



Instituto
Nacional
de Técnica
Aeroespacial

Diseño y operación de instalaciones de producción de hidrógeno mediante electrólisis con fuentes renovables

Eduardo López González

*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Laboratorio de Energía del Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA)
Ctra. S.Juan - Matalascañas, km.34, 21130,
Mazagón (Huelva), España*

**II Workshop INCT CAPE 2024 Transición Energética
Electrolizadores – 8 de noviembre de 2024**

Índice

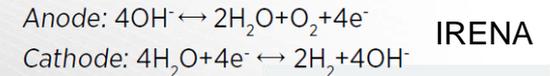
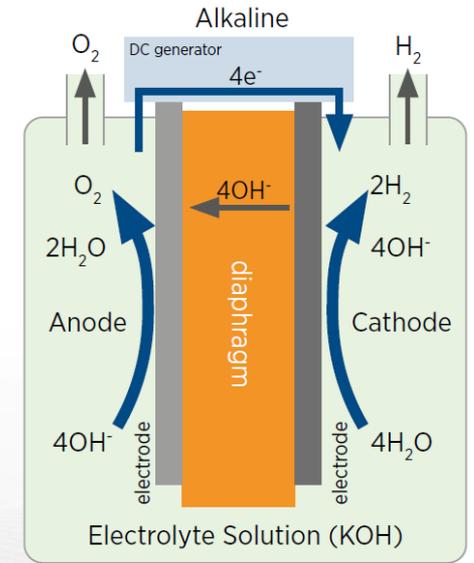
- Antecedentes
- Electrolizadores y comparación de tecnologías de electrolisis para la producción de hidrógeno
- Diseño de sistemas y balance de planta de electrolizadores
- Ejemplos de electrolizadores comerciales de baja temperatura
- Principales criterios e indicadores para el diseño de plantas de producción de hidrógeno renovable
- Principales factores que afectan al precio final del hidrógeno renovable
- Contratos de compra de energía eléctrica (PPA) de origen renovable
- Contratos de compra de hidrógeno (HPA)
- Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables
- Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Antecedentes

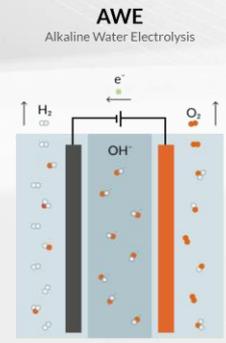
- La disponibilidad de energía renovable influye en las condiciones de funcionamiento de los electrolizadores acoplados directamente con fuentes renovables variables.
- Estas condiciones de funcionamiento afectan a diferentes indicadores de estas plantas, como la producción de hidrógeno, su coste, la eficiencia y la durabilidad de los sistemas de producción de hidrógeno renovable basados en electrolizadores.
- La configuración de electrolizadores en arquitecturas modulares, basada en varios stacks o módulos es uno de los métodos utilizados para optimizar su integración con fuentes renovables.

Electrolizadores alcalinos presurizados (AWE o PAWE)

- Los electrolizadores alcalinos emplean una tecnología madura y comercialmente disponible.
- Tienen un diseño de stack más complejo que el de los electrolizadores PEM por la gestión de un electrolito líquido, aunque a efectos prácticos son relativamente fáciles de fabricar.
- Sus costes de capital son inferiores a los de otras tecnologías de electrolizadores.
- Existen electrolizadores alcalinos en un rango de operación desde presión atmosférica hasta cercanas a 30 bar. Los electrolizadores presurizados pueden responder a variaciones en la carga con mayor rapidez que los que operan a presiones cercanas a la atmosférica.

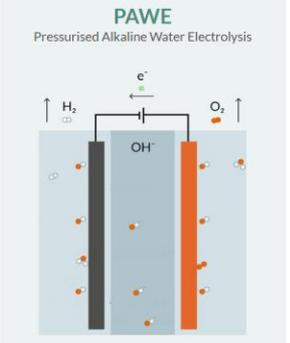


IRENA



AWE
Alkaline Water Electrolysis

Alkaline Water Electrolysis (AWE): This technology uses an alkaline solution, typically potassium hydroxide, as the electrolyte. The technology traditionally operates at intermediate temperatures and low current density and has established a long-standing presence in the industry.

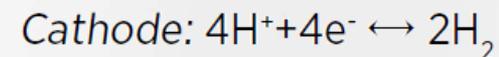
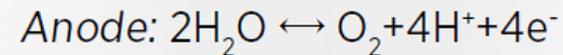
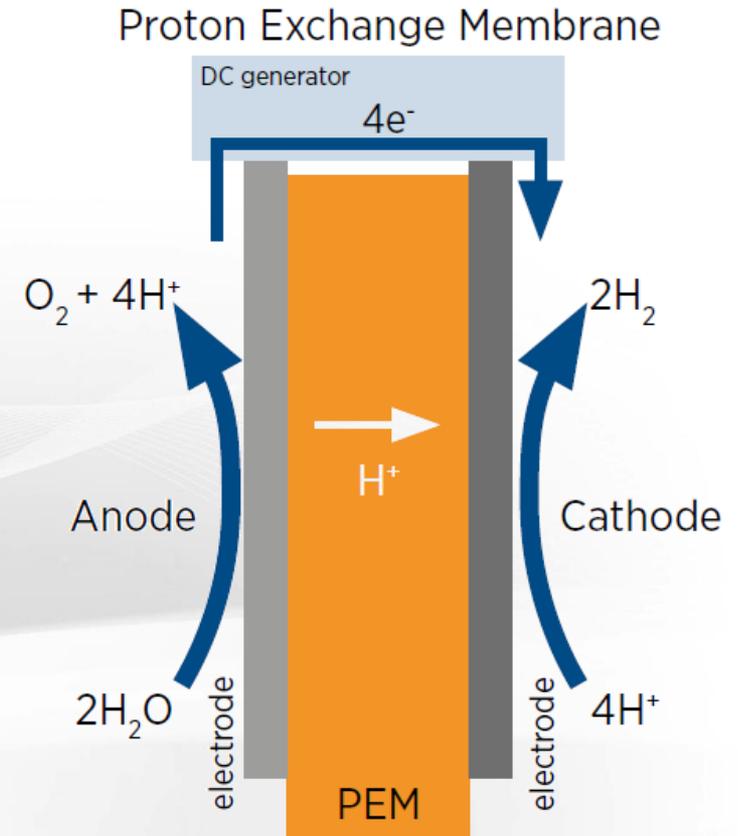


PAWE
Pressurised Alkaline Water Electrolysis

Pressurised Alkaline Water Electrolysis (PAWE): This technology uses electrolyser as pressure vessels, utilising electrochemical reactions to pressurise the system. There are distinct advantages with this approach, as utilising this electrolyser can effectively reduce the overall energy demand for producing pressurised hydrogen. This means that the pressurised system can operate at higher current densities while keeping the overall size down.

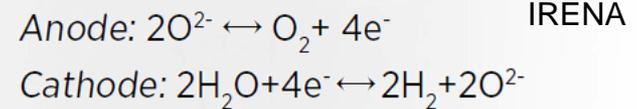
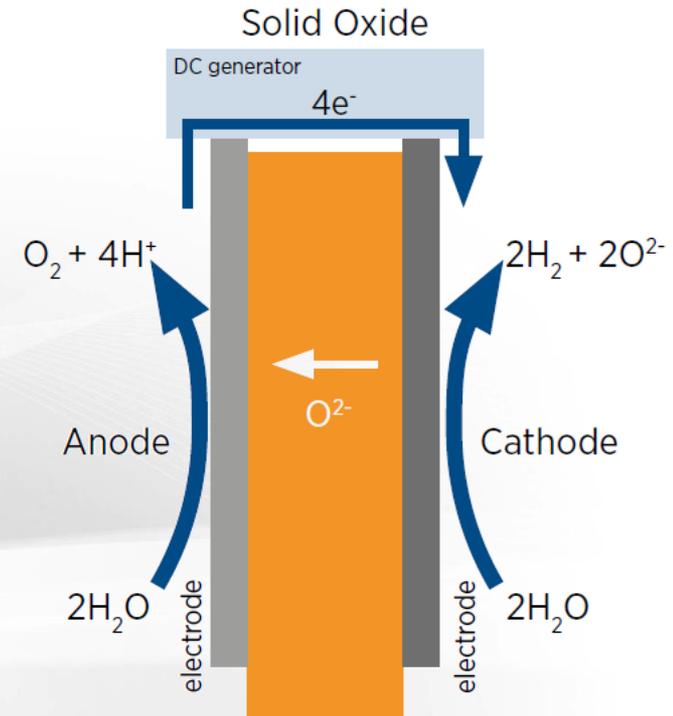
Electrolizadores de membrana con electrolito polimérico (PEMWE)

- Los electrolizadores PEM utilizan celdas con un electrolito de polímero sólido.
- Las celdas suelen funcionar a temperaturas de entre 50 °C y 80 °C y presión hasta 40 bares.
- Diseño de sistema compacto y simple, en comparación con los electrolizadores alcalinos.
- Capacidad para funcionar con mayores densidades de corriente.
- Mayor velocidad de respuesta que los electrolizadores alcalinos.
- Requieren catalizadores de metales nobles.
- Mayor coste de los electrolizadores alcalinos.



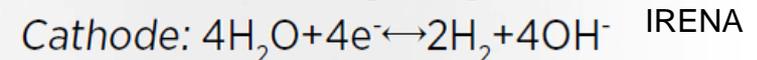
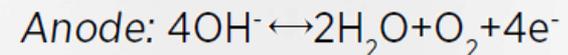
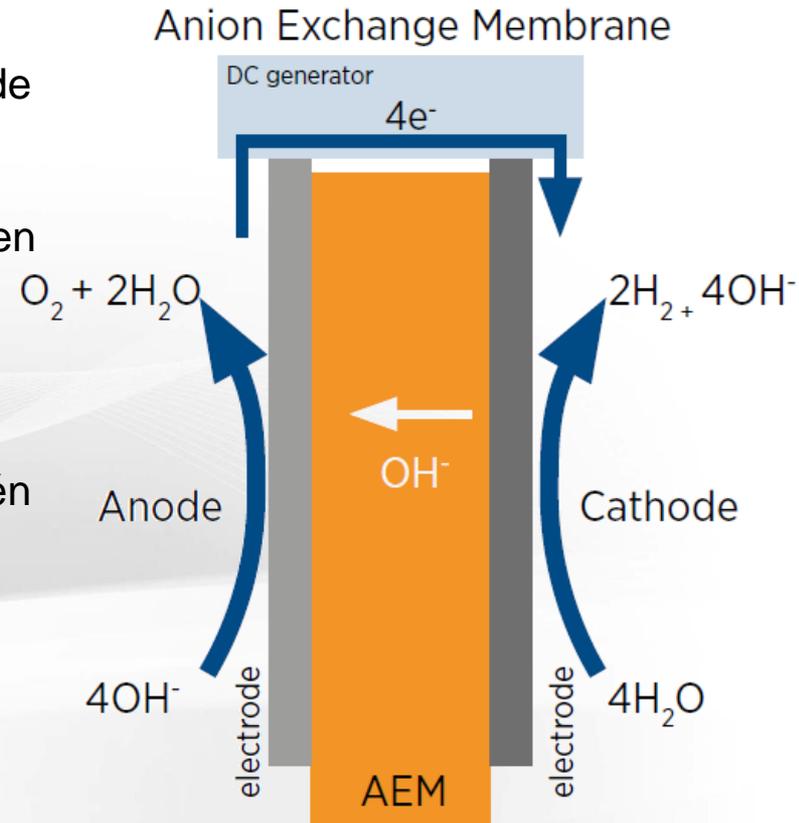
Electrolizadores de celdas electrolizadoras de óxido sólido (SOEC)

- Los electrolizadores SOEC funcionan a temperaturas del orden de 700-850 °C, usualmente a presión atmosférica.
- Utilizan energía térmica y electricidad. Las altas temperaturas incrementan su eficiencia eléctrica y permiten el uso de metales no preciosos como catalizadores.
- Los electrolizadores SOEC pueden, en teoría, funcionar de forma reversible como pilas de combustible.
- Los electrolizadores SOEC son menos flexibles que otras tecnologías de electrolizadores, por lo que son menos adecuados para el acoplamiento directo con la producción variable de energía renovable.
- El calor requerido por estos electrolizadores puede ser suministrado por fuentes como corrientes de calor residual industrial o plantas de energía solar concentrada (CSP).



Electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEMWE)

- Los electrolizadores AEM se basan en la misma reacción química que los electrolizadores alcalinos convencionales. La diferencia radica en el uso de una membrana de polímero, que permite el paso de aniones.
- Tienen un diseño simple y compacto, y no requieren catalizadores nobles o titanio.
- Se precisa un importante esfuerzo de I+D para superar ineficiencias de rendimiento e inestabilidades que afectan a la vida útil. También se requieren mejoras para aumentar su rango de potencia.
- Ofrecen un menor coste que los electrolizadores PEM.
- Alto grado de flexibilidad y reducidos tiempos de respuesta, lo que facilita una mayor integración de fuentes de generación renovables.



IRENA

Comparación de tecnologías de electrolisis (I)

Technical characteristics of typical water electrolysis technologies

	Alkaline	AEM	PEM	Solid Oxide
Anode reaction	$2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$
Cathode Reaction	$2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
Overall cell	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
Electrolyte	KOH/NaOH (5M)	DVB polymer support with 1 M KOH/NaOH	Solid polymer electrolyte (PFSA)	Yttria stabilized Zirconia (YSZ)
Separator	Asbestos/Zirfon/Ni	Fumatech,	Nafion [®]	Solid electrolyte YSZ
Electrode/Catalyst (Hydrogen side)	Nickel coated perforated stainless steel	Nickel	Iridium oxide	Ni/YSZ
Electrode/Catalyst (Oxygen side)	Nickel coated perforated stainless steel	Nickel or NiFeCo alloys	Platinum carbon	Perovskites (LSCF, LSM) (La,Sr,Co,FE) (La,Sr,Mn)
Gas Diffusion layer	Nickel mesh	Nickel foam/carbon cloth	Titanium mesh/carbon cloth	Nickel mesh/foam
Bipolar Plates	Stainless steel/Nickel coated stainless steel	Stainless steel/Nickel coated stainless steel	Platinum/Gold-coated Titanium or Titanium	Cobalt coated stainless steel
Nominal current density	0.2–0.8 A/cm ²	0.2–2 A/cm ²	1–2 A/cm ²	0.3–1 A/cm ²
Voltage range (limits)	1.4–3 V	1.4–2.0 V	1.4–2.5 V	1.0–1.5 V
Operating temperature	70–90 °C	40–60 °C	50–80 °C	700–850 °C
Cell pressure	<30 bar	<35 bar	<70 bar	1 bar
H ₂ purity	99.5–99.9998%	99.9–99.9999%	99.9–99.9999%	99.9%
Efficiency	50%–78%	57%–59%	50%–83%	89% (laboratory)
Lifetime (stack)	60 000 h	> 30 000 h	50 000–80 000 h	20 000 h
Development status	Mature	R & D	Commercialized	R & D
Electrode area	10 000–30 000 cm ²	<300 cm ²	1500 cm ²	200 cm ²
Capital costs (stack) minimum 1 MW	USD 270/kW	Unknown	USD 400/kW	>USD 2000/kW
Capital costs (stack) minimum 10 MW	USD 500–1000/kW	Unknown	USD 700–1400/kW	Unknown

S. Shiva Kumar, Hankwon Lim, An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production, Energy Reports, 2022,

Comparación de tecnologías de electrolisis (II)

Summary of parameters of state-of-the-art water electrolysis.

Technology	AEL	PEM	SOEC	
Electrolyte	20–40 wt % KOH	water	steam	
Operating temperature [°C]	60–90	50–80	700–900	
Typical operating pressure [bar]	10–30	20–50	1–15	
Current density [$A\ cm^{-2}$]	0.2–0.4 / 1.2	0.6–2.0	0.3–2.0	
Cell area [m^2]	<4	<0.3	<0.01	
Specific energy consumption (stack) [$kWh_{el}\ Nm^{-3}\ H_2$]	4.2–4.8	4.4–5.0	>3.0	
Specific energy consumption (system) [$kWh_{el}\ Nm^{-3}\ H_2$]	5.0–5.9	5.0–6.5	3.7–3.9 (4.7 $kWh\ Nm^{-3}\ H_2$)	
Lower dynamic range [%]	10–40 / <10	0–10	>30	
Gas purity [%]	> 99.5 / > 99.95	99.99	99.90	
System response	seconds	milliseconds	seconds	
Cold time start [min]	<60 / <1–50 % ^{b)}	<20	<60	
Stack lifetime [h]	60 000–90 000	20 000–60 000	<10 000	
Maturity	mature	commercial	demonstration	
Investments costs [$€kW^{-1}$]	800–1500	1400–2100	>2000	
η_{LHV}	[%]	63–71	60–68	96
Load Flexibility	[%]	20–100	0–160	–100–100 (SOFC-SOEC)
Warm start-up (standby-load) 0–100%		1–5 min	<10s	15 min
Cold start-up (0-load) 0–100%	[min]	5–15	<10–15	>60
Heat-up ramp	[K/min]	0.4–1.5	0.3–1	0.5–1
Load gradient, start up	[%/s]	10–50	10–90	ca. 0.1–0.3 (in the lab)
Load gradient, shutdown	[%/s]	10	40.6	3

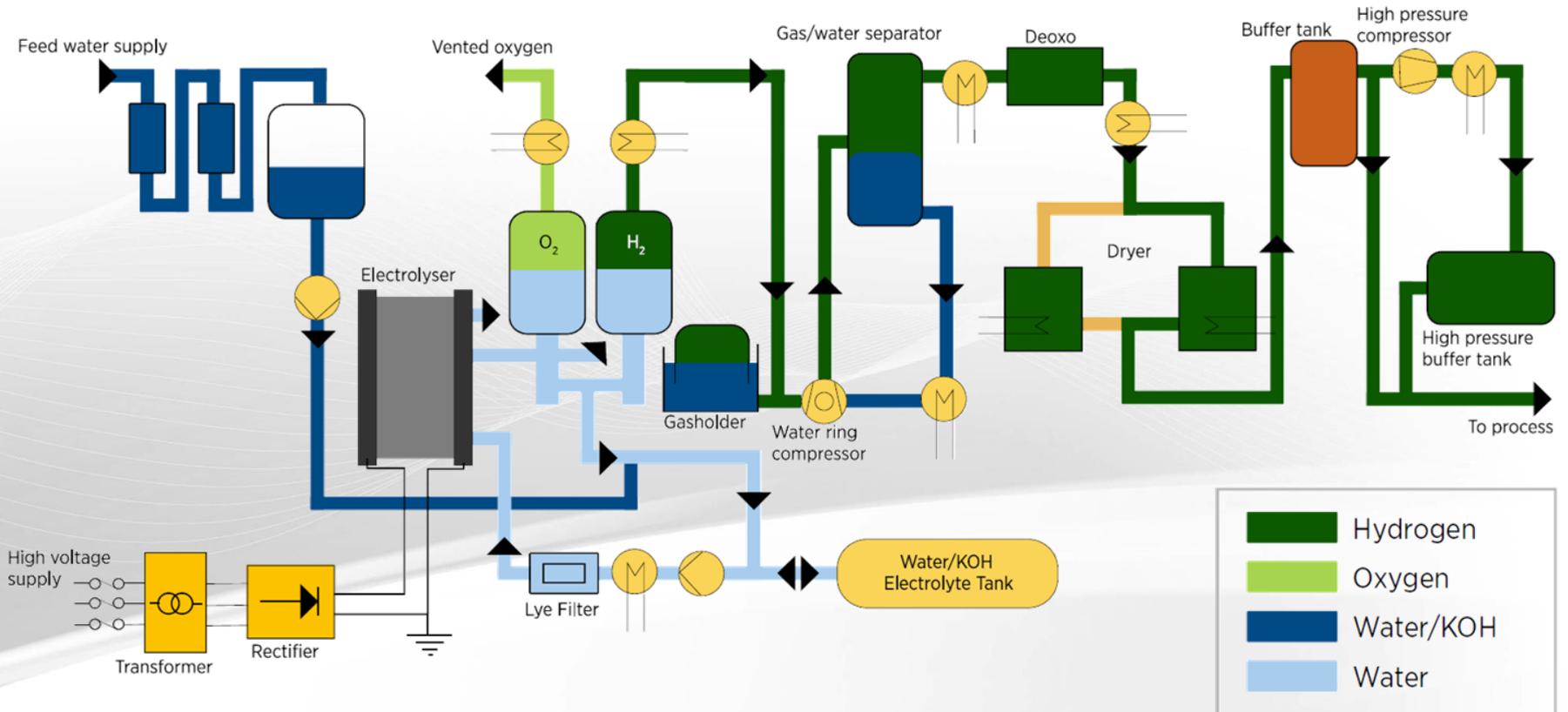
Comparación de tecnologías de electrolisis (III)

Advantages and disadvantages of typical water electrolysis technologies.

Electrolysis technology	Advantages	Disadvantages
Alkaline water electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Well established Technology • Commercialized for industrial applications • Noble metal-free electrocatalysts • Relatively low cost • Long-term stability 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited current densities • Crossover of the gasses • High concentrated (5M KOH) liquid electrolyte
AEM water electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Noble metal-free electrocatalysts • Low concentrated (1M KOH) liquid electrolyte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited stability • Under development
PEM water electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Commercialized technology • Operates higher current densities • High purity of the gases • Compact system design • Quick response 	<ul style="list-style-type: none"> • Cost of the cell components • Noble metal electrocatalysts • Acidic electrolyte
Solid oxide water electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • High working temperature • High efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited stability • Under development

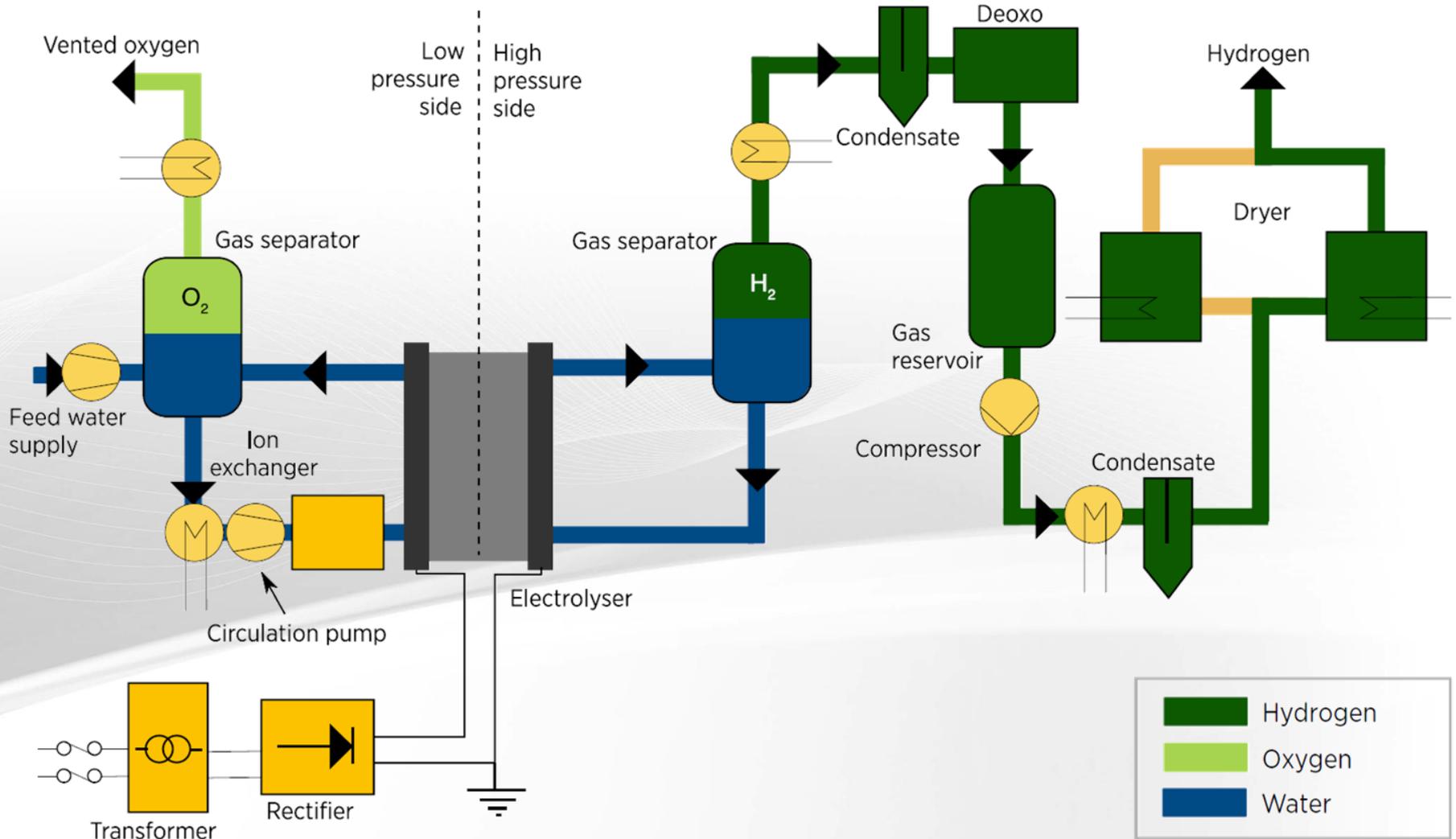
S. Shiva Kumar, Hankwon Lim, An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production, Energy Reports, 2022,

Diseño de sistema y balance de planta típico de un electrolizador alcalino



IRENA

Diseño de sistema y balance de planta típico de un electrolizador PEM



Ejemplo de electrolizador alcalino (presurizado)

Input details

Max stack capacity	6 x 1 MW
Grid voltage	10.5 kV, 22kV & 33kV (+/-10%)
Demineralised water consumption	< 9.1 kg/kg H ₂
Nitrogen consumption / purge	25-30 Nm ³

Output details

H ₂ production	Up to 1200 Nm ³ /hour 107 kg/hour
H ₂ purity	98% [vol]
H ₂ purity purification module	≥ 99,97% [vol]
Oxygen production (vented)	Up to 600 Nm ³ /hour
Output pressure	≥ 35 barg
Potential heat utilisation	>1850 kW

Operational details

Dynamic range	25% -> 100%
Load adjustment time (25% <-> 100%)	<40 s.
Ambient temperature range	(-20° C -> +40° C)
Start-up time from off (excl. N ₂ purge)	<30. min.
Stand by time	>24 hours
Stack efficiency	51.9 kWh/kg H ₂

HyProvide® X-1200



System Specification



Ejemplo de electrolizador PEM

H ₂ production nominal	450 kg/d 210 Nm ³ /h
System specific energy consumption ^{1,2}	4.7 kWh/Nm ³ H ₂ 53 kWh/kg
System efficiency ^{1,2}	75 %
Performance class	1 MW
H ₂ production modulation range	42 – 210 Nm ³ /h 20 – 100 % H ₂
H ₂ purity	5.0 (meets ISO 14687:2019 Table 2)
H ₂ output pressure	20 – 30 bar (g)
Load change	30 s (Standby to nominal load)
Heat recovery	Heat output: 170 kW BoL 350 kW EoL 57 °C Transfer to customer system >90% system efficiency
H ₂ O required quality	TrinkwV 2020 EU Directive 2020/2184-EU
H ₂ O consumption nominal	260 kg / h (at 10° dH)
Power supply electrolysis ³	3 x 480 V Y, 3 x 480 V ▲ / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting power: 1.325 MVA
Power supply peripherie	3 x 400 V / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting value: 150 kW
Dimensions L x W x H	40' Container, incl. attachments ca. 13.2 x 4.0 x 5.7 m
Weight	ca. 36 t (operational)
Ambient temperature	-20 °C ⁴ bis +40 °C

Technical changes reserved
¹ Standard conditions: BoL, 15 °C outdoor temperature, 30 bar(g) H₂ transfer pressure
² 200 Nm³/h, based on Higher Heating Value (HHV).
³ Transformer is required for galvanic isolation
⁴ Optionally expandable down to -30 °C with the cold package

QUEST ONE PEM-ELECTROLYZER ME450

QUEST ONE



Tres series de tres stacks cada una (9 stacks en total)

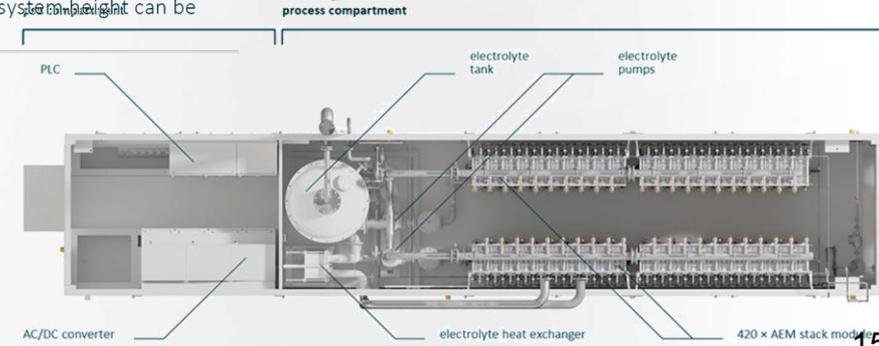
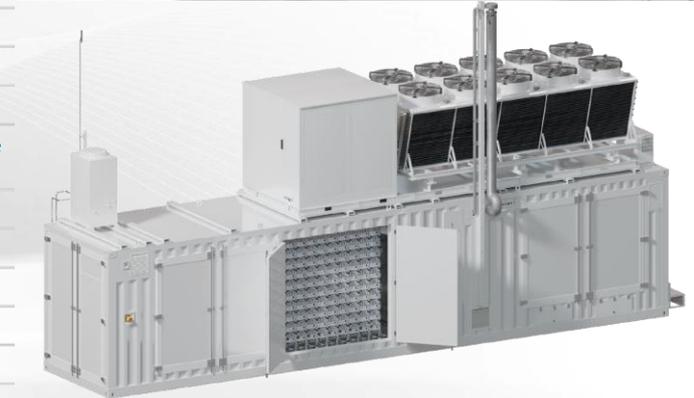
Ejemplo de electrolizador AEM



Enapter

AEM Nexus 1000

H₂ nominal flow	210 Nm ³ /h 453 kg/24h	Net volume flow rate
H₂ outlet pressure	Up to 35 barg (507.63 psig)	
H₂ purity	99.95% in molar fraction	Impurities: H ₂ O < 500 ppm, O ₂ < 5 ppm
H₂ purity with optional dryer	99.999% in molar fraction	Impurities: H ₂ O < 5 ppm, O ₂ < 5 ppm ≈ 6 kW consumption during regeneration
H₂ outlet temperature	5 – 55 °C (41 – 131 °F)	
O₂ nominal flow	105 Nm ³ /h	Vented at atmospheric pressure
Nominal power consumption	1,008 kW	Beginning of life (BOL)
Voltage	3 × 400 VAC	± 10 %
Frequency	50/60 Hz	± 10 %; THD < 5 %
H₂O nominal consumption	190 L/h (50.19 gal/h)	Purified water
H₂O inlet quality	Minimum ASTM D1193-06 Type IV or recommended Type II or Type III	
Operational flexibility	3% – 100%	Of nominal H ₂ flow rate
Specific power consumption (Efficiency)	4.8 kWh/Nm ³ H ₂ 53.3 kWh/kgH ₂	Including all utilities inside the battery limits of the AEM Nexus 1000 (at BOL)
Hot startup time	0 – 100% in 100 seconds	Electrolyte is at min. 35 °C (95 °F)
Cold startup time	0 – 100% in 20 minutes	Assuming 15 °C (59 °F) ambient temperature
Ambient operating temperature	-15 – 40 °C (5 – 104 °F)	Up to 45 °C (113 °F) with hot-ambient version
Sound Pressure Level	62 db(A) Max.	At 10 m (Including all utilities)
Process heat output	300 kW	BOL; ≈ 50 °C (≈ 122 °F)
Dimensions (L × W × H)	12.19 × 2.44 × 2.90 m 40 × 8 × 9.5 ft	only container height, full system height can be significantly taller



Diseño modular y máxima flexibilidad en operación

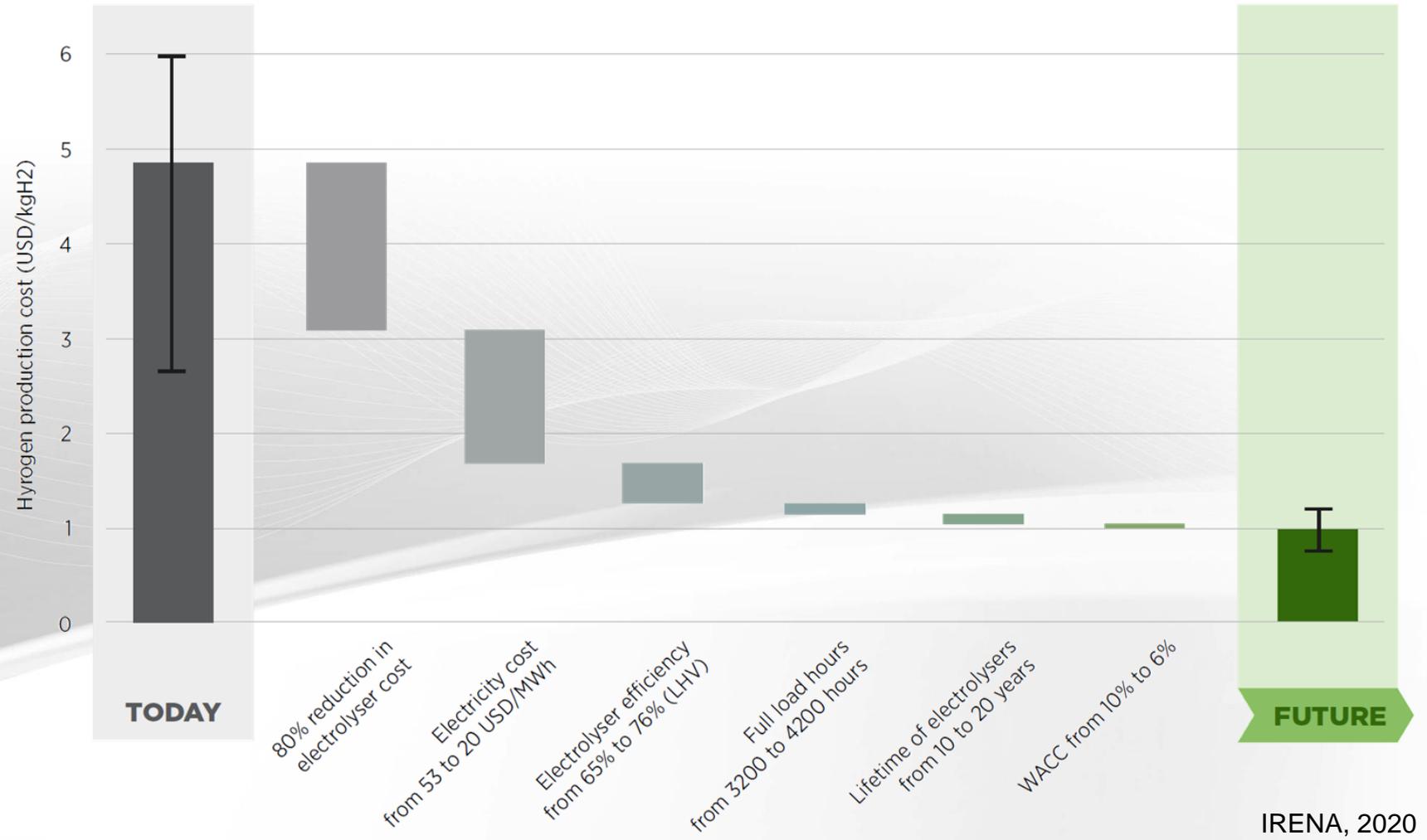
420 stacks de 2,4 kW en cadenas de 10 con un balance de planta común, integrados en un contenedor (1 MW).

Cada cadena aumenta o disminuye la carga por separado para aprovechar al máximo la energía disponible.

Principales criterios de diseño de plantas de producción de hidrógeno renovable (KPI)

- Mínimo coste del hidrógeno producido:
 - CAPEX
 - OPEX, incluyendo el coste de la electricidad
 - Eficiencia
 - Factor de utilización
 - Vida útil
- Requisitos del usuario final:
 - Pureza
 - Presión
 - Caudal
 - Disponibilidad
- Seguridad en todas las fases del proyecto

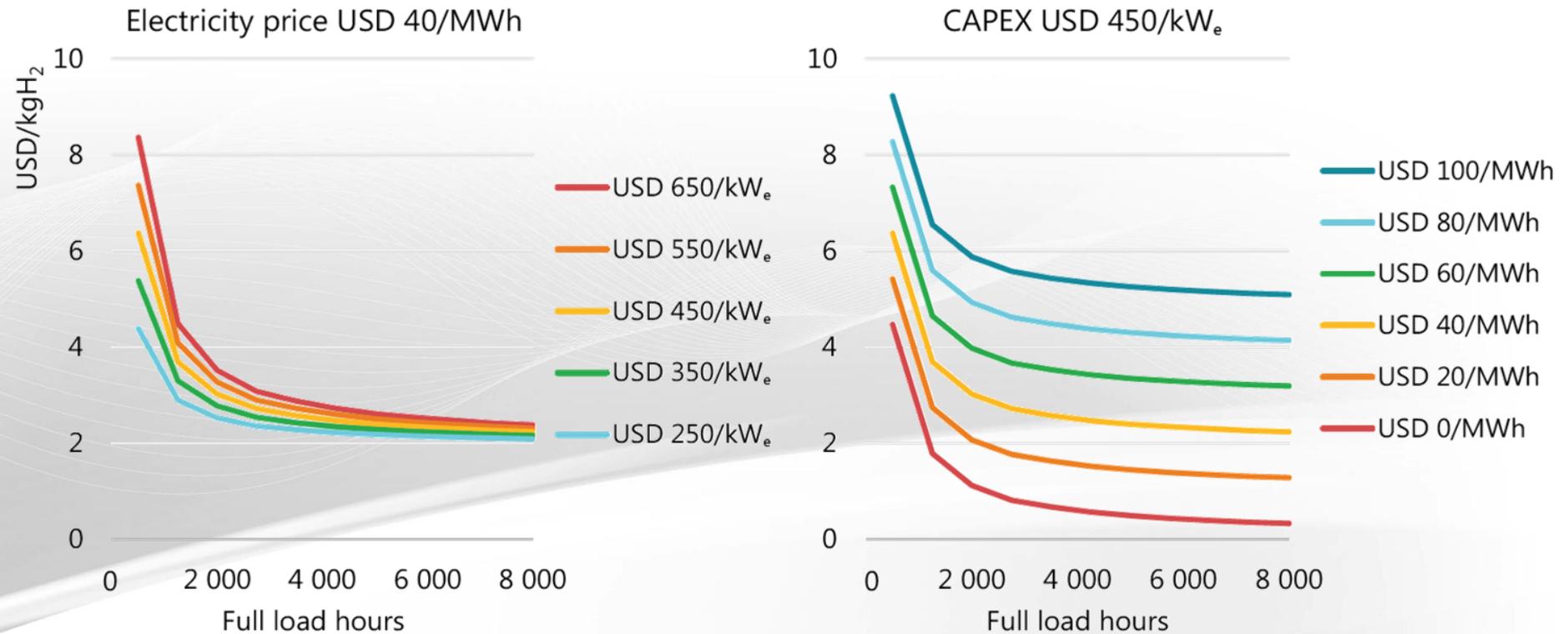
Principales factores que afectan al precio final del hidrógeno renovable



IRENA, 2020

Principales factores que afectan al precio final del hidrógeno renovable

Coste nivelado de producción de hidrógeno en función de las horas de operación, para diferentes costes de inversión en electrolizadores y costes de electricidad



Notes: MWh = megawatt hour. Based on an electrolyser efficiency of 69% (LHV) and a discount rate of 8%.

Al aumentar el número de horas a plena carga, el impacto del CAPEX en el precio del hidrógeno disminuye, y la electricidad se convierte en el principal factor sobre el coste final.

IEA, 2019

Contratos de compra de energía eléctrica (PPA) de origen renovable

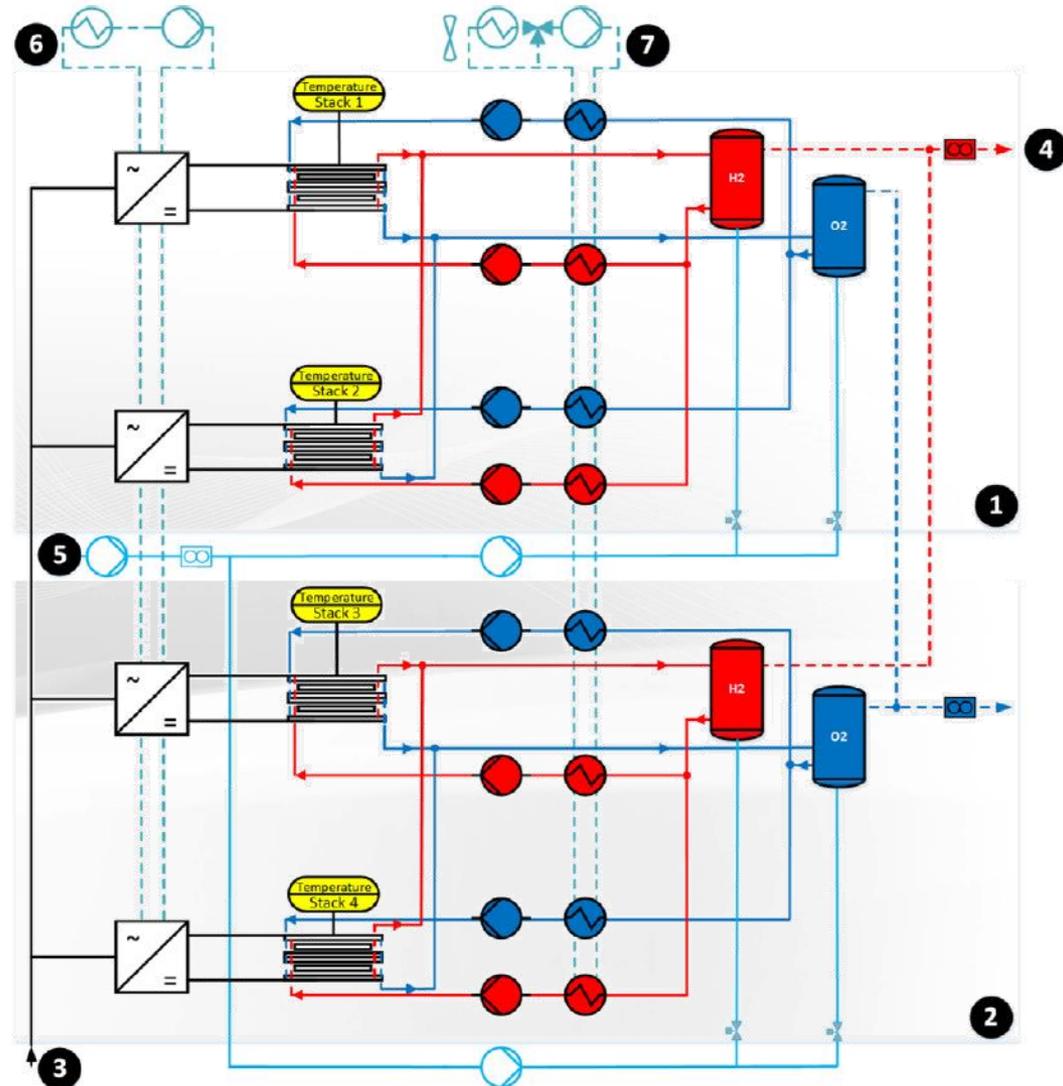
- Los contratos de compra de energía (*Power Purchase Agreement*, PPA) pueden especificar que la electricidad que se suministra sea de origen renovable.
- Un electrolizador conectado a la red puede utilizar un PPA renovable para garantizar que el hidrógeno que produce sea renovable.
- Los proyectos de hidrógeno verde pueden firmar PPA renovables que incluyan el suministro de múltiples recursos de generación en amplias zonas geográficas, siempre que existan conexiones a la red.
- La variabilidad de las plantas renovables para la producción de electricidad suministrada en un PPA (por ejemplo, con combinaciones de plantas solares y eólicas) permiten incrementar sustancialmente el número de horas anuales de utilización de los electrolizadores para la producción de hidrógeno.
- Los PPA para la producción de hidrógeno permiten también gestionar el consumo de electricidad en momentos de baja demanda eléctrica, y ofrecen oportunidades para la implantación de nuevas plantas de generación de energía eléctrica de origen renovable.
- En la Unión Europea, se deben tener en cuenta las indicaciones del Acto Delegado II de la Directiva de Energía Renovable de la Comisión Europea, en cuanto a los principios de adicionalidad, correlación temporal y geográfica que deben aplicar a los PPA para la producción de hidrógeno renovable.

Contratos de compra de hidrógeno (HPA)

- Un contrato de compra de hidrógeno (*Hydrogen Purchase Agreement*, HPA) es un acuerdo legalmente vinculante entre un proveedor de hidrógeno y un cliente, en el que se describen los términos y condiciones para la compra y suministro de hidrógeno.
- Es una herramienta adecuada para garantizar una demanda a medio-largo de plazo de hidrógeno, facilitando la financiación y construcción de las instalaciones de producción, especialmente de hidrógeno renovable.
- El acuerdo suele incluir detalles como el precio (que puede ser variable en el tiempo), el cronograma de entrega y los estándares de calidad del hidrógeno, así como otras posibles garantías proporcionadas por el proveedor (por ejemplo, un suministro mínimo garantizado).
- El suministrador de hidrógeno renovable puede producir la electricidad en plantas de energía renovable asociadas a la planta de producción de hidrógeno, o disponer de uno o varios PPA.
- En el caso de suministro de hidrógeno renovable, el proveedor debe garantizar al comprador el origen de la electricidad utilizada, mediante los procedimientos y mecanismos que se acuerden (por ejemplo, certificaciones).
- La generalización de HPA debe implicar su estandarización a nivel local, nacional e internacional, con objeto de facilitar el comercio de hidrógeno y garantizar la transparencia en todo el proceso.
- Otros procesos de compra de hidrógeno: subastas bilaterales

Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables

- Diagrama simplificado de tuberías e instrumentación de un electrolizador PEM Siemens Silyzer 100
- Cuatro stacks de 25 kW cada uno, operados de forma individual con un convertidor AC/DC y conectados en paralelo
- Los stacks comparten elementos del balance de planta de dos en dos
- Desarrollo de un modelo y propuesta de estrategias de operación para optimizar el coste del hidrógeno producido
- Distribución de energía entre los stacks y arranques/paradas en función de diferentes estrategias



Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables

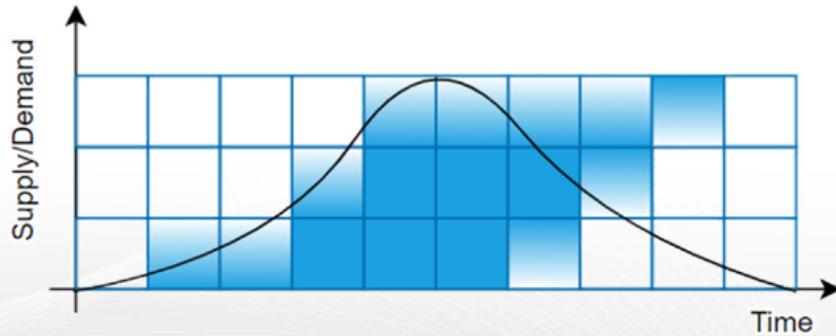
- En general, las estrategias de asignación de potencia se pueden utilizar para optimizar importantes indicadores clave (KPI), como la producción de hidrógeno, la eficiencia global del sistema, el coste del hidrógeno producido, la disponibilidad y pureza de hidrógeno al cliente final y la vida útil del sistema.
- Se dividen principalmente en estrategias de asignación promedio y de asignación en cadena.
- La estrategia de asignación promedio implica que la energía disponible que entra al sistema se reparte de igual forma entre un número constante de stacks o módulos en el sistema. Cuando se alcanza la potencia mínima necesaria para cada stack, el electrolizador comienza a operar y producir hidrógeno. Todos los stacks operan al mismo nivel de carga y tienen el mismo número de arranques y paradas, lo que supone un similar nivel de degradación y vida útil.
- En la estrategia de asignación en cadena, los stacks individuales entran en operación de forma individual, según diferentes criterios. Cuando el stack o módulo n alcanza una determinada potencia o condición de operación, el stack o módulo $n+1$ entra en operación hasta cumplirse la misma condición, y así sucesivamente.

Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables

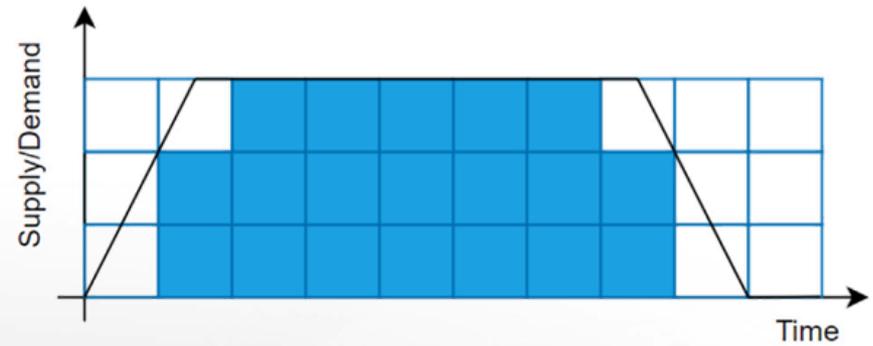
Algunas estrategias de funcionamiento típicas para electrolizadores con varios stacks según una asignación en cadena serían:

- Operación segmentada: el primer stack entra en funcionamiento cuando se alcanza un nivel mínimo de su potencia nominal. Cuando este stack alcanza un nivel de potencia predefinido, entra en funcionamiento el siguiente stack, y así sucesivamente. Si el nivel de potencia predefinido no es el nominal, una vez que todos los stacks han dicho nivel superior de potencia, se va incrementando progresivamente la potencia en cada stack, en el mismo orden que en el reparto inicial, hasta que todos los stacks alcanzan su potencia nominal. Si la potencia disponible disminuye, los stacks van reduciendo su potencia, hasta apagarse, según una estrategia de primero en entrar, primero en salir (FIFO) para garantizar un similar tiempo de funcionamiento y nivel de carga.
- Operación basada en arranques y paradas: el objetivo es que todos los stacks funcionen a potencia nominal. El primer stack se arranca cuando se alcanza dicha potencia, y así sucesivamente a medida que aumenta la potencia disponible. De nuevo, si la potencia disminuye, se sigue una estrategia FIFO, aunque en este caso puede ser más complejo repartir de forma homogénea entre los stacks el número de arranques/paradas y horas de operación. Durante estas horas, todos los stacks operan a potencia nominal. El stack que arranca en primer lugar depende del histórico de operación.
- Operación de arranque lento: se establece una potencia de arranque mínima para cada stack. Cuando el primer stack alcanza su potencia nominal y se dispone también de la potencia mínima necesaria, arranca el segundo stack, y así sucesivamente.

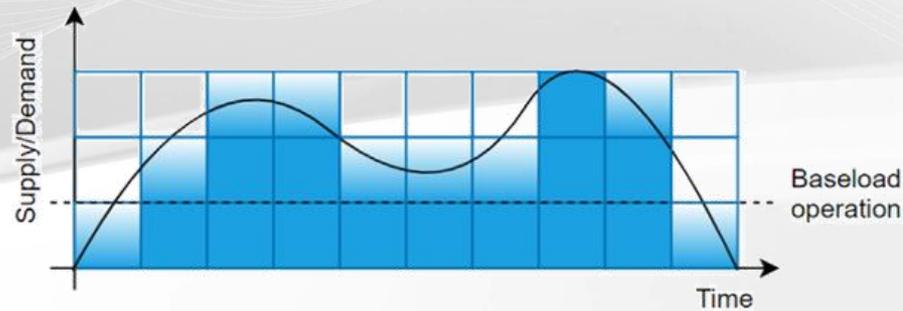
Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables



Estrategia basada en operación segmentada



Estrategia basada en arranques y paradas



Estrategia basada en arranque lento de stacks

Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables. Degradación.

- Cada una de estas estrategias permite optimizar diferentes KPI, aunque la mejora de un indicador puede suponer una reducción de otro. Necesidad de encontrar compromisos y adaptarlas a las características reales de los stacks y electrolizadores.
- Un indicador clave que se ve afectado de forma importante por las estrategias de operación es la degradación de los stacks, con impacto directo en su vida útil.
- La degradación es el resultado de un deterioro en los materiales de las celdas electrolíticas, principalmente las membranas o separadores y los catalizadores.
- Puede producirse por diversas causas con el mismo efecto: incrementar el voltaje de celda y reducir la eficiencia del stack. Puede llegar a provocar roturas en las membranas, lo que supone un riesgo en la operación de los electrolizadores.
- Se han identificado la influencia de diferentes modos de operación en la degradación de los stacks:
 1. Operación con potencia constante. La degradación aumenta con el tiempo de funcionamiento del electrolizador, incluso con una entrada de potencia constante, y especialmente a cargas elevadas.
 2. Operación con potencia fluctuante, como es el caso de la conexión directa con fuentes renovable.
 3. Arranques y paradas. Los ciclos de arranques y paradas de los stacks afectan significativamente a la gestión del calor y la tensión de los stacks, favoreciendo su degradación.

Estrategias de operación de electrolizadores conectados a fuentes renovables. Degradación.

- En general, la operación a potencia constante a baja (teniendo en cuenta aquí los aspectos de seguridad) y media, y el funcionamiento con reducidas fluctuaciones tienen un efecto limitado en la degradación.
- Los arranques y paradas frecuentes, alta variabilidad en la potencia de entrada a los stacks, y la operación constante a elevada carga tienen un impacto significativo en este parámetro.

Degradation of PEMWE components under dynamic operation.

Power ranges and the voltage degradation rates of PEMEC for different operating statuses.

Degradation modes	Causes	Consequences	Operating status	Power range (kW)	Parameters	Voltage degradation rate (mV/h)
Dissolution of catalyst	High operating potential; Current reversal during power off	$V_{act} \uparrow$	Maintaining	P_{rate}	V_{dm}	1.5
Agglomeration of catalyst	Load cycle and start-stop switching;	$V_{act} \uparrow$	Low power fluctuation	(P_{save}, P_t)	V_{df1}	50
	High current density	$V_{ohm} \uparrow$	Constant high energy efficiency power	P_{opt}	V_{opt}	10
Passivation of catalyst support	High operating potential	$V_{con} \uparrow$	Constant turning power	P_t	V_{dct}	20
	High current density;	$V_{ohm} \uparrow$	High power fluctuation	(P_t, P_{rate})	V_{dfh}	66
Passivation of electrode	Frequent fluctuations of current	$V_{ohm} \uparrow$	Constant rated power	P_{rate}	V_{dcr}	196
Dissolution of membrane	High current density	$V_{ohm} \downarrow$	Wendi Zheng et al., Optimization of power allocation for the multi-stack PEMEC system considering energy efficiency and degradation, International Journal of Hydrogen Energy, 2024			
Poisoning of membrane	Load cycle and start-stop switching; Frequent fluctuations of current	$V_{con} \uparrow$ $V_{ohm} \uparrow$				

Xinyu Lu et al., Optimization of power allocation for wind-hydrogen system multi-stack PEM water electrolyzer considering degradation conditions, International Journal of Hydrogen Energy, 2023

Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

- Diseño, desarrollo y operación de un electrolizador PEM multi-stack de 5,5 kW.
- Ensayos en bancos de pruebas y una microrred experimental existente con diferentes fuentes renovables y otros sistemas de almacenamiento de energía.
- Evaluación en condiciones reales de operación de la eficiencia, degradación y vida útil, respuesta a variaciones de potencia, comportamiento en operación con otros sistemas de almacenamiento de energía, etc.



Instituto
Nacional
de Técnica
Aeroespacial



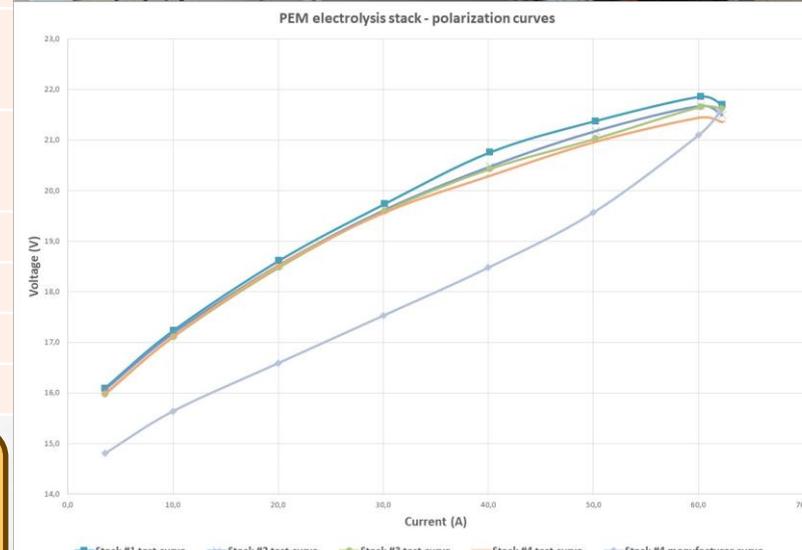
CEU
*Universidad
Cardenal Herrera*

Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

- Cuatro stacks PEM de 1,39 kW que se pueden conectar tanto en serie como en paralelo.
- En una primera fase se conectará un único convertidor de potencia a los cuatro stacks. Posteriormente se conectarán dos convertidores, uno para cada dos stacks.
- En el caso de un único convertidor, los cuatro stacks operarán con el mismo nivel de carga. El sistema de control seleccionará la configuración más adecuada para adaptar la tensión y la corriente del electrolizador resultante a la potencia disponible procedente de las fuentes renovables y a las condiciones de operación del convertidor de potencia.
- En este caso, el sistema de control decidirá el número de stacks en funcionamiento y la secuencia de conexión y desconexión, en función de la potencia disponible, el rendimiento, la producción de hidrógeno y criterios de vida útil (por ejemplo, arranques/paradas anteriores, horas de funcionamiento y nivel de potencia media, etc.)
- El sistema de control y las estrategias de operación propuestas se basan en el modelo de electrolizador PEM desarrollado conjuntamente por la Universidad de Sevilla y el INTA.

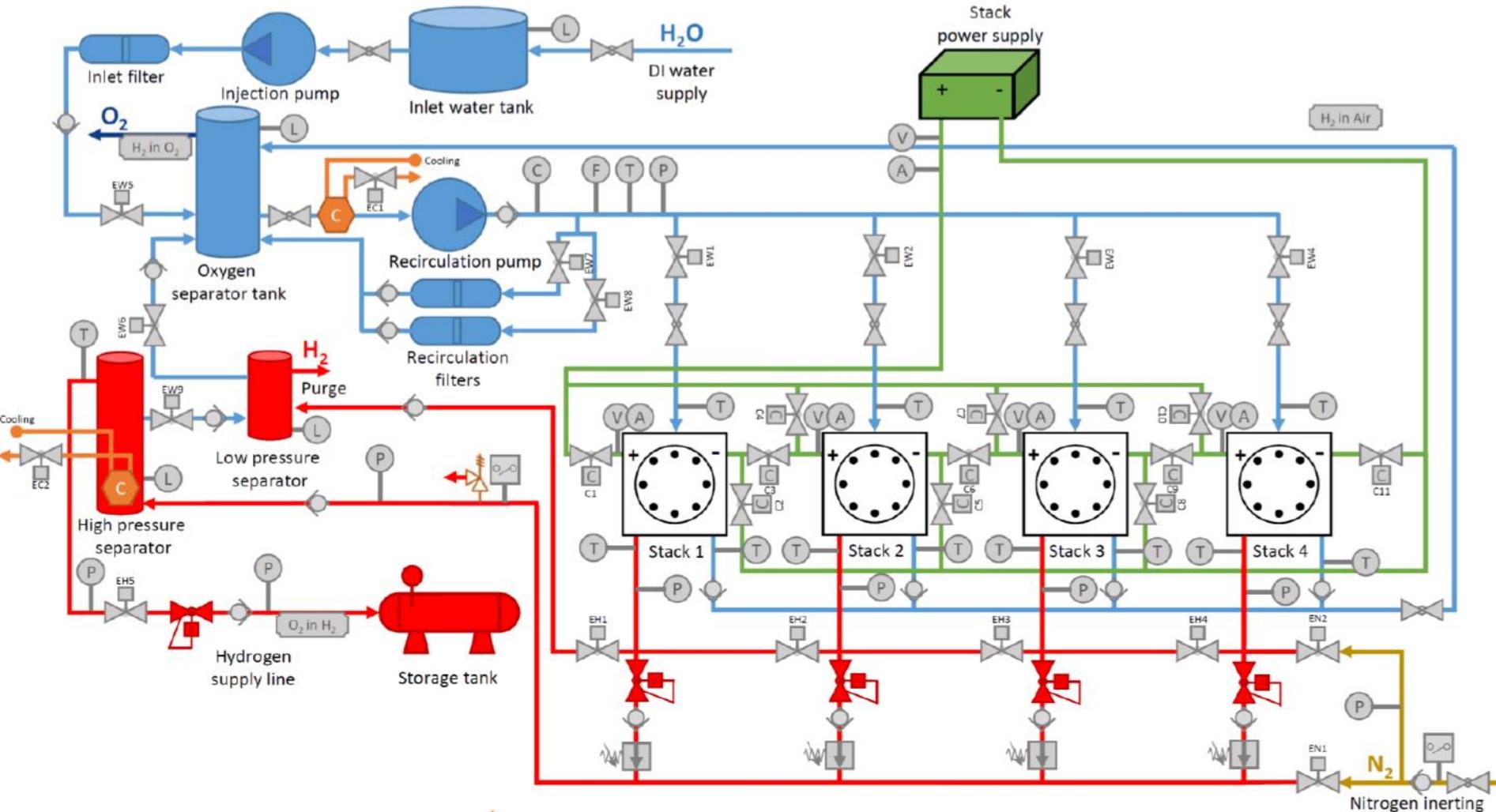
Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Característica	Valor (por stack)
Área activa en electrodos	28,3 cm ² (ø60 mm)
Número de celdas	10
Máxima producción de hidrógeno	4,4 NI/min (0,26 Nm ³ /h)
Máxima producción de oxígeno	2,2 NI/min (0,13 Nm ³ /h)
Temperatura de funcionamiento	65 - 80 °C
Tensión de stack (40 bar, 70 °C)	Aprox. 16,3 - 22,3 V al comienzo de la vida útil (BOL)
Intensidad de stack (40 bar, 70 °C)	2,8 - 62,2 A
Rango de potencia (40 bar, 70 °C)	aprox. 0,05 - 1,39 kW a BOL
Presión de salida H ₂	máx. 40 bar
Presión de salida O ₂	cerca del ambiente
Caudal de agua	mín. 2 l/min @BOL
Presión de entrada de agua	máx. 1,5 bar



<p>Ensayos de curvas de polarización: Presión: 6,5 barg Temperatura media: 55,2 °C Eficiencia media: 60%</p>	<p>Curva de polarización del fabricante: Presión: cercana a la ambiental Temperatura: 70 °C Eficiencia media: 69%</p>
---	--

Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable



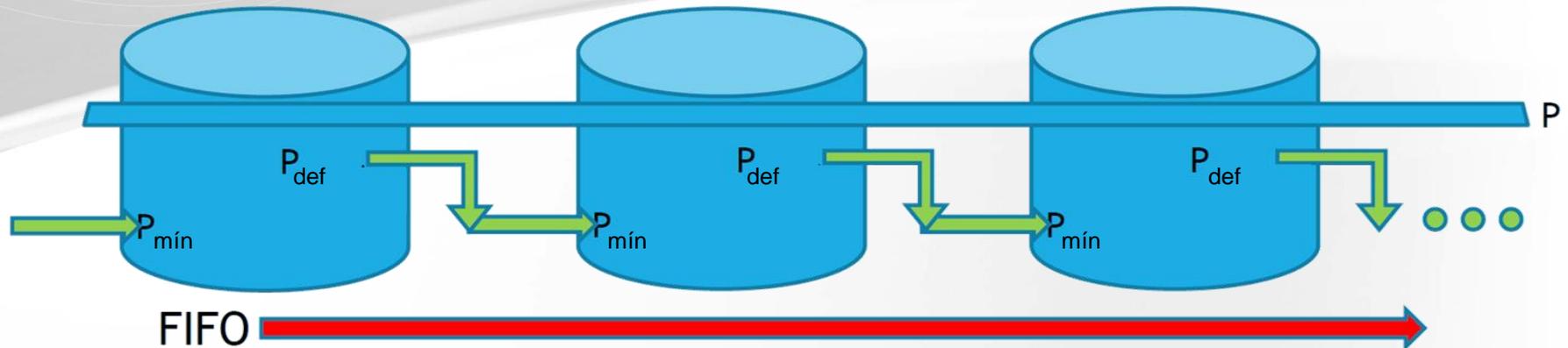
- | | | | | |
|------------------|--------------|------------------------------|----------------------------|--------------|
| (T) Temperature | (V) Valve | (E) Electrovalve | (PR) Pressure relief valve | (A) Analyser |
| (L) Level | (P) Pressure | (PC) Power contactor | (PS) Pressure switch | |
| (C) Conductivity | (V) Voltage | (BR) Back pressure regulator | (CV) Check valve | |
| (F) Flow | (A) Current | (HE) Heat exchanger | (PR) Pressure regulator | |

Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

En función de las características del sistema se proponen tres estrategias de operación:

Estrategia 1: asignación de potencia en cadena con operación segmentada.

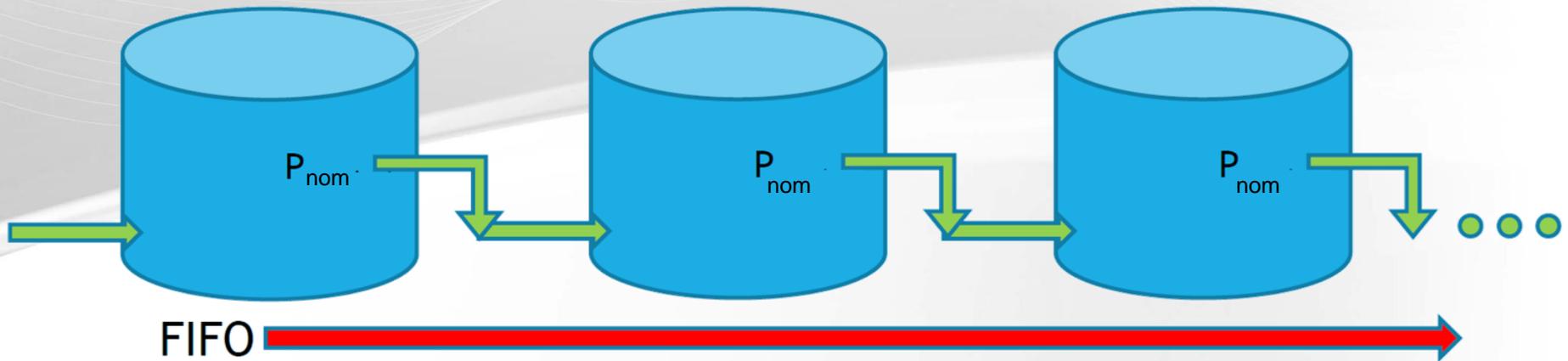
El primer stack comienza a funcionar cuando la potencia disponible alcanza un valor mínimo. Cuando se alcanza un valor predefinido de la carga nominal, entra en funcionamiento el siguiente stack.



Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Estrategia 2: asignación promedio con operación continua de los stacks en serie.

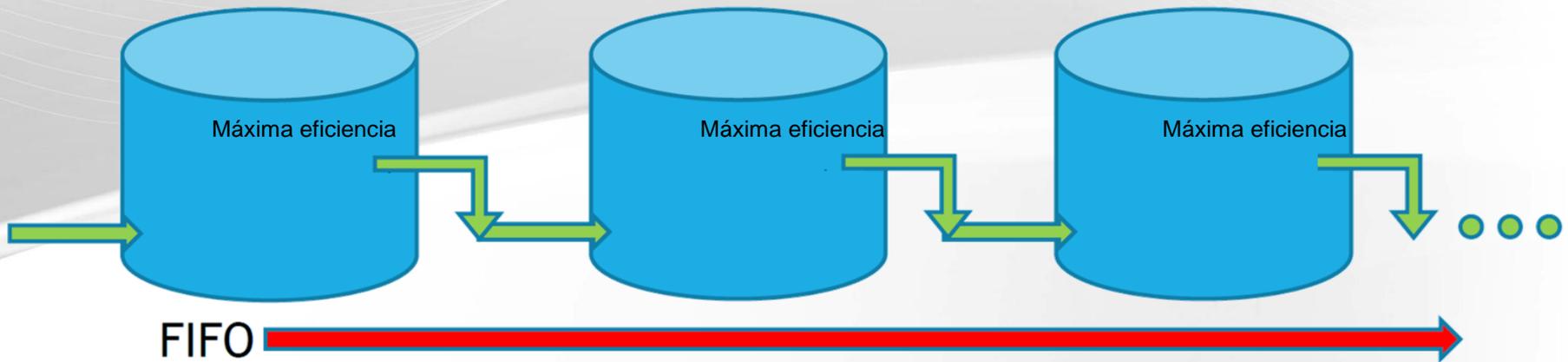
Una vez alcanzada la potencia mínima para los cuatro stacks, dicha potencia se distribuye proporcionalmente entre ellos. Operación equivalente a la un único stack con 40 celdas (10 celdas x 4 stacks).



Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

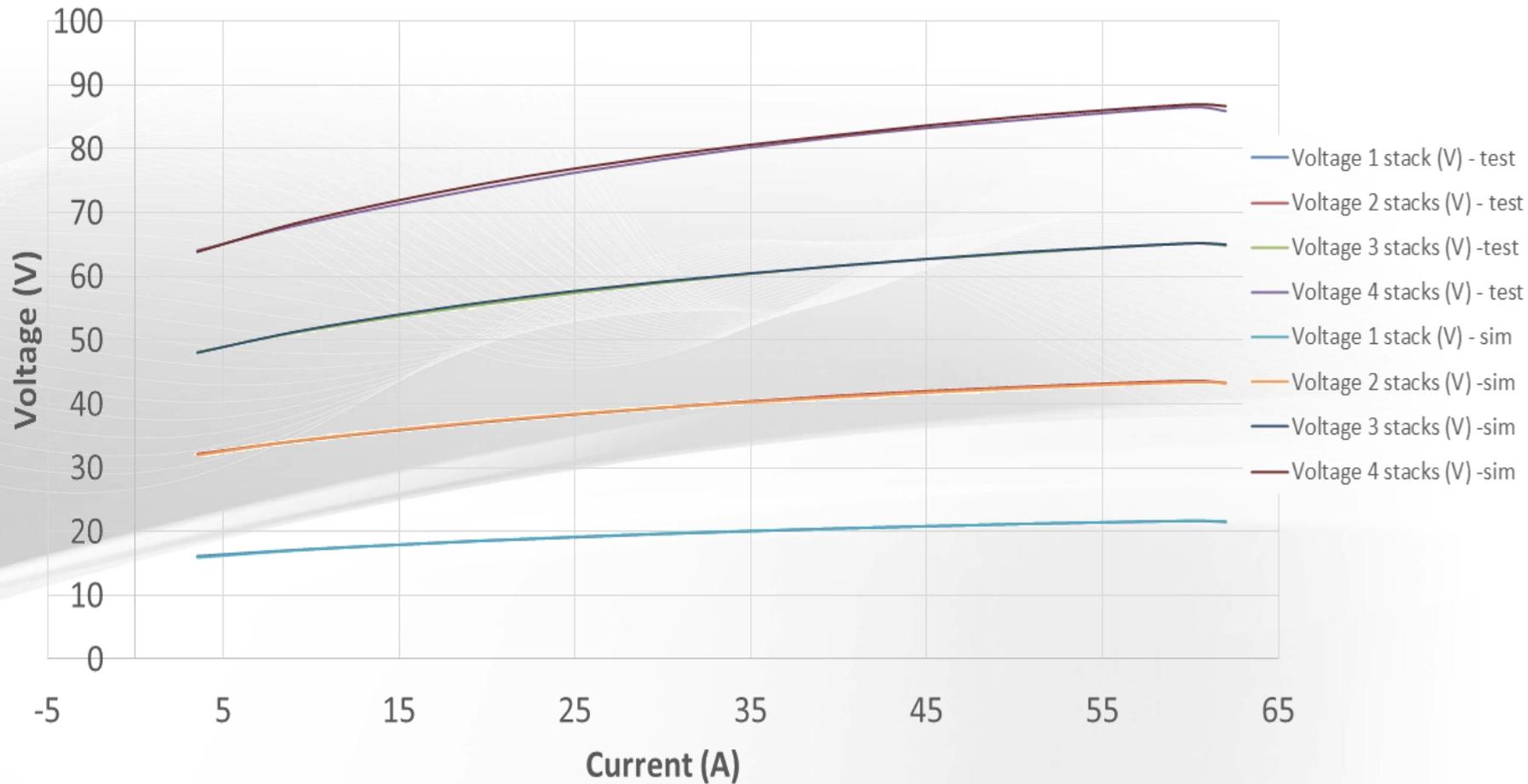
Estrategia 3: conexión en cadena con modo de operación de máxima eficiencia.

El modo de funcionamiento sigue la máxima eficiencia de los stacks, conectándolos y desconectándolos según este criterio.



Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Curvas de polarización del electrolizador multi-stack en configuración en serie



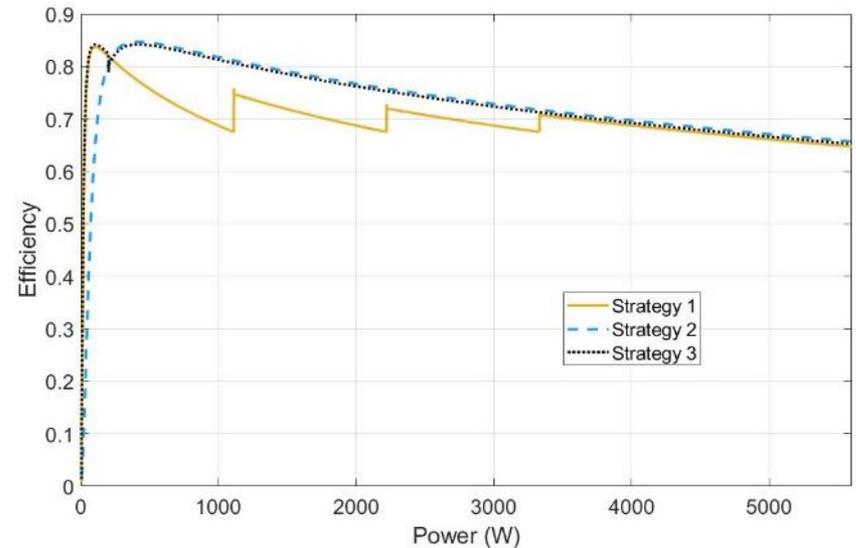
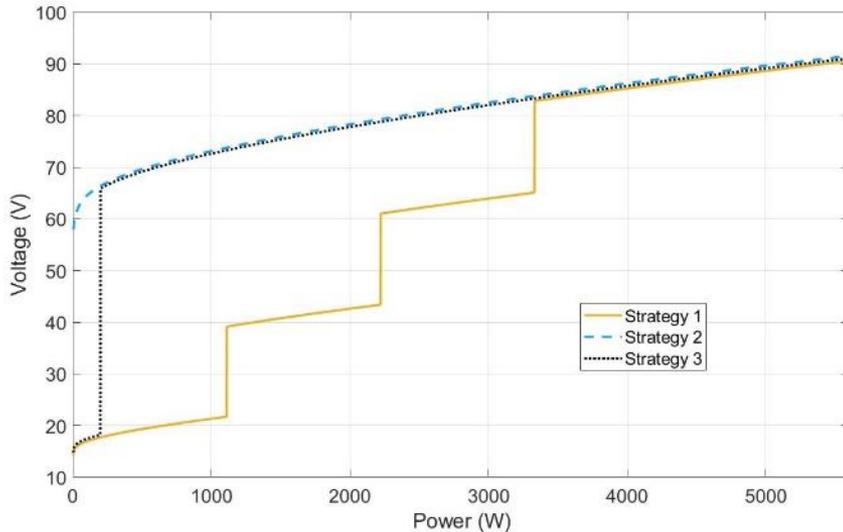
Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Curvas de tensión y eficiencia vs. potencia

Estrategia 1: asignación en cadena con modo de operación de segmentada.

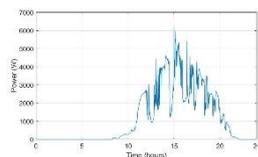
Estrategia 2: asignación promedio.

Estrategia 3: conexión en cadena con modo de operación de máxima eficiencia.



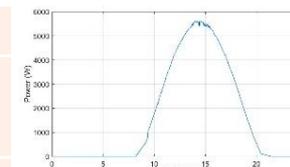
Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable

Las estrategias propuestas se han comparado en función de tres indicadores clave: eficiencia, degradación del electrolizador (medido como número de arranques y paradas) y producción de hidrógeno.



Generación de energía eléctrica de origen solar en un día nublado

Estrategia	Stack	Horas de operación	nº arranques	Producción H ₂ (Nm ³)	Estrategia	Stack	Horas de operación	nº arranques	Producción H ₂ (Nm ³)
1	1	7.46	4	5.16	1	1	9.53	1	7.61
	2	7.72	6			2	9.14	1	
	3	7.47	4			3	9.12	1	
	4	8.63	2			4	10.28	1	
2	1	13.61	1	5.33	2	1	12.98	1	7.65
	2	13.61	1			2	12.98	1	
	3	13.61	1			3	12.98	1	
	4	13.61	1			4	12.98	1	
3	1	12.96	1	5.37	3	1	12.19	1	7.68
	2	12.63	1			2	12.94	1	
	3	11.89	1			3	11.85	1	
	4	11.89	1			4	11.85	1	



Generación de energía eléctrica de origen solar en un día soleado.

Estrategia y día	Horas totales de funcionamiento	Diferencia máxima de horas de operación entre stacks	Relación producción de H ₂ / horas totales de funcionamiento (Nm ³ /h)
Estrategia 1 para día soleado	38,07	1,16	0,20
Estrategia 2 para día soleado	51,92	0	0,15
Estrategia 3 para día soleado	48,83	1,09	0,16
Estrategia 1 para día nublado	31,28	1,17	0,17
Estrategia 2 para día nublado	54,44	0	0,10
Estrategia 3 para día nublado	49,37	1,07	0,11

Caso práctico: Diseño y desarrollo de un electrolizador PEM multi-stack y optimización de estrategias de operación para la producción de hidrógeno renovable.

- Diseño preliminar de un electrolizador PEM multi-stack y definición de estrategias operativas para optimizar diversos KPI: producción de hidrógeno, eficiencia, degradación, calidad del hidrógeno, etc.
- Uso de un modelo cuasi-dinámico para simular la evolución de parámetros electroquímicos y térmicos en función de datos de entrada de intensidad variable.
- Simulación de tres estrategias operativas, dos de ellas basadas en asignación de potencia en cadena y otra considerando una asignación de potencia promedio entre los cuatro stacks.
- Los resultados preliminares muestran que la estrategia basada en una asignación de potencia en cadena con una adaptación del modo de operación segmentada ofrece mejores valores en cuanto a la tasa promedio de producción de hidrógeno y el número mínimo de horas de operación.
- Sin embargo, esta estrategia también presenta el mayor número de arranques y paradas. El impacto real de este problema en la degradación de los stacks se está evaluando con el soporte de ensayos experimentales, que validarán los resultados de las simulaciones y estrategias de operación propuestas.

Agradecimientos

Proyecto OPALH2, referencia TED2021-131663B-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y Unión Europea “ NextGenerationEU ”/PRTR.



Proyecto ODYELH2, referencia PROYEXCEL_01037, financiado por la Junta de Andalucía a través del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020).



Consejería de Universidad, Investigación e Innovación
Secretaría General de Investigación e Innovación

Proyecto AIHRE, con referencia 0093_AIHRE_6_E, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa de Cooperación Interreg V-A España - Portugal (POCTEP) 2021- 2027





¡Gracias por su atención!

Eduardo López González
lopezge@inta.es