



Modelamiento y simulación dinámica de una membrana de intercambio de protones para determinar rendimiento de arquitectura innovadora para producción de hidrógeno verde

FELIPE PATRICIO GONZÁLEZ LOBOS

2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Dr. Antonio Sanchez Squella (UTFSM)

Profesor Co-Referente:
MSc. Ricardo Flores Reyes (UTFSM)

Santiago, 26 de Noviembre de 2025.



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: Modelamiento y simulación dinámica de una membrana de intercambio de protones para determinar rendimiento de arquitectura innovadora para producción de hidrógeno verde

Nombre del candidato(a): Felipe Patricio González Lobos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: San Joaquín – CSSJ

Departamento: Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Antonio Alejandro Sánchez Squella, 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: Antonio Sánchez

Fecha: 12/12/2025

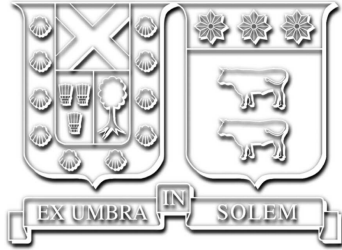
Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/12/2025

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.



Modelamiento y simulación dinámica de una membrana de intercambio de protones para determinar rendimiento de arquitectura innovadora para producción de hidrógeno verde

FELIPE PATRICIO GONZÁLEZ LOBOS

2025

“Gobernar es educar”
— *Pedro Aguirre Cerda*

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi profunda gratitud a mis profesores guía, Antonio y Ricardo, por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este trabajo de titulación. Su rigurosidad, visión y capacidad para establecer límites al exceso de trabajo fueron lecciones invaluable que me acompañarán en mis futuros estudios de Magíster.

Extiendo mi agradecimiento a los profesores que me brindaron la oportunidad de crecer como ayudante docente: Bárbara, por enseñarme el crucial equilibrio entre la exigencia y la permisividad. Nicolás, con quien trabajé durante 2 años y además fue mi supervisor en mi práctica profesional, dandome la autonomía completa para el desarrollo de mis tareas, forjando mi independencia profesional. Profesor Porzio, agradezco los momentos mas relajados y la sabiduría compartida en los laboratorios, recordándome siempre que la vida ofrece un espacio para la luz y la resiliencia. Profesor Rozas, quien fue jefe de carrera durante casi todo mi paso en pregrado y además fue clave al forjar el carácter y la perseverancia que hoy me permiten culminar este ciclo.

A mis Padres, por su apoyo incondicional y por todos los valores que me han transmitido, que me han convertido en la persona que soy. A mis hermanas y hermanos –algunos distantes geográficamente– sentí su apoyo constante. Finalmente, a Remy (QEPD), un poddle blanco y chico que se portó mal durante casi 17 años, gracias por ser parte de mi vida.

A Vale, Bastian, Gabriela, Ignacio y Crema, mi circulo más cercano a lo largo de la carrera. Su amistad hizo que cada desafío fuera más llevadero. Les reitero mi compromiso incondicional. También al equipo de Admisión, específicamente a Nacho, Chris, Aymara, Benja, Said y Nico, con ustedes desarrollé diferentes habilidades que han sido cruciales para mi desarrollo profesional y personal.

Finalmente, agradezco a figuras inesperadas de inspiración, como Juan Alcayaga (Don Carter), cuyo humor me acompañaron en los momentos más difíciles de este proceso.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	V
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Objetivo general y específicos	3
2. Estado del Arte	4
3. Metodología	9
3.1. Modelamiento PEM	9
3.1.1. Procedimiento experimental	11
3.2. Entorno de simulación	13
3.2.1. PEM – Circuito equivalente simple	13
3.2.2. Sistema Fotovoltaico	13
3.2.3. Sistema de almacenamiento	14
3.2.4. Convertidor de potencia	15
3.3. Definición de escenarios de prueba	15
3.3.1. Escenarios de control	15
3.3.1.a. Sintonización controladores PI	16
3.3.2. Arquitecturas de alimentación para el PEM	16
3.3.3. Escenarios de generación PV	17
4. Desarrollo y Resultados	19
4.1. Parámetros modelo PEM	19
4.1.1. Validación modelo dinámico	22
4.2. Evaluación de escenarios de control	24
4.3. Evaluación de respuesta dinámica en diferentes arquitecturas.	27
4.3.1. Conexión directa PEM-PV	27
4.3.2. PEM-PV con convertidor DC-DC intermedio	28
4.3.3. PEM-PV-ESS con convertidor parcial	30
4.3.4. PEM-PV-ESS con convertidores dedicados	30
4.4. Evaluación escenarios de generación fotovoltaica	31
5. Conclusiones	37

A. Parámetros PEM	39
B. Algoritmo de control de corriente	43
C. Gráficas comportamiento de las arquitecturas con dinámicas modifica- das	46
D. Tablas comparativas de generación de hidrógeno	48
Bibliografía	50

Índice de Figuras

2.1. Arquitecturas para la alimentación de un PEM encontradas en el estado del arte	6
3.1. Diagrama de flujo metodología	9
3.2. Circuitos equivalentes considerados para el modelamiento del electrolizador.	10
3.3. Montaje experimental y diagrama esquemático.	11
3.4. Modelo utilizado para representar el comportamiento del sistema fotovoltaico en simulación	13
3.5. Modelo utilizado para representar el sistema de almacenamiento de energía en simulación.	14
3.6. Convertidor buck bidireccional.	15
3.7. Perfiles de irradiancia global horizontal obtenidos desde la estación meteorológica Crucero.	18
4.1. Curva de polarización electrolizador.	19
4.2. Resultados experimentales de los parámetros del electrolizador.	21
4.3. Componentes de la tensión total del electrolizador basado en parámetros físicos experimentales.	21
4.4. Comparación entre el modelo ajustado y la medición experimental del PEM frente a escalones unitarios de corriente en distintos rangos de operación	22
4.5. Respuesta dinámica de la tensión del PEM frente a un escalón de corriente, comparando la medición experimental con el modelo calculado.	23
4.6. Comparación tensión dinamica experimental respecto a modelo desarrollado por ajuste y por variables físicas.	24
4.7. Comparación de respuesta a escalón de corriente de referencia en el EdeC 3 considerando dos controles PI. En cada subfigura, las señales mostradas en el grafico superior corresponden al control PI B, por otro lado, las mostradas en la gráfica inferior corresponden al PI C.	26
4.8. Análisis de error comparativo entre picos de corriente estimados y medidos en el Escenario 3.	27
4.9. Comportamiento eléctrico de la conexión directa entre un sistema PV y un PEM, considerando su modelo estático.	28
4.10. Comportamiento eléctrico de la conexión directa entre un sistema PV y un PEM, considerando su modelo dinámico.	28
4.11. Comportamiento eléctrico de la conexión entre un sistema PV y un PEM con convertidor DC-DC intermedio con seguimiento de potencia máxima, considerando modelo estático del PEM	29

4.12.	Comportamiento eléctrico de la conexión entre un sistema PV y un PEM con convertidor DC-DC intermedio con seguimiento de potencia máxima, considerando modelo dinámico del PEM	29
4.13.	Análisis de perturbaciones para la Arq C	30
4.14.	Análisis de perturbaciones para la Arq D	31
4.15.	Comportamiento de Arq A y Arq B bajo dos escenarios de generación PV.	32
4.16.	Control de corriente constante en Arq C bajo dos escenarios de generación PV	33
4.17.	Control de corriente con algoritmo simplificado en Arq C bajo dos escenarios de generación PV.	33
4.18.	Control de corriente constante en Arq D bajo dos escenarios de generación PV	34
4.19.	Comportamiento del electrolizador PEM frente a un perfil de irradiancia sano en las arquitecturas A, B y C - algoritmo simplificado. La Tabla D.1 muestra las cifras para cada uno de los valores mostrados en la gráfica.	36
4.20.	Comportamiento del electrolizador PEM frente a un perfil de irradiancia con eventos de sombreado parcial en las arquitecturas A, B y C - algoritmo simplificado. La Tabla D.1 muestra las cifras para cada uno de los valores mostrados en la gráfica.	36
A.1.	Curva de polarización ajustada mediante mínimos cuadrados de acuerdo a la electroquímica del electrolizador.	39
A.2.	Ajuste lineal de los últimos 4 puntos medidos de la curva de polarización para determinar el valor de R_{mem} .	40
A.3.	Ajuste de mínimos cuadrados para la respuesta a escalón de corriente desde los $3 A $ hasta los $4 A $.	40
B.1.	Algoritmo de control de corriente simplificado para la arquitectura C.	44
C.1.	Operación del algoritmo simplificado para el control de corriente en la arquitectura C con un perfil limpio de irradiancia.	46
C.2.	Operación del algoritmo simplificado para el control de corriente en la arquitectura C con un perfil con eventos de sombreado en sistema fotovoltaico.	47

Índice de Tablas

2.1.	Resumen de trabajos en integración PV-PEM según tipo de acoplamiento, modelo empleado y discusión sobre comportamiento dinámico.	7
3.1.	Especificaciones técnicas PEM.	12
3.2.	Parámetros panel usado en simulación	14
3.3.	Características arreglo de baterías Li-Ion para el sistema de almacenamiento de arquitectura PEM-PV-ESS	15
4.1.	Comparación entre la respuesta teórica y experimental para los escalones de corriente mostrados en la Figura 4.5.	23
4.2.	Parámetros del controlador PI para cada escenario de control definido. Estos se determinan mediante la técnica de posicionamiento de polos.	25
4.3.	Tabla resumen de energía utilizada para la generación de hidrógeno con las diferentes arquitecturas estudiadas, en donde el perfil 1 corresponde al perfil solar mostrado en la Figura 4.16a y el perfil 2 corresponde al perfil con eventos de sombreamiento mostrado en la Figura 4.16b.	35
A.1.	Parámetros calculados desde el ajuste de mínimos cuadrados para las respuestas a escalón medidas.	41
A.2.	Parámetros ajustados a la curva de polarización del electrolizador.	42
D.1.	Comparación de la producción de hidrógeno y energía consumida para distintos niveles de modelado dinámico del PEM, en donde el perfil 1 corresponde al perfil solar mostrado en la Figura 4.16a y el perfil 2 corresponde al perfil con eventos de sombreamiento mostrado en la Figura 4.16b.	49

Nomenclatura

PEM	: <i>Proton-exchange membrane</i>
PV	: Fotovoltaico
DC	: Corriente continua
ESS	: <i>Energy storage system</i>
Li-Ion	: Tecnología Ión-Litio
SOC	: Estado de carga
PID/PI	: Control Proporcional-Integral-Derivativo / Proporcional-Integral
V_{rev}	: Tensión reversible
η_{act}	: Sobretensión de activación
τ_{act}	: Tiempo característico de la sobretensión de activación
η_{ohm}	: Sobretensión óhmica
η_{diff}	: Sobretensión de difusión
C_{dl}	: Capacitancia de doble capa
R_{mem}	: Resistencia de la membrana del PEM
j_{cell}	: Densidad de corriente en el electrolizador
$j_{0,k}$	: Densidad de corriente de activación referida al electrodo k
j_{lim}	: Densidad de corriente límite (difusión)
V_{bat}	: Tensión en terminales de batería
L_{buck}	: Filtro inductivo del convertidor buck
R	: Constante de los gases ideales: 8,3145[J/mol · K]
T	: Temperatura en Kelvin
F	: Constante de Faraday: 96485[C/mol]
β	: Factor de transferencia de carga
D	: Ciclo de trabajo

Resumen

El hidrógeno verde se proyecta como un vector energético fundamental para la transición hacia sistemas eléctricos sostenibles, destacando la electrólisis mediante membranas de intercambio protónico (PEM) por su alta densidad de corriente, rápida respuesta dinámica y capacidad de operar bajo condiciones variables. No obstante, la integración eficiente de electrolizadores PEM con sistemas fotovoltaicos (PV) requiere considerar las dinámicas electroquímicas internas que no son capturadas en modelos estáticos tradicionales, especialmente bajo condiciones transitorias.

En este trabajo se desarrolla un modelo dinámico de un electrolizador PEM a partir de parámetros identificados experimentalmente mediante ensayos de escalón de corriente y ajustes por mínimos cuadrados. Dicho modelo incorpora la tensión reversible, las sobretensiones de activación, óhmica y de difusión, junto con los efectos de la capacitancia de doble capa. El modelo fue implementado en un entorno de simulación PV-PEM-ESS desarrollado en PLECS, lo que permitió evaluar el impacto de utilizar representaciones dinámicas frente a modelos estáticos en el diseño y desempeño de controladores PI.

Se analizaron tres escenarios de control, diferenciados por el tipo de modelo considerado en la sintonización y por la estrategia de retroalimentación de corriente, además de cuatro arquitecturas de conexión PV-PEM extraídas del estado del arte. Los resultados muestran que el uso de modelos dinámicos permite capturar fenómenos transitorios relevantes y mejorar la robustez del control, aunque en condiciones de alta densidad de corriente los modelos estáticos presentan un comportamiento equivalente. Asimismo, se observó que el método de retroalimentación de corriente es más determinante para el desempeño del sistema que el nivel de complejidad del modelo.

Esta memoria contribuye a delimitar las condiciones bajo las cuales es necesario emplear modelos dinámicos en electrolizadores PEM, estableciendo una metodología práctica de validación experimental y aportando lineamientos para la implementación futura de controladores avanzados y observadores de corriente en arquitecturas PV-PEM-ESS.

Capítulo 1

Introducción

La transición energética global ha impulsado el desarrollo de tecnologías que permitan descarbonizar sectores productivos intensivos en emisiones y aumentar la penetración de energías renovables en la matriz eléctrica. En este contexto, el hidrógeno verde obtenido a partir de electrólisis del agua usando electricidad renovable se ha consolidado como un vector energético estratégico para el almacenamiento de energía, la movilidad sostenible y, especialmente, la descarbonización de industrias difíciles de electrificar como la siderurgia, el transporte marítimo o la producción de fertilizantes [1-6].

Dentro de las tecnologías de electrólisis, los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM por sus siglas en inglés) destacan por su alta densidad de corriente, su respuesta dinámica rápida y su capacidad de operar con carga variable, lo que los hace particularmente adecuados para ser alimentados por fuentes solares fotovoltaicas [7,8]. Esta compatibilidad ha motivado una creciente exploración de arquitecturas de conexión entre sistemas PV y celdas PEM, tanto para aplicaciones aisladas como para soluciones de respaldo en sistemas eléctricos con alta penetración renovable [9,10].

A pesar de los avances recientes en modelamiento y control de sistemas PV-PEM, persisten vacíos en la literatura respecto a la representación precisa de los fenómenos dinámicos asociados a la activación, acumulación de carga y transporte de masa en las celdas, especialmente bajo condiciones transitorias y perfiles de operación variables [8,11]. La obtención y ajuste experimental de los parámetros que gobiernan estos fenómenos es fundamental para la validación y aplicación de modelos que permitan predecir el desempeño real de los sistemas y optimizar su diseño y operación [9,12].

No obstante, persiste una falta de consenso en la literatura respecto a los límites de aplicabilidad del modelo estático frente al dinámico, particularmente en su capacidad para representar con fidelidad el desempeño energético y la eficiencia del proceso de electrólisis. Esta brecha plantea la necesidad de realizar un análisis comparativo del impacto que tiene el nivel de modelado del electrolizador (estático vs. dinámico) en el diseño y desempeño de estrategias de control, especialmente bajo condiciones de operación no estacionarias e intermitencia solar propias de sistemas PV-PEM.

1.1. Objetivo general y específicos

En el diseño de la arquitectura de conexión PV-PEM propuesta por Sánchez-Squella et al. en [13], se evidencia la existencia de dinámicas presentes en el electrolizador que no fueron consideradas en el control del convertidor elevador-reductor. Por tanto, este trabajo de memoria es un complemento a la investigación previamente mencionada.

El objetivo general de esta memoria es modelar las dinámicas de una *proton-exchange membrane* y diseñar controladores para la optimización de generación de hidrógeno mediante electrólisis.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar y estudiar modelos dinámicos para celdas PEM.
- Estudio de protocolos para ensayos en PEM para la obtención de parámetros de uno de los modelos estudiados.
- Realizar pruebas experimentales en un PEM comercial utilizado como objeto de estudio.
- Integrar modelo dinámico en topología de convertidor de potencia parcial para la simulación del comportamiento de la celda PEM.
- Implementar un lazo de control para la producción controlada de hidrógeno considerando las dinámicas de la celda y comparar respecto a un modelo estático.

Capítulo 2

Estado del Arte

Para el modelamiento de electrolizadores PEM, en la literatura se identifican cuatro componentes principales que describen su comportamiento eléctrico: tensión reversible, sobretensión de activación, pérdidas óhmicas y sobretensión de difusión. Estas son modeladas mediante diversas aproximaciones analíticas y empíricas [8,9,12,14–16].

La tensión reversible modela el potencial termodinámico necesario para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, y se determina a partir de la ecuación de Nernst, incluyendo correcciones por temperatura y presión parciales de los gases. La sobretensión de activación, asociada a las barreras cinéticas de las reacciones electroquímicas en los electrodos, se modela frecuentemente mediante la ecuación de Butler–Volmer o su simplificación logarítmica tipo Tafel [17]. Las pérdidas óhmicas representan la caída de tensión debido a la resistencia al transporte iónico en la membrana y la conducción electrónica en los electrodos, y son modeladas como un elemento resistivo equivalente. Finalmente, la sobretensión por difusión se relaciona con la acumulación de productos de reacción o deficiencia de reactantes en los electrodos, y se vuelve significativa en condiciones de alta densidad de corriente, siendo modelada comúnmente mediante expresiones logarítmicas que consideran la corriente límite [8].

Awasthi et al. [15] desarrolla un modelo dinámico del electrolizador PEM en un entorno de simulación, estructurado en cuatro subsistemas: ánodo, cátodo, membrana y cálculo de tensión reversible. A partir de balances molares y las ecuaciones de Nernst y Butler–Volmer, el modelo estima la tensión de celda considerando sobretensiones de activación y óhmica, además del transporte de agua por difusión, presión y arrastre electro-osmótico. Su principal aporte radica en ofrecer una representación analítica capaz de predecir con buena precisión los datos experimentales disponibles.

García-Valverde et al. [16] proponen un modelo de electrolizador PEM orientado a la estimación de la producción de hidrógeno, compuesto por tres submodelos: electroquímico, de generación de H_2 y térmico. En su estudio se valida experimentalmente cada submodelo, alcanzando alta fidelidad en condiciones estacionarias. Aunque el modelo electroquímico no representa las dinámicas asociadas a los fenómenos de activación, su principal aporte radica en la representación transitoria del intercambio de masa dentro de la celda, permitiendo capturar la influencia del transporte de gases y del agua en la producción instantánea de hidrógeno.

Wang et al. [9] propone un modelo integral orientado al control para un electrolizador

PEM, que considera explícitamente el efecto de la capacitancia de doble capa a través de un modelo equivalente multi-etapa. El trabajo combina espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y ajuste por constantes de tiempo para obtener una representación precisa de las respuestas dinámicas en los distintos regímenes de operación —arranque, electrólisis y apagado—, acoplándolas además con submodelos térmicos y de transporte de masa. Este enfoque permite simular la interacción electro-térmica del sistema y evaluar estrategias de control de temperatura mediante PID difuso.

A diferencia de los modelos híbridos o empíricos basados en identificación indirecta, Hernández-Gómez et al. [12] propone una metodología de carácter experimental-analítico para determinar los parámetros electroquímicos de un electrolizador PEM de baja temperatura, a partir de mediciones estacionarias y dinámicas de corriente-voltaje. Su enfoque combina las ecuaciones fundamentales de Nernst y Butler-Volmer con técnicas de ajuste por mínimos cuadrados no lineales, permitiendo estimar con precisión el potencial reversible, la resistencia de membrana y las sobrepotenciales de activación y concentración. Este procedimiento, ampliamente adoptado para la validación de modelos dinámicos de PEM, ofrece una identificación física directa y reproducible, en contraste con los métodos de tipo digital-twin de Zhao et al. [18], basados en datos sintéticos obtenidos de simulaciones multi-físicas. Por esta razón, en la presente memoria se privilegia un enfoque experimentalmente parametrizado, orientado a obtener un modelo dinámico que refleje el comportamiento real del electrolizador bajo condiciones transitorias de operación.

Los modelos de electrolizador PEM revisados, permiten comprender en detalle las interacciones electroquímicas que determinan la respuesta del electrolizador PEM frente a variaciones de corriente y tensión, lo que constituye la base necesaria para su integración con fuentes de energía renovables. En condiciones reales de operación, la potencia eléctrica que alimenta al electrolizador no es constante, sino que presenta fluctuaciones rápidas asociadas a la variabilidad de la irradiancia solar y de la temperatura de los módulos fotovoltaicos. Estas variaciones exigen que el modelo del PEM capture adecuadamente su comportamiento transitorio, con el fin de diseñar estrategias de control capaces de mantener una operación eficiente y segura.

El acoplamiento entre sistemas fotovoltaicos y electrolizadores PEM surge entonces como una solución directa para la producción descentralizada de hidrógeno verde, especialmente en aplicaciones distribuidas o aisladas de red [13,19]. Adi et al. en [19], identifica y clasifica las topologías de conexión PV-PEM en tres grandes grupos: acoplamiento directo, acoplamiento mediante convertidores DC-DC, y acoplamiento con almacenamiento intermedio en un bus DC común. Sanchez-Squella et al. en [13] propone además una cuarta arquitectura híbrida, que combina las ventajas del bus DC común con la simplicidad del acoplamiento directo, inspirada en la lógica de control de los convertidores de potencia parcial. Esta configuración busca mejorar la eficiencia energética y reducir las pérdidas de conversión, manteniendo al mismo tiempo la flexibilidad operativa frente a las variaciones de potencia provenientes del sistema fotovoltaico.

En el acoplamiento directo mostrado por Garcia-Valverde et al. en [20], los paneles solares se conectan directamente al stack del electrolizador, lo que simplifica el sistema y elimina pérdidas asociadas a la conversión de potencia. No obstante, esta configuración impone una coincidencia estricta entre los perfiles de operación de la fuente y la carga. Ursúa et al. [5] indican que esta estrategia solo es viable bajo condiciones muy controladas, debido a la alta sensibilidad del punto de operación frente a variaciones de irradiancia.

Los sistemas con bus DC intermedio y almacenamiento, como baterías o supercondensadores, los cuales permiten desacoplar temporalmente la generación y el consumo, mejorando la estabilidad frente a variaciones solares o eventos de carga. Este enfoque ha sido aplicado en soluciones aisladas o microrredes. En este contexto, Sánchez-Squella et al. [13] proponen una arquitectura de conversión DC-DC para alimentar un electrolizador PEM a partir de generación fotovoltaica y respaldo con baterías (Figura 2.1c), operando en un entorno *off-grid*. La topología incorpora un convertidor bidireccional que gestiona el flujo energético entre los paneles solares, el banco de baterías y el electrolizador, mediante un control jerárquico de tres niveles que estabiliza la tensión del bus DC y permite una operación continua ante variaciones de irradiancia. El estudio hecho en un entorno de simulación considera un modelo estacionario del electrolizador para validar el funcionamiento del sistema. En el presente trabajo, se adopta esta topología junto a otras existentes en el estado del arte [19] para un análisis realizado en un entorno de simulación, integrando un modelo dinámico del electrolizador PEM, con el objetivo de evaluar su comportamiento transitorio frente a distintas condiciones operativas. La Figura 2.1 muestra las arquitecturas para la alimentación de un PEM consideradas para este trabajo.

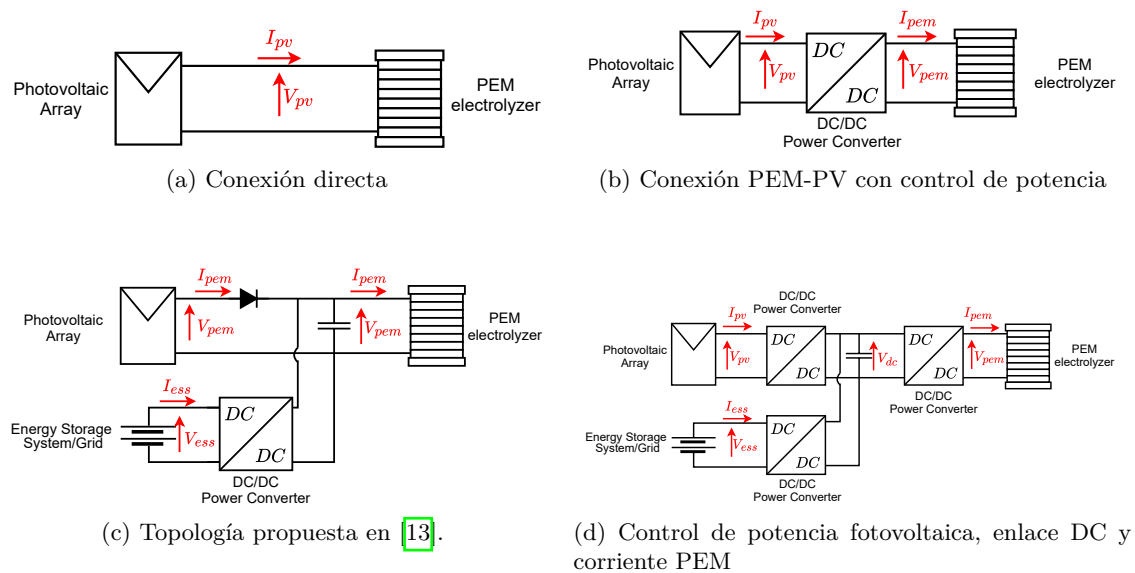


Figura 2.1: Arquitecturas para la alimentación de un PEM encontradas en el estado del arte.

Dado que tres de las arquitecturas mostradas anteriormente (Subfiguras 2.1b – 2.1d) requieren control activo de corriente para garantizar una operación eficiente y estable, resulta fundamental revisar las estrategias de control aplicadas en sistemas PEM. En este sentido, Mao et al. [21], en su artículo de revisión bibliográfica, destacan que las estrategias tradicionales basadas en controladores PID han sido ampliamente validadas en aplicaciones prácticas, demostrando una elevada confiabilidad y estabilidad operativa en sistemas de pilas de combustible y electrolizadores PEM. Además, los autores señalan que la investigación reciente se ha enfocado en perfeccionar estas estrategias de control con el objetivo de optimizar aún más el rendimiento, la eficiencia y la vida útil de los dispositivos electroquímicos.

Para situar el enfoque adoptado en este trabajo respecto al estado del arte, en la Tabla 2.1 se resume una selección de publicaciones recientes sobre integración PV-PEM. Se destaca el tipo de modelo utilizado y si los autores abordan las diferencias entre enfoques estáticos y dinámicos.

Tabla 2.1: Resumen de trabajos en integración PV-PEM según tipo de acoplamiento, modelo empleado y discusión sobre comportamiento dinámico.

Referencia	Acoplamiento	Modelo PEM	Conclusión
Awasthi et al. [15]	—	Dinámico	Demuestra que el modelo dinámico predice mejor los transitorios; las diferencias son mínimas en régimen estacionario.
Gorgun [22]	Directo	Dinámico	Muestra que el modelo estático es insuficiente ante fluctuaciones rápidas y control en tiempo real.
Ismail et al. [23]	Directo	Estático	No compara modelos; usa uno estático para dimensionar el acoplamiento PV-PEM.
Yodwong et al. [24]	DC-DC	Dinámico	Usa modelo dinámico para control avanzado, aunque no realiza comparación cuantitativa con el estático.
Yousri et al. [10]	DC-DC	Dinámico	Compara ambos enfoques y demuestra que el dinámico mejora la predicción transitoria y la sintonización de controladores.
Liu et al. [11]	Bus DC común	Dinámico	Modelo multifísico validado experimentalmente; destaca la importancia de representar la dinámica para integración con PV.
García-Valverde et al. [20]	Directo	Estático	Usa curvas de polarización para análisis energético; no aborda diferencias entre modelos.
Atlam et al. [25]	Directo	Estático	Acoplamiento directo sin modelado dinámico; no discute efectos transitorios.
Sánchez-Squella et al. [13]	Híbrido	Estático	La validación experimental evidencia que las dinámicas de tensión son relevantes para control de potencia.

El análisis del estado del arte evidencia un consenso general en la literatura respecto a la superioridad del modelo dinámico para representar adecuadamente las características transitorias de los PEM, particularmente en aplicaciones donde se requiere diseño y análisis de controladores. Esta preferencia se basa en la capacidad del modelo dinámico para capturar fenómenos clave como la acumulación de carga en la doble capa, las barreras cinéticas de activación y las pérdidas por difusión, todos los cuales influyen en la respuesta del sistema frente a variaciones rápidas en la corriente.

Ningún trabajo revisado aborda explícitamente el análisis de escenarios donde la dinámica de activación deja de ser dominante y, en consecuencia, la utilidad de emplear un modelo dinámico se vuelve marginal. Benmehel et al. [26] y Nguyen et al. [27] abordan críticamente la validez y las limitaciones de los modelos estáticos bajo condiciones reales de operación intermitente, mostrando que en estos contextos la frontera de aplicabilidad entre los enfoques estático y dinámico aún no está clara y debe ser explorada experimentalmente. Así, la literatura actual coincide en que la caracterización dinámica y la validación experimental son esenciales para determinar en qué circunstancias los resultados obtenidos con modelos simplificados pueden conducir a errores significativos en el diseño y operación en sistemas de generación PEM.

Frente a estas limitaciones, esta memoria propone modelar dinámicamente una celda PEM a partir de parámetros obtenidos experimentalmente y evaluar su impacto en el diseño de controladores PI y rendimiento en generación de hidrógeno bajo distintos escenarios. El enfoque incluye la implementación de lazos de control con distintas estrategias de sintonización y retroalimentación de corriente, comparando el rendimiento del sistema frente al uso de un modelo estático. De esta manera, se busca aportar evidencia concreta

sobre las limitaciones y alcances prácticos del modelado dinámico en electrolizadores PEM conectados a sistemas fotovoltaicos.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se describe el enfoque metodológico adoptado para el modelado, caracterización y control de un PEM, así como su integración dentro de una arquitectura de simulación compuesta por fuentes PV y un sistema de almacenamiento de energía (ESS). La metodología se divide en tres etapas principales:

- (i) Ensayos experimentales en PEM.
- (ii) Caracterización y modelamiento de los elementos que componen el entorno de simulación.
- (iii) Evaluación y comparación del desempeño de diferentes arquitecturas, los cuales consideran variantes tanto en el modelo del electrolizador como el perfil de irradiancia del sistema PV.

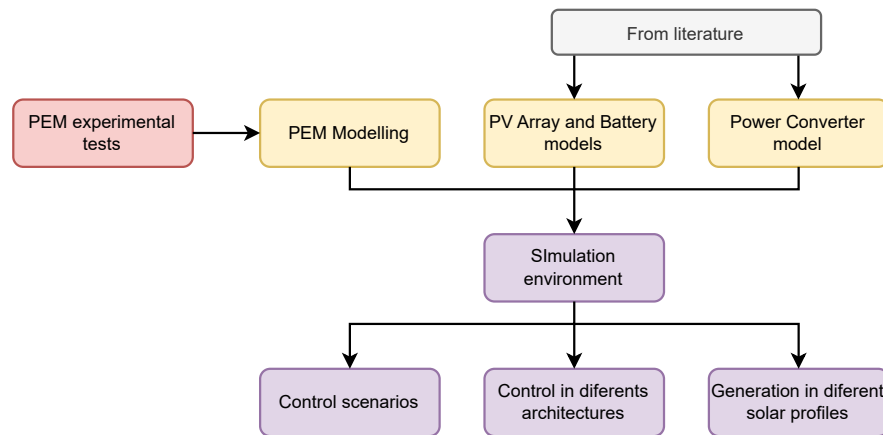


Figura 3.1: Diagrama de flujo metodología

3.1. Modelamiento PEM

Para la caracterización del electrolizador, el primer paso fundamental es determinar experimentalmente la curva de polarización, que relaciona la tensión y la corriente del dispositivo en estado estacionario. Esta curva permite identificar y ajustar los parámetros

asociados a los distintos fenómenos electroquímicos que afectan el comportamiento del electrolizador, los cuales se manifiestan principalmente como distintas sobretensiones. En este sentido, Marefatjouikilevae et al. [8] recopilan en la literatura diversas ecuaciones (3.1 – 3.5) para modelar cada una de las componentes eléctricas involucradas, facilitando así una caracterización detallada y fundamentada de los procesos estacionarios presentes en el electrolizador PEM.

$$V_{pem} = V_{rev} + \eta_{ohm} + \eta_{act}^{an} + \eta_{act}^{ca} + \eta_{diff} \quad (3.1)$$

$$V_{rev} = 1,229 - 0,9 \cdot 10^{-3}(T - 298) \quad (3.2)$$

$$\eta_{ohm} = I_{pem} R_{mem} \quad (3.3)$$

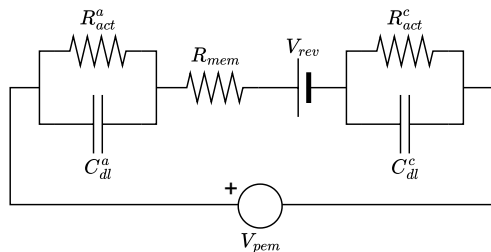
$$\eta_{act}^k = \frac{RT}{F} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{j_{cell}}{j_{0,k}} \right) \quad (3.4)$$

$$\eta_{diff} = -\frac{RT}{2\beta F} \ln \left(1 - \frac{j_{cell}}{j_{lim}} \right) \quad (3.5)$$

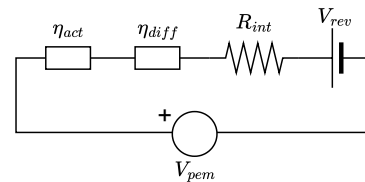
De todas las sobretensiones que intervienen en el comportamiento eléctrico del electrolizador, η_{act}^k exhibe una respuesta dinámica apreciable ante cambios rápidos de corriente. Esto se debe a la presencia de fenómenos capacitivos en la doble capa electroquímica, los cuales introducen una constante de tiempo que ralentiza la respuesta del sistema y están gobernados por la ecuación (3.6). El modelamiento dinámico del electrolizador considera el circuito equivalente mostrado en la Figura 3.2a

$$\frac{d\eta_{act}^k}{dt} C_{dl} + \frac{\eta_{act}^k}{R_{act}^k} = I_{pem} \quad (3.6)$$

De la ecuación (3.6) se definirá τ_{act}^k como el tiempo característico de las dinámicas del ánodo (τ_{act}^a) y cátodo (τ_{act}^c), por motivos de simplificación del modelo se considerará que las dinámicas del cátodo son 10 veces más rápidas que las del ánodo [12].



(a) Circuito de modelo dinámico equivalente simple de una PEM.



(b) Circuito de modelo estático PEM.

Figura 3.2: Circuitos equivalentes considerados para el modelamiento del electrolizador.

Se considera una densidad de corriente límite para los efectos de difusión en el electrolizador de $j_{lim} = 1,5 \text{ A/cm}^2$ [28]. Dado que la densidad de corriente nominal del PEM utilizado en este experimento es de 700 mA/cm^2 (véase Tabla 3.1), los fenómenos de difusión pueden despreciarse para corrientes iguales o inferiores al valor nominal del dispositivo. En consecuencia, se asume $\eta_{diff} = 0$ [8, 12].

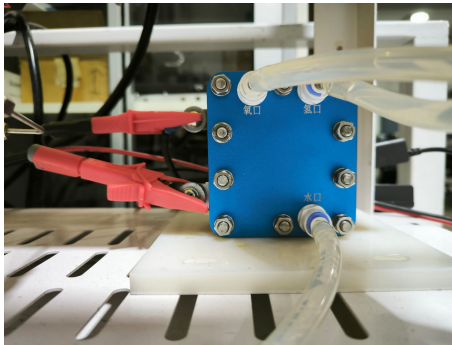
La generación de hidrógeno es definida en la literatura como una función de la corriente de la membrana [8,9,13,14,29], tal como se indica en la ecuación (3.7). En donde N_{mem} corresponde a la cantidad de membranas que constituye el stack y η_f corresponde a la eficiencia de Faraday, comúnmente asumida como unitaria.

$$\dot{H}_2 = \frac{I_{pem} \cdot N_{mem}}{2F} \eta_f [mol/s] \quad (3.7)$$

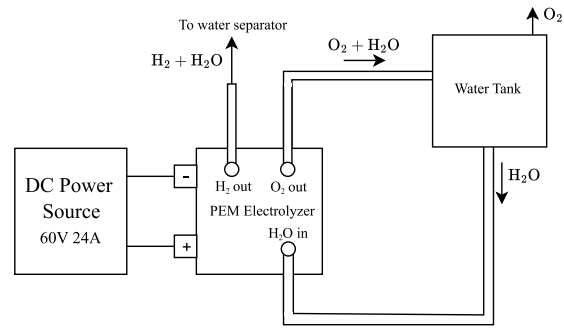
3.1.1. Procedimiento experimental

La interfaz de pruebas para determinar los parámetros dinámicos del electrolizador estudiado se muestra en la Figura 3.3b. Se consideran los siguientes implementos para el montaje experimental en laboratorio:

1. PEM comercial cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.1
2. Fuente de corriente controlada BK Precision XLN6024.
3. Osciloscopio Keysight InfiniiVision DSOX2014A.
4. Sonda diferencial Cal Test Electronics CT2593.
5. Sonda de corriente AEMC SL261
6. Depósito de agua desmineralizada ($\sigma \leq 5 \mu S/cm$).



(a) Montaje en laboratorio.



(b) Diagrama de conexiones.

Figura 3.3: Montaje experimental y diagrama esquemático.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas PEM.

Datasheet PEM-5H-1500	
Corriente [A]	40
Densidad de corriente [mA/cm ²]	700
Tensión [V]	8.5–12.5
Potencia [W]	340–500
Dimensiones del stack [mm ³]	127 · 127 · 52
Cantidad de membranas [–]	6
Generacion de hidrogeno [ml/min]	1500
Generacion de oxigeno [ml/min]	750
Pureza hidrogeno [%]	>99.999
Temperatura del agua circulante [°C]	0–80
Caudal nominal [ml/min]	<320
Conductividad agua [μS/cm]	<5

El ensayo realizado para caracterizar la curva estática y las dinámicas del electrolizador consiste en aplicar escalones de corriente de 1, [A], partiendo desde 0 hasta alcanzar la corriente máxima permitida por el electrolizador o por la fuente de poder (la que sature primero), registrando la respuesta dinámica de la tensión junto a sus valores en estado estacionario.

Con los datos obtenidos, se construirán dos aproximaciones de modelado. La primera consiste en un modelo completamente empírico, en el que se utilizará el método de mínimos cuadrados para ajustar directamente la respuesta transitoria de tensión ante los escalones de corriente. El ajuste se realizará mediante la aplicación *Curve Fitter* de MATLAB, considerando la siguiente expresión para la evolución temporal del voltaje:

$$V_{pem}(t) = V_{pem}(t = 0^-) + \mu(t)\Delta I_{pem} \left(R_{mem} + \sum_k \frac{\tau_{act}^k}{C_{dl}} (1 - e^{-t/\tau_{act}^k}) \right) \quad (3.8)$$

En este modelo, los parámetros dinámicos como R_{mem} , τ_{act}^k y C_{dl} no necesariamente tendrán una interpretación físico-química directa, sino que serán seleccionados de acuerdo con el mejor ajuste numérico. De forma complementaria, se realizará también un ajuste por mínimos cuadrados sobre la curva estática para verificar coherencia en los parámetros obtenidos, particularmente en el valor de R_{mem} , que puede extraerse desde la pendiente de la curva de polarización en la región de alta corriente, donde el efecto de activación es despreciable, como se indica en [12].

En paralelo, se desarrollará un segundo modelo del electrolizador basado en parámetros físicos determinados experimentalmente o tomados desde la literatura. La resistencia de membrana R_{mem} será obtenida, al igual que en el modelo anterior, desde la pendiente de la curva de polarización en régimen estacionario. El potencial reversible V_{rev} y la densidad de corriente límite j_{lim} se considerarán a partir de valores reportados en literatura especializada [8, 28]. Por otro lado, la densidad de corriente de intercambio $j_{0,k}$ será estimada mediante ajuste de la curva de polarización considerando el modelo estático propuesto en la ecuación (3.1). Finalmente, la capacitancia de doble capa C_{dl} será calculada a partir de una medición experimental basada en la interrupción abrupta de la corriente, técnica descrita por Wang et al. en [9], y formalizada por la expresión de cálculo incluida

en la ecuación (3.9). Este segundo modelo tendrá la ventaja de estar fundamentado en parámetros con significado físico, lo que lo hace más adecuado para extrapolaciones, a diferencia del primer modelo, que si bien ofrece un buen ajuste a los datos, no permite una interpretación directa de sus constantes.

$$C_{dl} = \frac{\Delta I}{\frac{dV_{pem}}{dt}} \quad (3.9)$$

3.2. Entorno de simulación

El entorno de simulación se desarrolla en *MATLAB-Simulink* con el complemento PLECS Blockset, en donde se integrará cada uno de los componentes de la interfaz de alimentación de la PEM, con sus respectivos controladores y actuadores.

3.2.1. PEM – Circuito equivalente simple

De acuerdo con lo descrito en la Sección 3.1, se empleará el circuito equivalente mostrado en la Figura 3.2a, en el cual los valores de $R_{act}^{a,c}$, $C_{dl}^{a,c}$, R_{mem} y V_{rev} son calculados siguiendo la metodología previamente detallada. De este modo, es posible modelar cada una de las sobretensiones descritas en la ecuación (3.1). La simulación considera el uso de $N_{pem,p}$ arreglos en paralelo compuestos por $N_{pem,s}$ electrolizadores en serie, los cuales serán definidos en cada uno de los escenarios de control.

3.2.2. Sistema Fotovoltaico

Para el modelamiento de un panel fotovoltaico, se utilizará el modelo de diodo único presentado por Gradella et al. en [30] (Figura 3.4). Los parámetros del panel a modelar se muestran en la Tabla 3.2.

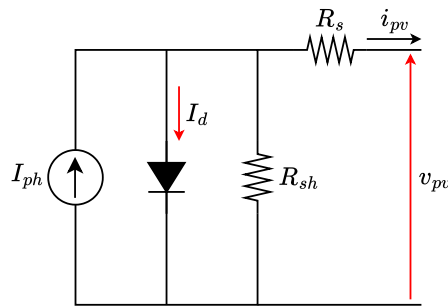


Figura 3.4: Modelo utilizado para representar el comportamiento del sistema fotovoltaico en simulación.

Para el análisis de las arquitecturas mostradas en las Figuras 2.1b y 2.1d, se implementa un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés maximum power point tracking) con el fin de regular la tensión en los terminales del generador fotovoltaico. Se adopta el método de Perturbar y Observar (P&O) [31–33],

Tabla 3.2: Parámetros panel usado en simulación

Parámetro	Valor
Paneles en serie	1
Paneles en paralelo	5
Potencia nominal [W]	543
Temperatura nominal de operación [°C]	25
Irradiancia nominal [W/m ²]	1000
Tensión de circuito abierto [V]	49.60
Corriente de cortocircuito [A]	11.53
Resistencia serie equivalente [Ω]	0.25
Resistencia paralelo equivalente [Ω]	497.74
Constante de idealidad del diodo [–]	0.5
Coef. temp. tensión circ. abierto [V/K]	-0.12
Coef. temp. corriente cortocircuito [A/K]	0.0046

dada su simplicidad, bajo costo computacional y amplia utilización en aplicaciones de control PV.

En el caso de la arquitectura mostrada en la Figura 2.1c, se requiere un estimador de máxima potencia del sistema fotovoltaico para alimentar el algoritmo de control correspondiente, definido por la ecuación (3.10) [34].

$$P_{mpp} = G \cdot \frac{P_{mpp,sct}}{G_{sct}} \cdot N_s \cdot N_p (K_T \Delta T + 1) \quad (3.10)$$

3.2.3. Sistema de almacenamiento

En las arquitecturas que incorporan sistema de almacenamiento de energía, se emplea un sistema basado en baterías Li-Ion, modeladas según la formulación propuesta por Chen et al. [35], ampliamente utilizada en simulaciones por su equilibrio entre simplicidad y capacidad para reproducir la dinámica de tensión. Este modelo permite además estimar el estado de carga (SOC) de la batería a partir de variables eléctricas, parámetro relevante para la implementación de estrategias de gestión energética en sistemas PV-PEM. Los parámetros utilizados en la simulación se presentan en la Tabla 3.3, mientras que la Figura 3.5 ilustra el esquema eléctrico equivalente del modelo adoptado.

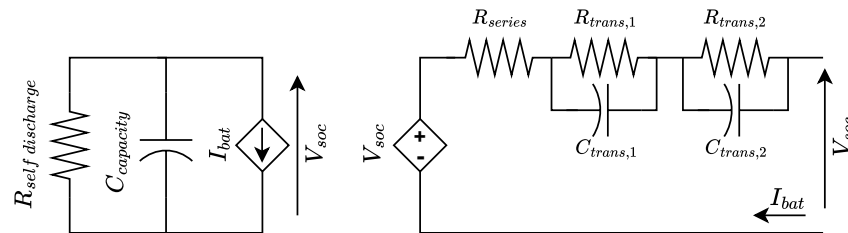


Figura 3.5: Modelo utilizado para representar el sistema de almacenamiento de energía en simulación.

Tabla 3.3: Características arreglo de baterías Li-Ion para el sistema de almacenamiento de arquitectura PEM-PV-ESS

Parámetro	Valor
Número de celdas en serie	15
Número de celdas en paralelo	5
SOC _{inicial} [%]	55
Capacidad [Ah]	105

3.2.4. Convertidor de potencia

La topología escogida para la simulación corresponde a un convertidor de potencia basado en una topología buck bidireccional (Figura 3.6) debido a la simplicidad que este tiene para su control. Es de suma importancia mencionar que la topología escogida debe tener la capacidad de operar con corriente directa e inversa, puesto que este se encargará de la carga y descarga del sistema de almacenamiento. El control del convertidor, dependiendo del contexto, estará basado en un lazo de control PI o la consigna de ciclo de trabajo determinada por el algoritmo de MPPT [32,33]. En este trabajo, se considerará que $L_{buck} = 10[mH]$, $R_{buck} = 10[m\Omega]$ y $C = 1,5[mF]$.

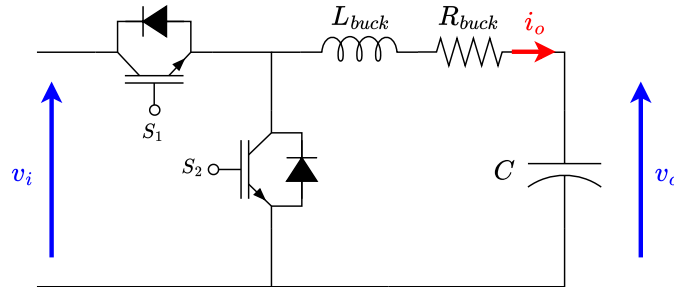


Figura 3.6: Convertidor buck bidireccional.

3.3. Definición de escenarios de prueba

Para evaluar el desempeño del sistema PV-PEM se definen distintos escenarios de prueba que combinan arquitecturas de alimentación, esquemas de control y perfiles de generación solar. Con ello es posible analizar el efecto de la topología de conexión, el modelo utilizado en la sintonización del control y la variabilidad de la irradiancia sobre la producción de hidrógeno y la dinámica del electrolizador.

3.3.1. Escenarios de control

Se comparará el desempeño del lazo de control de corriente del electrolizador PEM considerando su representación mediante modelos estático y dinámico. Para ello, se definen tres escenarios de control (EdeC) que permiten evaluar el impacto del modelo utilizado en la sintonización del controlador PI, así como en el tipo de retroalimentación de corriente empleada.

Cada escenario se evalúa a distintos niveles de densidad de corriente, dado que la mag-

nidad de la sobretensión de activación —componente responsable de la dinámica del sistema— presenta una dependencia logarítmica respecto de la densidad de corriente (Ecuaciones 3.6 y 3.4). En consecuencia, a altos niveles de corriente la sobretensión óhmica, de naturaleza lineal, domina sobre la activación, reduciendo la influencia de las dinámicas electroquímicas en la tensión terminal. Esta relación justifica la aplicación de perturbaciones tipo escalón en diferentes puntos de operación, con el fin de analizar la variación de la respuesta transitoria y determinar en qué condiciones es significativa la incorporación del comportamiento dinámico en el diseño del control.

EdeC 1: Sintonización del controlador PI empleando un modelo estático del PEM, con retroalimentación de corriente mediante medición directa. La planta equivalente para la sintonización del PI se define como la función de transferencia del filtro RL del convertidor de potencia:

$$\frac{I_{pem}(s)}{D(s)} = \frac{V_{bat}}{sL_{buck} + R_{buck}} \quad (3.11)$$

EdeC 2: Sintonización del controlador PI empleando un modelo dinámico del PEM, con retroalimentación de corriente mediante medición directa. La planta equivalente para la sintonización del PI se define como la función de transferencia del filtro RL del convertidor de potencia y los componentes pasivos del modelo del electrolizador presentado en la Ecuación (3.1):

$$\frac{I_{pem}(s)}{D(s)} = \frac{V_{bat}}{sL_{buck} + R_{buck} + \frac{R_{act}^a}{sC_{dl}^a R_{act}^a + 1} + \frac{R_{act}^c}{sC_{dl}^c R_{act}^c + 1} + R_{ohm}} \quad (3.12)$$

EdeC 3: Sintonización del controlador PI empleando un modelo estático del PEM, con retroalimentación de corriente estimada mediante un observador basado en dicho modelo (Ecuación 3.1). La planta equivalente para la sintonización del PI se mantiene como en la Ecuación 3.11.

3.3.1.a. Sintonización controladores PI

La sintonización de los controladores PI se realizó mediante el método de posicionamiento de polos, con el fin de asegurar una respuesta rápida y estable del sistema. Este enfoque sigue la metodología propuesta por Elhawash et al. [36], aplicada al control de corriente de convertidores buck que alimentan electrolizadores PEM de alta corriente. Asimismo, la estructura de control adoptada es coherente con la arquitectura de doble lazo PI utilizada por Guo et al. [37], ampliamente validada en convertidores interleaved para producción de hidrógeno verde.

3.3.2. Arquitecturas de alimentación para el PEM

En esta subsección se describen las arquitecturas de alimentación seleccionadas para la simulación. Cada configuración representa un nivel distinto de complejidad en la interfaz entre el sistema fotovoltaico, el electrolizador PEM y el sistema de almacenamiento energético. Estas arquitecturas constituyen la base para comparar el comportamiento dinámico del sistema y analizar el impacto de cada esquema en la producción de hidrógeno y en el diseño del lazo de control de corriente.

Arq A: Conexión directa PV–PEM.

En esta configuración, la salida del generador fotovoltaico se conecta directamente a la entrada del electrolizador (Figura 2.1a). El PEM opera de manera completamente dependiente de las variaciones de tensión y corriente entregadas por el campo solar, por lo que la producción de hidrógeno queda sujeta directamente a las condiciones de irradiancia y temperatura. Para este escenario se considera $N_{pem,s} = 4$ y $N_{pem,p} = 2$.

Arq B: PV–PEM con convertidor DC–DC intermedio.

En este caso, se incorpora un convertidor CC–CC entre el generador fotovoltaico y el electrolizador (Figura 2.1b). El convertidor regula la tensión o corriente de operación del PEM mediante el algoritmo MPPT. Para este escenario se considera $N_{pem,s} = 6$ y $N_{pem,p} = 2$.

Arq C: PV–PEM–ESS con convertidor parcial.

La arquitectura mostrada en la Figura 2.1c emplea un único convertidor de potencia parcial que conecta tanto el generador fotovoltaico como una batería al electrolizador. Esta topología permite que la batería actúe como elemento de respaldo o amortiguación frente a variaciones rápidas de la irradiancia, optimizando el uso del convertidor. Para este escenario se considera $N_{pem,s} = 4$ y $N_{pem,p} = 2$. Se evaluarán dos controles de corriente, uno a corriente constante y uno basado en el esquema propuesto por Sánchez-Squella et al. [13], utilizando una versión simplificada adaptada a este trabajo (Anexo B).

Arq D: PV–PEM–ESS con convertidores dedicados.

En este escenario, cada subsistema dispone de su propio convertidor de potencia (Figura 2.1d). Esta configuración permite un control independiente de cada etapa, maximizando la flexibilidad operativa y habilitando estrategias avanzadas de gestión energética, aunque a costa de una mayor complejidad y costo de implementación. Para este escenario se considera $N_{pem,s} = 4$ y $N_{pem,p} = 2$. El enlace DC se controla mediante un esquema anidado de tensión y corriente sobre el condensador de acoplamiento; el controlador PI de corriente corresponde al obtenido en el EdeC1, mientras que el PI de tensión se sintoniza mediante el método de posicionamiento de polos.

3.3.3. Escenarios de generación PV

Con el objetivo de evaluar el desempeño de las arquitecturas de alimentación y los esquemas de control propuestos, se consideran distintos escenarios de generación fotovoltaica. Para ello, se emplea un perfil de irradiancia medido en la estación meteorológica Crucero (*Comuna de María Elena, Región de Antofagasta, Chile*) correspondiente a un día promedio de febrero de 2010, disponible en el Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile [38].

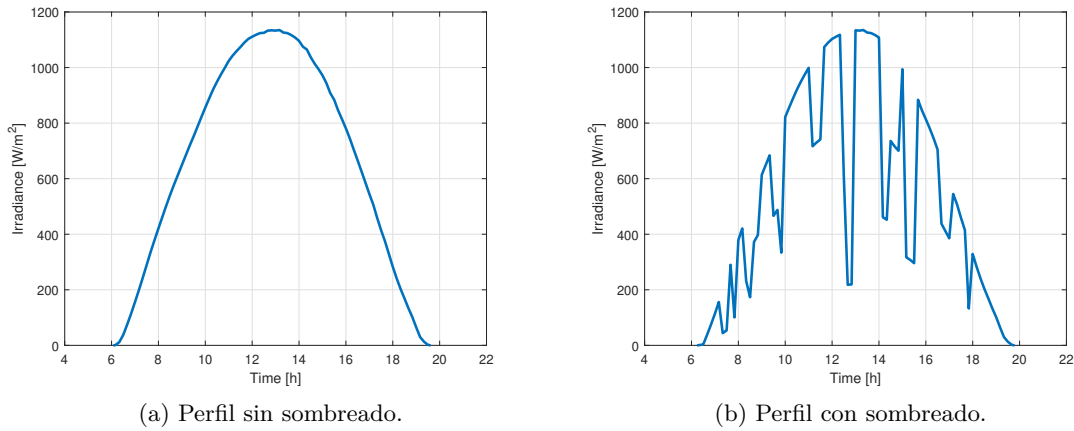


Figura 3.7: Perfiles de irradiancia global horizontal obtenidos desde la estación meteorológica Crucero.

El perfil de la Figura 3.7a representa un día promedio de enero en la estación meteorológica Crucero despejado sin perturbaciones, constituyendo el escenario de referencia para estimar la producción máxima de hidrógeno. En contraste, la Figura 3.7b incorpora eventos de sombreado esporádicos agregados de forma aleatoria, los cuales simulan la atenuación parcial de la irradiancia debida a nubes u obstáculos. Estos eventos introducen variaciones rápidas en la potencia disponible del campo fotovoltaico, lo que permite analizar la robustez de los algoritmos de control y el efecto de la intermitencia solar en la dinámica del electrolizador.

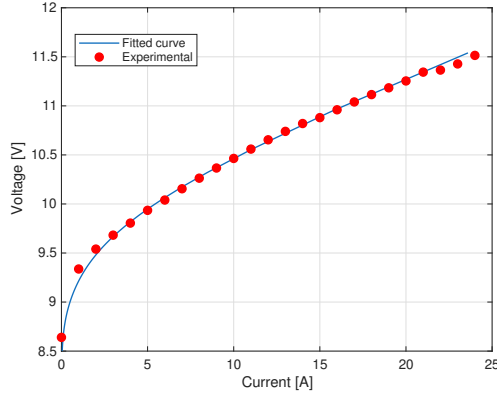
De esta manera, la comparación entre ambos perfiles posibilita cuantificar la sensibilidad del sistema frente a condiciones reales de operación, identificando el impacto del sombreado en la regulación de corriente del PEM.

Capítulo 4

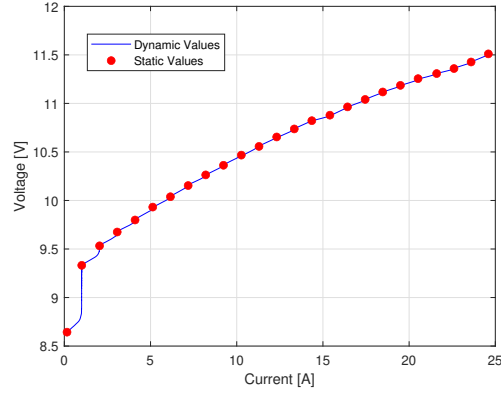
Desarrollo y Resultados

4.1. Parámetros modelo PEM

Contrastando la curva de polarización experimental con una teórica (Figura 4.1a) calculada de acuerdo a las ecuaciones 3.1-3.5, es notable un comportamiento similar entre ambas curvas, perdiendo exactitud a corrientes bajas, en donde se asume error burdo en la medición de V_{pem} a corriente nula. Se deja mayor detalle de supuestos en el Apéndice A.



(a) Curva de polarización con ajuste de mínimos cuadrados ($R^2 = 0,9408$).



(b) Curva de polarización dinámica considerando escalones de corriente de 1 A.

Figura 4.1: Curva de polarización electrolizador.

La pendiente de la curva de polarización del electrolizador da información sobre el valor de R_{mem} , tal como indica el autor de [12]. De esta forma, dicha resistencia tiene un valor de $57,4[m\Omega]$.

Las densidades de corriente de activación para el cátodo y ánodo se determinan con un ajuste de mínimos cuadrados a la curva de polarización del electrolizador mostrada en la Figura 4.1a respecto a la ecuación (3.1), despreciando el fenómeno de difusión, pues el nivel de corriente en el electrolizador es suficientemente pequeño como para despreciar dicho fenómeno. De esta manera se obtiene que $j_{0,a} = 15,3[\mu A/cm^2]$ y $j_{0,c} = 15,3[mA/cm^2]$, donde

existe un par de ordenes de magnitud entre ambas densidades de corriente, congruentes con lo descrito por Marangio et al. [29]. Esta metodología para obtener este parámetro es validada por Marefatjouikilevae et al. [8].

Mediante la ecuación (3.9) se determinó experimentalmente una capacitancia de doble capa del orden de $C_{dl} \approx 300$ mF. Los tiempos característicos de activación τ_{act} y las resistencias de activación R_{act} correspondientes se presentan en la Figura 4.2b. Sin embargo, dado que en la literatura no se dispone de una expresión explícita para el cálculo teórico de C_{dl} , no es posible validar directamente dicho valor ni, en consecuencia, los tiempos característicos de las dinámicas asociados respecto a ecuaciones empíricas reportadas en la literatura [39]. Aun así, resulta pertinente contrastar los valores de C_{dl} extrapolados a partir de los tiempos característicos medidos experimentalmente. La Figura 4.2a evidencia claramente la variabilidad de C_{dl} en función de la corriente. Cabe destacar que la capacitancia del ánodo ($C_{dl,c}$) en el rango de 1–12 [A] presenta valores cercanos a los estimados mediante la ecuación (3.9), lo que sugiere que el método de desenergización propuesto en [9] constituye una buena aproximación ($R^2 = 84\%$) para la estimación de la capacitancia de doble capa del electrolizador en el rango anteriormente mencionado.

La Figura 4.3 permite descomponer visualmente la contribución de cada una de las sobretensiones que conforman la tensión terminal del electrolizador V_{pem} . Se observa cómo, en el rango de operación completo hasta j_{lim} , la tensión reversible V_{rev} y la sobretensión óhmica η_{ohm} dominan la forma de la curva, mientras que la sobretensión de activación η_{act} se mantiene relativamente constante a partir de densidades de corriente mayores a los 500 [mA/cm²]. La sobretensión por difusión η_{diff} , por su parte, solo comienza a manifestarse de forma significativa en el entorno de $j_{lim} = 1,5$ A/cm². Esto se aprecia con mayor claridad en el subgrafico mostrado en la misma Figura 4.3, donde se amplifica el tramo final de la curva. En dicha figura se evidencia cómo η_{diff} presenta un comportamiento divergente, propio de su naturaleza logarítmica y de su relación directa con el fenómeno de agotamiento de reactantes. Este análisis respalda la decisión metodológica de despreciar el efecto de difusión en el ajuste de parámetros a baja corriente, y confirma que su inclusión solo es relevante en condiciones cercanas al límite de operación del dispositivo [8, 12, 16].

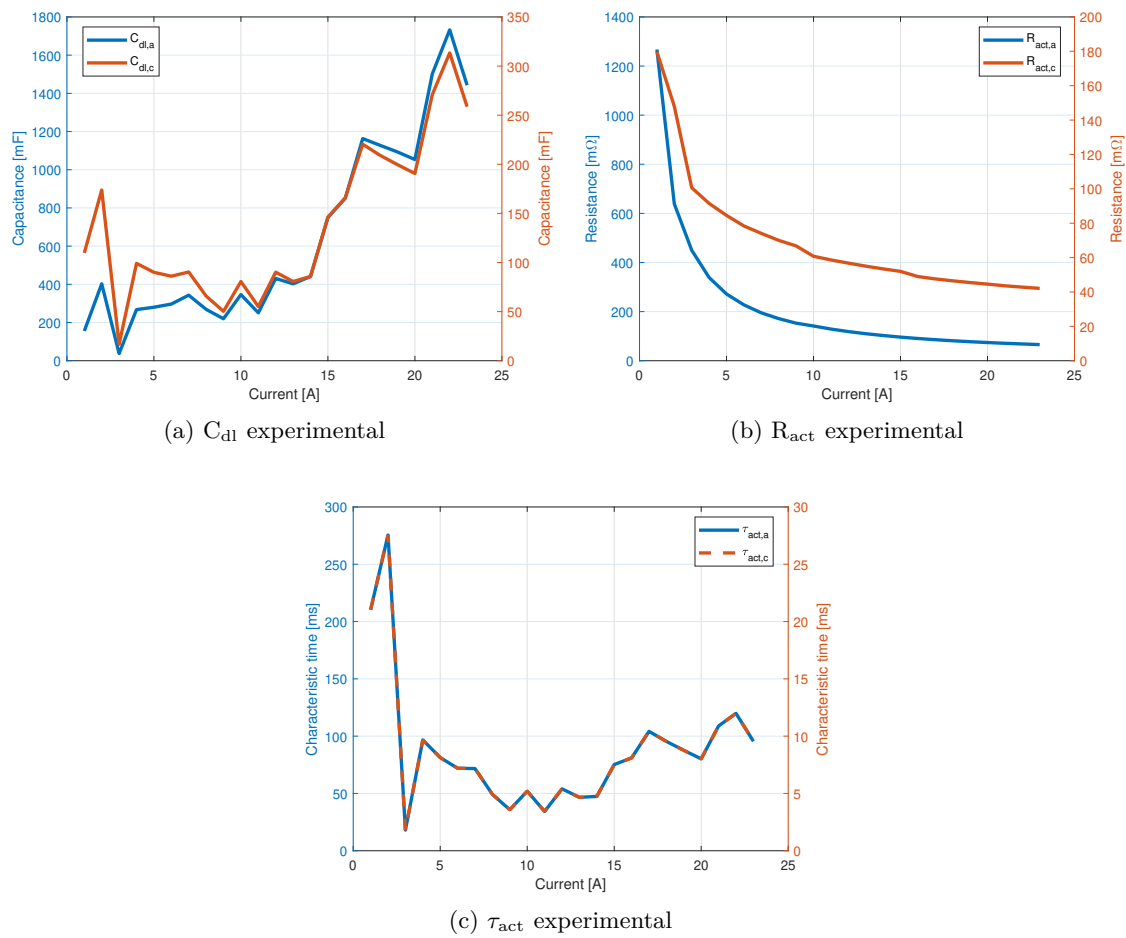


Figura 4.2: Resultados experimentales de los parámetros del electrolizador.

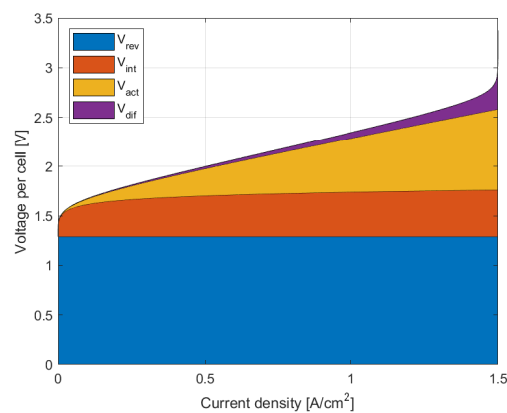


Figura 4.3: Componentes de la tensión total del electrolizador basado en parámetros físicos experimentales.

4.1.1. Validación modelo dinámico

Los parámetros del modelo presentados en la Figura 4.2 y en la Tabla A.2 conforman el modelo del PEM empleado como objeto de estudio en este trabajo. La validación se realiza comparando la respuesta dinámica del modelo frente a escalones de corriente de distinta magnitud, en condiciones diferentes a las utilizadas para la obtención de los parámetros. Validar el modelo para cada uno de los escalones empleados en el proceso de ajuste resultaría redundante, dado que en 12 ya se valida la metodología utilizada para la identificación de parámetros. No obstante, las Figuras 4.4 muestran la adecuada capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del electrolizador frente a distintos escalones unitarios de corriente, tanto en el régimen transitorio como estacionario.

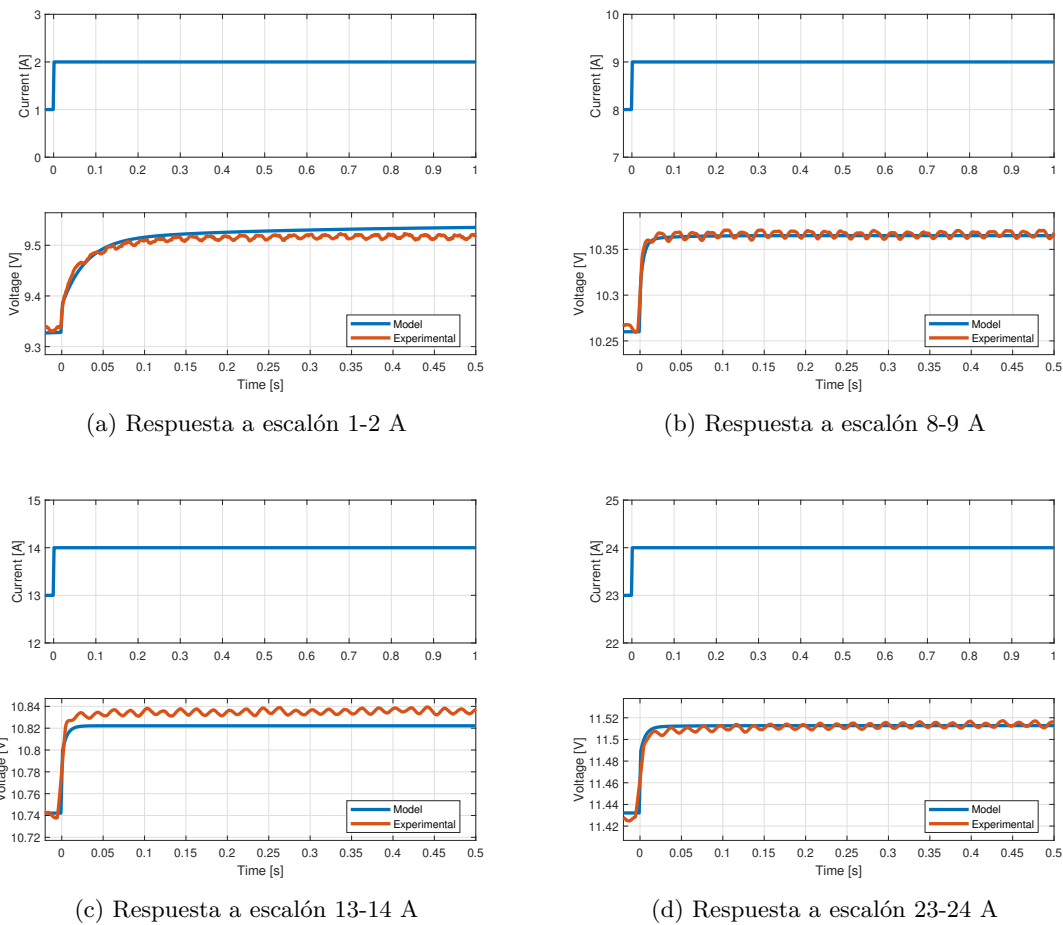
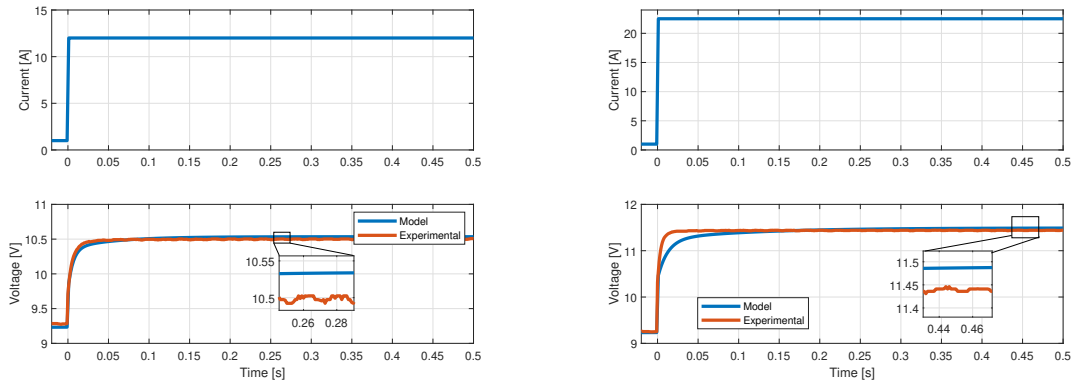


Figura 4.4: Comparación entre el modelo ajustado y la medición experimental del PEM frente a escalones unitarios de corriente en distintos rangos de operación.

Cabe mencionar que las discrepancias observadas en el estado estacionario entre el modelo y los resultados experimentales, mostradas en las subfiguras 4.4a y 4.4c, se deben principalmente a dos factores: (i) los parámetros del electrolizador fueron ajustados en función de la curva estática, lo que limita la precisión en condiciones dinámicas, y (ii) la temperatura de operación del PEM varió entre los distintos ensayos, ya que durante las mediciones no se dispuso de un sistema de regulación de la temperatura del agua.



(a) Tensión en el PEM ante un escalón de corriente de 1-12 A.

(b) Tensión en el PEM ante un escalón de corriente de 1-24 A.

Figura 4.5: Respuesta dinámica de la tensión del PEM frente a un escalón de corriente, comparando la medición experimental con el modelo calculado.

La Figura 4.5 muestra la comparación entre la respuesta dinámica del modelo propuesto y las mediciones experimentales del electrolizador PEM frente a dos escalones de corriente de distinta magnitud. En ambos casos, el modelo reproduce de manera satisfactoria la evolución temporal del voltaje en la celda, capturando tanto el régimen transitorio como el estacionario con un error reducido.

Para el escalón de 1–12 A (Figura 4.5a), se observa una alta concordancia entre el modelo y la medición experimental, con un error cuadrático medio (RMSE) de 57 mV y un error porcentual medio (MPE) de 0,51 %. El coeficiente de determinación obtenido es $R^2 = 0,8905$, lo que indica un buen ajuste de la curva simulada respecto de la experimental.

En el caso del escalón de 1–24 A (Figura 4.5b), el modelo mantiene una adecuada correspondencia en régimen estacionario, presentando un RMSE de 73 mV, un MPE de 0,40 % y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9415$. No obstante, se aprecia una ligera subestimación en la rapidez de la respuesta transitoria, atribuible a la simplificación de los parámetros dinámicos de activación.

Estos resultados confirman que el modelo dinámico propuesto es representativo del comportamiento experimental del electrolizador en un rango amplio de corriente, validando su aplicabilidad para análisis de control y simulaciones de operación bajo condiciones variables de irradiancia.

Tabla 4.1: Comparación entre la respuesta teórica y experimental para los escalones de corriente mostrados en la Figura 4.5.

Métrica	(a) 1–12 A	(b) 1–24 A
R^2 [%]	89.05	94.15
RMSE [mV]	57	73
MPE [%]	0.51	0.40

En la Figura 4.6 se presenta la comparación entre la respuesta experimental del electrolizador y dos modelos desarrollados: uno basado en parámetros físicos y otro ajustado mediante mínimos cuadrados. Se observa que el modelo ajustado presenta una mejor con-

cordancia global con la curva experimental, capturando con mayor precisión tanto el valor estacionario como la dinámica transitoria. No obstante, el modelo físico —aunque más conservador y con mayor amortiguamiento— reproduce adecuadamente el comportamiento cualitativo del sistema y respeta la estructura física del fenómeno, siendo más lento en las respuestas escalón, como se aprecia en los recuadros ampliados. A bajas corrientes, el modelo físico subestima la tensión debido a una representación limitada de las sobretensiones de activación, mientras que ambos modelos presentan un error sistemático leve en la zona de alta corriente, posiblemente asociado a fenómenos no modelados como efectos térmicos o saturación de transporte. Esta comparación evidencia que, si bien el modelo ajustado es útil para simulaciones operativas y control, el modelo físico entrega mayor robustez y la posibilidad de ser extrapolado a un rango de operación más amplio, teniendo validez hasta donde el efecto de difusión ya no sea despreciable (Figura 4.3) —cerca de $j \approx 0,4 - 0,5j_{lim}$ [40].

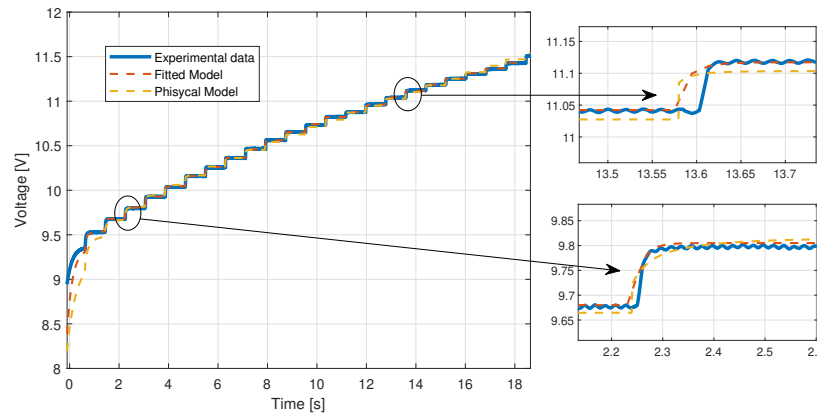


Figura 4.6: Comparación tensión dinámica experimental respecto a modelo desarrollado por ajuste y por variables físicas.

4.2. Evaluación de escenarios de control

Dado que en el modelo dinámico del electrolizador la resistencia de activación R_{act} gobierna la respuesta a través de la constante de tiempo $\tau_{act} = C_{dl} R_{act}$, se considera un controlador PI adaptativo cuyas ganancias proporcional e integral se definen por tramos en función de la corriente, sin embargo, las dinámicas de tensión del PEM son considerablemente más lentas que las de la corriente y la sintonización obtenida presenta variaciones menores a lo largo del rango 1–23 A; en consecuencia, se implementa un –PI promedio– que representa adecuadamente el comportamiento en todo el intervalo de operación.

En contraste, para el modelo estático, donde no se modelan las dinámicas asociadas a la doble capa, se considerarán solo las dinámicas del filtro del convertidor de potencia y V_{pem} como perturbación. La Tabla 4.2 resume los valores de las ganancias empleadas en ambos casos, obtenidos mediante la herramienta *rltool*, perteneciente a la librería *Control System Toolbox* de MATLAB. Los polos del sistema en lazo cerrado se ubican de manera que se garantice un tiempo de asentamiento de 4 – 10 [ms] y un factor de amortiguamiento 0.6 – 0.8.

Tabla 4.2: Parámetros del controlador PI para cada escenario de control definido. Estos se determinan mediante la técnica de posicionamiento de polos.

EdeC	Factor de amortiguamiento [–]	Tiempo de asentamiento [ms]	K_p	K_i
1 – 3 2	0,6	10	0,6878 0,6484	326 356
1 – 3 2	0,6	4	1,7271 1,6970	2017 2115
1 – 3 2	0,8	10	0,7637 0,6878	156 327
1 – 3 2	0,8	4	1,9679 1,9568	714 826
DC_{link} (Arq D)	–	–	5	1200

Los parámetros del controlador PI obtenidos al considerar explícitamente las dinámicas internas del electrolizador presentan valores similares a aquellos calculados modelando únicamente el convertidor de potencia. Esta observación sugiere que la influencia de las dinámicas del electrolizador sobre el diseño del controlador es marginal en comparación con el efecto de la estrategia de retroalimentación de corriente implementada. En consecuencia, se plantea la hipótesis de que el desempeño dinámico del sistema está determinado principalmente por el tipo de retroalimentación empleado —ya sea mediante medición directa o mediante una estimación basada en un modelo estático del electrolizador— más que por el modelo utilizado en la sintonización del PI. Por tanto, se hará un análisis particular del EdeC 3; control de modelo dinámico mediante retroalimentación estimada mediante modelo estático.

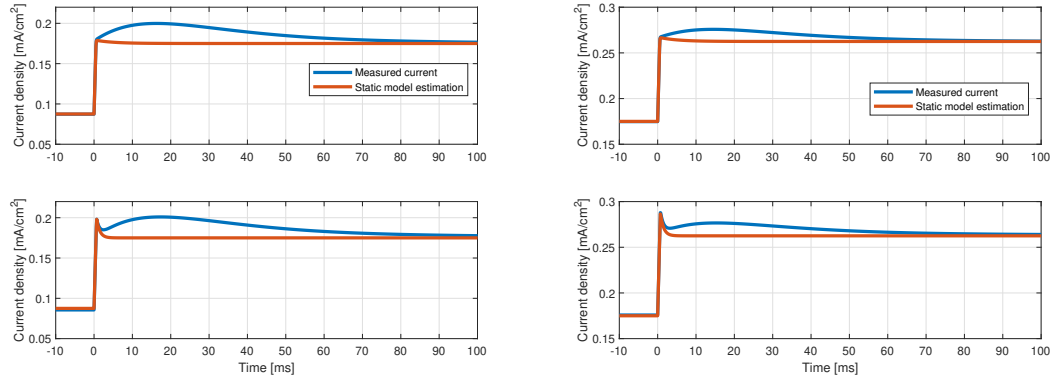
Para evaluar esta hipótesis, a continuación se analiza la respuesta dinámica de la tensión en los terminales del electrolizador frente a un escalón de corriente de referencia aplicado en los tres escenarios de control definidos en la Sección 3.3.1. La magnitud del escalón corresponde a una densidad de corriente de referencia de 87,5, [mA/cm²], lo que equivale a una corriente de 5, [A] en el electrolizador empleado como objeto de estudio (ver especificaciones en la Tabla 3.1). Los parámetros de control PI empleados para este análisis corresponden al más conservador y el más agresivo; PI_B y PI_C respectivamente, en donde estos son parámetros extraídos de la tabla 4.2.

$$PI_B(s) = 0,7637 + \frac{156}{s}$$

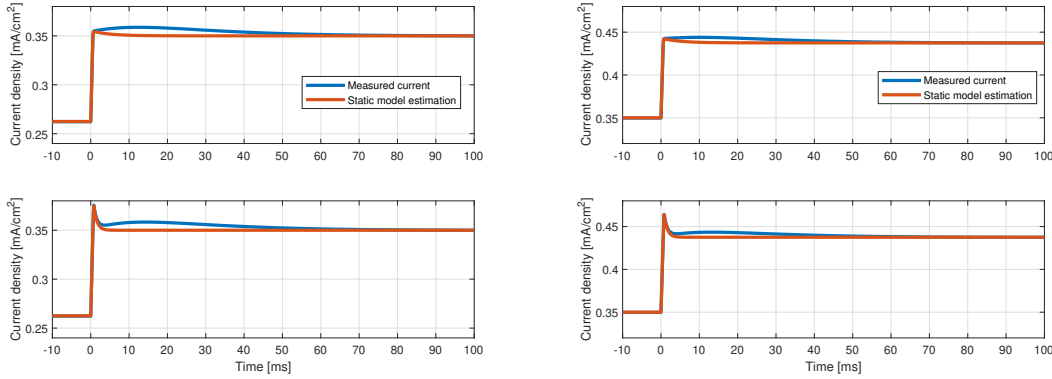
$$PI_C(s) = 1,7271 + \frac{2017}{s}$$

Al evaluar la respuesta a escalón del sistema bajo el supuesto de retroalimentación mediante estimación de corriente basada en un modelo estático (Figura 4.7), se evidencia la aparición de picos de corriente que exceden el valor previsto por la sintonización del controlador PI. Este sobrepaso, o overshoot, tiende a disminuir conforme se incrementa la densidad de corriente en el electrolizador. En ciertos casos, se observa la presencia de un segundo pico local, el cual, si bien no supera el overshoot inicial, resulta significativo desde el punto de vista dinámico. Este comportamiento se atribuye a las propias dinámicas internas del electrolizador, que difieren marcadamente del modelo estático utilizado,

especialmente a bajas corrientes, donde las sobretensiones de activación juegan un rol determinante.



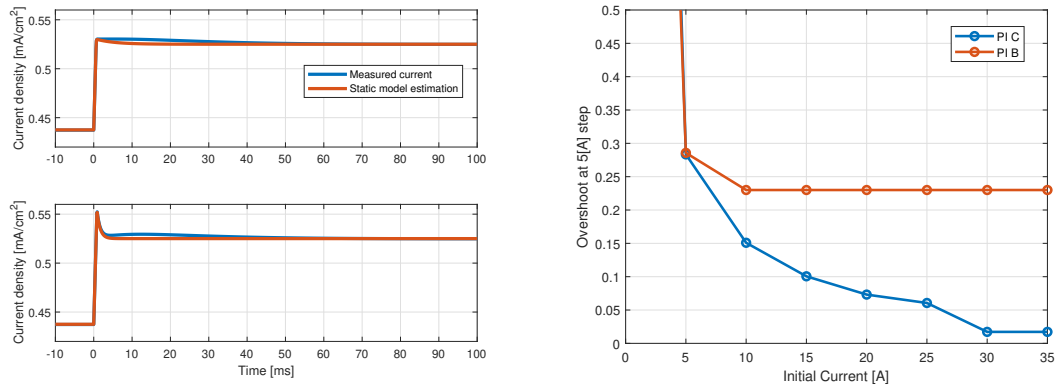
(a) $j_{\text{inicial}} = 87,5[\text{mA}/\text{cm}^2]$, $j_{\text{final}} = 175[\text{mA}/\text{cm}^2]$ (b) $j_{\text{inicial}} = 175[\text{mA}/\text{cm}^2]$, $j_{\text{final}} = 263[\text{mA}/\text{cm}^2]$



(c) $j_{\text{inicial}} = 263[\text{mA}/\text{cm}^2]$, $j_{\text{final}} = 350[\text{mA}/\text{cm}^2]$ (d) $j_{\text{inicial}} = 230[\text{mA}/\text{cm}^2]$, $j_{\text{final}} = 437[\text{mA}/\text{cm}^2]$

Figura 4.7: Comparación de respuesta a escalón de corriente de referencia en el EdeC 3 considerando dos controles PI. En cada subfigura, las señales mostradas en el grafico superior corresponden al control PI B, por otro lado, las mostradas en la gráfica inferior corresponden al PI C.

Es interesante notar en la Figura 4.3 que, a partir de una densidad de corriente de $500 [\text{mA}/\text{cm}^2]$, la sobretensión de activación η_{act} presenta un aumento prácticamente despreciable en función de la corriente. El hecho de que dicha derivada tome un valor numérico bajo o cercano a cero sugiere que, a altas densidades de corriente, la contribución de η_{act} es despreciable y, en consecuencia, sus dinámicas no modifican en gran medida los valores máximos de corriente y por lo tanto, la respuesta del modelo dinámico se torna similar a la del modelo estático del electrolizador tal como se muestra en la figura 4.8a.



(a) $j_{\text{inicial}} = 437[\text{mA}/\text{cm}^2]$, $j_{\text{final}} = 525[\text{mA}/\text{cm}^2]$ (b) Error comparativo de estimador basado en modelo estático en función de la densidad de corriente

Figura 4.8: Análisis de error comparativo entre picos de corriente estimados y medidos en el Escenario 3.

4.3. Evaluación de respuesta dinámica en diferentes arquitecturas.

4.3.1. Conexión directa PEM-PV

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el comportamiento de un electrolizador PEM conectado directamente a un sistema PV bajo condiciones de variación escalonada de la irradiancia, con saltos de 10 % respecto a la irradiancia nominal. En ambos casos, los modelos (estático y dinámico) convergen hacia los mismos valores de corriente en estado estacionario; sin embargo, el análisis de la trayectoria seguida en la curva I-V revela diferencias relevantes en la dinámica de transición. Tal como se observa en las Figuras 4.9a y 4.10a, el modelo estático realiza una transición instantánea entre puntos de operación, mientras que el modelo dinámico evidencia un comportamiento transitorio que inicia con un escalón definido por la resistencia interna y posteriormente recorre la curva I-V del generador fotovoltaico hasta alcanzar el nuevo equilibrio.

De forma complementaria, las Figuras 4.9b y 4.10b muestran la evolución temporal de la tensión y la corriente durante los cambios de irradiancia. El modelo estático se caracteriza por variaciones abruptas, representadas únicamente por escalones ideales. En contraste, el modelo dinámico exhibe dos fenómenos diferenciados: (i) para condiciones de operación situadas a la izquierda del punto de máxima potencia (MPP), la corriente presenta una respuesta escalonada similar al perfil de la irradiancia, y (ii) para condiciones a la derecha del MPP, la corriente manifiesta un sobreimpulso asociado al desplazamiento de la curva I-V hacia la derecha, con el consiguiente aumento de la tensión. En ambos escenarios se constata la existencia de transitorios de tensión no despreciables, lo cual confirma la relevancia de considerar la dinámica interna del electrolizador en la caracterización del sistema.

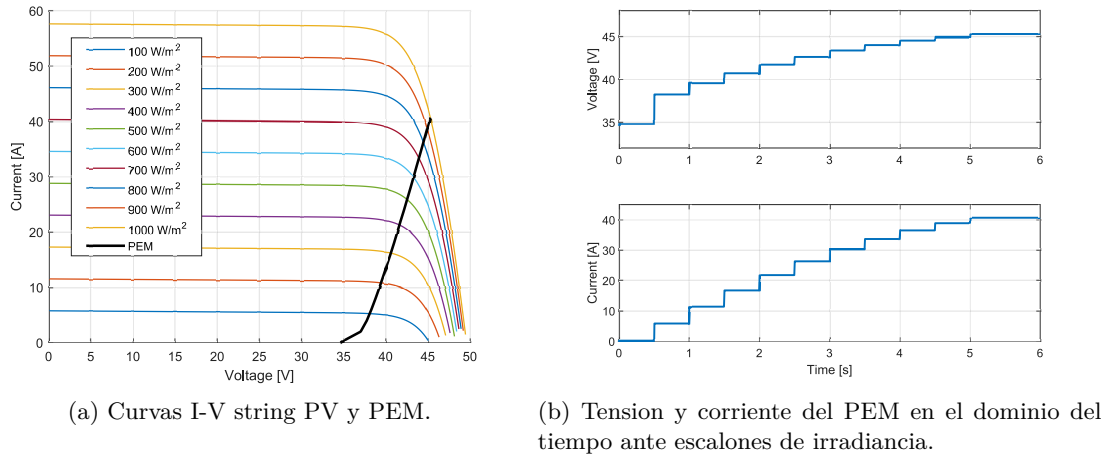


Figura 4.9: Comportamiento eléctrico de la conexión directa entre un sistema PV y un PEM, considerando su modelo estático.

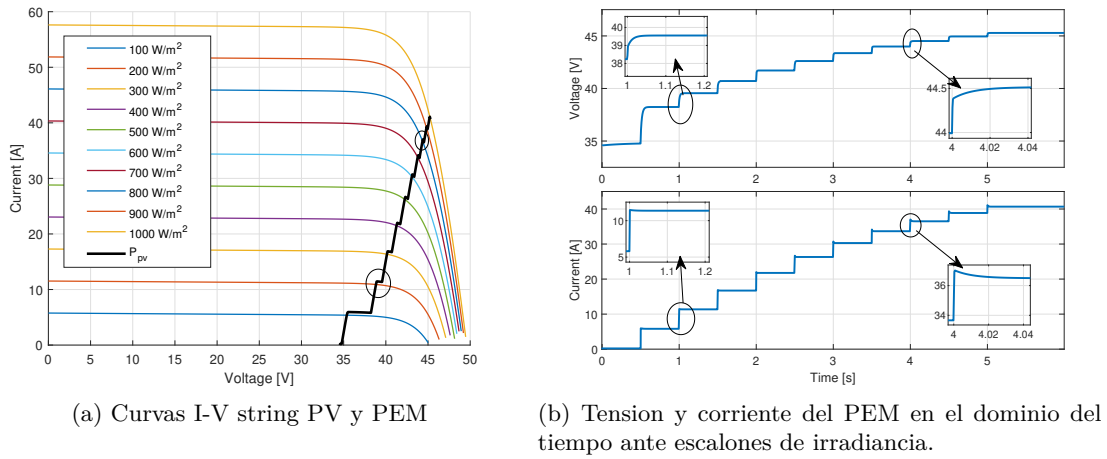


Figura 4.10: Comportamiento eléctrico de la conexión directa entre un sistema PV y un PEM, considerando su modelo dinámico.

4.3.2. PEM-PV con convertidor DC-DC intermedio

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran el comportamiento transitorio de una arquitectura que incorpora un convertidor de potencia controlado mediante el algoritmo de MPPT. En ambos casos (Figuras 4.11a y 4.12a), el algoritmo MPPT muestra un desempeño consistente, convergiendo hacia el MPP mediante una maniobra similar.

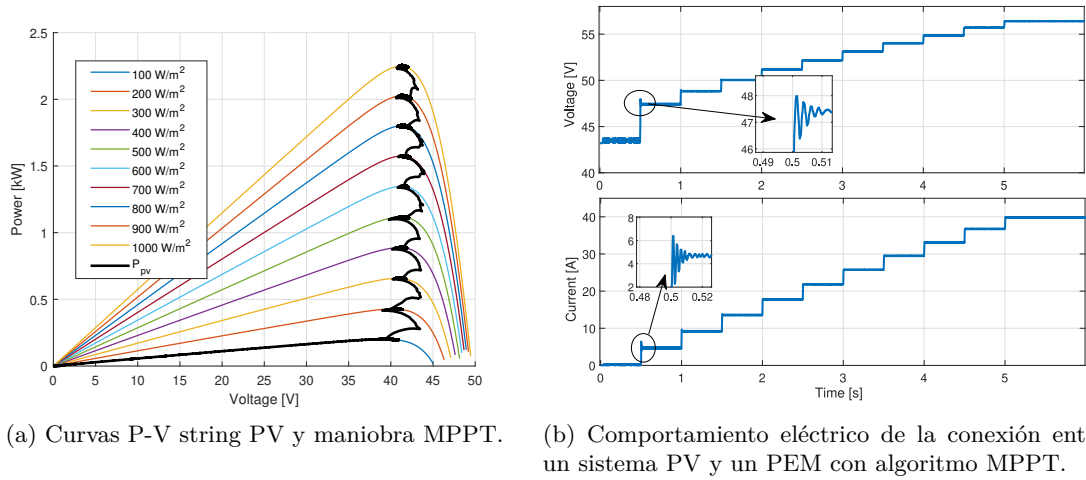


Figura 4.11: Comportamiento eléctrico de la conexión entre un sistema PV y un PEM con convertidor DC-DC intermedio con seguimiento de potencia máxima, considerando modelo estático del PEM.

Por su parte, las Figuras 4.11b y 4.12b evidencian que la corriente del electrolizador presenta oscilaciones características, propias de la estrategia de control implementada en el algoritmo P&O, el cual actúa directamente sobre el ciclo de trabajo del convertidor. Cabe destacar que estas oscilaciones se manifiestan principalmente en la corriente, mientras que la tensión en el modelo dinámico, debido a las componentes capacitivas del circuito equivalente, adopta un comportamiento semejante al de una respuesta a un escalón de corriente.

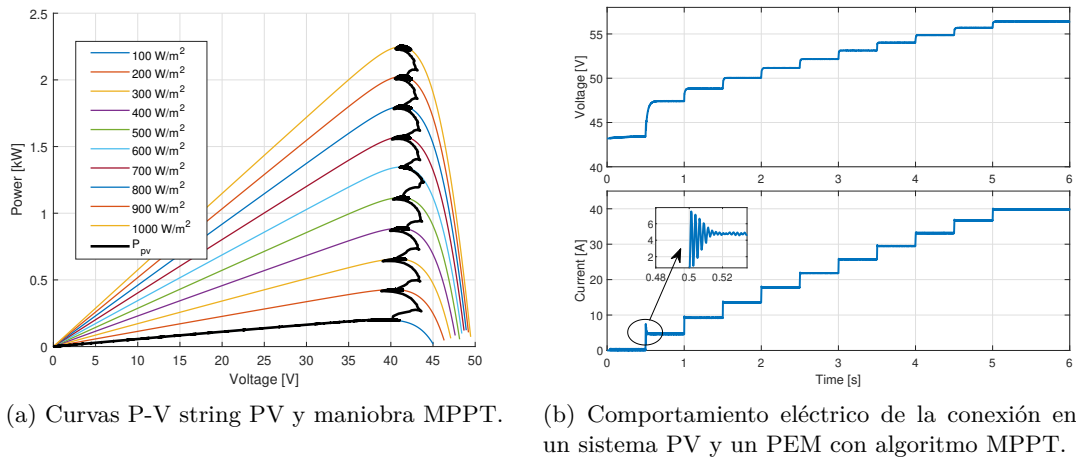


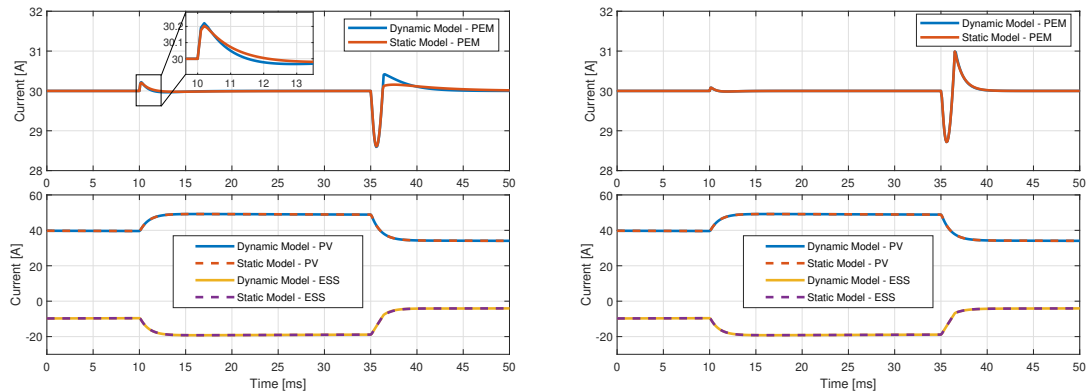
Figura 4.12: Comportamiento eléctrico de la conexión entre un sistema PV y un PEM con convertidor DC-DC intermedio con seguimiento de potencia máxima, considerando modelo dinámico del PEM.

4.3.3. PEM-PV-ESS con convertidor parcial

Anteriormente se ha realizado un análisis exhaustivo de la respuesta dinámica del electrolizador ante escalones de corriente, el enfoque de esta sub-sección se centrará en evaluar el rendimiento del lazo de control de corriente en una arquitectura PEM-PV-ESS con convertidor parcial (Figura 2.1c), bajo condiciones de irradiancia variable (Figura 3.7b). Para ello, se perturba el sistema mediante una variación de irradiancia. La Figura 4.13 presenta la respuesta del sistema bajo dos estrategias de control: los controladores PI_B (subfigura 4.13a) y PI_C (subfigura 4.13b), sintonizados considerando distintas especificaciones dinámicas.

En ambos casos se observa un desempeño aceptable en el seguimiento de corriente por parte del electrolizador. Sin embargo, destaca el hecho de que el controlador PI_C (subfigura 4.13b) ofrece un mejor desempeño dinámico ante incrementos de irradiancia, con una menor desviación transitoria en la corriente del PEM. No obstante, ante una caída brusca de irradiancia, el PI_C muestra una sensibilidad mayor a la perturbación, provocando una desviación más pronunciada en comparación al controlador PI_B (subfigura 4.13a). Este último presenta un comportamiento más robusto frente a perturbaciones negativas, tanto considerando el modelo dinámico como el modelo estático del electrolizador.

Este análisis sugiere que el controlador más rápido (PI_C), si bien mejora la capacidad de seguimiento ante incrementos en el recurso solar, podría inducir picos de corriente no deseados o mayores oscilaciones en eventos de caída de irradiancia, lo que es particularmente relevante considerando las no linealidades del modelo dinámico del PEM. Por el contrario, un controlador más amortiguado como el PI_B puede ofrecer mejor rechazo a perturbaciones sin comprometer significativamente la estabilidad del sistema.



(a) Control de corriente en electrolizador con PI_B . (b) Control de corriente en electrolizador con PI_C .

Figura 4.13: Análisis de perturbaciones para la Arq C

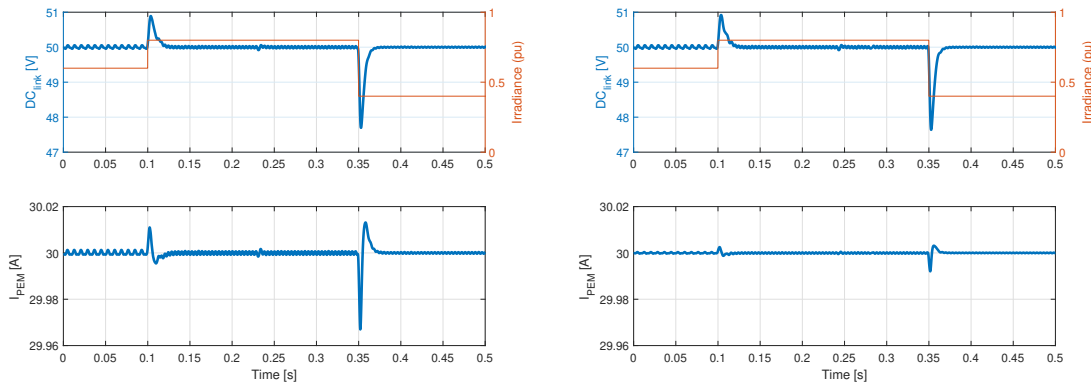
4.3.4. PEM-PV-ESS con convertidores dedicados

Una arquitectura basada en el uso de convertidores dedicados para cada uno de los elementos de potencia (PEM, PV y ESS), si bien conlleva un mayor costo computacional y puede incrementar las pérdidas por conmutación, también permite un aprovechamiento más eficiente de la energía fotovoltaica disponible. Esto se logra mediante la implemen-

tación de un algoritmo MPPT tradicional que inyecta energía a un enlace de corriente continua, el cual es estabilizado mediante la carga y descarga del banco de baterías.

Este tipo de arquitectura presenta un comportamiento más robusto frente a perturbaciones, como se observa en la Figura 4.14. En ella se evidencia que, ante cambios abruptos en la irradiancia (ya sea aumento o disminución), el control de corriente en el electrolizador mantiene una respuesta más estable en comparación con la arquitectura parcial previamente analizada. En particular, se logra una reducción del 97 % en la amplitud de la perturbación de corriente ante una disminución de irradiancia, al comparar con la arquitectura C utilizando el mismo controlador PI (controlador B).

Además, al implementar un controlador más agresivo —con mayor rapidez de respuesta y menor tiempo de asentamiento (PI C)— se consigue una mejora adicional en el rechazo de perturbaciones. El control de corriente se mantiene estable y con una respuesta altamente amortiguada, mostrando un desempeño superior frente a variaciones del recurso solar.



(a) Control de corriente en electrolizador con PI B. (b) Control de corriente en electrolizador con PI C.

Figura 4.14: Análisis de perturbaciones para la Arq D

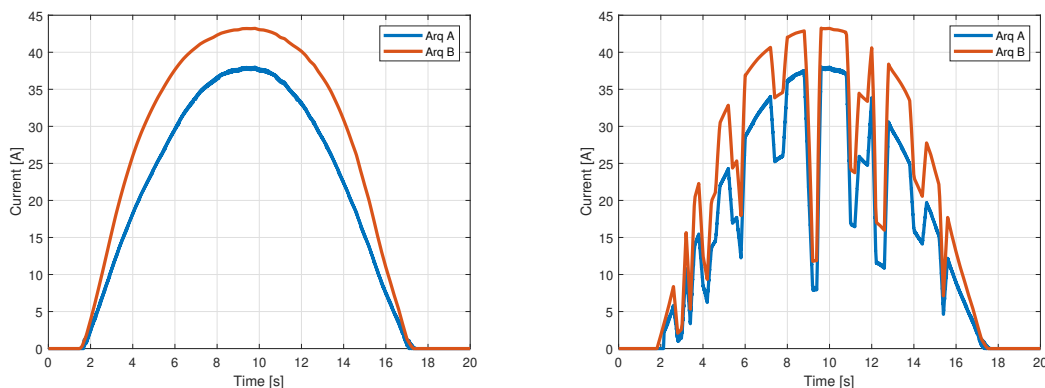
4.4. Evaluación escenarios de generación fotovoltaica

En primer lugar, se evalúa el comportamiento del electrolizador cuando es alimentado por las arquitecturas A y B, correspondientes a una conexión directa y a una conexión con convertidor intermedio para MPPT, respectivamente. La Figura 4.15 presenta la evolución temporal de la corriente inyectada al electrolizador en ambos casos, bajo dos escenarios de irradiancia: uno sin eventos de sombreado (perfil limpio) y otro con eventos de sombreado intermitente (perfil sucio).

Del análisis comparativo entre ambas arquitecturas se destacan dos observaciones relevantes:

- Aumento de potencia máxima extraída: La arquitectura B permite alcanzar una mayor corriente máxima, es decir, una mayor potencia entregada al electrolizador. Esta diferencia está directamente relacionada con el punto de operación conjunto entre las curvas I–V del sistema fotovoltaico y del electrolizador, como se discute en [19]. El convertidor intermedio posibilita operar en un punto más cercano al MPP del sistema PV.

- Mejor aprovechamiento en baja irradiancia: El uso del convertidor boost en la arquitectura B habilita la operación del sistema PV a tensiones superiores a la tensión reversible del electrolizador, incluso bajo condiciones de baja irradiancia. Esto permite al electrolizador continuar operando en momentos en que, en una conexión directa (arquitectura A), simplemente se mantendría inactivo debido a la imposibilidad de superar la barrera de tensión mínima requerida para la electrólisis.



(a) Escenario con perfil de irradiancia sin eventos de (b) Escenario con perfil de irradiancia considerando
sombreamiento. eventos de sombreamiento intermitente.

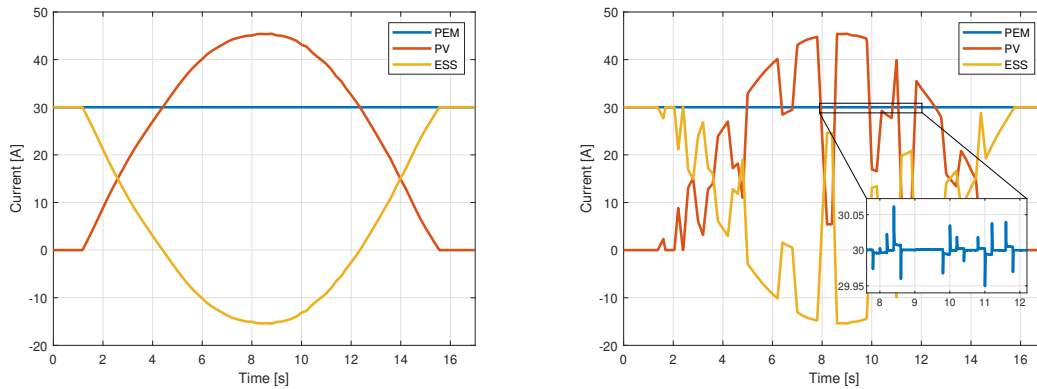
Figura 4.15: Comportamiento de Arq A y Arq B bajo dos escenarios de generación PV.

La Figura 4.16 presenta los resultados de la estrategia de control de corriente constante en las terminales del electrolizador bajo dos condiciones distintas de generación fotovoltaica: una operación limpia y una con eventos de sombreado intermitente simulados. En ambas subfiguras se aprecia claramente que, independientemente de las perturbaciones impuestas por el perfil de corriente del generador fotovoltaico (curva amarilla), el controlador mantiene la corriente de entrada al electrolizador (curva azul) prácticamente constante en el tiempo, lo que evidencia un desempeño robusto del lazo de control.

En el caso de la condición limpia (Figura 4.16a), se observa una transferencia energética suave entre las fuentes, con una modulación gradual del flujo de corriente del sistema de almacenamiento. Por otro lado, en el escenario con suciedad (Figura 4.16b), la generación PV presenta variaciones abruptas y de mayor amplitud, lo que exige una compensación más agresiva por parte del sistema ESS. A pesar de estas perturbaciones, la corriente entregada al PEM no presenta oscilaciones perceptibles, lo que demuestra que el controlador implementado es capaz de aislar eficazmente las fluctuaciones de generación del comportamiento de la carga electroquímica.

La Figura 4.17 presenta el comportamiento de la arquitectura C operando bajo un control de corriente dependiente del estado de carga del sistema de almacenamiento. En este esquema se aprecia la distribución dinámica de corriente entre el electrolizador PEM y el sistema de almacenamiento, observándose que el PEM mantiene una corriente mayor a un mínimo preestablecido, lo que asegura su operación continua y evita ciclos de apagado y encendido frecuentes.

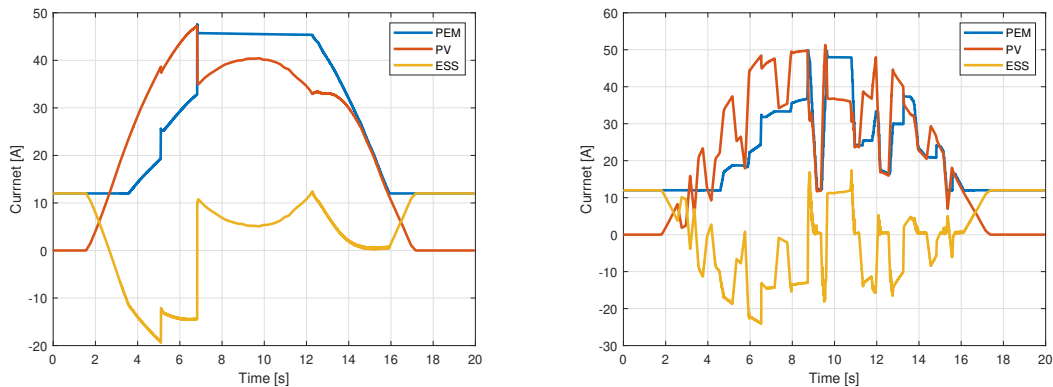
Cabe destacar que, en el escenario con eventos de sombreado intermitente (Figura 4.17b), el control de corriente del electrolizador incide directamente sobre la generación



(a) Escenario con perfil de irradiancia sin eventos de (b) Escenario con perfil de irradiancia considerando
sombreamiento. eventos de sombreamiento intermitente.

Figura 4.16: Control de corriente constante en Arq C bajo dos escenarios de generación PV.

fotovoltaica, debido a la interdependencia eléctrica existente en el bus de continua. En consecuencia, las fluctuaciones de irradiancia generan variaciones tanto en la corriente del generador fotovoltaico como en la del electrolizador, activando la respuesta compensatoria del sistema de almacenamiento, cuyo papel resulta esencial para mantener la estabilidad del bus DC y la continuidad del proceso de electrólisis.



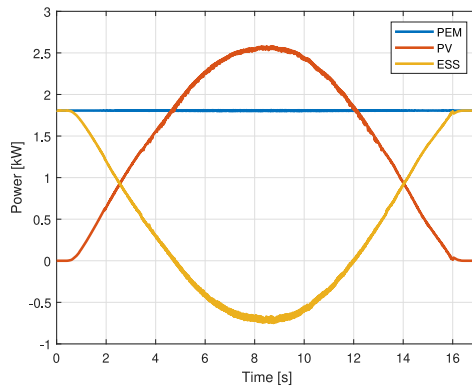
(a) Escenario con perfil de irradiancia sin eventos de (b) Escenario con perfil de irradiancia considerando
sombreamiento. eventos de sombreamiento intermitente.

Figura 4.17: Control de corriente con algoritmo simplificado en Arq C bajo dos escenarios de generación PV.

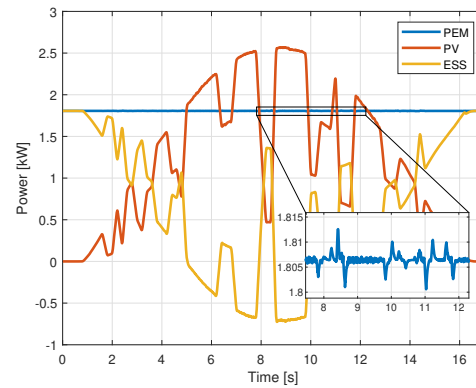
En lo que respecta a la arquitectura D, el análisis se realiza desde una perspectiva de transferencia de potencia (Figura 4.18), ya que los elementos que conforman esta topología se encuentran desacoplados eléctricamente mediante convertidores dedicados. Esto implica que cada subsistema opera a diferentes niveles de tensión, haciendo más adecuado evaluar su interacción energética mediante potencias en lugar de corrientes.

Al igual que en la arquitectura C, el sistema sigue siendo sensible a perturbaciones

originadas por variaciones en la irradiancia del generador fotovoltaico, especialmente en presencia de sombreado intermitente. Sin embargo, se evidencia una capacidad de rechazo de perturbaciones altamente robusta, atribuible a la naturaleza desacoplada de los elementos que integran la topología. El controlador de corriente mantiene la potencia entregada al electrolizador prácticamente constante, mientras que el sistema de almacenamiento (ESS) asume un rol activo en la compensación de las variaciones dinámicas del generador PV.



(a) Escenario con perfil de irradiancia sin eventos de sombreado.



(b) Escenario con perfil de irradiancia considerando eventos de sombreado intermitente.

Figura 4.18: Control de corriente constante en Arq D bajo dos escenarios de generación PV.

En la Tabla 4.3 se muestran métricas sobre la generación de hidrógeno y la energía requerida para la producción en cada uno de los escenarios mostrados en las Figuras 4.15-4.18, contrastando las diferencias de generación considerando un modelo del electrolizador estático y un modelo dinámico. Cabe destacar que para casi todos los casos tanto la energía utilizada como el hidrógeno generado son similares, pues, el modelo dinámico obtenido para el objeto de estudio utilizado en este trabajo posee tiempos transitorios considerados como rápidos (máximo ~ 250 [ms]) respecto a lo dicho en [9, 12], en donde se indica que las dinámicas suelen ser del orden de los segundos. Este antecedente es relevante, pues sumado al hecho de que las dinámicas pueden ser despreciadas a altas corrientes, estas además son despreciables temporalmente en la escala de tiempo manejada. Este hecho hace que solo en condiciones de sombreado parcial se logre apreciar una diferencia entre los valores de generación de H₂ y consumo de energía en las arquitecturas A y C con algoritmo de control.

Tabla 4.3: Tabla resumen de energía utilizada para la generación de hidrógeno con las diferentes arquitecturas estudiadas, en donde el perfil 1 corresponde al perfil solar mostrado en la Figura 4.16a y el perfil 2 corresponde al perfil con eventos de sombreadamiento mostrado en la Figura 4.16b.

Arquitectura	Perfil	Modelo PEM	H ₂ [ml]	E [kJ]
Arq A	1	Estático	1307	20.83
		Dinámico	1307	20.83
	2	Estático	1126	17.32
		Dinámico	1105	17.32
Arq B	1	Estático	1656	24.34
		Dinámico	1656	24.34
	2	Estático	1329	19.46
		Dinámico	1329	19.46
Arq C @30A	1	Estático	1672	36.12
		Dinámico	1672	36.12
	2	Estático	1672	36.12
		Dinámico	1672	36.12
Arq C – Alg. Simp.	1	Estático	1461	23.09
		Dinámico	1463	23.06
	2	Estático	1329	18.66
		Dinámico	1329	17.91
Arq D @40A	1	Estático	2229	36.12
		Dinámico	2229	36.12
	2	Estático	2229	36.12
		Dinámico	2229	36.12

Dado este contexto, resulta pertinente analizar cómo varían las métricas de generación y consumo energético al considerar modelos dinámicos más lentos que el obtenido experimentalmente. Para ello, se evaluaron modelos con constantes de tiempo 10 y 100 veces mayores, con el objetivo de estudiar el efecto de una respuesta más inercial del electrolizador en la interacción con el sistema fotovoltaico.

Las Figuras 4.19 y 4.20 resumen las diferencias observadas en la producción de hidrógeno y el consumo de energía bajo distintas condiciones de irradiancia para las arquitecturas A, B y C (con algoritmo simplificado). Estas configuraciones resultan de especial interés, pues en ellas las dinámicas del electrolizador adquieren relevancia al evaluar el rendimiento del sistema, por lo tanto es posible comentar que:

- Las diferencias entre el modelo estático y el modelo dinámico (incluso al ser ralentizado hasta 100 veces) no superan el 2 % en términos de generación de hidrógeno y consumo de energía, para todas las arquitecturas analizadas.
- La arquitectura C controlada muestra una mayor sensibilidad frente a la ralentización del modelo dinámico, evidenciando una variabilidad significativa en su rendimiento en función del grado de retardo temporal introducido.
- La arquitectura B, en contraste, presenta un comportamiento prácticamente inva-

riante frente a la dinámica del modelo, manteniendo resultados similares en todos los casos evaluados.

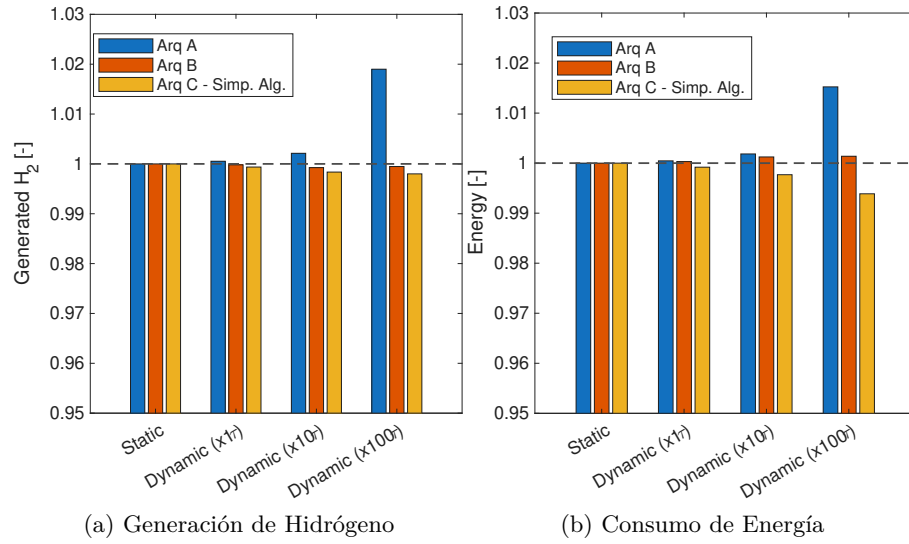


Figura 4.19: Comportamiento del electrolizador PEM frente a un perfil de irradiancia sano en las arquitecturas A, B y C - algoritmo simplificado. La Tabla [D.1](#) muestra las cifras para cada uno de los valores mostrados en la gráfica.

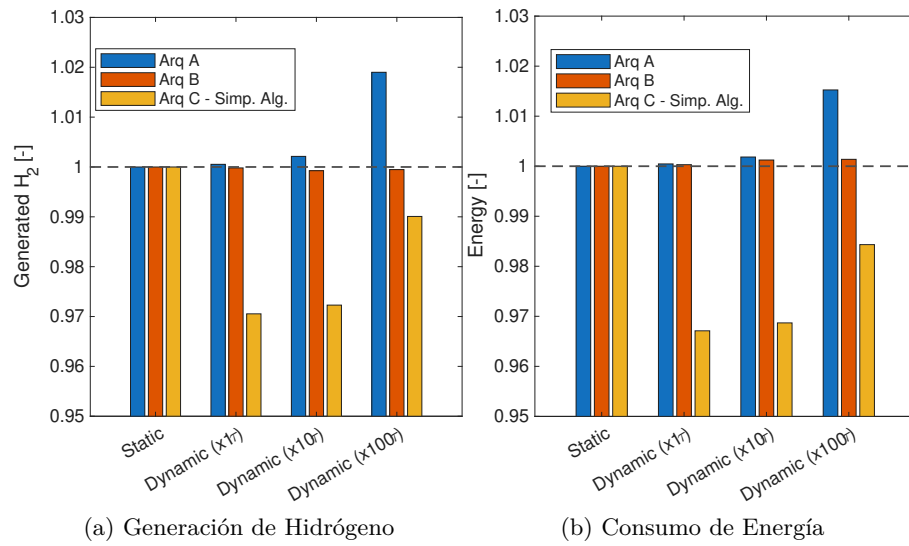


Figura 4.20: Comportamiento del electrolizador PEM frente a un perfil de irradiancia con eventos de sombreado parcial en las arquitecturas A, B y C - algoritmo simplificado. La Tabla [D.1](#) muestra las cifras para cada uno de los valores mostrados en la gráfica.

Capítulo 5

Conclusiones

En primer lugar, se logró construir un modelo dinámico del electrolizador PEM que incorpora los principales fenómenos electroquímicos que afectan la tensión en terminales del electrolizador: la tensión reversible, las sobretensiones de activación, óhmica y de difusión. Los parámetros del modelo fueron obtenidos mediante una combinación de mediciones experimentales —utilizando escalones de corriente— y ajustes por mínimos cuadrados a la curva de polarización, complementados con información de la literatura.

Durante la validación experimental se observó que el PEM utilizado presenta tiempos de respuesta más rápidos que los comúnmente reportados en la literatura. Debido a las limitaciones de la fuente de corriente empleada (tiempos de asentamiento del orden de $10 \sim 15$ ms), no fue posible capturar con precisión todo el comportamiento dinámico del sistema.

Se diseñaron y analizaron tres escenarios de control PI con diferentes combinaciones de modelado (estático y dinámico) y retroalimentación (medida o estimada). Los resultados demuestran que el uso de un modelo dinámico en la etapa de sintonización permite obtener controladores más rápidos y robustos. Sin embargo, también se observó que al momento de controlar un electrolizador, la variable determinante en el correcto control de la corriente del electrolizador corresponde al método utilizado para realimentar la corriente. Además, es interesante recalcar que el modelo estático tiene un rendimiento similar al dinámico en operación de alta densidad de corriente. Esto permite definir de forma explícita una frontera práctica para la aplicabilidad del modelo estático en tareas de control.

Se evalúa el desempeño de 4 arquitecturas revisadas en el estado del arte, considerando un sistema PV bajo dos escenarios de generación: uno con perfil limpio y otro con eventos de sombreado intermitente. En ambos casos, el control de corriente logra mantener un rechazo de perturbaciones robusto e inyección de corriente al PEM dentro de los márgenes deseados. Adicionalmente, se varían artificialmente los tiempos transitorios del electrolizador, para hacer evidente el efecto de los transitorios de tensión en una PEM sobre la energía requerida para generar una determinada cantidad de hidrógeno mediante electrolisis.

Finalmente, este trabajo propone una metodología práctica para validar dinámicas de electrolizadores con recursos experimentales limitados, y contribuye al análisis cuantitativo de cuándo es necesario utilizar un modelo dinámico en el diseño de controladores para sistemas PEM. Además, sienta las bases para la implementación futura de observadores

de corriente basados en modelos dinámicos, con el fin de reducir la dependencia de sensores físicos en arquitecturas de conversión avanzada.

Trabajo Futuro

En el desarrollo de este trabajo, se intentó caracterizar los parámetros dinámicos de una PEM con síntomas de degradación, pues, presentaba picos de tensión no despreciables frente a un escalon de corriente impuesto por una fuente DC controlada, He et al. [41] precisamente describe este comportamiento de la respuesta a escalón de la tensión. Como trabajo futuro, se propone investigar en la definición de un modelo eléctrico que logre emular el comportamiento de dicho pico de tensión frente a un escalón de corriente.

Por otro lado, se propone replicar este mismo trabajo considerando un electrolizador que presente dinámicas más lentas. Pues el PEM utilizado para determinar experimentalmente sus parámetros presentaba dinámicas más rápidas que las comúnmente reportadas en la literatura [9,12]. Por otro lado, la fuente DC empleada tiene un control de corriente con tiempos de asentamiento del orden de los $10 \sim 15[ms]$, por lo que hay información que no se logró captar óptimamente, por este motivo es que esta memoria emplea un modelo híbrido entre medición experimental y estimación basada en parámetros físicos.

Iniciar una línea de estudio enfocada en la evolución temporal de parámetros dinámicos del electrolizador, observando cómo se modifica C_{dl} , R_{mem} , $j_{0,k}$ y j_{lim} , a medida que se somete a ciclos de carga. Esto abriría la posibilidad de desarrollar un modelo de degradación y control adaptativo en función del envejecimiento.

Apéndice A

Parámetros PEM

Mediante la herramienta *Curve Fitter* de MATLAB, se ajusta la curva de polarización medida del electrolizador con las ecuaciones (3.1) – (3.5), despreciando el efecto de difusión. La ecuación (A.1) indica la curva con la que se ajustará la curva de polarización mostrada en la Figura A.1 (Notar que $j_{pem} = \frac{I_{pem}}{A}$, en donde $A = 57[cm^2]$).

$$V_{pem} = V_{rev} + I_{pem} \cdot R_{mem} + 6 \frac{RT}{F} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{j_{pem}}{j_{lim,catodo}} + \operatorname{arcsinh} \frac{j_{pem}}{j_{lim,anodo}} \right) \quad (A.1)$$

En la ecuación (A.1) se considerará que $\frac{RT}{F} = 27[mV]$ y $V_{rev} = 7,74[V]$; valores calculados de forma teórica. $R_{mem} = 57,4[m\Omega]$ se determina con la pendiente de la recta comprendida entre los últimos 4 puntos de la curva de polarización (Figura A.2).

De esta forma, se determina que $j_{0,catodo} = 15,3[mA/cm^2]$ y $j_{0,anodo} = 15,3[\mu A/cm^2]$, valores congruentes por lo indicado por Marangio et al. [29].

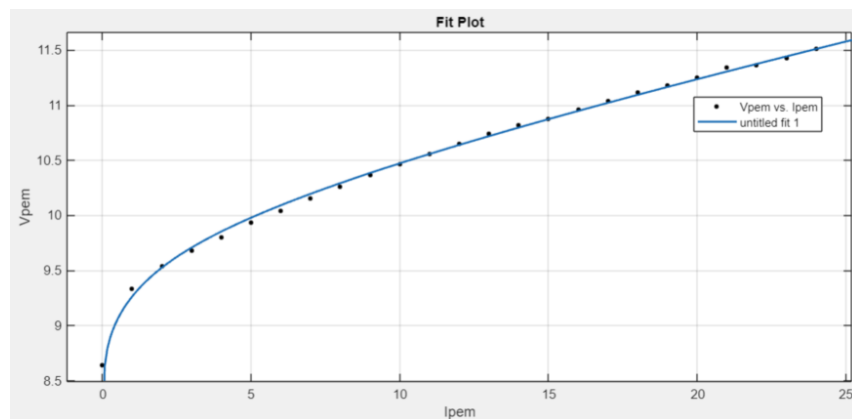


Figura A.1: Curva de polarización ajustada mediante mínimos cuadrados de acuerdo a la electroquímica del electrolizador.

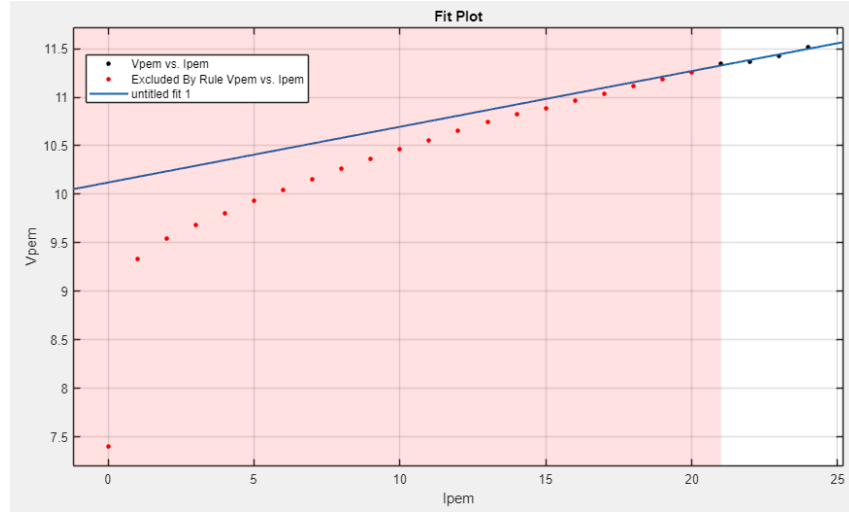


Figura A.2: Ajuste lineal de los últimos 4 puntos medidos de la curva de polarización para determinar el valor de R_{mem} .

A partir de las mediciones realizadas en el ensayo de respuesta a escalón descrito en la sección 3.1.1, también se utiliza la herramienta *curve fitter* de matlab, en donde, por limitaciones de la fuente de poder se considerará solo un tiempo característico de la respuesta a escalón de la PEM (ecuación (A.2)), y que la respuesta a escalón solo tiene un modo, el cual está compuesto por $R_{mem} \cdot \Delta I_{pem}$ y $\Delta \eta_{act}$ (Ecuación (A.3)).

$$V_{pem}(t) = V_{pem}(t = 0^-) + a_i \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right) \quad (A.2)$$

$$a = R_{mem} \cdot \Delta I_{pem} + \Delta \eta_{act} \quad (A.3)$$

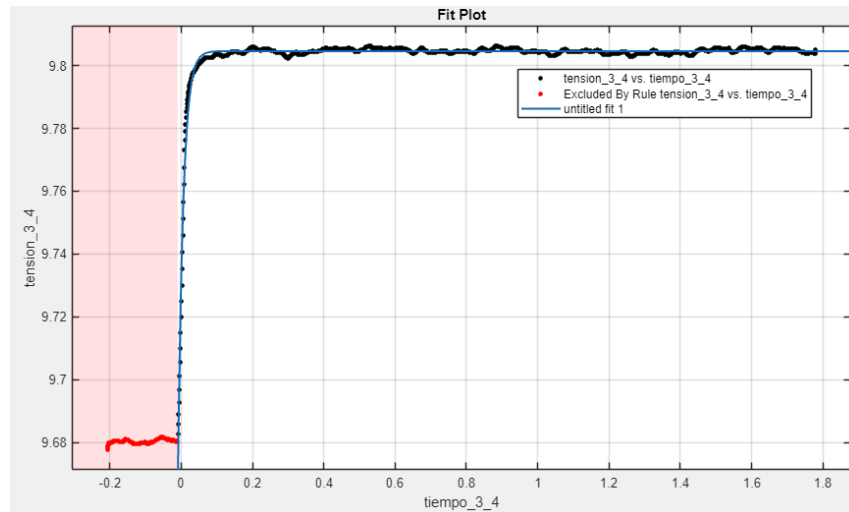


Figura A.3: Ajuste de mínimos cuadrados para la respuesta a escalón de corriente desde los 3[A] hasta los 4[A].

Dado que la temperatura influye de forma no despreciable en los parámetros del electrolizador, se ajustan los valores a_i de cada uno de los escalones para coincidir con la

curva de polarización mostrada anteriormente. Este ajuste se realiza considerando R_{mem} constante y que $a_i \geq 0$.

La Tabla A.1 muestra los parámetros a_i y τ_i calculados mediante el método de mínimos cuadrados, ajustado la respuesta a escalón del PEM.

Tabla A.1: Parámetros calculados desde el ajuste de mínimos cuadrados para las respuestas a escalón medidas.

$I^{0-} [\text{A}]$	$I^{0+} [\text{A}]$	$\tau_a [\text{ms}]$	$\Delta\eta_{act,a} [\text{mV}]$	$\Delta\eta_{act,c} [\text{mV}]$
0	1	210	1267	180
1	2	276	10	116
2	3	18	73	6
3	4	97	5	64
4	5	81	4	57
5	6	72	6	48
6	7	72	0	48
7	8	49	7	42
8	9	36	5	41
9	10	52	38	6
10	11	34	4	37
11	12	54	6	37
12	13	47	6	34
13	14	47	7	33
14	15	75	4	32
15	16	81	7	4
16	17	104	7	26
17	18	95	8	28
18	19	88	8	28
19	20	80	10	27
20	21	109	10	24
21	22	120	11	26
22	23	96	9	26

Por otro lado, en la Tabla A.2 se muestran los parámetros $\Delta\eta_{act}$ y τ_a para cada uno de los ensayos a escalón realizados. Para representar estos datos en el entorno de simulación se puede utilizar una herramienta de interpolación o realizar un ajuste de mínimos cuadrados a una función que tenga un comportamiento similar al descrito por las curvas. Particularmente, por simplicidad, se opta por usar una herramienta de interpolación para la simulación en el rango de entre 0[A] y 23[A] debido a que el control de corriente a 24[A] no es del todo estable en la fuente programable.

Tabla A.2: Parámetros ajustados a la curva de polarización del electrolizador.

I^{0-} [A]	I^{0+} [A]	τ_a [ms]	$\Delta\eta_{act,a}$ [mV]	$R_{act,a}$ [m Ω]	$\Delta\eta_{act,c}$ [mV]	$R_{act,c}$ [m Ω]
0	1	210	1351	1351	192	192
1	2	276	17	684	125	159
2	3	18	77	482	198	172
3	4	97	0	361	193	177
4	5	81	6	290	259	193
5	6	72	5	243	243	202
6	7	72	6	209	313	217
7	8	49	1	183	285	226
8	9	36	4	163	356	240
9	10	52	34	150	289	245
10	11	34	3	137	395	259
11	12	54	0	125	324	264
12	13	47	0	116	427	277
13	14	47	0	107	346	282
14	15	75	0	100	425	291
15	16	81	18	95	362	296
16	17	104	0	90	469	306
17	18	95	0	85	379	310
18	19	88	0	80	481	319
19	20	80	0	76	391	323
20	21	109	0	73	491	331
21	22	120	0	69	397	334
22	23	96	0	66	508	341

Apéndice B

Algoritmo de control de corriente

El algoritmo de control de corriente utilizado en la arquitectura C (PV–PEM–ESS con convertidor parcial) se fundamenta en el esquema propuesto por [13], originalmente concebido para la gestión coordinada de potencia en sistemas híbridos PV–batería–electrolizador. Dicho enfoque permite optimizar la utilización de la energía solar disponible mediante la regulación del flujo de potencia hacia el electrolizador y el sistema de almacenamiento, manteniendo condiciones seguras de operación para ambos subsistemas.

En el presente trabajo se implementa una versión simplificada de dicho algoritmo, cuyo propósito principal es facilitar el análisis de las dinámicas internas del electrolizador y evidenciar las diferencias de comportamiento entre sus representaciones estática y dinámica. La simplificación realizada elimina las capas de control jerárquico y los estimadores de estado del esquema original, manteniendo únicamente la lógica de reparto de potencia entre el PEM y la batería en función del estado de carga (*State of Charge*, SOC) y de la potencia fotovoltaica instantánea.

El algoritmo determina una corriente de referencia para el electrolizador, I_{ref} , considerando tres objetivos principales: (i) limitar la corriente máxima del PEM de acuerdo a sus restricciones operativas; (ii) regular la contribución de la batería en función de su SOC, priorizando su participación en condiciones de baja irradiancia; y (iii) asegurar una operación continua del sistema frente a variaciones rápidas de potencia generada. De esta manera, se logra representar de forma realista la interacción entre los subsistemas PV–ESS–PEM, preservando la respuesta dinámica relevante para el estudio.

La Figura B.1 muestra el diagrama funcional del algoritmo implementado, y el código utilizado se presenta a continuación para referencia. Este esquema constituye una aproximación suficiente para capturar las transiciones de potencia y la respuesta del lazo de corriente, manteniendo un bajo costo computacional y un comportamiento coherente con los principios del control propuesto en [13].

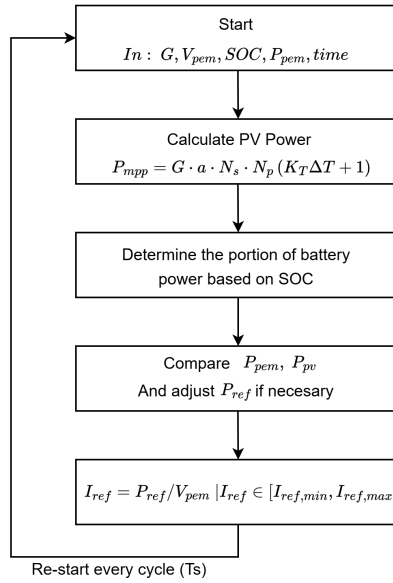


Figura B.1: Algoritmo de control de corriente simplificado para la arquitectura C.

```

1 function I_ref = generador_Iref(SOC, G, V_dc, P_pem, t)
2     persistent last_update_time I_ref_actual
3     if isempty(last_update_time)
4         last_update_time = 0;
5         I_ref_actual = 0;
6     end
7
8     Ts = 0.01; % tiempo de muestreo 10 ms
9
10    if (t - last_update_time) >= Ts
11
12        P_pv_max = 2255; % Potencia máxima PV [W]
13        P_pv = G * P_pv_max;
14        SOC_min = 0.25;
15        SOC_max = 0.85;
16        I_ref_max = 48; % Corriente máxima [A]
17
18        if SOC < SOC_min
19            fraccion_bat = 1;
20        elseif SOC < 0.3
21            fraccion_bat = 0.7;
22        elseif SOC < 0.55
23            fraccion_bat = 0.5;
24        elseif SOC < 0.7
25            fraccion_bat = 0.35;
26        elseif SOC < SOC_max
27            fraccion_bat = 0.1;
28        else
29            fraccion_bat = 0;
30        end
31
32        I_bat_ref = fraccion_bat * (P_pv / V_dc);
33        I_pem_ref = (1 - fraccion_bat) * (P_pv / V_dc);
34

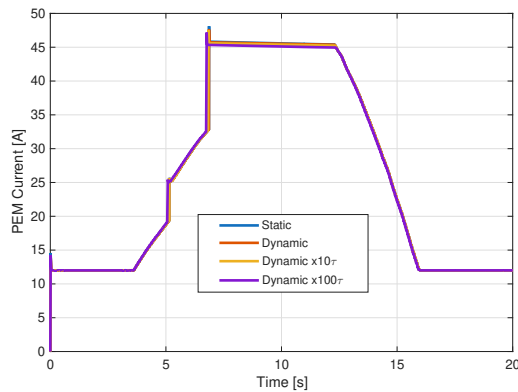
```

```
35     if P_pem > P_pv
36         I_pem_ref = P_pv / V_dc;
37     else
38         temp_I_pem_ref = P_pem / V_dc;
39         if temp_I_pem_ref > I_pem_ref
40             I_pem_ref = temp_I_pem_ref;
41         end
42     end
43
44     I_ref_actual = min(I_pem_ref, I_ref_max);
45     if I_ref_actual < 12
46         I_ref_actual = 12;
47     end
48
49     last_update_time = t;
50 end
51
52 I_ref = I_ref_actual;
53 end
```

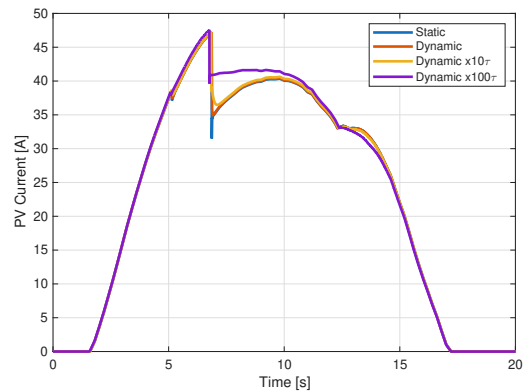
Listing B.1: Algoritmo simplificado para la generación de la referencia de corriente del electrolizador.

Apéndice C

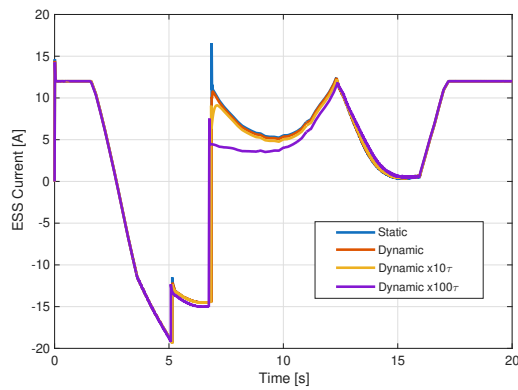
Gráficas comportamiento de las arquitecturas con dinámicas modificadas



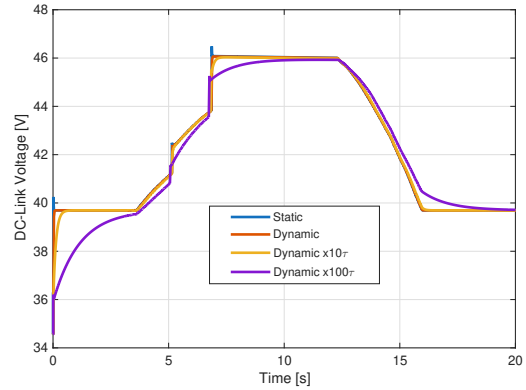
(a) Corriente PEM



(b) Corriente PV

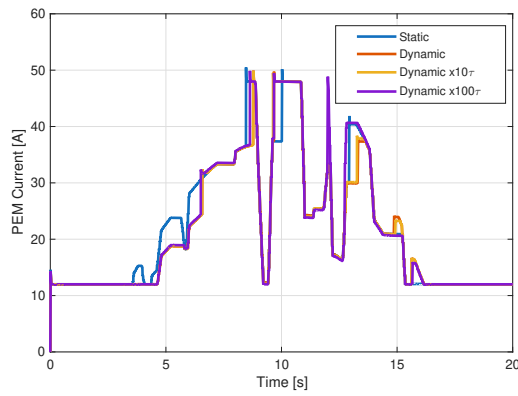


(c) Corriente ESS

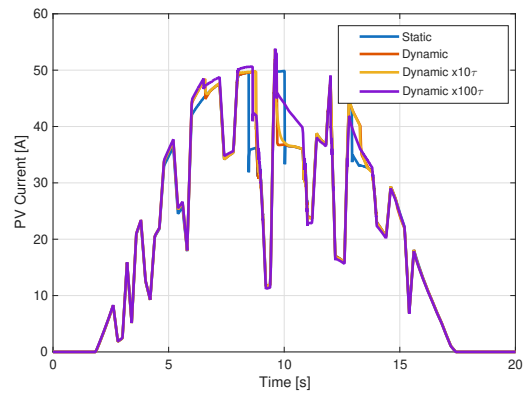


(d) Tensión DC-Link

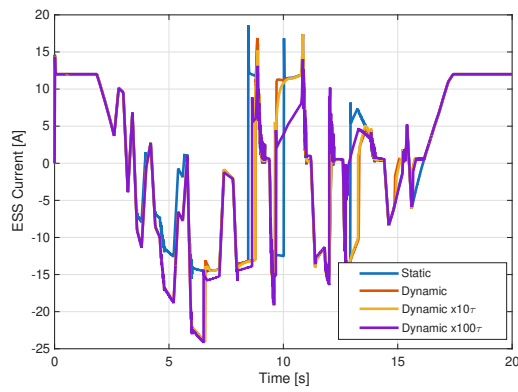
Figura C.1: Operación del algoritmo simplificado para el control de corriente en la arquitectura C con un perfil limpio de irradiancia.



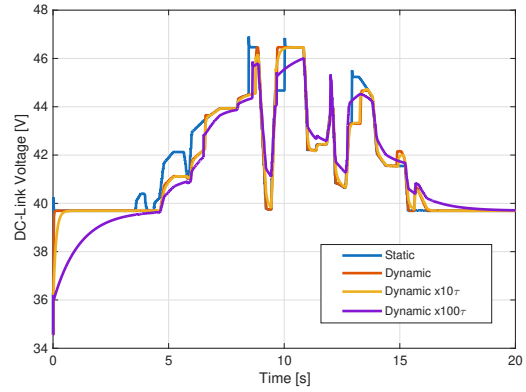
(a) Corriente PEM



(b) Corriente PV



(c) Corriente ESS



(d) Tensión DC-Link

Figura C.2: Operación del algoritmo simplificado para el control de corriente en la arquitectura C con un perfil con eventos de sombreado en sistema fotovoltaico.

Apéndice D

Tablas comparativas de generación de hidrógeno

Tabla D.1: Comparación de la producción de hidrógeno y energía consumida para distintos niveles de modelado dinámico del PEM, en donde el perfil 1 corresponde al perfil solar mostrado en la Figura 4.16a y el perfil 2 corresponde al perfil con eventos de sombreadamiento mostrado en la Figura 4.16b.

Arquitectura	Perfil	Modelo PEM	H ₂ [ml]	E [kJ]
Arq A	1	Estático	1307	20.826
		Dinámico	1307	20.826
		Dinámico x10 τ	1308	20.825
		Dinámico x100 τ	1315	20.886
	2	Estático	1126	17.324
		Dinámico	1104	17.324
		Dinámico x10 τ	1107	17.356
		Dinámico x100 τ	1104	17.588
Arq B	1	Estático	1656	24.332
		Dinámico	1656	24.332
		Dinámico x10 τ	1657	24.367
		Dinámico x100 τ	1657	24.369
	2	Estático	1329	19.451
		Dinámico	1329	19.451
		Dinámico x10 τ	1328	19.475
		Dinámico x100 τ	1328	19.477
Arq C – Alg. Simp.	1	Estático	1463	23.085
		Dinámico	1461	23.063
		Dinámico x10 τ	1456	22.949
		Dinámico x100 τ	1460	22.950
	2	Estático	1215	18.663
		Dinámico	1171	17.908
		Dinámico x10 τ	1181	18.074
		Dinámico x100 τ	1208	18.452

Bibliografía

- [1] International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, 2019. Accessed: 2025-09-15.
- [2] DNV. Maritime forecast to 2050. <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-2023-249411>, 2023. Accessed: 2025-09-15.
- [3] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen: A guide to policy making. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>, 2020. Accessed: 2025-09-15.
- [4] Energy Transitions Commission. Making the hydrogen economy possible. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-hydrogen-possible/>, 2021. Accessed: 2025-09-15.
- [5] Alfredo Ursua, Luis M. Gandia, and Pablo Sanchis. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2):410–426, 2012.
- [6] Sumit Sood, Om Prakash, Mahdi Boukerdja, Jean-Yves Dieulot, Belkacem Ould-Bouamama, Mathieu Bressel, and Anne-Lise Gehin. Generic dynamical model of pem electrolyser under intermittent sources. *Energies*, 13(24), 2020.
- [7] Abhigyan Majumdar, Meridian Haas, Isabella Elliot, and Shima Nazari. Control and control-oriented modeling of pem water electrolyzers: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(79):30621–30641, 2023.
- [8] Haniyeh Marefatjouikilevae, Francois Auger, Jean-Christophe Olivier. Static and dynamic electrical models of proton exchange membrane electrolyzers: A comprehensive review. *Energies*, 2023.
- [9] Benfei Wang, Dingnan Xin, Qing Fu, and Caizhi Zhang. A control-oriented comprehensive model of pem electrolyzer considering double-layer capacitance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93:866–877, 2024.
- [10] Dalia Yousri, Rawdha H. AlKuwaiti, Hany E.Z. Farag, Hatem Zeineldin, and Ehab El-Saadany. Advanced modeling of pem electrolyzers for microgrid systems: Incorporating electrochemical and thermal models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 83:755–773, 2024.

- [11] Xianyang Liu, Jun Zou, Rui Long, Zhichun Liu, and Wei Liu. Variable period sequence control strategy for an off-grid photovoltaic-pem electrolyzer hydrogen generation system. *Renewable Energy*, 216:119074, 2023.
- [12] Angel Hernández-Gómez Victor Ramirez Damien Guilbert Belem Saldivar. Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for pem water electrolysis. *ELSEVIER*, 2020.
- [13] Antonio Sánchez-Squella Ricardo Flores Rolando Burgos Felipe Morales Andrés Nader Patricio Valdivia-Lefort. 99.6 % efficiency dc-dc coupling for green hydrogen production using pem electrolyzer, photovoltaic generation and battery storage operating in an off-grid area. *ELSEVIER*, 2024.
- [14] Javier Viñuelas Ferrando. Modelling and simulation of hydrogen electrolyzers for power system applications. Master's thesis, Kungliga Tekniska högskolan, 2023.
- [15] A. Awasthi, Keith Scott, and S. Basu. Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22):14779–14786, 2011. Fuel Cell Technologies: FUCETECH 2009.
- [16] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina. Simple pem water electrolyser model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2):1927–1938, 2012. 10th International Conference on Clean Energy 2010.
- [17] Allen J. Bard and Larry R. Faulkner. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 2nd edition, 2001.
- [18] Dongqi Zhao, Qijiao He, Jie Yu, Meiting Guo, Jun Fu, Xi Li, and Meng Ni. A data-driven digital-twin model and control of high temperature proton exchange membrane electrolyzer cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(14):8687–8699, 2022.
- [19] Amin Mohammadi and Mehdi Mehrpooya. A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources. *Energy*, 158:632–655, 2018.
- [20] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina. Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct coupling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17):10574–10586, 2011. International Conference on Hydrogen Production (ICH2P)-2010.
- [21] Jiahao Mao, Zheng Li, Jin Xuan, Xinli Du, Meng Ni, and Lei Xing. A review of control strategies for proton exchange membrane (pem) fuel cells and water electrolyzers: From automation to autonomy. *Energy and AI*, 17:100406, 2024.
- [22] Haluk Görgün. Dynamic modelling of a proton exchange membrane (pem) electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1):29–38, 2006.
- [23] Tamer M. Ismail, Khaled Ramzy, Basem E. Elnaghi, M.N. Abelwhab, and M. Abd El-Salam. Using matlab to model and simulate a photovoltaic system to produce hydrogen. *Energy Conversion and Management*, 185:101–129, 2019.

- [24] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Wattana Kaewmanee, Matheepot Phattanasak, Melika Hinaje, and Gianpaolo Vitale. Improved sliding mode-based controller of a high voltage ratio dc–dc converter for electrolyzers supplied by renewable energy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(8):8831–8840, 2024.
- [25] Ozcan Atlam, Frano Barbir, and Dario Bezmalinovic. A method for optimal sizing of an electrolyzer directly connected to a pv module. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(12):7012–7018, 2011.
- [26] Abdelkrim Benmehel, Salaheddine Chabab, Arthur Lucas Do Nascimento Rocha, Michael Chepy, and Tarik Kousksou. Pem water electrolyzer modeling: Issues and reflections. *Energy Conversion and Management: X*, 24:100738, 2024.
- [27] Emma Nguyen, Pierre Olivier, Marie-Cécile Péra, Elodie Pahon, Robin Roche, Olivier Lefranc, and Fabien Claudel. Impact of short-term intermittent operation on experimental industrial pem and alkaline electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 126:516–530, 2025.
- [28] Nikolaj Maack Bielefeld, Rasmus Dockweiler Sørensen, Mikkel Jørgensen, Kristofer Kure, and Torsten Berning. A one-dimensional computational model to identify operating conditions and cathode flow channel dimensions for a proton exchange membrane fuel cell. *Hydrogen*, 5(3):624–643, 2024.
- [29] F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure pem water electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(3):1143–1158, 2009.
- [30] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208, 2009.
- [31] Abraham Dandoussou, Pierre Kenfack, Stève Ngoffe Perabi, and Martin Kamta. Simulations of the performance of maximum power point tracking algorithms based on experimental data according to the topologies of dc-dc converters. *Journal of Power and Energy Engineering*, 9:76–92, 2021.
- [32] A. Garrigós, J.L. Lizán, J.M. Blanes, and R. Gutiérrez. Combined maximum power point tracking and output current control for a photovoltaic-electrolyser dc/dc converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36):20907–20919, 2014.
- [33] R. García-Valverde, C. Miguel, R. Martínez-Béjar, and A. Urbina. Optimized photovoltaic generator–water electrolyser coupling through a controlled dc–dc converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20):5352–5362, 2008.
- [34] Nicolás Müller, Samir Kouro, Pericle Zanchetta, Patrick Wheeler, Gustavo Bittner, and Francesco Girardi. Energy storage sizing strategy for grid-tied pv plants under power clipping limitations. *Energies*, 12(9), 2019.
- [35] Min Chen and G.A. Rincon-Mora. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2):504–511, 2006.

- [36] Abdelrahman M. Elhawash, Rui Esteves Araújo, and João A. Peças Lopes. A new adaptive lead-lag control scheme for high current pem hydrogen electrolyzers. In *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, 2023.
- [37] Xiaoqiang Guo, Shiqi Zhang, Zhaoguo Liu, Le Sun, Zhigang Lu, Changchun Hua, and Josep M. Guerrero. A new multi-mode fault-tolerant operation control strategy of multiphase stacked interleaved buck converter for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(71):30359–30370, 2022.
- [38] Ministerio de Energia de Chile. Explorador solar. <https://solar.minenergia.cl/mediciones>, 2025. Último acceso: 29 de julio de 2025.
- [39] Jun Huang. Modelling of electrocatalytic double layers with refined treatment of metal-water interactions and chemisorption. *ChemRxiv*, 2022.
- [40] Frano Barbir. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Academic Press, 2nd edition, 2013.
- [41] Mingzhi He, Gongzhe Nie, Haoran Yang, Xiongzheng Wang, Shuhan Zhou, and Xin Meng. Clarify the process of overshoot voltage generation of proton exchange membrane electrolyzer under intermittent operation. *Chemical Engineering Journal*, 500:157414, 2024.