajo de la potencia nominal y observar si es posible lograr el fenómeno de suavizado de picos de potencia (peak shaving).

4.2.1. Generación de hidrógeno

Como es explicado con anterioridad, se estudia el caso de generación de hidrógeno. Éste modo de operación se debe presentar cuando la potencia P_{pv} generada por la fuente renovable sea superior a 8.5[kW], produciendo hidrógeno mediante ELZ. Para ello se varía la P_{pv} en valores en el rango [10 - 8.5[[kW]. Esto se logra generando escalones de irradiancia y luego de temperatura según se muestra en la figura 4.10

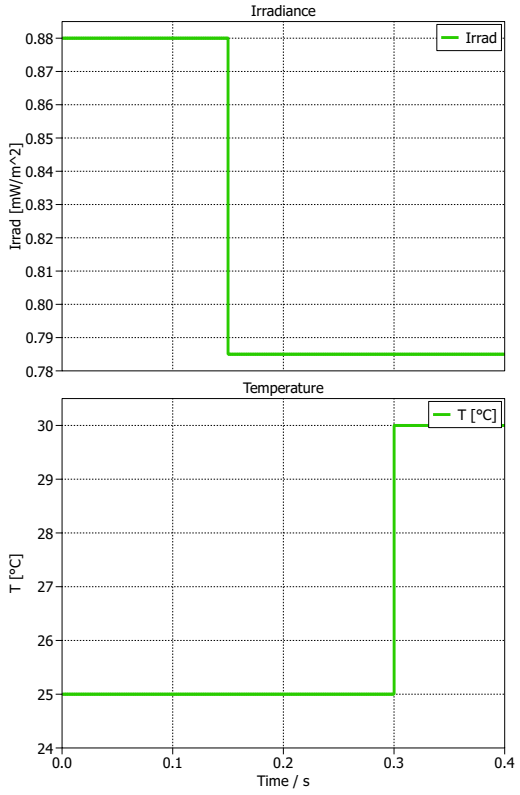


Figura 4.10: Irradiancia y temperatura de PV para caso de estudio 1.

A partir de las variaciones de irradiancia y temperatura, se obtienen los resultados de potencia mostrados en la figura 4.11. Desde ésta se observan tres niveles de potencia que están por sobre la potencia nominal de la red, i.e., 8.5[kW]. Para estas tres instancias la potencia de la red sigue siendo la nominal, mientras que la potencia de ELZ disminuye según va disminuyendo la potencia entregada por PV. Por su parte, la potencia de la celda de combustible se mantiene en cero.

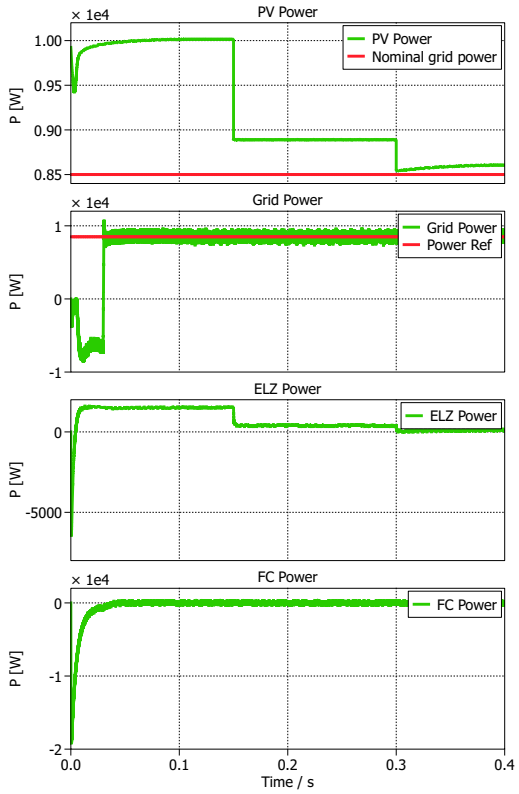
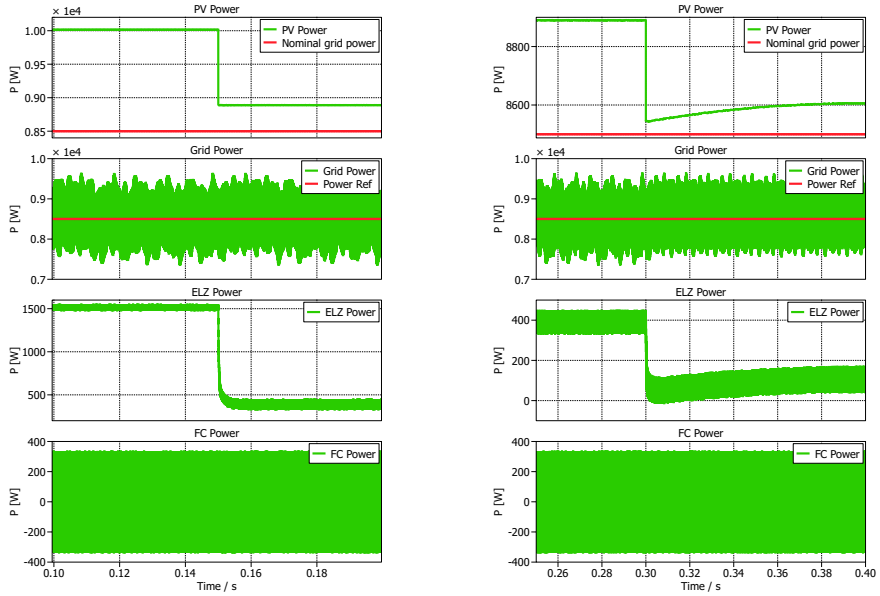


Figura 4.11: Potencias de interés caso de estudio 1.

Un análisis más cercano a cada nivel se hace a continuación. En la figura 4.12a se muestra el primer cambio de nivel de potencia asociado al cambio de irradiancia aplicado a PV. En éste se observa que antes del escalón la potencia entregada por PV es de 10[kW]. La potencia media de la red es de 8.5[kW]. Por su parte la potencia media generada por ELZ es de 1.5[kW] y la potencia media de FC es 0. Luego del escalón de irradiancia, P_{pv} es de 8.9[kW]. La potencia media de P_g se mantiene en 8.5[kW]. La potencia media P_{elz} es de 400[W], lo que es lo esperado, dado que es la potencia restante que no utiliza la red. En relación al valor medio de P_{fc}, éste se mantiene en 0.

La figura 4.12b muestra el análisis previo y posterior al escalón de temperatura aplicado a PV. El momento previo de éste es el mismo analizado con anterioridad, es decir, el momento posterior al escalón de irradiancia analizado en la figura 4.12a. Para el momento posterior al escalón de temperatura, la potencia P_{pv} entregada es de 8.6[kW]. El valor medio

de P_g se mantiene en 8.5[kW]. $\bar{P}_{elz}$ es de 100[W], lo que se condice con la potencia remanente que deja la red, mientras que $\bar{P}_{fc}$ se mantiene en 0.



(a) Potencias de interés para escalón de irradiancia.

(b) Potencias de interés para escalón de temperatura.

Figura 4.12: Caso de estudio 1.

Se analizan también las señales de interés de la red y el voltaje del enlace DC del sistema H_2ESS en la figura 4.13. En ésta se observa que el voltaje DC sigue la referencia de 800[V] en todo momento. En cuanto a las corrientes en coordenadas d1 i_{gd} e i_{gq}, la primera va disminuyendo a medida que disminuye la potencia P_{pv}, mientras que la segunda se mantiene en un valor medio de cero. Las referencias para la generación de pulsos no se ven mayormente perturbadas. En relación al voltaje de la red V_{gabc}, éste se ve escalado por un factor de $\frac{40}{300}$ para su mejor visualización respecto a las corrientes i_{gabc}, las cuales mantienen su forma sinusoidal y practicamente imperturbadas a lo largo del caso de estudio.

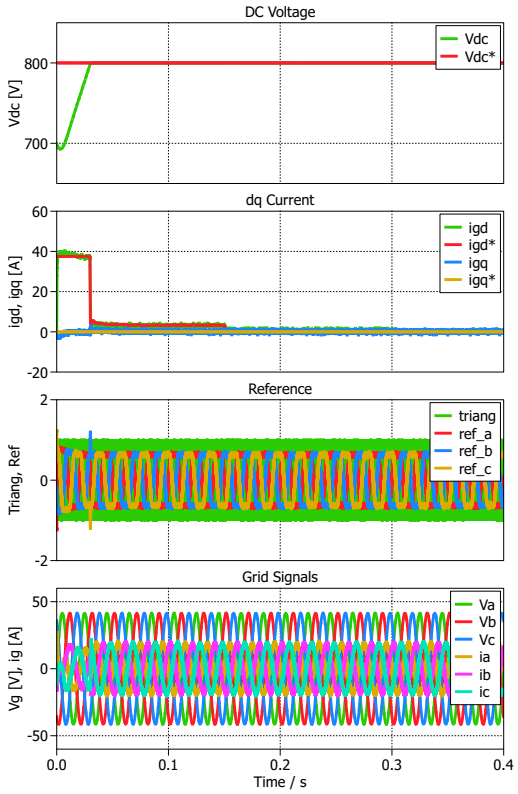
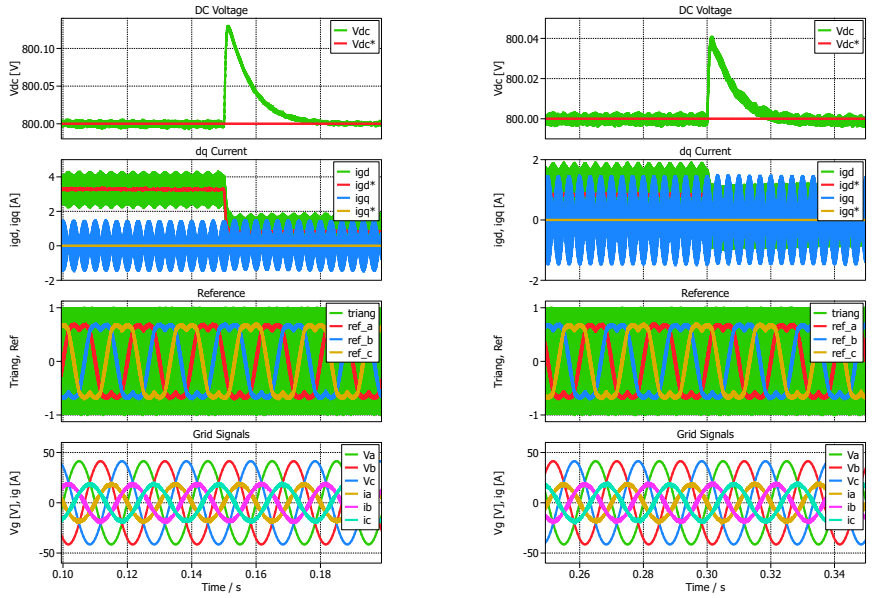


Figura 4.13: Señales de interés de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS caso de estudio 1.

Un análisis más cercano se hace a continuación. La figura 4.14a muestra las señales de la red de interés y el voltaje DC del sistema H_2ESS en los momentos previo y posterior al escalón de irradiancia. Al momento previo, se observa que V_{dc} es de 800[V]. $\bar{i}_{gd}$ tiene un valor de 3.25 [A], siendo igual a su referencia $\bar{i}^*_{gd}$. Algo similar ocurre con $\bar{i}_{gq}$ y su referencia i^*_{gq}, en donde ambos son cero. Por su parte la amplitud de V_{gabc} es de 310[V] y $\hat{i}_{gabc}$ es de 18[A]. Al momento posterior del escalón de irradiancia, V_{dc} es de 800[V], siguiendo su referencia. $\bar{i}_{gd}$ 0.83[A], siendo igual a $\bar{i}^*_{gd}$. Similar ocurre con $\bar{i}_{gq}$, dado que éste es igual a su referencia i^*_{gq}, donde ambos son cero. La corriente de la red i_{gabc} mantiene su amplitud de 18[A] y lo mismo ocurre con el voltaje de la red, manteniendo su amplitud de 210[V]. Es de notar que la referencia para la conmutación se mantiene prácticamente imperturbada en ambos momentos analizados.

Se analiza también el escalón de temperatura. Al igual que el análisis de potencia, se analiza el momento posterior a éste, dado que el momento previo ya fue revisado. La figura 4.14b muestra, entonces, cuando se realiza esta variación de temperatura, en donde el V_{dc} sigue siendo 800[V]. $\bar{i}_{gd}$ tiene un valor de 0.22 siendo igual a su referencia $\bar{i}^*_{gd}$. La corriente en coordenada q $\bar{i}_{gq}$ sigue siendo cero, siguiendo su referencia i^*_{gq}. En cuanto a la referencia para el PWM se mantiene casi imperturbado, similar a la corriente i_{gabc} que mantiene su amplitud y lo mismo ocurre con $\hat{V}_{gabc}$, que es igual a 310[V].

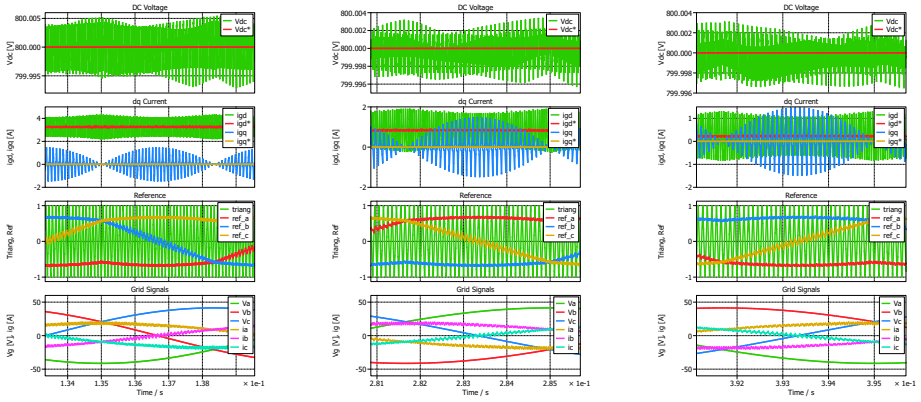


(a) Señales de interés de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS para escalón de irradiancia.

(b) Señales de interés de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS para escalón de temperatura.

Figura 4.14: Caso de estudio 1.

En estado estacionario, la figura 4.15a es el estado estacionario de las condiciones iniciales. La figura 4.15b corresponde al estado estacionario del primer escalón y la figura 4.15c corresponde al del segundo escalón.



(a) Análisis e.e. condiciones iniciales. (b) Análisis e.e. primer escalón. (c) Análisis e.e. segundo escalón.

Figura 4.15: Caso 1.

Se estudia también la corriente, voltaje y referencia de la conmutación para el ELZ en la figura 4.16. En ella se ve que la corriente de cada línea del electrolizador i_n reduce su valor a medida que reduce la potencia P_{pv} dados los escalones de irradiancia y temperatura realizados. Es de notar que la corriente del electrolizador, i_{elz} es la suma de las tres corrientes i_n, por lo que su valor es el triple que la de una línea, la que también va reduciendo a medida que P_{pv} disminuye. Lo análogo ocurre con el voltaje de ELZ, V_{elz}. En cuanto a la referencia para los pulsos, su valor medio reduce su valor medio después de cada escalón.

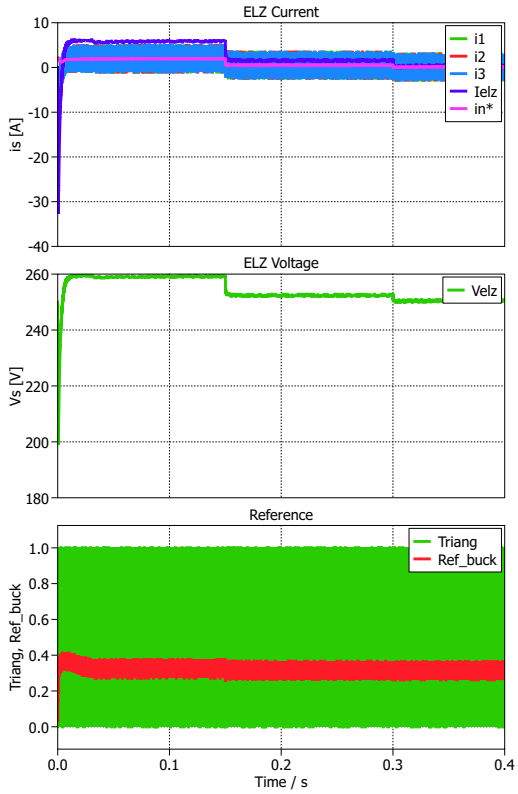
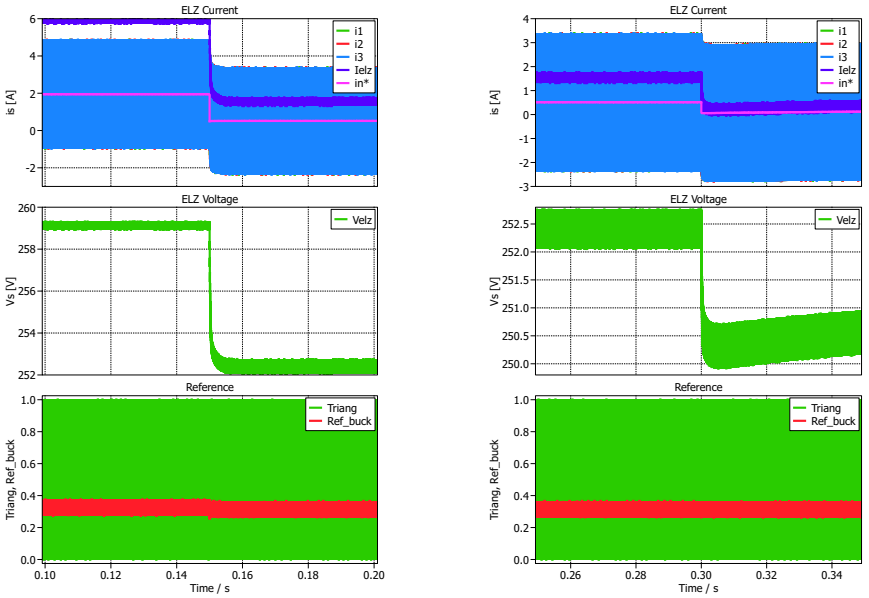


Figura 4.16: Señales de interés para ELZ caso de estudio 1.

Se estudian en cercanía las variaciones de P_{pv}. Para la primeria variación, figura 4.17a, que corresponde al escalón de irradiancia, se tiene que, previo al cambio, $\bar{i}_{elz}$ tiene un valor de 6[A], mientras que los valores de i_n rodean los 2[A]. En relación al votlaje V_{elz} este tiene un valor medion de 260[V]. En cuanto la referencia para la conmutación del convertidor buck, su valor medio se encuentra en 0.320. Al momento posterior a la variación de irradiancia, $\bar{i}_{elz}$ es de 1.5[A], mientras que los valores medios de i_n, sus valores rodean los 0.5[A]. En cuanto al voltaje V_{elz} en esta parte del caso de estudio, este tiene un valor medio de 252[V] y la referencia para la conmutación baja su valor a 0.315.

Para el momento posterior a la variación de temperatura, la figura 4.17b, se tiene que la corriente $\bar{i}_elz$ tiene un valor de 0.42[A] y las corrientes i_n un valor de 0.14[A]. Por su parte, el voltaje V_{elz} baja su valor a 250[V]. La referencia para la conmutación del convertidor buck baja a un valor medio de 0.310.

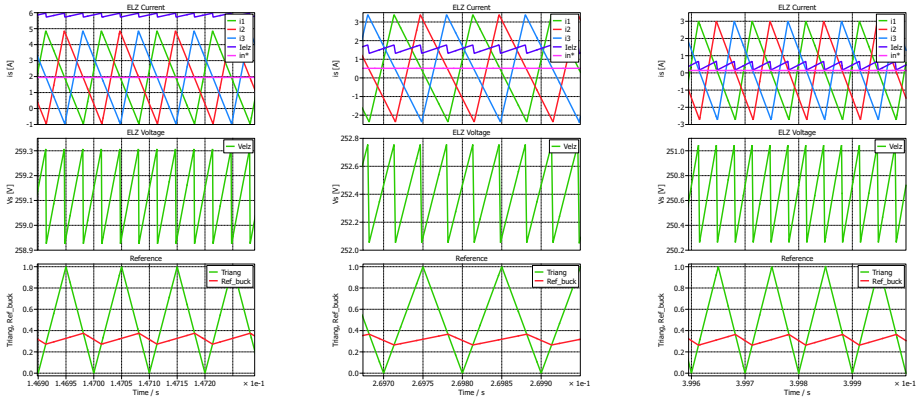


(a) Señales de interés para ELZ en variación de irradiancia.

(b) Señales de interés para ELZ en variación de temperatura.

Figura 4.17: Caso de estudio 1.

En estado estacionario, las señales de ELZ corresponden a la de la figura 4.18a para las condiciones inciales, a la figura 4.18b para el primer escalón y a la figura 4.18b para el segundo escalón.



(a) Análisis ELZ e.e. condiciones iniciales.

(b) Análisis ELZ e.e. primer escalón.

(c) Análisis ELZ e.e. segundo escalón.

Figura 4.18: Caso 1.

Se analiza también las corrientes asociadas a FC, al igual que si voltaje y las referencias para la conmutación del convertidor boost que le corresponde, figura 4.19. En ésta se observa que las corrientes de las tres líneas del convertidor mencionado i_m y, a la vez, la corriente de FC i_{fc} se mantienen en cero a lo largo de todo el caso de estudio. En cuanto al voltaje V_{fc}, una vez alcanzado su estado estacionario, este mantiene su valor fijo en 350[V]. Algo similar ocurre con la referencia para la conmutación de dicho convertidor, donde su referencia se mantiene en un valor fijo e imperturbado a lo largo del caso estudiado.

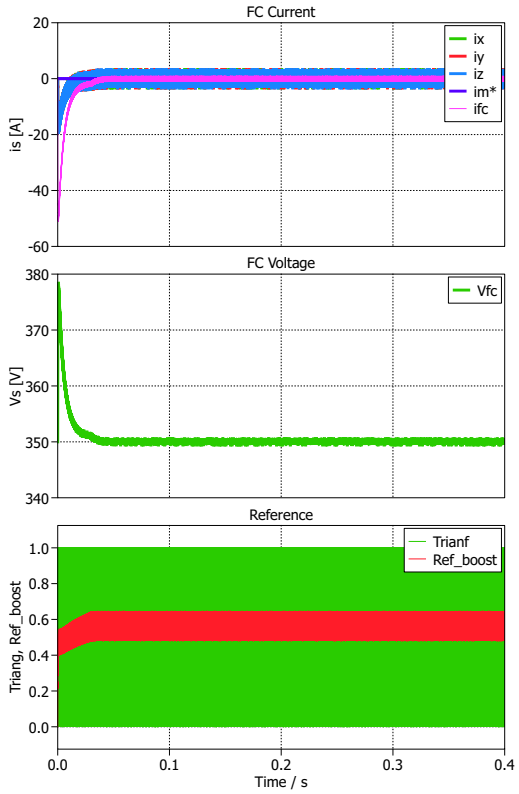


Figura 4.19: Señales de interés FC caso 1.

Se analizan también las pérdidas y eficiencias del convertidor AFE para el sistema H_2ESS y el convertidor buck. Una vez alcanzado el estado estacionario de la primera porción es de 17[W], mientras que la eficiencia es de 98.88 %. Luego de la variación de irradiancia, las pérdidas bajan a 3.4[W] y la eficiencia aumenta a 99.12 %. Para el escalón de temperatura, las pérdidas bajan a 2.9[W] y la eficiencia baja a 97.20 %. Para el análisis del convertidor buck, una vez alcanzado el estado estacionario del primer tramo, las pérdidas son de 12.6[W], mientras que la eficiencia tiene un valor de 99.16 %. Luego del escalón de irradiancia, las pérdidas disminuyen a 10.28[W] y la eficiencia también lo hace a un 97.36 %. Después de la variación de temperatura, se tiene que las pérdidas son de 10.20[W] y la eficiencia es de 90.27 %.

4.2.2. Consumo de hidrógeno

Para este caso de estudio, la potencia P_{pv} generada por la fuente renovable debe ser inferior a 8.5[kW]. De esta forma, FC puede operar inyectando potencia a la red proporcional a la faltante. Para lograr esto, se varía la irradiancia y luego la temperatura de PV según muestra la figura 4.20

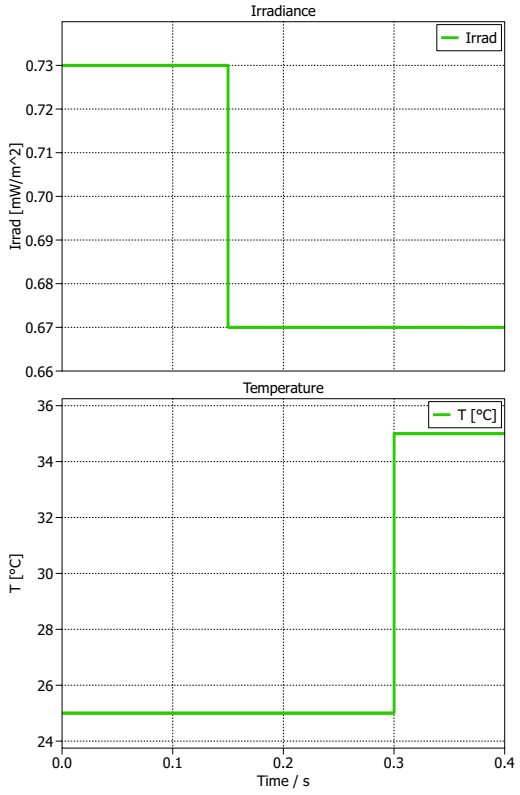


Figura 4.20: Irradiancia y temperatura de PV para caso de estudio 2.

A partir de las variaciones de irradiancia y temperatura, se obtienen los resultados asociados a las potencias de la red, PV, ELZ y FC según se muestra en la figura 4.21. En ella se observa que, a pesar de los escalones aplicados a ambos parámetros mencionados, la potencia de la red no se ve mayormente afectada. Por su parte la potencia de ELZ se mantiene en cero, lo que se condice con lo diseñado en el EMS, dado que esta componenete no debe de generar hidrógeno. Su contraparte, es decir, FC en cambio si consume hirdógeno, inyectando potencia a la red.

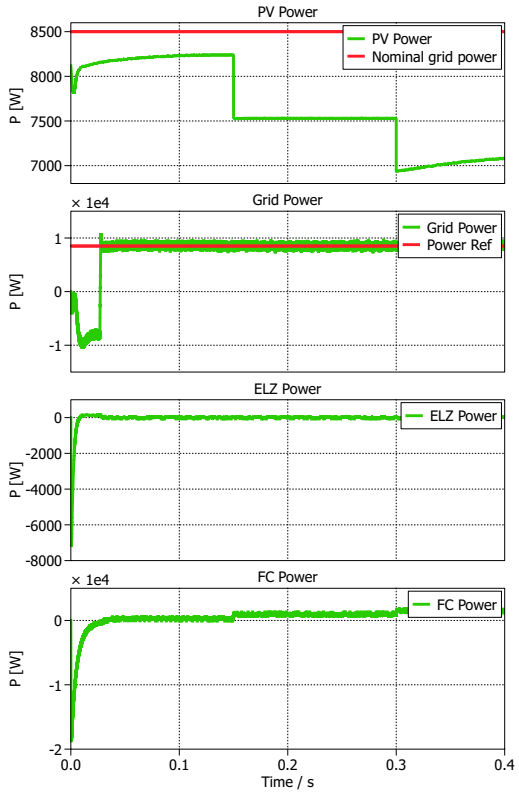
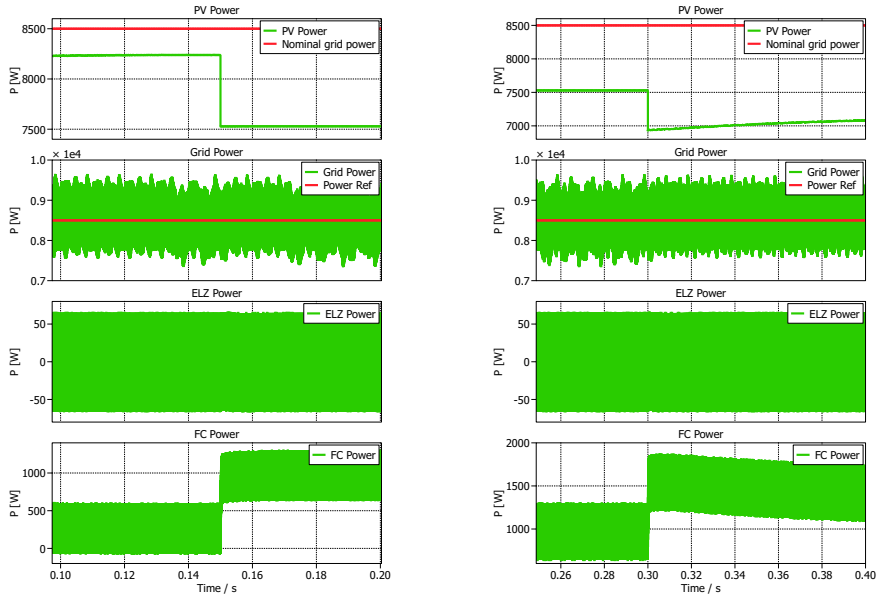


Figura 4.21: Potencias de interes caso de estudio 2.

Se analizan las potencias mencionadas de forma más cercana. La figura 4.22a muestra la respuesta al primer escalón de irradiancia aplicado a PV. En éste se ve que previo a este, P_{pv} tiene un valor de 8240[W]. El valor medio de la potencia de la red es de $\bar{P}_g$ es 8500[W]. Por su parte $\bar{P}_{elz}$ es de 0 y $\bar{P}_{fc}$ tiene un valor de 260[W]. Tras la aplicación del escalón de irradiancia, la potencia P_{pv} es de 7530[W]. La potencia de la red tiene un valor medio de $\bar{P}_g$ de 8500[W], $\bar{P}_{elz}$ tiene un valor de 0 y $\bar{P}_{fc}$ es de 970[W].

En la figura 4.22b se muestra la respuesta al escalón de temperatura. Una vez aplicado, P_{pv} es de 7080[W]. Para esta potencia, $\bar{P}_g$ tiene un valor de 8500[W], mientras que $\bar{P}_{fc}$ es 0 y $\bar{P}_{fc}$ es 1420[W].



(a) Potencias de interés para escalón de irradiancia.

(b) Potencias de interés para escalón de temperatura.

Figura 4.22: Caso de estudio 2.

Las señales voltaje DC del sistema H_2ESS, V_{dc}; las corrientes de las red en corrdenadas dq, i_d e i_q; las referencias para la conmutación del AFE del sistema H_2ESS; y laos voltajes y corrienes de la red, V_{gabc} e i_{gabc} se muestran en la figura 4.23. En ella se ve que V_{dc} sigue la referencia de 800[V] en todo momento. Lo mismo ocurre coin las corrientes i_{gdq}, las cuales siguen su referencia en todo el caso de estudio. Por su parte, tanto las referencias para la conmutación, V_{gabc} e i_{gbac} permanecen imperturbados a lo largo del caso.

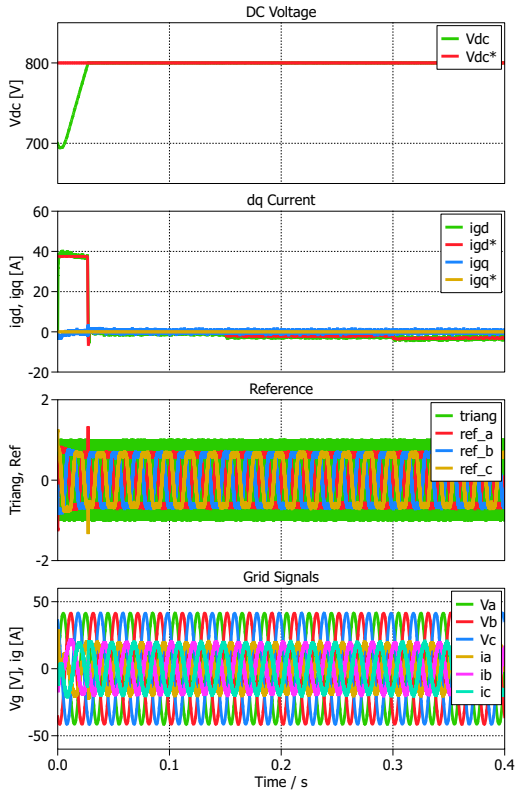
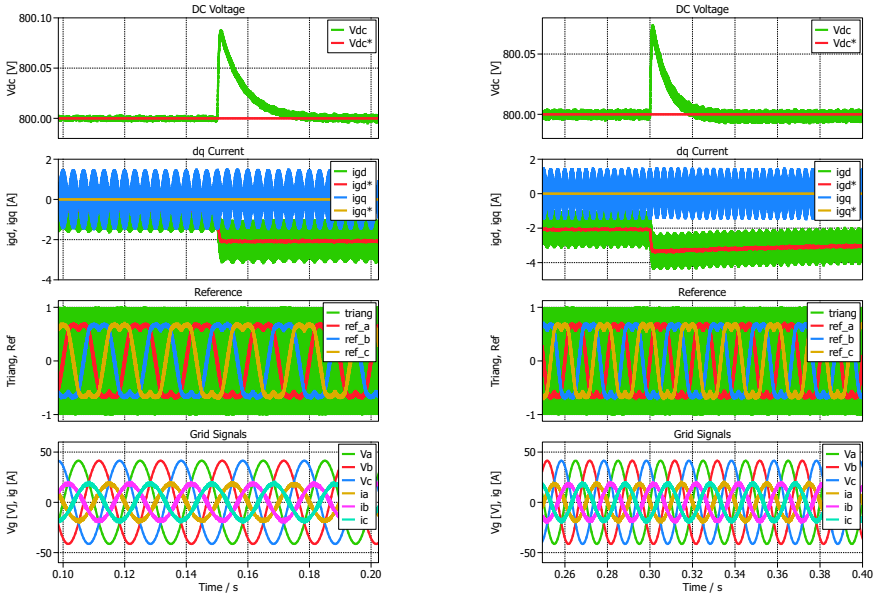


Figura 4.23: V_{dc}, i_{gdq}, referencias de conmutación, V_{gabc} e i_{gabc} caso de estudio 2.

Un acercamiento a la respuesta ante el escalón de irradincia para las señales mencionadas se hace en la figura 4.24a. En ella se observa que antes del escalón, V_{dc} es de 800[V]. $\bar{i}_{gd}$ es de -0.55 [A], siguiendo su referencia i^*_{gd} que también es de -0.55[A]. La corriente $\bar{i}_{gq}$ tiene un valor de 0, lo que sigue la referencia i^*_{gq}, que también es cero. Las referencias se encuentran dentro de la señal triagular y cumplen con la forma del PWM con min-max. Por su parte, $\hat{V}_{gabc}$ es de 310[V] (este valor está escalado en la figura por una factor de $\frac{40}{300}$) e $\hat{i}_{gabc}$ tiene un valor de 18[A]. Posterior al escalón de irradiancia, V_{dc} continua siguiendo la referencia, es decir, mantiene su valor en 800[V]. Las corrientes $\bar{i}_{gd}$ también sigue su referencia, teniendo su valor en -2.10[A]; mientras que $\bar{i}_{gq}$ se mantiene en 0. La referencias para la conmutación sigue imperturbada y las señales $\hat{V}_{gabc}$ e $\hat{i}_{gabc}$ tiene un valor de 310[V] y 18[A] respectivamente, manteniendo sus valores nominales.

La figura 4.24b muestra la respuesta al escalón de temperatura. Posterior a éste, V_{dc} con-

tinúa siendo 800[V]. La corriente $\hat{i}_{gd}$ sigue su referencia y es de -3.05[A], mientras que $\hat{i}_{gq}$ también lo hace, manteniendo su valor en 0. Las referencias siguen estando imperturbadas. Por su parte $\hat{V}_{gabc}$ es 310[V] e $\hat{i}_{gabc}$ es de 18[A].

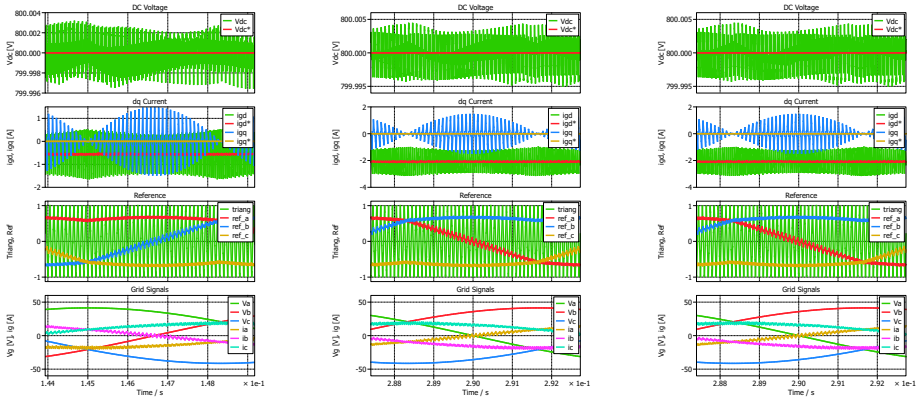


(a) Señales de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS para escalón de irradiancia.

(b) Señales de la red y voltaje DC del sistema H_2ESS para escalón de temperatura.

Figura 4.24: Caso de estudio 2.

En estado estacionario, la figura 4.25a muestra las señales de interés y el voltaje DC en este régimen para las condiciones inciales. Lo mismo para las figura 4.25b que lo hace para el estado estacionario del primer escalón y la figura 4.25c para el segundo escalón.



(a) Análisis e.e. condiciones inciales. (b) Análisis e.e. primer escalón. (c) Análisis e.e. segundo escalón.

Figura 4.25: Caso 2.

La figura 4.26 muestra el comportamiento de FC para este caso de estudio. Se observa que las corrientes i_x, i_y e i_z siguen su referencia i_m^*, mientras que i_{fc} es es triple de ésta, siendo también la suma de las tres corrientes i_x, i_y e i_z. Éstas van aumentando a medida en que la potencia P_{pv} va disminuyendo. Por su parte el voltaje V_{fc} disminuye a medida que lo hace P_{pv}. Por su parte, la referencia para la conmutación del convertidor boost se mantiene en todo momento dentro de la señal triangular, y prácticamente imperturbada.

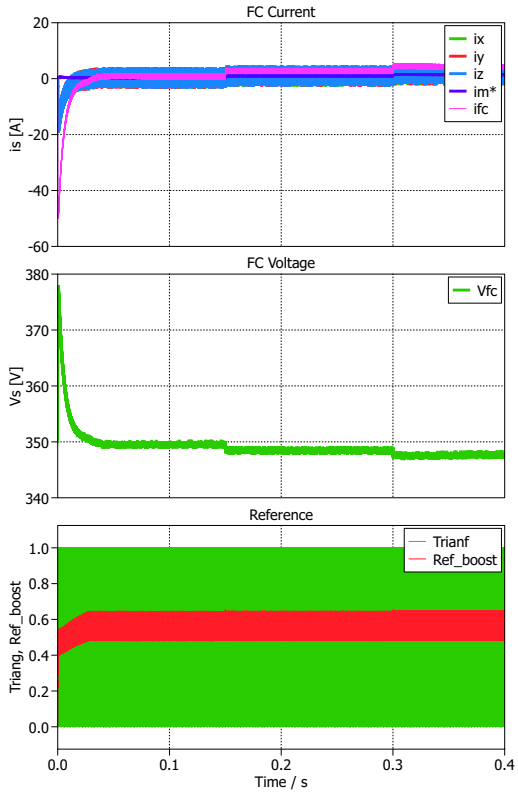
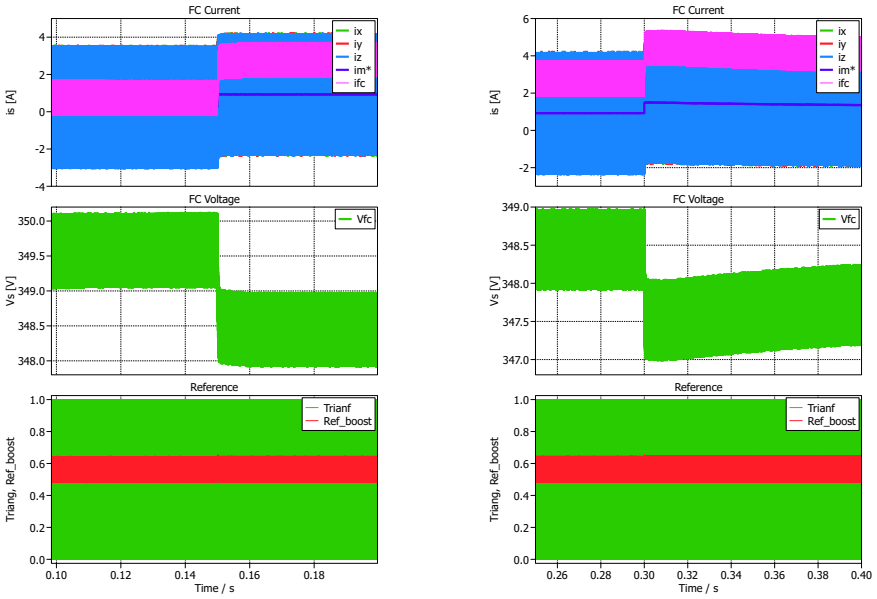


Figura 4.26: Señales de interés de FC para caso de estudio 2.

En la figura 4.27a se encuentra un acercamiento al momento inicial y luego a la respuesta del escalón de irradiancia. Previo al escalón, se observa que las corrientes i_x, i_y e i_z tienen un valor medio de 0.24[A], siguiendo la referencia de i_m^* que también tiene el mismo valor. En cuando a i_{fc}, ésta tiene un valor de 0.75[A], siendo, aproximadamente, tres veces el valor de i_m^*. Por su parte, $\bar{V}_{fc}$ es de 350[V] y la referencia para la conmutación se encuentra dentro de la señal triangular. Luego del escalón de irradiancia, las corrientes i_x, i_y e i_z tienen un valor medio de 0.92[A], sieguiendo la referencia de i_m^* que también es de 0.92[A], e $\bar{i}_{fc}$ es igual a 2.78[A]. En cuanto al voltaje $\bar{V}_{fc}$, éste es 348[V] y la referencia para la conmutación sigue imperturbada.

En la figura 4.27b se encuentra la respuesta al escalón de temperatura. En ella se observa que los valores medios de i_x, i_y e i_z son 1.30[A], siguiendo la referencia i_m^* que tiene el mismo valor y la corriente $\bar{i}_{fc}$ es, aproximadamente el triple de ésta, siendo de 4.0[A]. $\bar{V}_{fc}$

es de 347[V] y la referencia para la conmutación sigue imperturbada.

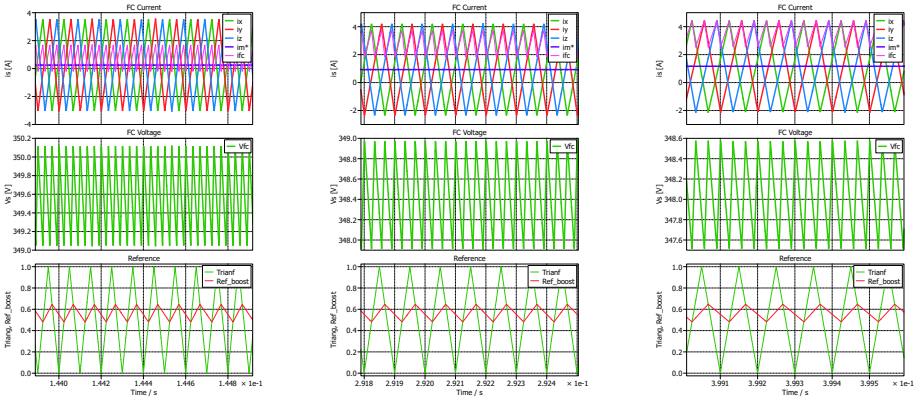


(a) Señales de interés FC para escalón de irradiancia.

(b) Señales de interés FC para escalón de temperatura.

Figura 4.27: Caso de estudio 2.

Se realiza un acercamiento al estado estacionario de cada tramo del caso de estudio. La figura 4.28a muestra este régimen para las coniciones iniciales, luego la figura 4.28b lo hace para el primer escalón y la figura 4.28b para el segundo escalón.



(a) Anális de FC en e.e. para condiciones iniciales.

(b) Anális de FC en e.e. para primer escalón.

(c) Anális de FC en e.e. para segundo escalón.

Figura 4.28: Caso 2.

También se analiza las respuestas en ELZ para este caso de estudio, figura 4.29. En ella se observa que a lo largo del caso de estudio las corrientes $\bar{i}_n$ e $\bar{i}_{elz}$ permanecen en cero, mientras que $\bar{V}_{elz}$ se mantiene en 250[V]. En cuanto a la referencia para la conmutación del convertidor buck permanecen imperturbada a lo largo del caso de estudio.

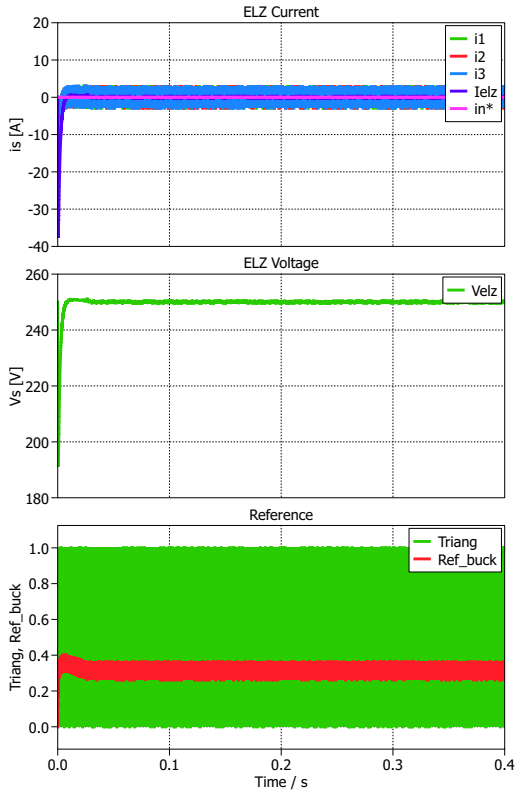


Figura 4.29: Señales de interés para ELZ en caso de estudio 2.

En relación a las pérdidas y eficiencias del convertidor AFE del sistema H_2ESS las pérdidas aumentan a medida que la potencia P_{pv} disminuye, pero la eficiencia del convertidor no fluctúa de su valor medio. En un análisis más cercano, se tiene que previo al escalón de irradiancia, las pérdidas tienen un valor medio de 3.3[W], mientras que la eficiencia es de 98.70 %. Posterior a este escalón, las pérdidas tienen un valor medio de 11.25[W] y la eficiencia es de 98.80 %. Para el escalón de temperatura las pérdidas suben a 17.60[W] y la eficiencia es de 98.76 %.

Se analizan las pérdidas y eficiencia del convetidor boost en donde se observa que las pérdidas aumentan a medida que disminuye P_{pv} y la eficiencia también lo hace. Antes del escalón de irradiancia, se tiene que el valor medio de las pérdidas es 12.01[W] y la eficiencia es de 95.41 %. Luego de este escalón, las pérdidas son de 12.09[W] y la eficiencia es de 98.76 %. Para el ecalón de temperatura, las pérdidas son de 13.21[W] y la eficiencia sube a un 99.07 %.

El análisis en carcanía de las pérdidas y eficiencias del convertidor AFE del sistema H_2ESS y el convertidor buck se encuentran en el Anexo. Además, en esa misma sección, se encuentra el análisis de las pérdidas y eficiencias del convertidor buck.

Con los análisis expuestos, se observa que el EMS propuesto cumple su función, gestionando los flujos de potencia de forma correcta. Para los distintos niveles de P_{pv} por debajo de los 8.5[kW], FC fue capaz de suplir la potencia faltante, mientras que ELZ no operó en ningún instante del caso de estudio.

4.2.3. Peak shaving

El tercer caso de estudio corresponde a probar si el sistema H_2ESS propuesto es capaz de suavizar oscilaciones en la red (Peak shaving) cuando la potencia P_{pv} varía de forma obrupta en torno a su referencia - $P^*_{pv} = 8.5$[kW] - en reiteradas ocaciones. A la vez, esto pretende analizar la respuesta de ELZ y FC, dado que el algoritmo EMS cambia la referencia hacia los controladores de corriente de forma instantánea. Así, se busca que ambos elementos mencionados respondan en un tiempo adecuado para amortiguar estas variaciones.

Estas fluctuaciones se realizan variando la temperatura e irradiancia de PV como se muestra en la figura 4.30. Se realiza un escalón de temperatura, subiendo de 25°C a 30°C, luego se vuelve a la temperatura inicial. Seguido de ello, se realiza un escalón de irradiancia de 0.765 a 0.75. De esta forma, es posible variar la potencia que entrega PV en valores en torno a la potencia nominal de la red, i.e., 8.5[kW].

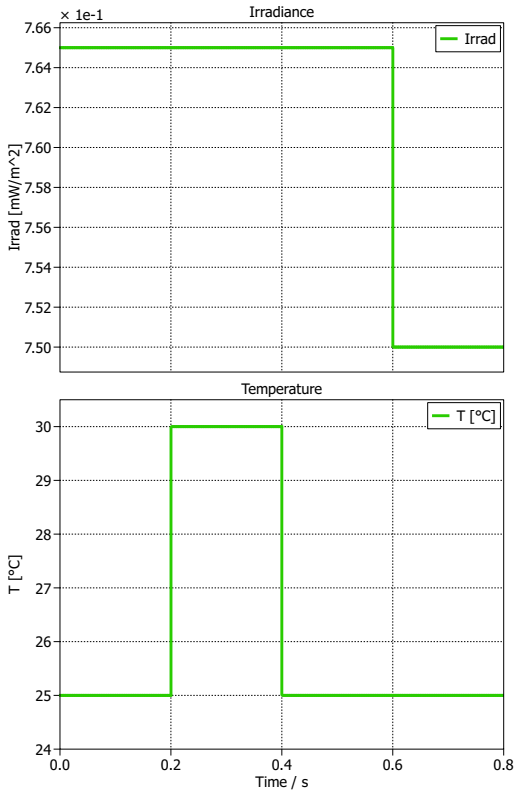


Figura 4.30: Variación de temperatura e irradiancia para caso de estudio 3.

Las potencias de interés para este caso de estudio se muestran en la figura 4.31. En ésta se observa que a pesar de la variación de P_{pv}, la potencia de la red P_g se mantiene prácticamente imperturbada. En cuanto a potencias P_{elz}, se infiere que ELZ genera hidrógeno en proporción al excedente de P_{pv} y deja de operar cuando esta misma está por debajo de los 8.5[kW]. Al analizar P_{fc}, se observa que consume hidrógeno para la generación de potencia eléctrica en proporción a lo que requiere la red y deja de operar cuando P_{pv} es mayor que 8.5[kW].

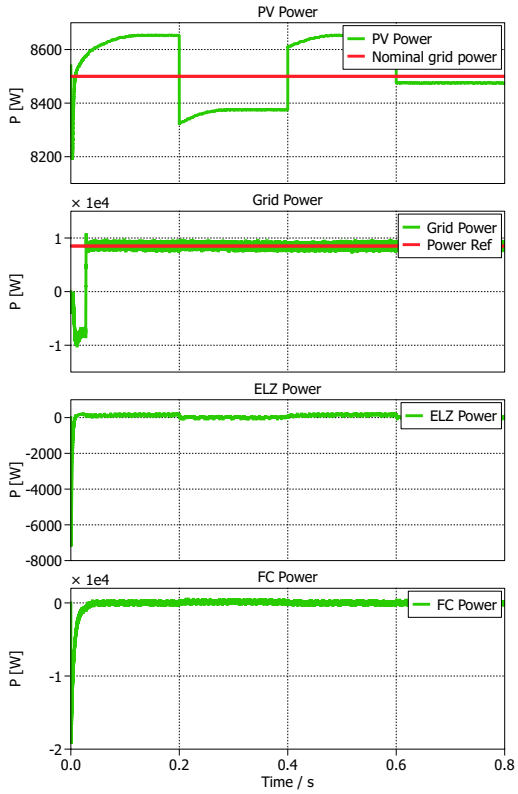
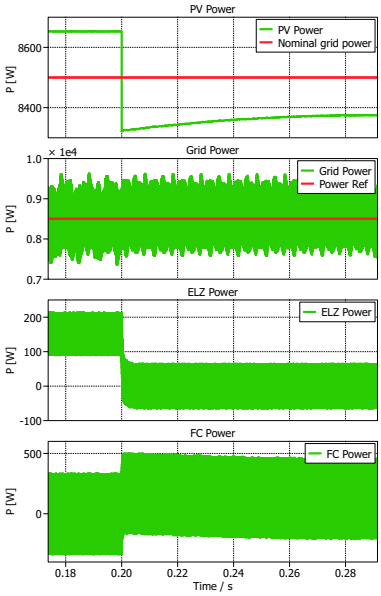
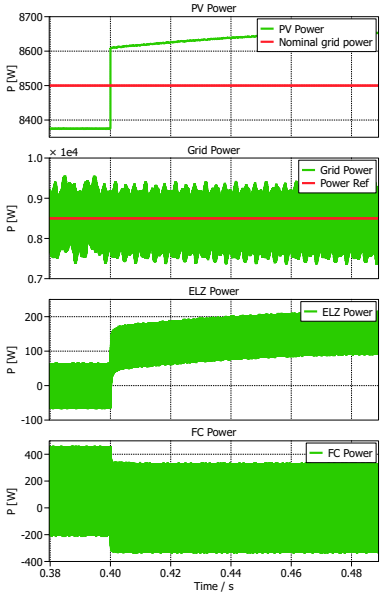


Figura 4.31: Potencias de interés caso de estudio 2.

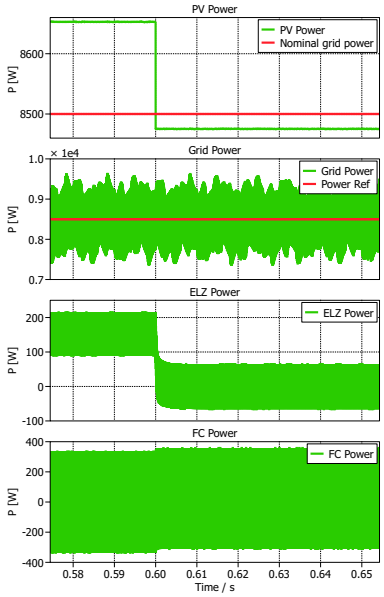
Se analiza también en cercanía cada tramo de este caso de estudio. Para los parámetros iniciales y del primer escalón de temperatura, figura 4.32a, se tiene que antes de la primera variación P_{pv} es de 8650[W], $\bar{P}_g$ es 8.5[kW], $\bar{P}_{elz}$ es 150[W] y $\bar{P}_{fc}$ es 0. Posterior al escalón mencionado, P_{pv} es 8370[W], $\bar{P}_g$ es 8.5[kW], $\bar{P}_{elz}$ es 0 y $\bar{P}_{fc}$ es 130[W]. Para el segundo escalón de temperatura, figura 4.32b, posterior a éste la potencia P_{pv} es de P_{pv} es de 8650[W], $\bar{P}_g$ es 8.5[kW], $\bar{P}_{elz}$ es 150[W] y $\bar{P}_{fc}$ es 0. Luego, para el escalón de irradiancia, figura 4.32c, P_{pv} es de 8475[W], $\bar{P}_g$ es de 8.5[kW], $\bar{P}_{elz}$ es de 0 y $\bar{P}_{fc}$ es de 25[W].



(a) Potencias primer escalón de temperatura.



(b) Potencias segundo escalón de temperatura.



(c) Potencias escalón de irradiancia.

Figura 4.32: Caso de estudio 3.

Se analiza también el voltaje V_{dc} y señales de interés de la red para este caso de estudio, figura 4.33. En ella se observa que V_{dc} sigue la referencia, V_{dc}^{*}, teniendo un valor de 800[V]. Por su parte las corrientes $\bar{i}_{gd}$ e $\bar{i}_{gq}$ también siguen sus referencias i_{gd}^{*} e i_{gq}^{*} respectivamente. En cuannto a las referencias para PWM, se mantienen sin mayores perturbaciones, lo mismo para el voltaje y la corriente de la red, V_{gabc} e i_{gabc}, a lo largo del caso de estudio.

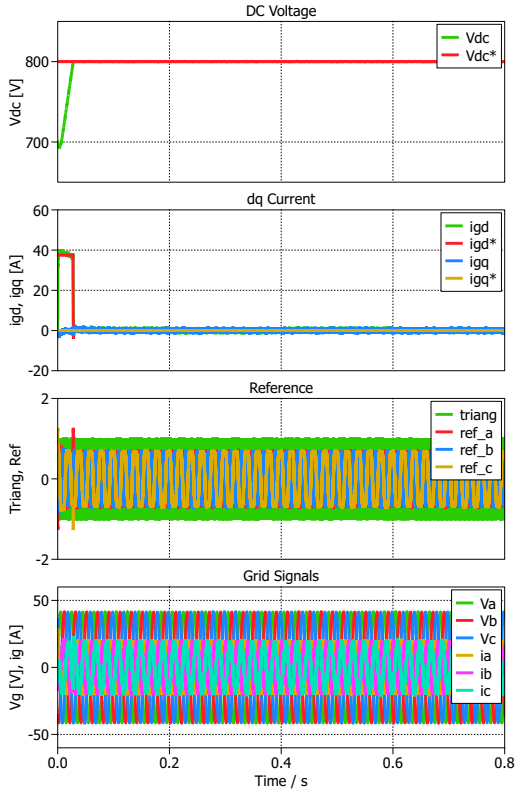
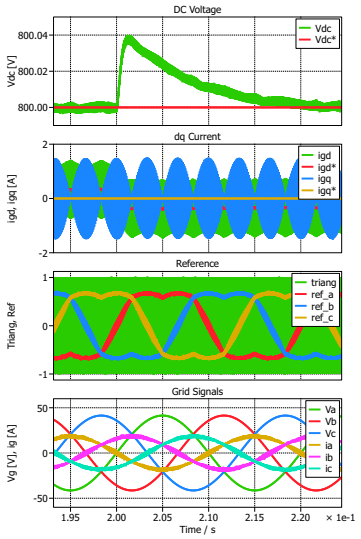


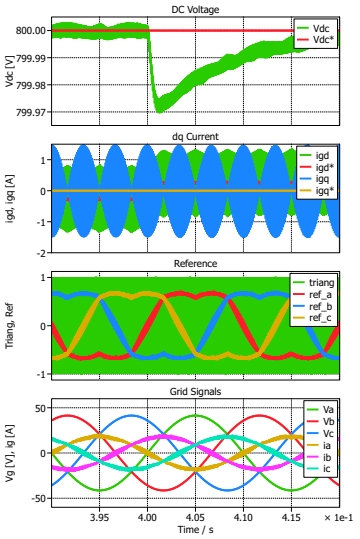
Figura 4.33: Voltaje dc y señales de interés de la red caso de estudio 3.

Al hacer un análisis más cercano los momentos en torno al primer escalón de temperatura, figura 4.34a, se observa que antes de éste $\bar{V}_{dc}$ es 800[V], $\bar{i}_{gd}$ e $\bar{i}_{gd}^{*}$ son 0.33[A], $\bar{i}_{gq}$ e $\bar{i}_{gq}^{*}$ son 0[A], las referencias permanecen dentro de la señal triangular, $\hat{V}_{gabc}$ es 310[V] y $\hat{i}_{gabc}$ es 18[A]. Posterior al escalón, $\bar{V}_{dc}$ es 800[V], $\bar{i}_{gd}$ e $\bar{i}_{gd}^{*}$ son -0.26[A], $\bar{i}_{gq}$ e $\bar{i}_{gq}^{*}$ son 0[A], las referencias permanecen dentro de la señal triangular, $\hat{V}_{gabc}$ es 310[V] y $\hat{i}_{gabc}$ es 18[A]. Luego del segundo escalón de temperatura, figura 4.34b, $\bar{V}_{dc}$ es 800[V], $\bar{i}_{gd}$ e $\bar{i}_{gd}^{*}$ son 0.33[A], $\bar{i}_{gq}$ e $\bar{i}_{gq}^{*}$ son 0[A], las referencias permanecen dentro de la señal triangular, $\hat{V}_{gabc}$ es 310[V] y $\hat{i}_{gabc}$ es 18[A]. Al aplicar el escalón de irradiancia, figura 4.34c, $\bar{V}_{dc}$ es 800[V], $\bar{i}_{gd}$ e $\bar{i}_{gd}^{*}$ son -0.05[A], $\bar{i}_{gq}$ e $\bar{i}_{gq}^{*}$

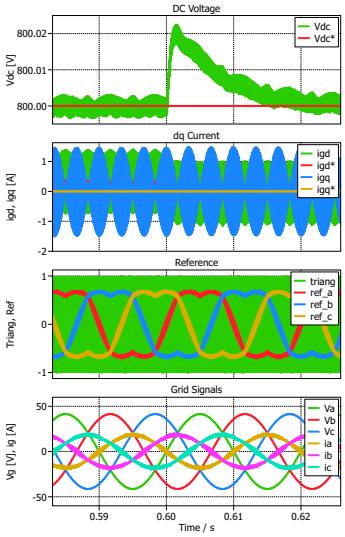
son 0[A], las referencias permanecen dentro de la señal triangular, $\hat{V}_{gabc}$ es 310[V] y $\hat{i}_{gabc}$ es 18[A].



(a) Voltaje dc y señales de interés de la red primer escalón de temperatura.



(b) Voltaje dc y señales de interés de la red segundo escalón de temperatura.

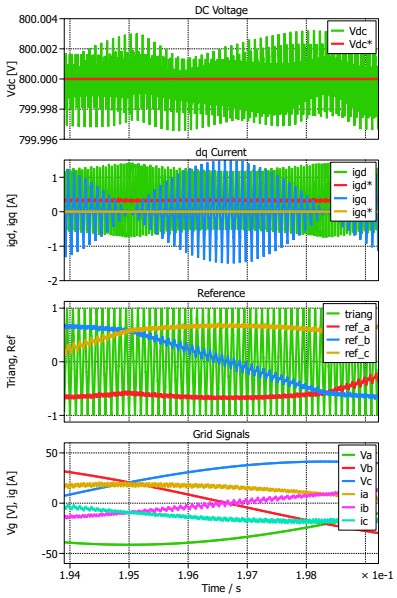


(c) Voltaje dc y señales de interés de la red escalón de irradiancia.

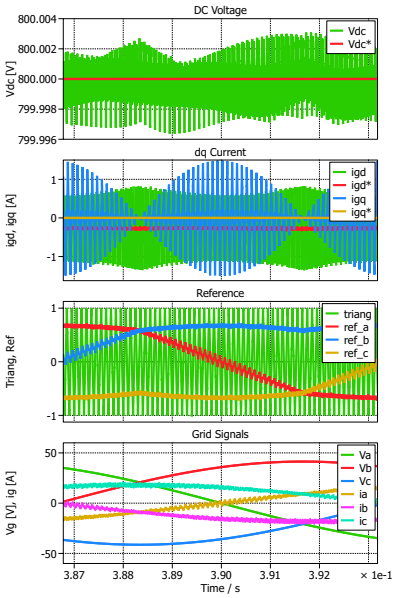
Figura 4.34: Caso de estudio 3.

Se muestra el estado estacionario de los cuatro tramos de este caso de estudio. La figura

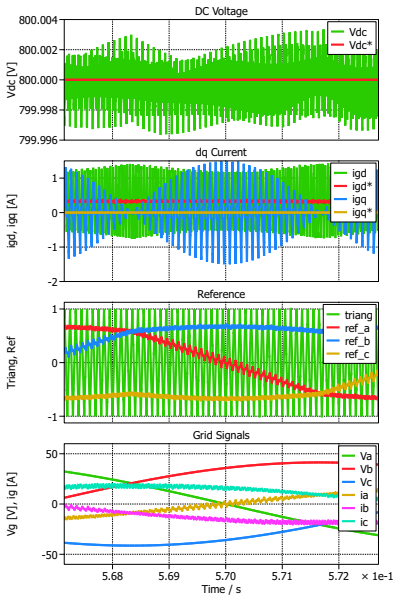
4.35a muestra este régimen para las conidiciones iniciales, la figura 4.35b para el primer escalón, la figura 4.35c para el segundo escalón y la figura 4.35d para el tercer escalón.



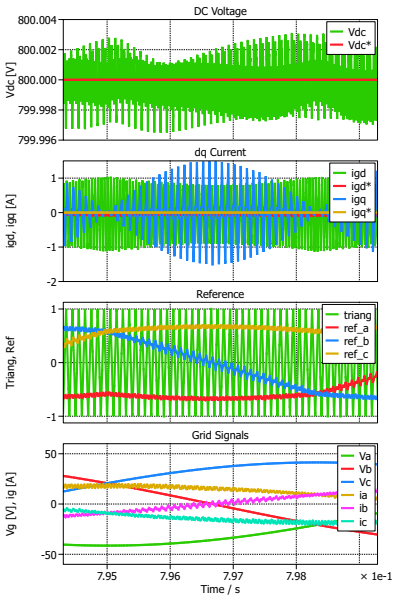
(a) Señales de interés y V_{dc} en e.e. para c.i caso 3.



(b) Señales de interés y V_{dc} en e.e. primer escalón caso 3.



(c) Señales de interés y V_{dc} en e.e. segundo escalón caso 3.



(d) Señales de interés y V_{dc} en e.e. tercer escalón caso 3.

El comportamiento de ELZ a lo largo de este caso de estudio se muestra en la figura 4.36. En ella se observa que las corriente $\overline{i}_1$, $\overline{i}_2$ e $\overline{i}_3$ siguen la referrencia i_n^*, y en consecuencia $\overline{i}_{elz}$ es el triple de esta última. Además, se ajusta según la potencia P_{pv}, operando cuando hay exceso de potencia y dejando de operar cuando hay un déficit de potencia. Por su parte, el voltaje V_{elz} también se ajusta P_{pv}, siendo 250[V] en los momentos en que no opera ELZ, mientras que cuando éste opera, su voltaje sube en porpoción a lo requerido. En relación a las referencias para la conmutación del convertidor buck, ésta se mantiene imperturbada a lo largo del caso de estudio.

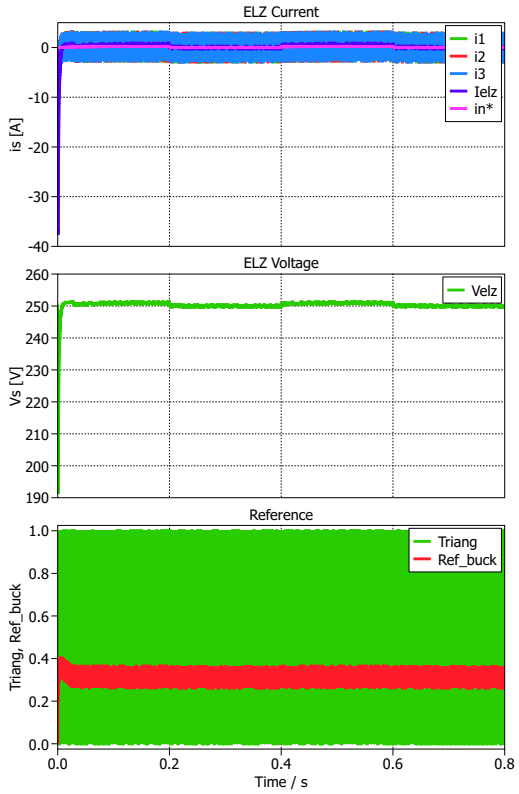
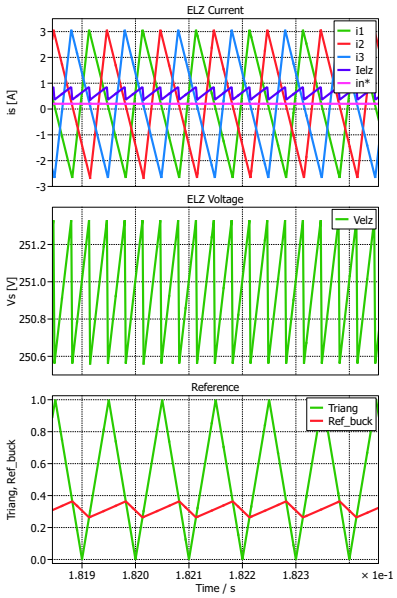
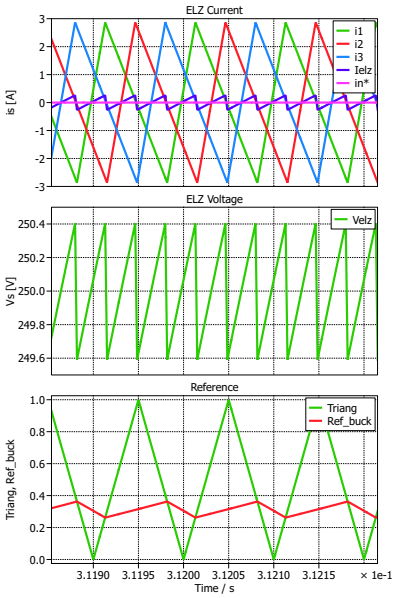


Figura 4.36: Señales de interés ELZ caso de estudio 3.

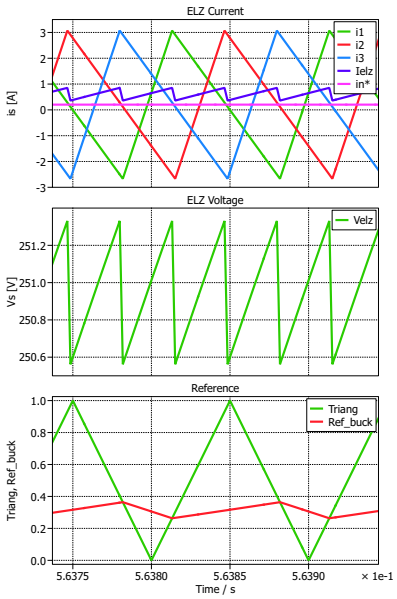
En un análisis en estado estacionario, el comportamiento de ELZ en condiciones inciales se muestra en la figura 4.37a. Mientras que para el primer escalón los resultados se muestran en la figura 4.37b. Para el tercer y cuarto escalón, las figura 4.37c y 4.37d muestran los resultados de este régimen respectivamente.



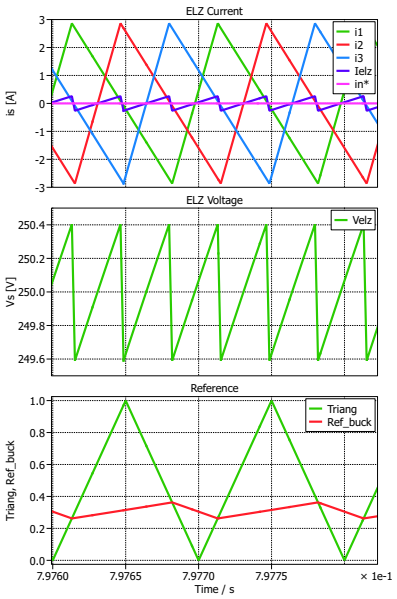
(a) Señales de interés ELZ en e.e. para c.i caso 3.



(b) Señales de interés ELZ en e.e. primer escalón caso 3.



(c) Señales de interés ELZ en e.e. segundo escalón caso 3.



(d) Señales de interés ELZ en e.e. tercer escalón caso 3.

La figura 4.38 muestra el comportamiento de FC para este caso de estudio. De forma análoga a ELZ, las corrientes $\bar{i}_x$, $\bar{i}_y$ e $\bar{i}_z$ siguen la referrencia i_m^*, y en consecuencia $\bar{i}_{fc}$ es el triple de esta última. Además, esta última, se ajusta según la potencia P_{pv}, operando cuando hay un déficit de potencia y dejando de operar cuando hay exceso de ella. El voltaje $\bar{V}_{fc}$ se mantiene en 350[V] cuando no FC no opera y baja su nivel de tensión cuando si opera. En cuanto a la referenia para la conmutación del convertidor boost, ésta se ve imperturbada a lo largo del caso de estudio, manteniéndose dentro de la señal triangular con la que se compara.

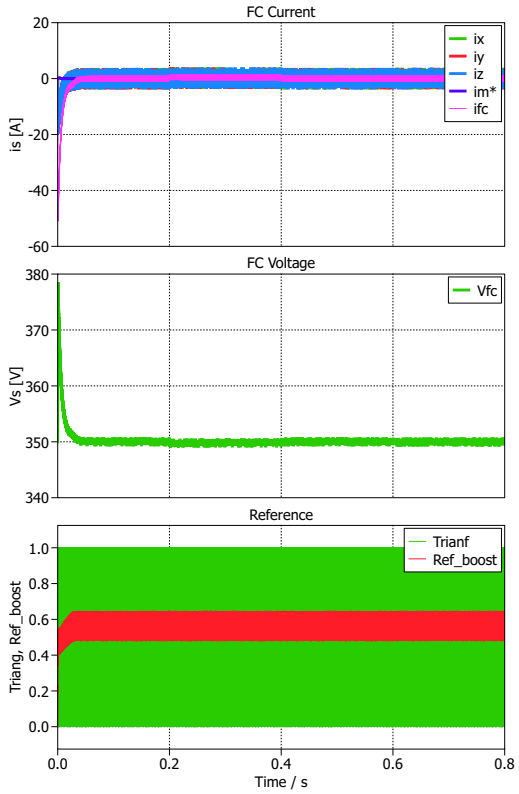
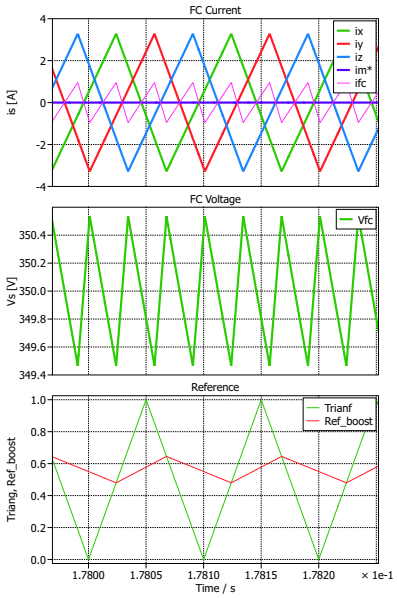
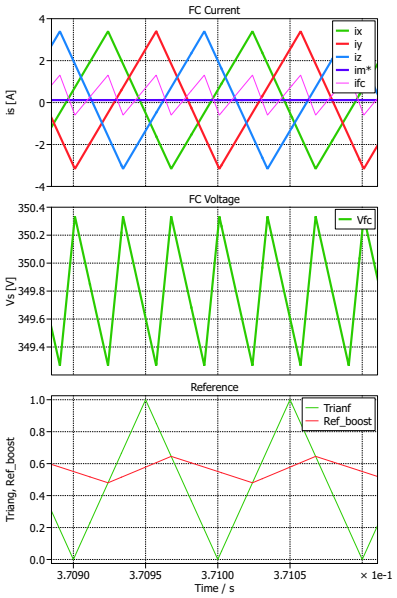


Figura 4.38: Señales de interés FC caso de estudio 3.

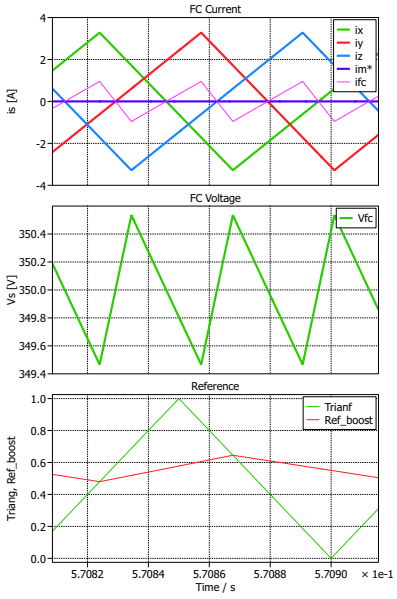
En un análisis en estado estacionario, el comportamiento de FC en condiciones inciales se muestra en la figura 4.39a. Mientras que para el primer escalón los resultados se muestran en la figura 4.39b. Para el tercer y cuarto escalón, las figura 4.39c y 4.39d muestran los resultados de este régimen respectivamente.



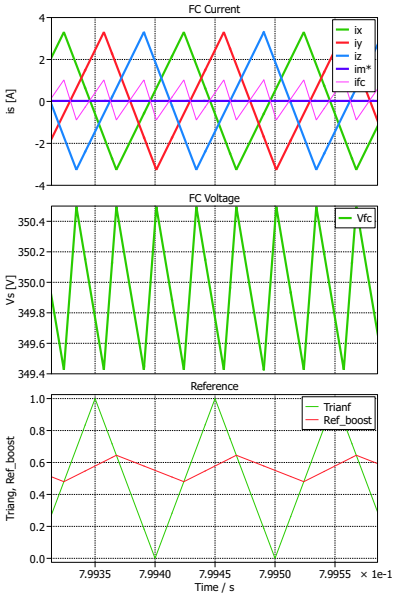
(a) Señales de interés FC en e.e. para c.i caso 3.



(b) Señales de interés FC en e.e. primer escalón caso 3.



(c) Señales de interés FC en e.e. segundo escalón caso 3.



(d) Señales de interés FC en e.e. tercer escalón caso 3.

Para el AFE, a lo largo del caso de estudio, el valor medio de las pérdidas es de 3[W] y la eficiencia es de 94.42 %. Las mismas señales se analizan en el convertidor buck en donde el valor medio de las pérdidas es 10.13[W], mientras que la eficiencia en los intantes que opera ELZ son de 93.13 % y 93.24 %. Por su parte, las pérdidas y eficiencia del convertidor boost son de 11.76[W] y, para la operación de FC, 90.58 % y 50.96 %.

A partir de los resultados expuestos, se muestra entonces que el EMS para el sistema H_2ESS propuesto es capaz de mitigar los efectos de las fluctuaciones de PV en la red de forma exitosa. Esto lo hace mediante la generación adecuada de hgidrógeno operando ELZ cuando P_{pv} es mayor a 8.5[kW], y consumiendo hidrógeno operando FC cuando P_{pv} es menor a 8.5[kW].

4.3. Resumen del capítulo

El sistema H2ESS modelado es implementado en el entorno de simulación PLECS, donde se integran los modelos de los convertidores de potencia, el electrolizador, la celda de combustible, el modelo térmico y el sistema de gestión de energía (EMS). Esta implementación permite analizar el comportamiento dinámico del sistema ante distintos escenarios de generación renovable y demanda eléctrica.

Se evalúan diversos casos de estudio, incluyendo la producción de hidrógeno cuando existe excedente de potencia renovable, el consumo de hidrógeno mediante la celda de combustible cuando la generación es insuficiente y un escenario de peak shaving orientado a limitar la potencia inyectada a la red. En cada caso, el EMS determina el modo de operación del sistema, coordinando las referencias de corriente de los convertidores asociados al ELZ y la FC según la potencia disponible.

Los resultados muestran que el sistema es capaz de gestionar adecuadamente las fluctuaciones de potencia, manteniendo la estabilidad del bus DC y logrando transiciones suaves entre modos de operación. Asimismo, el análisis de pérdidas y eficiencia evidencia un desempeño energético favorable, con pérdidas térmicas reducidas en relación con la potencia procesada, validando la viabilidad del H2ESS como solución de soporte y flexibilidad para redes con alta penetración renovable.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5.1. Resumen

EL TRABAJO valida el uso del sistema H_2ESS como una alternativa para brindar soporte y flexibilidad a la red eléctrica mediante el uso de hidrógeno como vector energético de bajas emisiones. El sistema permite mitigar fluctuaciones de potencia y realizar peak shaving, abordando desafíos asociados a la intermitencia de fuentes renovables.

Se propone un EMS capaz de gestionar de forma inteligente la operación de ELZ y FC. En escenarios de excedente de P_{pv}, el EMS habilita la producción de hidrógeno mediante ELZ, mientras que en condiciones de déficit coordina la operación de FC para suplir la potencia faltante, manteniendo la estabilidad de la red. Ante variaciones severas de potencia, se consideran las limitaciones de ramp rate en ELZ [29] y la degradación de FC [30], asegurando transiciones suaves mediante controladores adecuados.

En todos los casos analizados, el conjunto H_2ESS–EMS demuestra un desempeño eficiente, con altas eficiencias de conversión y pérdidas térmicas despreciables, validando su viabilidad como solución de soporte a la red.

Además, se identifican líneas futuras de desarrollo, tales como la integración de baterías y otras fuentes renovables para ampliar la capacidad y flexibilidad del sistema, la incorporación del estado de carga (SOC) [26] en los sistemas de almacenamiento de hidrógeno para nuevos escenarios operativos, y la exploración de métodos de control no lineal y diferentes topologías de convertidores que permitan respuestas más precisas y soluciones de implementación más compactas.

5.2. Conclusiones

A través del trabajo realizado se logra validar el uso del sistema H_2ESS para brindar soporte a las redes eléctricas y, a la vez, darle flexibilidad al permitir el uso de un combustible de bajas emisiones como vector energético. Además, este mismo permite solventar fenómenos de fluctuaciones de potencia, logrando el efecto de peak shaving. Así, el H_2ESS propuesto presenta una solución a ciertos desafíos que la intermitencia de energías de fuentes renovables suscitan.

Por su parte, se establece un algoritmo EMS que funciona de forma eficiente e inteligente. Aquel sistema de manejo de energía permite enviar las referencias a los convertidores asociados a ELZ y FC. De esta forma, para el primer caso de estudio, que corresponde a la generación de hidrógeno, es ELZ quien precisa de operar. Para que esto ocurra, el algoritmo entrega de forma oportuna la referencia de corriente al convertidor Buck para permitir este modo de operación. Sumado a ello, al reconocer de forma inteligente el excedente de potencia P_{pv} disponible, es que ELZ logra producir hidrógeno en una relación consecutne con ésta. También, dada la estructura del EMS, es que FC no de mantiene operativo, logrando el funcionamiento esperado en este caso.

Para el segundo caso de estudio ocurre lo análogo, pero esta vez asociado al consumo de hidrógeno. El algoritmo logra de forma oportuna enviar la referencia al convertidor Boost, para así operar con FC. Esto, a la vez, permite que la red eléctrica mantenga su funcionamiento sin mayores perturbaciones, dado que FC es capaz de suplir la potencia faltante en la red. Además, esta misma variable es consecuente con el déficit que presenta P_{pv}, es decir, FC suple únicamente la potencia faltante que la red necesita. Resulta, también, que ELZ está en todo momento de este caso de estudio fuera de su modo operativo. De esta forma se valida, para este caso, el funcionamineto del EMS.

El tercer caso de estudio modela fluctuaciones más severas de potencia. Este fenómeno está ligado directamente con los fenómenos de intermintencia a los que se aforntan las energías de fuentes renovables [5]. Este caso suscita un cambio prácticamente instantáneo de los modos de operación de generación y consumo. Sumado a ello, se debe considerar los efectos de ramp rate en ELZ [29] y la degradación de FC [30]. El primer efecto corresponde a una tasa de cambio en la potencia suministrada a ELZ para su operación [29]. Esto implica que su encendido y apagado se debe realizar con una cierta rampa, la cual debe ajustarse según indique el proveedor [29]. Eso se logra mediante los controladores, que si bien permiten llegar al estado estacionario del modo de operación antes de la fluctuación a un valor de P_{pv} a un valor bajo la referencia, el cambio en las señales de ELZ se hacen de forma suave.

Similarmente ocurre con el efecto de degradación en FC. El cambio abrupto en la potencia de éste afecta directamente su vida útil [30]. Así, el controlador de corriente para FC cumple con lograr un encendido y apagado suave de FC. Esto lo hace sin demeritar el operamiento de la red.

Resulta además que, de forma exitosa, el sistema H_2ESS junto con el EMS logran realizar el efecto de peak shaving. Lo mencionado se puede apreciar en los resultados en la potencia, corrientes y voltajes de la red. Estas señales se ven levemente afectadas por las intermitencias inyectadas por medio de P_{pv}.

Es de notar, además, que de forma transversal en todos los casos de estudio, que la eficiencia de los convertidores utilizados es sustancial, logrando incluso instantes de operción cercanos al 99 %. Además, las pérdidas asociadas al dominio térmico pocas veces superan el órden de las decenas, por lo que resulta despreciable en comparación a la potencia del sistema.

Por tanto, a través de los tres casos estudiados en este trabajo, se valida el uso de un sistema de almacenamiento en base a hidrógeno de bajas emisiones para brindar soporte y estabilidad a la red eléctrica. Mas, esto es posible mediante el uso agregado de un sistema de manejo de energía, que logre gestionar de forma correcta los flujos de potencia. Esto conforma un respaldo inteligente y eficiente, mediante el uso del hidrógeno como vector energético.

5.3. Trabajo Futuro

Considerando el soporte y estabilidad que el EMS junto a el sistema H_2ESS entregan a una red eléctrica, se pueden presentar variadas implementiaciones de esto. Algunas de ellas contemplan el uso de baterías, ampliando el algoritmo de manejo de energía, logrando incluso un respaldo de mayor capacidad y mayor grado de libertad al sistema.

Por otro lado, se pueden agregar variadas fuentes renovables, como eólicas y solares. De esta manera, se puede complementar desde diferentes frentes el sistema de soporte. Esto, a su vez, considera también un mayor desarrollo del EMS.

A la vez, es posible implementar simulaciones de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno. Con éstos, el EMS requiere de una nueva variable a analizar, siendo esta el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) [26]. Mediante esta variable es posible generar nuevos casos de estudio, donde no sea necesario generar hidrógeno dado que la capacidad de almacenamiento está a su máximo. Otro caso sería que no es posible dar soporte a la

red dado que SOC es muy bajo. Esto, llevado de forma complementaria a lo mencionado anteriormente, es decir, con batería y otras fuentes renovables, conformarían análisis más extensos de sistemas realeas y posibles soluciones.

Métodos de control no lineal y diferentes topologías de convertidores también constituyen trabajos futuros. Dado que el sistema presenta ecuaciones no lineales, el uso de métodos de control no lineal permitiría una respuesta más ajustada [33]. También, al explorar con diferentes convertidores, puede significar soluciones distintas, incluso más compactas, al momento de una potencial implementación.

Apéndice A

PUBLICACIONES GENERADAS

Apéndice B

ANEXO

B.0.1. Código algoritmo MPPT

```
// Code declarations:
#include <float.h>
#include <math.h>

#define vpv      Input(0)
#define ipv      Input(1)
#define vpv_ref Output(0)

double P_prev;
double V_prev;

//--------------------------------------------------------
// Start function code:
//--------------------------------------------------------
vpv_ref = 800;
P_prev  = 0.0;
V_prev  = 0.0;

//--------------------------------------------------------
// Output function code:
//--------------------------------------------------------
double P_now = vpv * ipv;
double dP    = P_now - P_prev;
double dV    = vpv   - V_prev;

if (dP > 0 && dV > 0)
    vpv_ref = vpv_ref + 0.5;

```

```
29 else if (dP > 0 && dV < 0)
30     vpv_ref = vpv_ref - 0.5;
31
32 else if (dP < 0 && dV > 0)
33     vpv_ref = vpv_ref - 0.5;
34
35 else if (dP < 0 && dV < 0)
36     vpv_ref = vpv_ref + 0.5;
37
38 P_prev = P_now;
39 V_prev = vpv;
```

Listing B.1: Implementación del algoritmo P&O para MPPT

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. Child, C. Kemfert, D. Bogdanov and C. Breyer, "Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100 % renewable energy system in Europe", Renewable Energy 139 (2019) 80-101.

[2] I. Dincer and C. Acar, "Smart energy systems for a sustainable future", Applied Energy 194 (2017) 225-235.

[3] C. Breyer, S. Khalili, D. Bogdanov, M. Ram, A. S. Oyewo, A. Aghahosseini, A. Gulagi, A. A. Solomon, D. Keiner, G. López, P. A. Østergaard, H. Lund, B. V. Mathiesen, M. Z. Jacobson, M. Victoria, S. Teske, T. Pregger, V. Fthenakis, M. Raugei, H. Holttien, U. Bardi, A. Hoekstra and B. K. Sovacool, " On the History and Future of 100 % Renewable Energy Systems Research", 10.1109/ACCESS.2022.3193402.

[4] S. B. Wali, M. A. Hannah, P. J. Ker, M. S. Abd Rahman, S. K. Tiong, R. A. Begum and T. M. I. Mahlia, "Techno-economic assessment of a hybrid renewable energy storage system for rural community towards achieving sustainable development goals", Energy Strategy Reviews 50 (2023) 101217.

[5] D. Sobczyński and P. Pawłowski, "Energy storage systems for renewable energy sources", 2021 Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE).

[6] I. A. Etxeberria, J. M. A. Etxeberria and H. Camblong, "Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Sources Integration in Microgrids: A Review", 978-1-4244-7398-4/10/$26.00 ©2010 IEEE.

[7] E. Kalihonda, E. Igbineweka and S. Chowdhury, "Integrating Hydrogen as an Energy Storage for Renewable Energy Systems: A Comprehensive Review", 2024 32nd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC).

[8] T. M. I. Mahlia, T. J. Saktisahdan, A. Jannifar, M. H. Hasan and H. S. C. Matseelar, "A review of available methods and development on energy storage; technology update", Renewable and Sustainable Energy Reviews 33 (2014) 532–545.

[9] J. Incer-Valverde, A. Korayem, G. Tsatsaronis and T. Morosuk, "“Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity", Energy Conversion ands Management 291 (2023) 117294.

[10] L. Wan, W. Zhang and Z. Xu "Overview of Key Technologies and Applications of

Hydrogen Nergy Storage in Integrated Energy Systems", 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APEEC).
[11] M. Shatnawi, N. Al Qaydi and M. Aljaberi, "Hydrogen-Based Energy Storage Systems: A Review", 7th International Confererence on Renewable Energy Research and Applications, Paris, France, Oct. 14-17, 2018.
[12] D. Guilbert, B. Yodwong and W. Kaewmanee, "Power converters for hybrid renewable energy systems with hydrogen buffer storage: A short review", 6th IEEE International Conference on Smart Grid Nagasaki, JAPAN, December 4-6, 2018.
[13] E. Ribeiro, A. J. M. Cardoso and C. Boccaletti, "POWER CONVERTERS ANALYSIS IN A RENEWABLE ENERGY BASED HYBRID SYSTEM WITH HYDROGEN STORAGE", Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) under Projects No. SFRH/BD/47741/2008 and No. PTDC/EEA-EEL/114846/2009.
[14] F. Garcia-Torres, L. Valverde and C. Bordons, "Optimal Load Sharing of Hydrogen-Based Microgrids With Hybrid Storage Using Model-Predictive Control", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.63, NO.8, AUGUST 2016.
[15] L. Hang, W. Yuqiang, Z. Yifan, Z. Ming, H. Rulei and H. Junfei, "Using hydrogen energy storage system to improve wind power consumption and low voltage ride through capability", 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC).
[16] T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, S. B. Sani, S. Chemud and R. M. Lajim, "A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects", Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3015919.
[17] J. Zhang, F. Xiao, F. Ma, X. Hao and R. Xiao, " A source-load- storage cooperative control method without communication for medium voltage DC off-grid microgrid", Electric Power Systems Research 246 (2025) 111698.
[18] G. Rego, J. Rocha, J. A. Faria, J. L. Afonso and V. Monteiro, "A Review of Hydrogen Production Methods and Power Electronics Converter Topologies for Green Hydrogen Applications", Energies 2024, 17, 5579.
[19] S. Kart, F. Demir, I. Kocaarslan and N. Genc, " Increasing PEM fuel cell performance via fuzzy-logic controlled cascaded DC-DC boost converter", International journal of hydrogen energy 54 (2024) 84-95.
[20] Md. A. Hossain, Md. R. Islam, Md. A. Hossain and M. J. Hossain, "Control strategy review for hydrogen-renewable energy power system", Journal of Energy Storage 72 (2023) 108170.
[21] D. Vinnikov, A. Andrijanovitš, I. Roasto and T. Lehtla , "New Integrated Converter for Hydrogen Buffer Interfacing in Distributed Energy Systems", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11) Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011.

[22] A. Hassan, O. Abdel-Rahim, M. Bajaj and I. Zaitsev, " Power electronics for green hydrogen generation with focus on methods, topologies, and comparative analysis", Scientific Reports — (2024) 14:24767.
[23] H. Armghan, Y. Xu, H. Sun and N. Ali and J. Liu, "Event-triggered multi-time scale control and low carbon operation for electric-hydrogen DC microgrid", Applied Energy 355 (2024) 122149.
[24] M. Khalid. K. M. Muttaqi, Md R. Islam, D. Sutanto and A. P. Agalgaoknar, "Electrical circuit modeling of proton exchange membrane electrolyzer: The state-of-the-art, current challenges, and recommendations", International journal of hydrogen energy 49 (2024) 625-645.
[25] B. Barać, M. Krpan and T. Capuder, "Modelling of PEM Fuel Cell for Power System Dynamic Studies", DOI 10.1109/TPWRS.2023.3297741.
[26] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. K. Kær and C. Milan, "Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system". Energy Conversion and Management 87 (2014) 820-831.
[27] P. Andrade, G. Belas, V. Mariano and D. Barbosa, "Analysis of Active and Reactive Power Injection in Distributed Systems with Photovoltaic Generation".
[28] Introduction to the Thermal Domain in PLECS.
[29] H. Young, Y. Seok, K. Lee, S. Ki and J. Hyun, "Effect of Ramping Rate on the Durability of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis During Dynamic Operation Using Triangular Voltage Cycling", J. Electrochem. Sci. Technol., 2024, 15(2), 253-260.
[30] J. Zhao and X. Li, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques", Energy Conversion and Management 199 (2019) 112022.
[31] T. Porselvi, R. Archana, S. Janani, R. Nishantini, S. Roshini and L. Kurinjimalar, "Comparison of PO and Incremental conductance for MPPT algorithm in bifacial solar PV system", 2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS).