



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer el esfuerzo que me ha brindado mi familia, amigos y compañeros desde el inicio de esta aventura. Dicha etapa, no podría haber finalizado sin la ayuda de Raquel Nuez Díaz, por siempre estar presionándome y así poder iniciar una nueva. El apoyo de mis padres y mis hermanos, quienes siempre han creído en mí a pesar de haber tardado tanto en alcanzar este punto. Demostrar a mis amigos del R50 que nunca me di por vencido y agradecer el esmero de mi tutor Valentín Pérez Herranz y mi cotutora Emma María Ortega Navarro por estos últimos años, gracias a todos.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

RESUMEN

Hoy en día aún existen ciertos problemas para lograr la generación de hidrógeno que provenga de energías renovables, conocido como Hidrógeno Verde. Actualmente se busca mejorar los métodos de producción de hidrógeno para lograr la “descarbonización”. Se pretende perfeccionar dichos métodos para lograr una mejora climática global donde poder dejar de depender de los combustibles fósiles, así como del hidrógeno proveniente de estos. La incorporación de nanopartículas de metales nobles a los electrodos de níquel en los electrolizadores alcalinos se cree que puede mejorar la eficiencia de los mismos.

El presente documento recoge los resultados y conclusiones obtenidas de la caracterización de un electrolizador para la obtención de hidrógeno usando 5 configuraciones diferentes de electrodos: ánodo de níquel liso - cátodo de níquel liso, ánodo de níquel liso - cátodo de níquel poroso, ánodo de níquel liso - cátodo de níquel poroso con incrustación de oro, ánodo de níquel poroso con incrustación de oro - cátodo de níquel poroso con incrustación de oro y ánodo de níquel poroso - cátodo de níquel poroso. El método de caracterización fue mediante electrolisis alcalina del agua, para la producción de hidrógeno, empleando un Voltámetro de Hoffman, a 3 densidades de corriente, 20, 50 y 100 mA cm⁻² y 3 temperaturas, 30, 50 y 80°C.

Palabras Clave: Electrolisis alcalina, Voltámetro de Hoffman, Hidrógeno Verde, Oxígeno, Energía Renovable, Electrodo dopado, Níquel, Nanopartículas de Oro.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

RESUM

Hui dia encara existeixen uns certs problemes per a aconseguir la generació d'hidrogen que provinga d'energies renovables, conegut com a Hidrogen Verd. Actualment es busca millorar els mètodes de producció d'hidrogen per a aconseguir la “descarbonització”. Es pretén perfeccionar aquests mètodes per a aconseguir una millora climàtica global on poder deixar de dependre dels combustibles fòssils, així com de l'hidrogen provinent d'aquests. La incorporació de nanopartícules de metalls nobles als elèctrodes de níquel en els electrolitzadors alcalins es creu que pot millorar l'eficiència d'aquests.

El present document recull els resultats i conclusions obtingudes de la caracterització d'un electrolitzador per a l'obtenció d'hidrogen usant 5 configuracions diferents d'elèctrodes: ànode de níquel llis - càtode de níquel llis, ànode de níquel llis - càtode de níquel rugós, ànode de níquel llis - càtode de níquel rugós amb incrustació d'or, ànode de níquel rugós amb incrustació d'or - càtode de níquel rugós amb incrustació d'or i ànode de níquel rugós - càtode de níquel rugós. El mètode de caracterització va ser mitjançant l'electròlisi alcalina de l'aigua, per a la producció d'hidrogen, emprant un Voltàmetre d'Hoffman, a 3 densitats de corrent, 20, 50 i 100 mA cm⁻² i 3 temperatures, 30, 50 i 80°C.

Paraules Clau: Electròlisi alcalina, Voltàmetre d'Hoffman, Hidrogen Verd, Oxigen, Energia Renovable, Elèctrodes dopats, Níquel, Nanopartícules d'Or.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

ABSTRACT

Nowadays there are still certain problems to achieve the generation of hydrogen that comes from renewable energies, known as Green Hydrogen. Currently, it is seeking to improve hydrogen production methods to achieve "decarbonization". It is intended to perfect these methods to achieve a global climate improvement where we can stop depending on fossil fuels, as well as the hydrogen from these. The incorporation of noble metal nanoparticles to nickel electrodes in alkaline electrolyzers is believed to improve their efficiency.

This document collects the results and conclusions obtained from the characterization of an electrolyzer for obtaining hydrogen using 5 different electrode configurations: smooth nickel anode - smooth nickel cathode, smooth nickel anode - rough nickel cathode, nickel anode smooth - rough nickel cathode with gold inlay, rough nickel anode with gold inlay - rough nickel cathode with gold inlay and rough nickel anode - rough nickel cathode. The characterization method was by alkaline electrolysis of water, for the production of hydrogen, using a Hoffman Voltmeter, at 3 current densities, 20, 50 and 100 mA cm⁻² and 3 temperatures, 30, 50 and 80°C.

Key Words: Alkaline Electrolysis, Hoffman Voltmeter, Green Hydrogen, Oxygen, Renewable Energy, Doped Electrodes, Nickel, Gold Nanoparticles.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

ÍNDICE

Documentos contenidos en el TFG

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL HIDRÓGENO.	1
1.1.1 ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?	1
1.1.2 HIDRÓGENO VERDE	2
1.2. PERSPECTIVA ENERGÉTICA MUNDIAL RESPECTO AL HIDRÓGENO.	7
1.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO.	10
1.3.1 GASIFICACIÓN.....	10
1.3.2 PROCESOS TERMOQUÍMICOS DEL AGUA.	11
1.3.3 OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.....	11
1.3.4 REFORMADO DE HIDROCARBUROS CON VAPOR DE AGUA	12
1.3.5 ELECTROLISIS DEL AGUA.....	12
1.4. COMPARATIVA DE PROCESOS.	13
CAPÍTULO 2. ELECTROLISIS DEL AGUA	15
2.1. INTRODUCCIÓN.	15
2.2. TIPO DE ELECTROLIZADORES.....	17
2.2.1 ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO.....	17
2.2.2 ELECTROLIZADORES TIPO PEM (PEMWE).....	18
2.2.3 ELECTROLIZADORES ALCALINOS (AWE).....	20
2.2.4 ELECTROLIZADORES TIPO AEM (AEMWE)	21
2.3. REQUERIMIENTOS PARA LA REACCIÓN DE ELECTROLISIS	22
2.4. REACCIONES DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER) Y DEL OXÍGENO (OER)	23
2.4.1 REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER).	23

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

2.4.2	REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL OXÍGENO (OER)	24
2.4.3	EFFECTO DEL AUMENTO DE LA SUPERFICIE ELECTROQUÍMICA ACTIVA (ECSA)	26
2.4.4	MATERIALES DE LOS ELECTRODOS PARA LA HER Y OER	26
CAPÍTULO 3.	OBJETIVOS	29
3.1	OBJETIVOS	29
CAPÍTULO 4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	31
4.1.	DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES.....	31
4.2.	DISOLUCIÓN DE TRABAJO.....	32
4.2.1	ELECTRODOS ENSAYADOS.....	33
4.2.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
4.2.3	CURVAS DE DESCARGA DE HIDRÓGENO.	36
4.2.4	ENSAYOS GALVANOSTÁTICOS.	38
4.2.4.1.	FIGURAS DE MÉRITO DEL ELECTROLIZADOR.	38
CAPÍTULO 5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	41
5.1.	CONFIGURACIÓN ANAU - CNAU	41
5.1.1	ENSAYO POTENCIODINÁMICO ANAu – CNAu	41
5.1.2	ENSAYO GALVANOSTÁTICO ANAu – CNAu.....	42
5.2.	COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES	46
5.2.1	ENSAYO POTENCIODINÁMICO.....	46
5.2.2	ENSAYO GALVANOSTÁTICO	49
5.3.	ESTUDIO DEL COSTE DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	57
CAPÍTULO 6.	CONCLUSIONES	61
6.1.	BIBLIOGRAFÍA	62

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	CONSIDERACIONES.....	1
2.	PRESUPUESTO DESGLOSADO	4

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Costes estimados para la producción futura de hidrógeno mediante electrólisis con electricidad renovable (fotovoltaica y eólica)	9
Figura 2. Clasificación de los principales métodos de producción de Hidrógeno	10
Figura 3. Sistema de electrólisis del agua	16
Figura 4. Funcionamiento de un electrolizador de óxido sólido.....	18
Figura 5. Electrolizador tipo PEM.....	19
Figura 6. Esquema de la configuración a) monopolar b) bipolar de los electrolizadores.....	20
Figura 7. Visión termodinámica de una OER ideal catalítica a $U = 0$ V(líneas negras) y $U = 1,23$ V(líneas azules).....	26
Figura 8. Curva de volcano para la generación de hidrogeno sobre la superficie de metales ...	27
Figura 9. Curva de volcano para la OER donde se muestra la relación entre la energía de enlace y la máxima actividad calculada usando el Análisis de Sabatier	28
Figura 10. Celda electroquímica de generación de gases: a) Fotografía b) Disposición de electrodos y conexiones eléctricas	32
Figura 11. Evolución de la densidad másica y la presión de vapor en función de la temperatura para una disolución de KOH 30% en peso.....	33
Figura 12. Imagen de un electrodo macroporoso de Ni con a) un microscopio tipo FE-SEM a magnificación 30 y b) laser confocal 3D.....	34
Figura 13. Imagen de un electrodo macroporoso de Ni-Au con a) un microscopio tipo FE-SEM a magnificación 20000 y b) laser confocal 3D.....	34
Figura 14. Curva de descarga de hidrógeno	37
Figura 15. Curva de descarga de hidrógeno a 3 temperaturas, y potencial 50 a una densidad de corriente de 50 mA cm^{-2}	42
Figura 16. Evolución del potencial con el tiempo para 3 temperaturas y densidad de corriente 10mA	43
Figura 17. Evolución del potencial con el tiempo para 3 densidades de corriente y temperatura 80°C	44
Figura 18. Consumo energético a 3 densidades de corriente: 20 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2} y 100 mA cm^{-2} y 3 temperaturas para la configuración ANAu – CNAu	44
Figura 19. Rendimiento eléctrico a 3 densidades de corriente: 20 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2} y 100 mA cm^{-2} y 3 temperaturas para la configuración ANL – CNAu.....	45
Figura 20. Eficiencia energética a 3 densidades de corriente: 20 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2} y 100 mA cm^{-2} y 3 temperaturas para la configuración ANL – CNAu.....	45
Figura 21. Efecto de la densidad de corriente sobre las curvas de descarga de 5 configuraciones a: a. temperatura 30°C y $E50$. b. temperatura de 80°C y $E50$	47

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Figura 22. Evolución del potencial con el tiempo para todas las configuraciones, una temperatura de 80°C y densidad de corriente 50mA cm ⁻²	50
Figura 23. Influencia de la temperatura sobre el consumo energético del hidrógeno, QH_2 , para todas las configuraciones y densidades de corriente: a. 20 mA cm ⁻² , b. 50mA cm ⁻² y c. 100 mA cm ⁻²	51
Figura 24. Influencia de la densidad de corriente sobre el consumo energético a una temperatura de 80°C	52
Figura 25. Influencia de la temperatura sobre el rendimiento eléctrico del hidrógeno, ϕ , para todas las configuraciones y densidades de corriente: a. 20 mA cm ⁻² , b. 50mA cm ⁻² y c. 100 mA cm ⁻²	54
Figura 26. Influencia de la densidad de corriente sobre el rendimiento eléctrico a una temperatura de 80°C	54
Figura 27. Influencia de la temperatura sobre la eficiencia energética del hidrógeno, ε , para todas las configuraciones y densidades de corriente: a. 20 mA cm ⁻² , b. 50mA cm ⁻² y c. 100 mA cm ⁻²	56
Figura 28. Influencia de la densidad de corriente sobre la eficiencia energética a una temperatura de 80°C	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de procesos empleados para la obtención de hidrógeno.	13
Tabla 2. Comparación de las tecnologías más importantes de Electrólisis del Agua	22
Tabla 3. Configuraciones de electrodos empleados en el presente estudio.	35
Tabla 4. Condiciones experimentales empleadas en los ensayos potenciodinámicos.....	36
Tabla 5. Condiciones experimentales empleadas en los ensayos galvanostáticos	38
Tabla 6. Datos de la gráfica ANAu - CNAu para 3 temperaturas, y potencial 50 a una densidad de corriente de 50 mA cm ⁻²	42
Tabla 7. Datos tomados en el laboratorio para la configuración ANAu – CNAu a 3 temperaturas y 3 densidades de corriente	43
Tabla 8. Datos de la comparación de curvas de descarga de hidrógeno de las 5 configuraciones a todas las temperaturas, y <i>E</i> 50.	48
Tabla 9. Consumo energético específico a 80°C y 1 atm de cada configuración de electrodos.	60

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- n_{H_2} : Caudal de moles de hidrógeno.
- A_e : Área específica.
- E_{H_2} : Potencial de descarga de hidrógeno.
- E_{50} : Potencial de descarga a 50 mA cm⁻².
- E_{celda} : Potencial de celda.
- E_{HHV} : Potencial asociado al poder calorífico superior del H₂.
- E_{rev} : Potencial termodinámico reversible.
- n_{H_2} : Moles de hidrógeno obtenidos
- η_{H_2} : Sobrepotencial de descarga de hidrógeno.
- Q_{H_2} : Consumo energético específico de hidrógeno.
- ϵ_{max} : Eficiencia energética máxima.
- θ_{H_2} : Grado de recubrimiento de hidrógeno.
- AEM : Membrana de intercambio aniónico.
- AEMWE : Membrana de intercambio aniónico para electrolisis de agua.
- ANAu : Ánodo níquel poroso con nanopartículas de oro.
- ANL : Ánodo níquel liso.
- ANR : Ánodo níquel poroso.
- AWE : Intercambio de agua alcalina.
- BF : Alto horno.
- BOF : Horno de oxígeno básico.
- BOP : Balance de planta.
- CAPEX : Gastos de capital.
- CG : Gasificación de carbono.
- CNAu : Cátodo níquel poroso con nanopartículas de oro.
- CNL : Cátodo níquel liso.
- CNR : Cátodo níquel poroso.
- DFT : Teoría de la densidad funcional.
- DRP : Proceso de reducción directa.
- EAF : Horno de arco eléctrico.
- ENAu : Electrodo de níquel poroso con nanopartículas de oro.
- ENL : Electrodo de níquel liso.
- ENR : Electrodo de níquel poroso.
- GE : General Electric.
- GEI : Gases de efecto invernadero.
- GLP : Gas licuado del petróleo.
- HER : Reacción de evolución de hidrógeno.
- IREC : Instituto de Investigación en Energía de Catalunya.
- IRENA : Agencia Internacional de Energías Renovables.
- LCOA : Coste nivelado del amoníaco.
- MEA : Conjunto de electrodos de membrana.
- M-H : Unión metal-hidrógeno.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

- OER : Reacción de evolución del oxígeno.
- OPEX : gastos de explotación.
- PEM : Membrana de intercambio protónico.
- PEMWE : Membrana de intercambio protónico para electrolisis de agua.
- PGM : Metales del grupo platino.
- PNIEC : Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
- RHE : Electrodo de hidrógeno reversible.
- SMR : Reformado del vapor de metano.
- TFG : Trabajo de Final de Grado.
- UE : Unión Europea.
- USA : Estados Unidos.
- $E(t)$: Potencial de celda en función del tiempo.
- F : Constante de Faraday.
- I : intensidad.
- T : Temperatura.
- j : Densidad de corriente.
- t : Tiempo.
- n_e : Número de electrones de la reacción intercambiados.
- ε : Eficiencia energética.
- ϕ : Rendimiento eléctrico.

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL HIDRÓGENO.	1
1.1.1 ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?	1
1.1.2 HIDRÓGENO VERDE	2
1.2. PERSPECTIVA ENERGÉTICA MUNDIAL RESPECTO AL HIDRÓGENO.	7
1.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO.	10
1.3.1 GASIFICACIÓN.....	10
1.3.2 PROCESOS TERMOQUÍMICOS DEL AGUA.	11
1.3.3 OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.....	11
1.3.4 REFORMADO DE HIDROCARBUROS CON VAPOR DE AGUA	12
1.3.5 ELECTROLISIS DEL AGUA.....	12
1.4. COMPARATIVA DE PROCESOS.	13
CAPÍTULO 2. ELECTROLISIS DEL AGUA	15
2.1. INTRODUCCIÓN.	15
2.2. TIPO DE ELECTROLIZADORES.....	17
2.2.1 ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO.....	17
2.2.2 ELECTROLIZADORES TIPO PEM (PEMWE).....	18
2.2.3 ELECTROLIZADORES ALCALINOS (AWE).....	20
2.2.4 ELECTROLIZADORES TIPO AEM (AEMWE)	21
2.3. REQUERIMIENTOS PARA LA REACCIÓN DE ELECTROLISIS	22
2.4. REACCIONES DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER) Y DEL OXÍGENO (OER)	23
2.4.1 REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER).	23
2.4.2 REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL OXÍGENO (OER)	24
2.4.3 EFECTO DEL AUMENTO DE LA SUPERFICIE ELECTROQUÍMICA ACTIVA (ECSA)	26
2.4.4 MATERIALES DE LOS ELECTRODOS PARA LA HER Y OER	26
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	29

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

3.1	OBJETIVOS	29
CAPÍTULO 4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	31
4.1.	DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	31
4.2.	DISOLUCIÓN DE TRABAJO.....	32
4.2.1	ELECTRODOS ENSAYADOS.....	33
4.2.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
4.2.3	CURVAS DE DESCARGA DE HIDRÓGENO.	36
4.2.4	ENSAYOS GALVANOSTÁTICOS.	38
4.2.4.1.	FIGURAS DE MÉRITO DEL ELECTROLIZADOR.	38
CAPÍTULO 5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	41
5.1.	CONFIGURACIÓN ANAU - CNAU	41
5.1.1	ENSAYO POTENCIODINÁMICO ANAu – CNAu	41
5.1.2	ENSAYO GALVANOSTÁTICO ANAu – CNAu.....	42
5.2.	COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES	46
5.2.1	ENSAYO POTENCIODINÁMICO.....	46
5.2.2	ENSAYO GALVANOSTÁTICO.....	49
5.3.	ESTUDIO DEL COSTE DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	57
CAPÍTULO 6.	CONCLUSIONES	61
6.1.	BIBLIOGRAFÍA	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 EL HIDRÓGENO.

1.1.1 ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?

El hidrógeno se puede hallar por todas partes. No solo se trata del primer elemento químico de la tabla periódica, sino que además de ello es inodoro, incoloro, insípido, no tóxico, es el compuesto más ligero y, además, es altamente inflamable. Su contenido energético es el más elevado por unidad de peso (120,7 KJ/g) si se compara con cualquier combustible conocido.

Se puede afirmar que el hidrógeno es muy importante, ya que forma parte de todos los organismos vivos, ya sea en proteínas, agua, azúcares, almidones e incluso grasas. Sin embargo, también se le puede localizar mezclado con carbono en los recursos energéticos más comunes, como son el petróleo o el gas natural. Por tanto, el hidrógeno se puede producir empleando gran variedad de materias primas mediante un aporte de energía. Además, mediante su uso para la obtención de energía su único "residuo" es el agua. Debido a todo esto, el hidrógeno se podría considerar como el vector energético del futuro.

La reducción del consumo de combustibles fósiles es algo que se lleva buscando desde hace tiempo debido a que en algún momento dichos combustibles desaparecerán y se deberá de buscar otra fuente que pueda explotarse de manera similar. Sin embargo, no existe una única solución dicho problema, hay un amplio abanico de tecnologías renovables y nuevos vectores de energía alternativa que pueden aportar dicha carencia de energía.

Un punto que cabe también destacar es un problema básico para el desarrollo de este sistema energético, y es su elevado coste en comparación con los sistemas actuales. Si se incorporasen como coste de producción los efectos negativos en el medioambiente generado por los combustibles fósiles, la Economía del Hidrógeno sería más competitiva debido a que no produce dichos efectos negativos. Puesto que se sigue investigando en la reducción de costes y en mejorar el rendimiento de dicho proceso, solo es cuestión de tiempo que esto sea posible.

Estas son algunas de las propiedades que hacen al hidrógeno candidato a resolver los presentes y futuros problemas energéticos:

- Es el elemento más abundante del planeta, a pesar de no hallarse libre en la naturaleza.
- La energía química del hidrógeno puede convertirse directamente a energía eléctrica. Dicha conversión es posible mediante el empleo de las llamadas pilas de combustible, dispositivos electroquímicos transforman la energía química en eléctrica. El hidrógeno se puede acumular y almacenar, así pues, puede emplearse con fines estacionarios y con fines de transporte, así como emplearse en aplicaciones portátiles.

- Su combustión solo libera vapor de H₂O, libre de CO₂. Además, si la producción del hidrogeno procede de energías renovables, esta permite regularizar de manera frecuente la aleatoriedad de la producción eléctrica con renovables, permitiendo destinar el excedente de la energía eléctrica a aplicaciones de transporte y portátiles, que contribuyen a la emisión de CO₂.

1.1.2 HIDRÓGENO VERDE

Hace poco, el magnate informático Bill Gates, quien publicó un nuevo libro llamado *How to avoid a climate disaster* ("Cómo evitar un desastre climático"), destacó a este combustible, el hidrógeno verde, como la mejor innovación de los últimos años para combatir el efecto invernadero [1].

El hidrógeno, en términos de combustible, posee una energía tres veces mayor a la gasolina. Sin embargo, se trata de una fuente de energía limpia, ya que el residuo generado se libera en forma de H₂O_(vapor) y no genera dióxido de carbono (CO₂).

En la actualidad, existen 6 tipos de hidrogeno:

- 1) El *hidrógeno azul*, es aquel que se obtiene a través de hidrocarburos y en el cual se efectúa una captura de las emisiones contaminantes en un alto porcentaje. Se obtiene sobre todo a través de la extracción de yacimientos de gas natural. La idea es evitar que libere CO₂ para así no contribuir al calentamiento global, el problema es que para lograrlo es necesario elevar el coste de este. Considerado como el mejor disponible - hasta el momento.
- 2) El *hidrogeno negro* (el cual englobaría, aunque no exclusivamente al conocido como marrón o gris), es parte del daño ambiental persistente se ha producido durante décadas echando mano de combustibles no renovables, como son el carbón o el petróleo sin capturar las emisiones de CO₂.
- 3) El *hidrógeno gris*, producido a partir de gas natural mediante un reformado del vapor. No se usan energías renovables ni se capturan las emisiones contaminantes.
- 4) El *hidrógeno marrón*, generado desde la gasificación del carbón. La técnica de gasificación ha sido empleada durante más de un siglo para generar el muy conocido "gas ciudad" o "de alumbrado" (actualmente "gas de síntesis"). No se usan energías renovables ni se capturan las emisiones contaminantes.
- 5) El *hidrógeno turquesa*, esta terminología es bastante reciente, es aquel que se obtiene a partir de hidrocarburos (generalmente gas natural) pero con la técnica de la pirólisis, en el cual se obtiene carbono en estado sólido y se evitan las emisiones contaminantes.

- 6) El *hidrógeno verde*, obtenido a través de energías renovables, como es la energía solar o eólica, acopladas a un proceso electrolítico del agua. Este hidrógeno, es 100% sostenible, sin embargo, es mucho más costoso de producir que el tradicional.

Para lograr la llamada “descarbonización”, es necesario que la generación del hidrógeno verde aumente para garantizar un futuro sostenible. La caída de los costes de producción del hidrógeno verde mediante energías renovables, junto con la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, han dado al hidrógeno limpio un impulso sin precedentes. Petroleras como Shell, Repsol y BP están entre las compañías que ya han lanzado proyectos de hidrógeno verde. De igual manera, varias naciones han publicado planes nacionales de producción de este combustible renovable.

La Unión Europea (UE), se comprometió a invertir \$430.000 millones en hidrogeno verde desde ahora hasta el 2030. Su intención es instalar electrolizadores de hidrógeno renovable de 40 gigavatios (GW) en la próxima década para así lograr si meta de volverse climáticamente neutral para el año 2050 [1].

Así mismo, el actual presidente de Estados Unidos, Joe Biden, se asegurará de que el costo del hidrogeno verde sea el mismo al hidrógeno convencional en una década, proporcionando una nueva y limpia fuente de combustible para algunas de las ya existentes centrales eléctricas.

A finales del pasado año 2020, siete empresas internacionales, las cuales están desarrollando proyectos de hidrógeno verde, lanzaron la iniciativa Green Hydrogen Catapult. Esta coalición global formada por ACWA Power, CWP Renewables, Envision, Iberdrola, Ørsted, Snam y Yara busca incrementar la producción de hidrógeno verde en los próximos 6 años, así como reducir el coste actual a la mitad, es decir, a menos de 2\$/Kg.

A continuación, estos son los seis países con mayores proyectos de producción de hidrógeno verde [1]:

- 1) Australia: la cual posee propuestas para construir 5 megaproyectos gracias a sus enormes recursos. El mayor de los cuales es el *Asian Renewable Energy Hub*, en Pilbara, donde se plantea construir una serie de plantas con una capacidad de 14 GW.
- 2) Países bajos: a través de la petrolera Shell, lidera junto con otros desarrolladores el proyecto *NorthH2* el cual prevé la construcción de al menos 10 GW de electrolizadores.
- 3) Alemania: cuyo mayor proyecto es el de *AquaVentus*, en el mar del Norte. Con la idea de construir allí plantas de 10 GW de capacidad para el año 2035.
- 4) China: su proyecto es liderado por la empresa de servicios públicos estatal de Beijing Jingneng, el cual invertirá US\$3000 millones para la generación de 5GW a través de energía solar y eólica.
- 5) Arabia Saudita: a través del proyecto *Helios Green Fuels Project* pretende obtener electrolizadores de 4 GW para el 2025.

- 6) Chile: quien fue el primero en la región en presenta una “estrategia nacional de hidrógeno verde”.

El hidrógeno verde no tiene como único uso ser un vector energético, sino que también se le puede dar uso como materia prima. A continuación, se evaluarán las limitaciones técnicas y los beneficios potenciales del uso directo del "hidrógeno verde" en los siguientes procesos industriales:

- Producción de amoníaco.
- Producción de acero.

Ambos procesos poseen una alta emisión de dióxido de carbono (CO_2), esto está asociado al uso de combustibles fósiles como materia prima/reactivos. Sin embargo, se podría reducir de forma significativa y directa sustituyendo dichos combustibles por hidrógeno verde. Esta sustitución ya no afectaría sólo a disminuir la emisión de CO_2 sino que además impulsaría la demanda de electrolizadores de hidrógeno a gran escala generando así un impacto positivo en otros sectores.

Actualmente, la legislación europea más relevante que incide en los procesos que se consideran aquí son: la Directiva sobre la calidad del combustible (98/70 / EC), la Directiva sobre energías renovables (2009/28 / CE) y Directiva sobre régimen de comercio de derechos de emisión (2003/87 / CE). Estas directivas, en su forma revisada actual o prevista (por ejemplo, RED II), establecen objetivos, metodologías y limitaciones que dirijan directa o indirectamente la evolución de estos procesos industriales hacia una mayor eficiencia y la reducción de las emisiones GEI.

Producción de amoníaco

El principal objetivo detrás de la adopción de hidrógeno verde es la descarbonización de los procesos industriales y la reducción de las emisiones de GEI que actualmente están asociadas.

La producción anual mundial de amoníaco ronda los 180-200Mt [2]. La producción de amoníaco en Europa alcanza una magnitud de 20Mt. En el contexto europeo, una tonelada de amoníaco requiere un consumo energético de entre 8-10 MWh, siempre y cuando el hidrógeno a emplear proceda del reformado de vapor (SMR). Si el hidrógeno empleado procediese de la electrolisis, el consumo energético alcanzaría los 10-12 MWh.

Por un lado, cuando el hidrógeno involucrado procede de SMR, se emiten acerca de 1,6-1,9 toneladas de CO_2 por cada tonelada de NH_3 sintetizado. Por otro lado, el CO_2 emitido aumenta aún más cuando el hidrógeno procede de la gasificación de carbono (CG), llegando a emitir hasta 4 toneladas de CO_2 por cada tonelada de NH_3 . Dichas emisiones podrías ser evitadas empleando hidrógeno verde en el proceso de Haber-Bosch para la síntesis de NH_3 , además sólo consumirían 0,176 toneladas de hidrógeno verde para cada tonelada de NH_3 .

La producción de hidrógeno mediante SMR consume aproximadamente un 15% menos energía de la requerida para producir la misma cantidad de hidrógeno mediante electrolisis. No obstante, las emisiones de CO_2 si se emplease hidrógeno verde serían cercanas a 0, siempre y cuando la fuente de electricidad no poseyera una huella de carbono significativa.

Si se desea cambiar el hidrógeno obtenido a través del SMR por hidrógeno verde procedente de la electrólisis del agua para la síntesis de amoníaco, se requiere una fuente importante y confiable de electricidad renovable. Una planta que produzca alrededor de 800 kt de amoníaco por año, poseería un consumo energético de 8TWh / año.

Si se observa desde un punto de vista técnico, la sustitución de hidrógeno procedente de combustible fósil por hidrógeno verde en la síntesis de producción de amoníaco no representa ningún desafío. El equilibrio térmico de la planta no parece verse críticamente afectado al sustituir la etapa SMR por la electrólisis [2].

Debido a la alta temperatura y presión involucradas, el proceso de Haber Bosch no puede adaptarse fácilmente a las fluctuaciones, pues está diseñado para funcionar de forma continua. Para que la fuente de energía renovable aguante, se debe sobredimensionar la capacidad del electrolizador adherido.

La principal necesidad del proceso de síntesis se basa en una constante alimentación de nitrógeno/hidrógeno. Emplear un proceso híbrido donde se use combustible fósil, así como hidrógeno verde sería una forma de introducir el hidrógeno verde en el proceso de síntesis del amoníaco.

Si se toma en cuenta el costo de nivelado del amoníaco (LCOA) producido usando hidrógeno verde se observa que es de 2 a 5 veces mayor que el amoníaco producido mediante un proceso convencional. Este costo tiene en cuenta tanto el CAPEX [3] como el OPEX; donde el OPEX recibe un mayor impacto, ya que depende del costo de la electricidad renovable [2].

Debido a que los márgenes de beneficio del amoníaco son pequeños y sin incentivos, es poco probable el uso de hidrógeno verde ya que no podría ser económicamente sostenible a corto y medio plazo. Sin embargo, esta situación se verá muy afectada por el desarrollo de precios del CO₂, debido a posibles restricciones a la importación de productos con altas intensidades de carbono, así como la evolución de los precios del gas en un contexto global.

Dado que el costo de la transición a la producción de amoníaco utilizando hidrógeno verde es alto, y el margen de beneficio del producto es bajo, sin incentivos y sin apoyo a las inversiones, los productores de amoníaco no podrán hacer frente a los costos de transición necesarios mientras permanecen competitivos a nivel mundial [2].

Producción de acero

Al igual que con el amoníaco, el principal impulsor de la adopción del hidrógeno verde es el logro de la descarbonización del proceso industrial, y la disminución de GEI emisiones actualmente asociadas con la producción de acero.

La reducción del mineral de hierro (óxidos de hierro) es el primer paso en la producción de acero. Actualmente el carbón en forma de coque se utiliza como principal agente reductor dentro del alto horno (BF).

Se ha demostrado que la inyección de hidrógeno o metano es posible en los altos hornos de manera que estos puedan actuar como agentes reductores. Sin embargo, no es posible sustituir completamente el coque. A pesar de no poder ser remplazado al 100% el hecho de sustituirlo parcialmente hace posible que disminuya la emisión de GEI del BF [2].

También es posible reducir el mineral mediante un proceso de reducción directo. El proceso directo de reducción (DRP), realizado con hornos de eje, puede utilizar directamente reductores gaseosos como hidrógeno o gas natural (generando CO e hidrógeno in situ) como agentes reductores, y evitar por completo el uso de carbón.

La reducción del mineral de hierro con hidrógeno es endotérmica, mientras que la reducción con CO es exotérmica. Esto implica que se debe de suministrar calor, desde una fuente externa, al hidrógeno si se utiliza como agente reductor durante el proceso de reducción de mineral [2].

Cuando la esponja de hierro se produce mediante procesos de reducción directa, debe introducirse en un Horno de arco eléctrico (EAF) para el procesamiento final. Si el 100% del hidrógeno se utiliza como agente reductor en el DRP, todo el carbono necesario para el acero la producción debe introducirse en el paso final del EAF.

Se necesita 1 kg de carbono para la producción de aproximadamente 2 kg de hierro metálico líquido (proceso BF + BOF), mientras que 1 kg de hidrógeno (proceso DRP + EAF) produce alrededor de 15 kg de hierro metálico sólido.

Un producto sólido permite una gestión de procesos más sencilla si se aprovechan las oportunidades de almacenamiento cuando se dispone de capacidad de producción adicional.

El proceso de DRP puede utilizar simultáneamente metano e hidrógeno como agentes reductores. Por lo tanto, es posible sustituir parcialmente un gas por otro y utilizar proporciones variables según su disponibilidad. Esta opción aumenta la flexibilidad general del proceso de producción y separa parcialmente el proceso de la disponibilidad fluctuante de energía renovable [2].

Un posible uso adicional en la cadena de producción de acero es reemplazar el hidrógeno derivado de SMR que se quema actualmente para la eliminación de oxígeno en atmósfera inerte, evitando así la contaminación del aire. Cualquier uso dependerá en gran medida de su costo de producción, que debe compararse con los costos actuales del hidrógeno obtenido a través de la producción de SMR en el sitio (1.5-2 € / kg).

La producción europea anual de acero ronda las 168Mt por año. Del cual el 60% de dicha producción se obtiene mediante combinaciones consecutivas de BF + BOF. Este método requiere un consumo energético de 16-19,8 GJ por tonelada de acero producido (4,4-5,5MWh) prácticamente toda esta energía proviene de carbón obtenido a través de combustibles fósiles emitiendo de 1,6-2,2 toneladas de CO₂ por cada tonelada de acero. La industria del acero es responsable del 6-7% de las emisiones de GEI. En Europa, el otro 40% de acero involucra el uso de EAF.

El mayor margen de reducción de GEI esta basados en combinación de DRP y EAF. Ambas etapas de DRP y EAF son el núcleo del proceso de fabricación de acero, donde el hidrógeno verde solo desempeña un papel importante en el primer caso, como agente reductor, mientras que el resto de la energía requerida deberá derivar de fuentes de energía renovable. Cuando el hidrógeno

se produce a partir de electrólisis empleando una fuente eléctrica renovable, se estima un consumo energético para todo el proceso de producción de acero de 3,5-5,4MWh por tonelada de acero; La electrólisis ascenderá aproximadamente a 2.6-2.7MWh (alrededor de 50-77% de la energía total consumida) por tonelada de acero. Esto es similar, si no menor, que el consumo de la ruta BF + BOF, y reemplaza completamente los combustibles fósiles con electricidad.

La reducción de emisiones de GEI para la combinación DRP + EAF, con respecto a los establecidos mediante la combinación BF + BOF podría alcanzar el 35%, si solo se utiliza gas natural, y 80-95%, si más del 50% de los gases de reducción están compuestos de hidrógeno verde (dependiendo de la proporción de hidrógeno verde utilizado como agente reductor). La huella de carbono de la fuente de electricidad utilizada tanto para la electrólisis como para el EAF tendrá un impacto considerable en las emisiones reales del proceso.

En la actualidad, la opción DRP + EAF ya es tecnológicamente madura, sin embargo, se espera una transición gradual durante los próximos años. HYBRIT estima que entre 2025 y 2035 la producción de acero en su sitio estará completamente cubierta por un proceso DRP + EAF, totalmente alimentado a través de hidrógeno verde y electricidad renovable [2].

1.2. PERSPECTIVA ENERGÉTICA MUNDIAL RESPECTO AL HIDRÓGENO.

El cambio climático sigue siendo un problema en todo el mundo, para combatirlo la Unión Europea ha lanzado una herramienta continental conocida como El Pacto Verde Europeo o “*Green Deal*”. Dicho pacto, busca una economía limpia, con cero emisiones y proteger nuestro hábitat natural, con el objetivo de que Europa lidere la acción climática en todo el mundo.

Dentro de las políticas a desarrollar en el marco del Pacto Verde Europeo, la Estrategia Europea del Hidrógeno, aborda los principales campos de actuación a considerar inversiones, marco regulatorio, I+D en tecnologías y mercados, cooperación con terceros países, etc.

La Estrategia Europea del Hidrógeno erige el hidrógeno como elemento esencial para respaldar el compromiso de la UE de alcanzar la neutralidad de carbono en 2050 respaldando el esfuerzo global para introducir el Acuerdo de París.

La Estrategia remarca una sucesión de hitos a alcanzar durante los próximos años, estos son:

- Primera fase 2020-2024: Instalación de al menos 6 GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable a fin de descarbonizar la producción de hidrógeno en el sector químico.
- Segunda fase 2025-2030: El hidrógeno debe ya de estar integrado teniendo ya alrededor de 40GW de electrolizadores para 2030 con una producción de hasta 10 millones de toneladas en la UE.
- Tercera fase 2030-2050: Durante esta fase, el hidrógeno renovable ya debería alcanzar la madurez para desplegarse a gran escala en todos los sectores donde otras alternativas no sean factibles o tengan mayores costes.

Actualmente, el 99% del hidrógeno usado como combustible procede de fuentes no renovable. Mientras que menos del 0,1% se obtiene a través del proceso electrolítico del agua según la Agencia Internacional de la Energía [1].

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

En el pasado año 2020, se registraron los incrementos de la capacidad renovable mundial batiendo récords pese a la situación generada por el COVID-19. Según los datos obtenidos por parte de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en el año 2020 hubo un gran aumento de la capacidad energética renovable generando más de 260 gigavatios (GW), es decir, cerca de un 50% más de crecimiento que se registró en el año 2019.

Por un lado, más del 80% de la capacidad energética agregada en el 2020 fue renovable, donde la energía eólica y solar representaban un 91% de las nuevas renovables. Por otro lado, el crecimiento total de la capacidad energética proporcionada por combustibles fósiles disminuyó a 60 GW, es decir, 4 GW menos que en el 2019.

Al final del año 2020, la capacidad mundial de generación de energía renovable era de 2799 GW, donde la energía hidroeléctrica se situaba primera con una cuota de 1211 GW. A pesar de ello, la energía solar y la eólica van ganando terreno rápidamente. Ambas fuentes fueron predominantes en el aumento de la capacidad registrada en 2020, con 127 GW y 111 GW respectivamente [4].

En el 2020, China y Estados Unidos (USA) fueron los mercados que mayor crecimiento tuvieron. China, quien se sitúa primero como el mayor mercado de energías renovables, agregó 136 GW (72 GW mediante energía eólica y 49 GW con solar). USA agregó 29 GW, casi un 80% más que en el 2019, siendo 15 GW como energía solar y 14 GW como eólica.

Hablando de tecnologías que han aportado energías renovables se puede destacar:

- Energía hidroeléctrica: En 2020 China agregó 12 GW de capacidad seguida de Turquía con 2,5 GW.
- Energía eólica: A parte de lo mencionado por parte de China y USA, otros 10 países incrementaron su capacidad en más de 1 GW. Además, ese mismo año la energía eólica marítima creció hasta un 5% de la capacidad eólica total.
- Energía solar: En Asia hubo un crecimiento de la capacidad de 78 GW, de los cuales, 49 GW fueron de China, 11 de Vietnam, más de 5 GW de Japón e India y la República de Corea que ampliaron su capacidad en más de 4 GW.
- Bioenergía: La expansión de capacidad neta se redujo a la mitad en 2020. China amplió su capacidad bioenergética en 2 GW.
- Energía geotérmica: En 2020 no hubo casi adición a la capacidad generada.

Según un estudio realizado por el Instituto de Investigación en Energía de Catalunya (IREC), España no solo suministrará electricidad verde al país, sino que además se podría convertir en la primera potencia de producción e incluso exportación de hidrógeno verde. Todo esto sería posible en caso de que a partir del año 2030 se impulsasen las políticas que ayudasen a escalar esta tecnología, reducir sus costes y atrajesen inversiones. Si se alcanzase un nivel de coste en torno a 2€/Kg el hidrógeno verde sería competitivo incluso con el hidrógeno negro(marrón). No solo eso, además, también resultaría competitivo con respecto a los combustibles actuales como son el diésel y la gasolina.

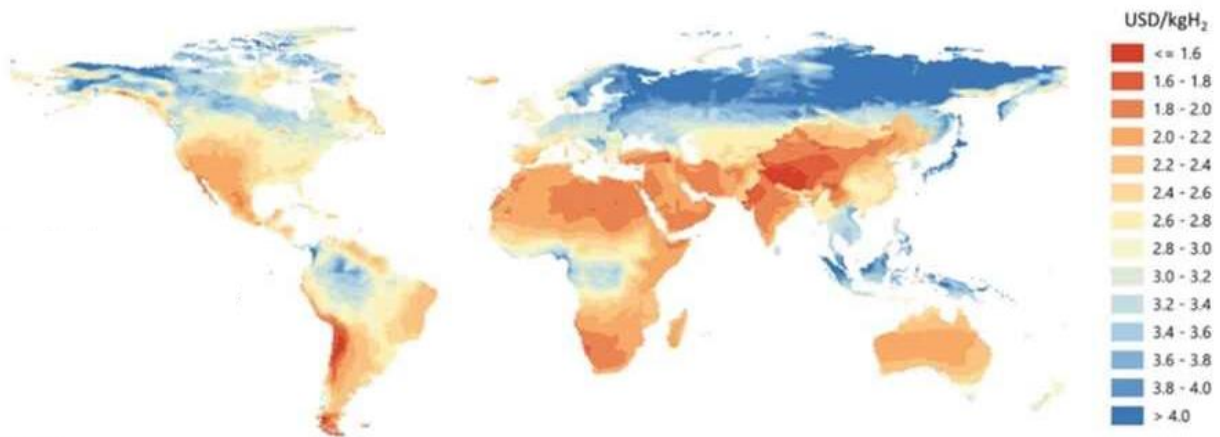


Figura 1. Costes estimados para la producción futura de hidrógeno mediante electrólisis con electricidad renovable (fotovoltaica y eólica). Fuente: Agencia Internacional de la Energía.

España en la actualidad posee un potencial de producción de energía renovable superior a 3000 TWh/año lo que implica que existe gran capacidad para la producción de hidrógeno. Según las estimaciones que se prevén, el potencial de producción de hidrógeno verde que tendría España equivale a 1750 TWh/año, lo que equivale a 11 veces el consumo actual de gas natural (160TWh/año) [5].

El Parlamento Europeo ha tomado como referencia las emisiones que se realizaron en el año 1990 de manera que su objetivo sería alcanzar un recorte de las emisiones no inferior al 60% .

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) establece que se fomentará la penetración de gases renovables, como son el biogás, biometano, hidrógeno renovable y otros. Sin embargo, esto es una visualización a corto/medio plazo, la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050, señala el camino a alcanzar mediante el incremento de las absorciones por sumideros que permitirán reducir las emisiones de GEI, como mínimo, un 90% en 2050 con respecto a 1990. Por supuesto, esto sólo será posible si se pueden alcanzar transformaciones profundas de la estructura actual del sistema energético, tales como el almacenamiento de energía eléctrica y la integración sectorial inteligente.

Para alcanzar todo esto, debería de producirse un aumento considerable de la potencia renovable ya en 2030. Esto vendría seguido de una bajada de los precios de la electricidad renovable, cuya finalidad sería obtener una producción de hidrógeno renovable competitivo con respecto a otras tecnologías de producción. Tras ese instante, la producción de hidrógeno renovable debería de aumentar a gran velocidad, así como, los avances tecnológicos y las economías de escala haciendo posible una gran expansión del consumo de hidrógeno en muchos sectores difíciles de descarbonizar.

Debido a que España posee buenas condiciones climáticas y amplias superficies libres para la implementación de energía renovable, podría convertirse en un exportador de hidrógeno renovable al resto de Europa. Claramente, esto se produciría una vez la capacidad de producción española sea superior a la demanda interna y exista demanda considerable en Europa.

1.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO.

Existen muchos métodos mediante los cuales poder producir hidrógeno, cada uno de estos métodos es “único” ya que existen diferencias en cuanto a la materia prima contenedora, al proceso de producción o a la madurez de la tecnología asociada al proceso.

Actualmente el origen mayoritario del hidrógeno que se produce proviene del gas natural y del petróleo.

A continuación, se describen los principales métodos de obtención de hidrógeno clasificados en la **Figura 2** en función de la materia prima empleada en el proceso. A parte de estos métodos, existen otros aún en desarrollo como la producción de termoquímica a partir del agua, la fermentación bioquímica de productos vegetales y la fotocatalisis y/o foto electrocatalisis del agua.

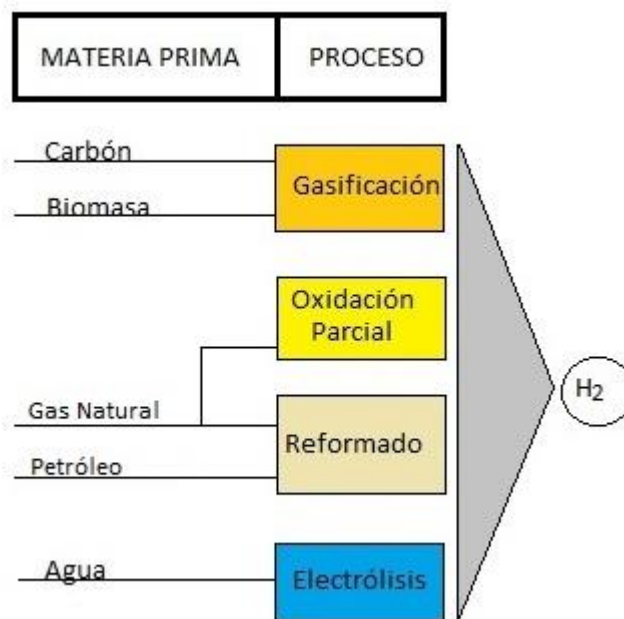
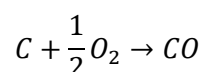
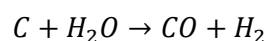


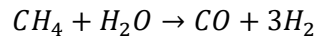
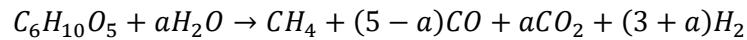
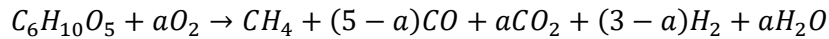
Figura 2. Clasificación de los principales métodos de producción de Hidrógeno. Fuente: Propia

1.3.1 GASIFICACIÓN.

Este proceso radica en la combustión con defecto de oxígeno mediante el cual se obtiene CO, CO₂, H₂ y CH₄, en distintas proporciones que vienen en función de la materia prima y las condiciones del proceso. El oxígeno se limita de un 10 a un 50% y la temperatura varía entre 700 y 1500°C. Así pues, se trata de un proceso con un consumo energético elevado. Este método puede aplicarse tanto al carbón como a la biomasa. Para el caso del carbón, se trata con vapor de agua puesto que así se obtiene monóxido de carbono e hidrógeno. El inconveniente es que se trata de una reacción muy endotérmica ($\Delta H = 119 \text{ KJ/mol}$) y requiere de temperaturas muy elevadas para poder llevarse a cabo. Por ello se añade una minúscula cantidad de oxígeno y se produce la oxidación parcial que libera energía:



Por otro lado, si partimos de biomasa, como la celulosa, el proceso está formado por fases de despolimerización y por reacciones de formación de combustibles y conversión de metano:



Esta técnica genera grandes cantidades de CO₂, en el caso de usar carbón de materia prima genera problemas ambientales. Sin embargo, si se parte de biomasa esto no genera ningún inconveniente ya que la cantidad de CO₂ generada es la misma que la que capta del ambiente para la formación de la misma biomasa, así pues, en balance resulta una contribución nula a la emisión de gases de efecto invernadero. La ganancia obtenida por este procedimiento es relativamente baja.

1.3.2 PROCESOS TERMOQUÍMICOS DEL AGUA.

La Termólisis consiste en la descomposición de compuestos mediante el uso de altas temperaturas. Puesto que este trabajo trata sobre la obtención de Hidrógeno, se observará de que orden de temperaturas hablamos y lo que requiere para llevarse a cabo.

Para descomponer la molécula de agua pura a sus elementos base, se debe aplicar una temperatura del orden de 2000°C para que la reacción tenga lugar. Sin embargo, para poder completar dicho proceso se debe de llevar la temperatura en torno a 4500-5000°C. Actualmente cualquier material se fundiría a esta temperatura, dicho esto, es inviable construir este tipo de instalaciones.

Ya que el anterior método resulta inviable, mediante la termoquímica se puede alcanzar algo similar sin la necesidad de alcanzar tales temperaturas. Empleando reacciones químicas cíclicas, el agua puede reaccionar con reactivos químicos haciendo que los productos de reacción sean descompuestos térmicamente para la generación de hidrógeno a temperaturas inferiores. Hay muchos procesos capaces de llegar a la descomposición del agua solo con alcanzar 1000°C, e incluso algunos casos, hasta con 600°C. Estas temperaturas sí que son aceptables y pueden alcanzarse mediante diversas fuentes, como son la energía nuclear y la energía solar. Así pues, es un proceso limpio de obtención de hidrógeno. El inconveniente que se le podría asociar a este proceso es el índice de rendimiento que tiene, el cual no supera el 55%. Actualmente esta vía sigue en desarrollo.

1.3.3 OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.

Para obtener hidrógeno mediante este método, hace falta una reacción exotérmica en la que un combustible (como es el metano) reacciona con defecto de oxígeno para generar una oxidación incompleta obteniendo de esta forma hidrógeno.

Para el caso del CH₄, se lleva a cabo esta reacción:



Esta reacción se lleva a cabo con aire u oxígeno puro en presencia de catalizadores, llevándose a cabo entorno a temperaturas de 800°C. El inconveniente es la presencia de CO, el cual puede envenenar el catalizador. Por lo tanto, conviene oxidarlo a CO₂ o tratarlo con vapor de agua para generar más hidrógeno. Sin embargo, el tener que purificar los gases implica un coste adicional y reduce la eficiencia.

Este método presenta unos elevados costes de inversión y el grado de conversión sigue siendo algo bajo. Por otro lado, el desarrollo actual de esta tecnología es más avanzado que otros procesos, así pues, es una ventaja que tener en mente. El rendimiento de este proceso gira en torno al 70% en producciones industriales a gran escala.

1.3.4 REFORMADO DE HIDROCARBUROS CON VAPOR DE AGUA.

Se conoce como proceso de reformado a la reacción catalítica de una mezcla de agua e hidrocarburos, mediante la cual se obtiene H₂ y CO.

Tomando como ejemplo el reformado del metano, se tendrían las siguientes reacciones:



Esta es la forma más empleada para la generación de hidrógeno debido a la disponibilidad de los componentes. Existe una gran variedad de hidrocarburos capaces de desempeñar el mismo papel que el metano, como es: el gas natural, GLPs, hidrocarburos líquido, etc.

1.3.5 ELECTROLISIS DEL AGUA.

De vías para la obtención de hidrógeno, la eficacia plena se alcanza cuando se obtiene mediante electricidad, siempre y cuando esta provenga de fuentes renovables. El inconveniente que posee esta tecnología son los elevados costes por parte de los materiales y del proceso en sí mismo. Puesto que en este trabajo el método de electrolisis será el estudiado, se expondrá de manera más detallada en el **Capítulo 2**.

1.4. COMPARATIVA DE PROCESOS.

En la **Tabla 1** se compararán los procesos vistos previamente para la obtención de hidrógeno.

Tabla 1. Comparativa de procesos empleados para la obtención de hidrógeno.

PROCESO	Ventajas	Inconvenientes
Gasificación	Tecnología muy avanzada. Abundancia y bajo coste de materia prima.	Altas emisiones de CO ₂ . Gran infraestructura. Eficacia baja.
Procesos termoquímicos	Proceso limpio de generación de hidrógeno.	Elevado coste energético. Eficacia baja/media.
Oxidación parcial	Tecnología muy avanzada.	Emisiones de CO ₂ . Gran infraestructura. Elevados costes de inversión.
Reformado con vapor	Elevada eficacia. Perfectamente desarrollado a gran escala. Hidrógeno a bajo coste.	Emisiones de CO ₂ . Gran infraestructura. Unidades a pequeña escala no comerciales.
Electrolisis del agua	Emisiones de CO ₂ nulas. Tecnología testada. Hidrogeno de alta pureza.	Elevados costes energéticos.

Como se puede comprobar en la tabla expuesta: la electrolisis es la opción más favorable medioambientalmente. No obstante, esta vía presenta un inconveniente a tener en cuenta: los elevados costes energéticos. En este trabajo se pretende obtener una mejora tanto en rendimiento como en costes a fin de lograr una fuente de generación de hidrógeno competitiva y coherente con el modelo existente de Economía del Hidrógeno.

CAPÍTULO 2. ELECTROLISIS DEL AGUA

2.1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, la mayoría del hidrógeno se obtiene mediante el reformado de hidrocarburos, como son el gas natural, nafta, fuel pesado o carbón. Ciertamente, es el método con el cual se obtiene más hidrógeno por menos coste. Sin embargo, existen otros métodos de obtención de hidrógeno algunos de los cuales se han mencionado en el apartado anterior.

El coste de obtención de hidrógeno mediante electrolisis es casi el doble que el coste con respecto al reformado de hidrocarburos. Pero, a pesar de ser más costosa su producción se siguen investigando métodos mediante los cuales reducir su coste y aumentar su efectividad.

El hidrógeno obtenido no genera gases de efecto invernadero durante su combustión, dicho de otra forma, ofrece un gran potencial para disminuir las emisiones de CO₂ que se generan durante la combustión de sus precursores de origen fósil [6], además de todo eso, el hidrógeno resultante mediante la electrolisis es extremadamente puro (99,9%) lo cual le da un valor añadido [7, 8].

No fue hasta el 02 de mayo de 1800 el químico William Nicholson y el cirujano Anthony Carlisle descompusieron el agua mediante el uso de una pila eléctrica, y fueron capaces de entender dicha reacción. Para este caso, usaron agua acidulada con ácido sulfúrico para hacerla más conductora y electrodos de zinc y cobre, demostrando así que el agua se descomponía produciendo dos volúmenes de gas hidrógeno y uno de gas oxígeno. Sin embargo, la primera electrólisis del agua se llevó a cabo once años antes mediante una máquina electrostática y una botella de Leyden [9]. Lo que paso fue que en aquel entonces no se consiguió interpretar esa misma reacción que se estaba produciendo.

La electrólisis del agua consiste en la ruptura de los enlaces de la molécula de agua mediante el aporte de una corriente eléctrica, cuya finalidad es la obtención de hidrógeno y oxígeno. Este proceso se puede realizar en agua salada y dulce, produciendo resultados diferentes. En el primer caso "agua salada", la materia resultante de la separación es el cloro y el hidrógeno en estado gaseoso, produciendo así la disolución del hidróxido de sodio. En el segundo caso, el proceso necesita de una gran cantidad de energía extra puesto que la pureza del líquido cuenta con escasa disociación.

Gracias al técnico belga Zénobe Gramme, quien construyó la dinamo de Gramme, se creó la primera máquina eléctrica de corriente continua apta para uso industrial. Esto significó un gran avance para la electrólisis del agua que se convirtió en un método económico para la producción de hidrógeno. Años más tarde, en 1888, Dmitry Lachinov desarrolló una técnica para la síntesis industrial de hidrógeno y oxígeno a través de la electrólisis del agua. Los años comprendidos entre las décadas de 1920 -70 fueron conocidos como la "edad de oro" para el desarrollo de la tecnología de electrólisis del agua, puesto que fue cuando se crearon la mayoría de los diseños tradicionales [10]. Propulsados por la carencia industrial de hidrógeno y oxígeno, los estudios instaurados en la primera etapa se usaron para la industrialización de las dichas tecnologías. La primera gran planta entró en funcionamiento en 1939, con una capacidad de 10.000 Nm³H₂h⁻¹,

y no fue hasta 1948 que el primer electrolizador industrial presurizado fue fabricado por Zdzansky/Lonza [11].

Muchos de los conceptos comerciales desarrollados en este período incluyen la mayoría de los componentes tecnológicos actuales [12], como por ejemplo el separador. Cuando empezaron a comercializarse, éstos fueron de amianto, sin embargo, el amianto no era muy resistente a la corrosión causada por un ambiente fuertemente alcalino a altas temperaturas. Además, provocaban graves efectos perjudiciales para la salud, de manera que fue reemplazado gradualmente por otros materiales [13]. A partir de la década de 1970, se han ido empleando polímeros con base de ácido perfluorosulfónico, éter de arileno o politetrafluoroetileno como material de separación de gases [13, 14].

La **Figura 3** presenta una celda de electrólisis de agua, que consta de un ánodo y un cátodo unidos mediante una fuente de alimentación externa y sumergidos en un electrolito conductor. Al aplicar corriente a la celda, los electrones fluyen desde el terminal positivo, ánodo, al negativo, cátodo, donde son consumidos por los iones de hidrógeno para formar átomos de hidrógeno. Mientras que los iones de hidrógeno se mueven hacia el cátodo, los de hidróxido se mueven hacia el ánodo. Para separar dichos compartimentos, se emplea un diafragma. Para recolectar los gases de hidrógeno y oxígeno formados en el cátodo y ánodo se emplean unos receptores de gas.

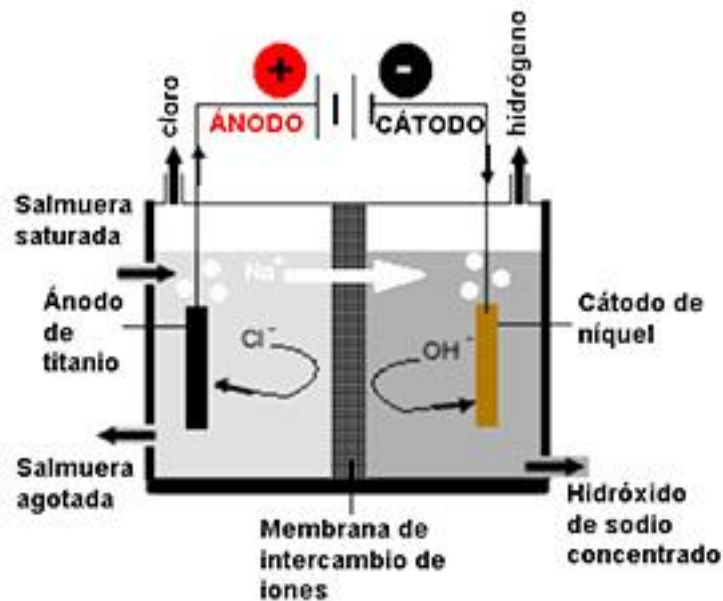
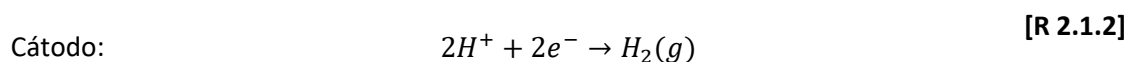
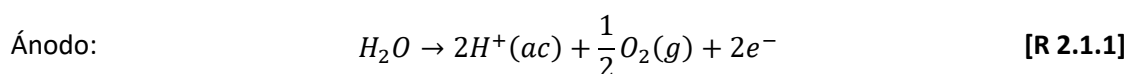


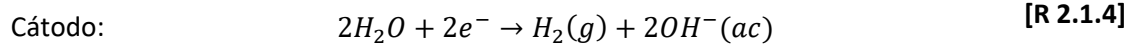
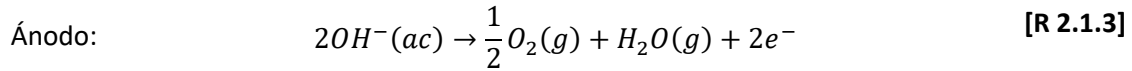
Figura 3. Sistema de electrólisis del agua. Fuente: Tesis Isaac Herranz Cardona.

Al emplear disoluciones acidas aumentas la conductividad de la disolución, aumentando así el rendimiento de ésta.

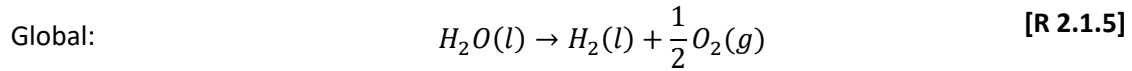
En medio ácido tienen lugar las siguientes semirreacciones:



Por otro lado, en medio alcalino se producen las siguientes semirreacciones:



dando lugar a la reacción química global de electrolisis para ambos casos:



Tal y como se menciona en el segundo párrafo, el coste de obtención de hidrógeno mediante electrolisis es casi el doble que el coste con respecto al reformado de hidrocarburos. Por ser más costosa su producción, se siguen investigando métodos mediante los cuales reducir su coste y aumentar su efectividad. Esto se puede alcanzar a través de dos vías. Por un lado, la idea es remover los materiales nobles de los electrodos, puesto que implica un coste elevado. Lo ideal sería sustituir dichos materiales por otros de un coste inferior y que posean una elevada estabilidad electroquímica. Por otro lado, puesto que la mayor parte de los costes de producción de hidrógeno proviene del consumo eléctrico, consistiría en reducir éste.

2.2. TIPO DE ELECTROLIZADORES.

Un electrolizador está compuesto de diversos elementos, estos se pueden apreciar en la **Figura 3**. Cabe destacar, que en función del electrolito empleado se pueden catalogar de distinta manera los electrolizadores. Estos se pueden clasificar principalmente en:

- 1) Electrolizadores de óxido sólido
- 2) Electrolizadores de membrana de intercambio protónico, también conocido como electrolizadores tipo PEM (del inglés *Proton Exchange Membrane*)
- 3) Electrolizadores alcalinos.

Sin embargo, aún se siguen desarrollando nuevos tipos de electrolizadores. En este caso se hace referencia a:

- 4) Electrolizadores de membra de intercambio aniónico, también conocido como electrolizadores tipo AEM [15] (del inglés *Anion Exchange Membrane*).

2.2.1 ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO

Este tipo de celdas no son una tecnología reciente, sus orígenes se remontan alrededor de 1890. Se atribuye a Nernst el descubrimiento de la conductividad iónica en materiales cerámicos en altas temperaturas, algunos de estos materiales son aislantes eléctricos a temperatura ambiente. Esta tecnología aún se encuentra en estado de desarrollo, ya que es necesario actuar sobre diversos aspectos: el control térmico, tiempos de vida de los materiales, sellado de gases entre otros.

Para este tipo de electrolizadores que trabajan a temperaturas del rango de 1000°C, se explota el efecto de las temperaturas sobre las cinéticas y los parámetros termodinámicos para generar

hidrógeno a partir del vapor de agua. La temperatura de operación se decide según la conductividad del electrolito. Es posible realizar los electrolizadores con geometrías planas o tubulares, siendo mínimo tanto el voltaje como las pérdidas.

La alimentación gaseosa, compuesta por una mezcla de agua con hidrógeno, se hace pasar por el compartimiento catódico de la celda. Puesto que el electrolito es impermeable al hidrógeno gaseoso, los iones de oxígeno migrarán hacia el ánodo debido a la acción del campo eléctrico, formando oxígeno gaseoso.

En ambos casos el electrolito se hallará entre electrodos porosos. Pese a que se han usado muchos tipos de electrolitos para este tipo de celdas, el que más se ha usado es el electrolito de zirconio estabilizado con itrio.

A través de la **Figura 4** Se puede observar cómo trabajan este tipo de electrolizadores.

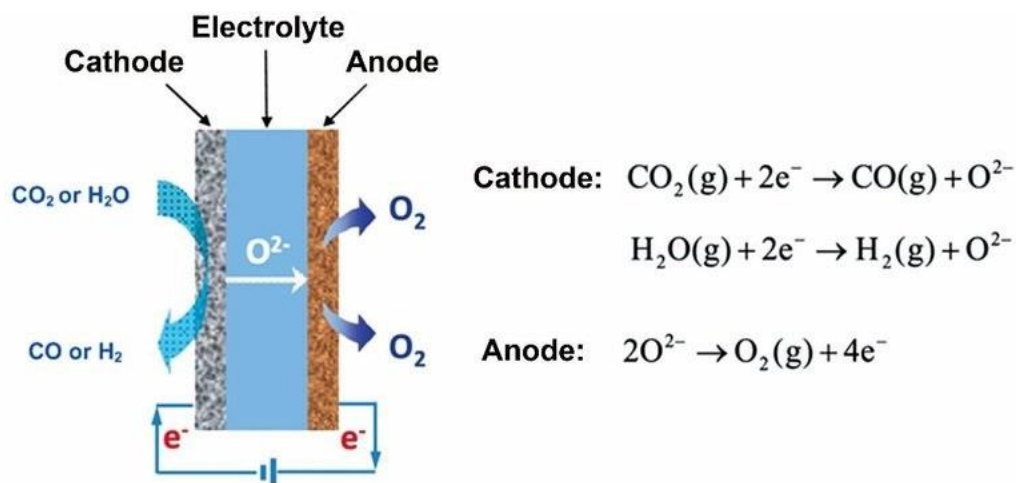


Figura 4. Funcionamiento de un electrolizador de óxido sólido. Fuente: Wei Li et al. [16]

2.2.2 ELECTROLIZADORES TIPO PEM (PEMWE)

Este tipo de electrolizador viene ligado a la creación de celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM). A principios de la década de 1960 los químicos Leonard Niedrach y Thomas Grubb, quienes trabajaban para General Electric Corporation (GE), desarrollaron los electrolizadores tipo PEM. Fueron ellos también quienes desarrollaron las celdas de combustible empleando un electrolito de poliestireno sulfonado. Los electrolizadores de este tipo se han consolidado como una tecnología viable industrialmente, son compactos y finos. Actualmente el ionómero fluorado *Nafion* es el material de PEM más empleado, desarrollado por el químico Walther Grot [17].

Los electrolizadores tipo PEM poseen una membrana polimérica perfluorada conductora de protones, la cual presenta cadenas terminadas en grupos de intercambio iónico sulfonados, que sirven como separador y electrolito simultáneamente. Ésta posee una baja conductividad iónica pero una elevada conductividad de protones cuando se halla saturada de agua. Las membranas de intercambio de protones se caracterizan principalmente por la conductividad de los protones (σ), la permeabilidad del metanol (P) y la estabilidad térmica. Los electrolizadores

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

PEM utilizan una membrana de polímero sólido (una fina película de plástico) como electrolito. Este polímero es permeable a los protones cuando está saturado de agua, pero no conduce electrones. Se puede obtener hidrogeno con una pureza superior al 99.9%. Sin embargo, a pesar de poder alcanzar unas eficiencias de casi el 100% se suele trabajar en rangos del 80-90%.

Mediante la **Figura 5** se puede observar cómo funciona dicha membrana:

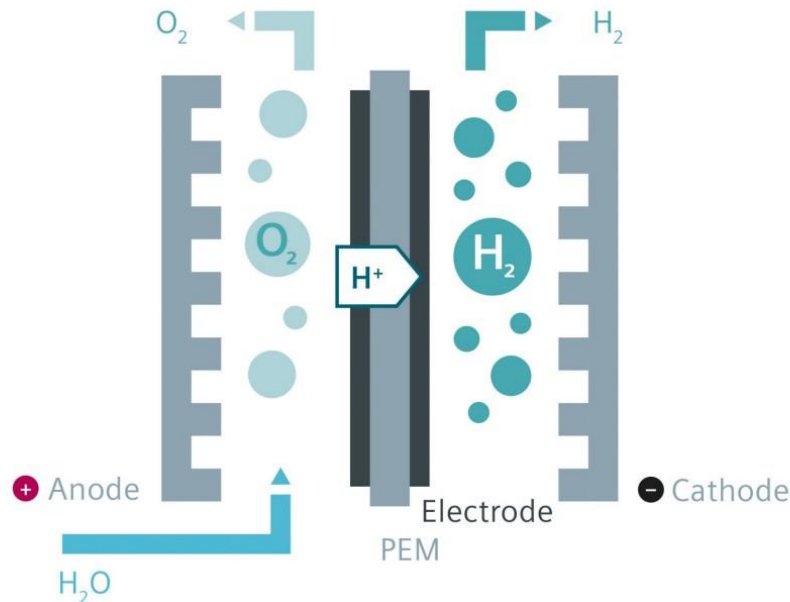
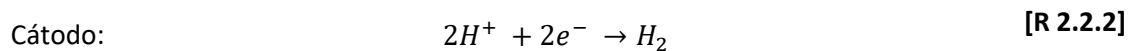
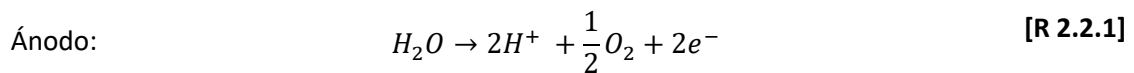


Figura 5. Electrolizador tipo PEM. Fuente: Siemens, soluciones-hidrógeno.

El ánodo es alimentado a base de agua, el cual se divide en O_2 e H^+ . El protón generado se transfiere desde la membrana hasta el cátodo, donde recibe el electrón y forma hidrógeno. En este proceso se generan las siguientes reacciones:



Los PEM se pueden fabricar a partir de membranas de polímero puro o de membranas compuestas, donde otros materiales están incrustados en una matriz de polímero. Mientras que Nafion es un ionómero con una columna vertebral perfluorada como el teflón, hay muchos otros motivos estructurales que se utilizan para producir ionómeros para membranas de intercambio de protones. Muchos usan polímeros poli aromáticos, mientras que otros usan polímeros parcialmente fluorados.

El peor inconveniente de este electrolizador es que los materiales de electrodos que se utilizan son metales nobles y que se utiliza titanio en las placas bipolares, ambos casos coinciden en que el precio es elevado, así como con los problemas relacionados con su escasez y abastecimiento.

2.2.3 ELECTROLIZADORES ALCALINOS (AWE)

La electrolisis del agua mediante electrolizadores alcalinos es una tecnología que se muestra como estándar actual al realizar electrolisis a gran escala. El tipo de electrolito que más se emplea es una disolución acuosa de una base fuerte como son: NaOH o KOH. Este tipo de electrolitos presentan una gran conductividad iónica y no sufren descomposición química, de manera que no afecta a la eficiencia de la electrolisis.

Para el caso del KOH, la conductividad es máxima cuando la concentración se encuentra al 28% en peso de KOH. Debido a ello, los electrolizadores trabajan a concentraciones del rango 25-30% en peso [18]. Además, ésta aumenta con la temperatura, alcanzando su máximo a los 150°C [19]. Sin embargo, debido a que el electrolito se hallaría en estado vapor es habitual trabajar en temperaturas del rango de los 80-90°C.

Los electrolizadores alcalinos están compuestos de varias celdas que pueden estar dispuestas en dos configuraciones: tipo tanque o monopolar **Figura 6a** y filtro prensa o bipolares **Figura 6b**.

La más típica es la monopolar, donde cada electrodo presenta una única polaridad estando conectados de forma paralela los electrodos de la misma polaridad. Este tipo de electrolizadores se construyen de forma sencilla y poseen un coste relativamente bajo. No obstante, son más voluminosos y no poseen la capacidad de trabajar a temperaturas y presiones elevadas, de manera que su temperatura de operación ronda los 60-90°C y presión cercana a la atmosférica. Las conexiones eléctricas son relativamente largas, originando pérdidas energéticas indeseadas.

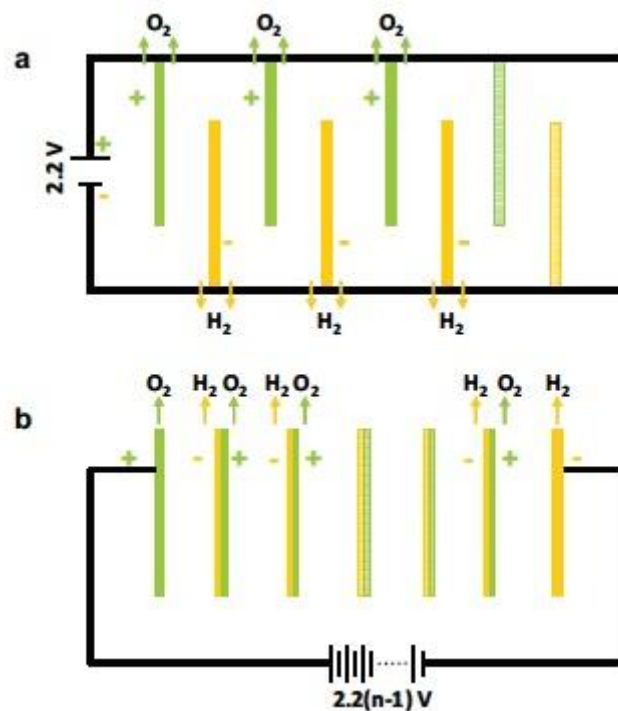
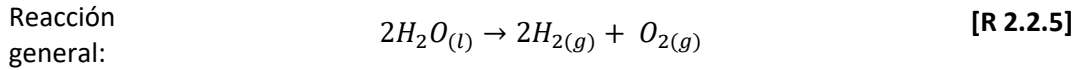
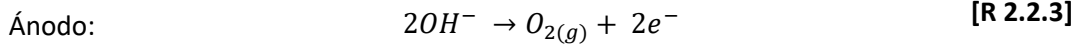


Figura 6. Esquema de la configuración **a)** monopolar **b)** bipolar de los electrolizadores. Fuente: Tesis Isaac.

En este proceso se generan las siguientes reacciones:



Existen ciertos electrolizadores más avanzados que presentan una geometría de “espacio-nulo” con el ánodo, así como con el cátodo formados sobre los lados opuestos del diafragma poroso. Estos son mucho más compactos y permiten trabajar a altas presiones y temperaturas. Por ello, los electrolizadores de filtro de prensa poseen la posibilidad de trabajar a voltajes menores obteniendo densidades de corriente más altas. A pesar de ello, tanto su construcción como su mantenimiento son laboriosos. En este tipo de electrolizadores se puede trabajar con electrodos de metales no nobles, lo que disminuye su coste respecto a los PEM.

A pesar de todo, para una producción de hidrógeno a gran escala son necesarios unos requisitos eléctricos elevados. Asimismo, debido a que se desea reducir la emisión de CO₂ las necesidades eléctricas de esta tecnología deberían de ser abastecidas por energías renovables, como son la solar, mareomotriz, eólica.

2.2.4 ELECTROLIZADORES TIPO AEM (AEMWE)

Los electrolizadores tipo AEM han ido despertando cierto interés en los desarrolladores industriales. Se trata de introducir una membrana de intercambio aniónica, *Anion Exchange Membrane Water Electrolysis*.

El diseño de una celda AEMWE se concibe como una mejora significativa de las propiedades de los separadores AWE, tanto en términos de resistencia como impermeabilidad, o como una transformación de la tecnología *Proton Exchange Membrane Water Electrolysis*. Permite un factor de forma y capacidades similares, sin embargo, la clave es el transporte en los sistemas AEM de iones de hidróxido OH⁻ en lugar de protones H⁺. Esto genera un entorno electroquímico alcalino en lugar de un ambiente ácido, lo que permite el uso de más materiales rentable. Al igual que con Las PEMWEs, las AEMWEs pueden usar metal finamente dividido como catalizadores en estrecho contacto con una membrana no porosa y dos capas de transporte de gas para dar lugar a *Membrane Electrode Assembly*.

Los electrolizadores AEMWE pueden combinar y mejorar las ventajas de los sistemas AWE y PEMWE.

Pueden operar a alta corriente densidades con presiones diferenciales mientras se utilizan cargas de PGM bajas a cero para las capas de catalizador o electrodos. La plenitud de materiales para la resistencia a la corrosión en medios alcalinos elimina la necesidad de titanio recubierto de PGM como el medio de transporte poroso y otros componentes de flujo. Además, con concentraciones de KOH diluido (por ejemplo, 1-2 M), las corrientes de derivación se reducen sustancialmente para una mayor eficiencia y el Balance de Planta (BOP) se puede simplificar sobre la tecnología AWE existente con menos problemas de seguridad y una compatibilidad de materiales mejorada para el equipo de soporte.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

La **Tabla 2** contiene un breve compendio de las características más importantes de los electrolizadores en la actualidad, destacando las ventajas e inconvenientes más importantes.

Tabla 2. Comparación de las tecnologías más importantes de Electrólisis del Agua.

Electrolizador	Óxido Sólido	Tipo PEM	Alcalino	Tipo AEM
Electrolito	Cerámica	Polímero	NaOH/KOH	Polímero
Portador carga	O ²⁻	H ⁺	OH ⁻	OH ⁻
Temperatura	1000°C	80°C	80°C	80°C
Ventajas	-Menor consumo de energía eléctrica	-H ₂ de mayor pureza -Menores costes energéticos -Posibilidad de trabajar a altas presiones	-Tecnología madura -Gran durabilidad de los electrolizadores -Producción de H ₂ a gran escala	-Diseño compacto -Posibilidad de trabajar a altas presiones y densidades. -No necesita titanio recubierto de PGM. -Catalizador de bajo coste.
Inconvenientes	-Aún en desarrollo -Las altas temperaturas requieren materiales muy estables	-Electrolito más caro -Electrolito ácido, encarece los materiales -Tecnología en desarrollo, empleada a baja escala	-Electrolito corrosivo -No puede trabajar a altas presiones -Alto coste de electrodos -Elevado coste energético	-Aún en desarrollo. -Actualmente no reproducible a gran escala.

2.3. REQUERIMIENTOS PARA LA REACCIÓN DE ELECTROLISIS

Para que tenga lugar la reacción de electrolisis, es necesario aplicar un sobrepotencial, η . Esto es debido a que existe una barrera energética de activación la cual debe ser superada, así como los gradientes de concentración y la formación de burbujas. Es esencial y necesario el aportar energía adicional, pues se empleará para conducir los procesos de migración iónica y vencer de esta forma a la resistencia de la membrana y del circuito. Dicha energía extra causa una caída de potencial en la celda, $I \cdot R_{celda}$ (donde I es la intensidad a través de la celda y R_{celda} es la suma de resistencias eléctricas y de transporte de celda, función de las propiedades del electrolito, forma de los electrodos, así como del diseño de celda).

El potencial de celda, E_{celda} se puede escribir de la siguiente forma:

$$E_{celda} = E_{rev} + \sum \eta + I \cdot R_{celda} \quad (1)$$

y suele estar alrededor de 1.8 - 2.0 V a densidades de corriente de entre 1000 – 3000 A m⁻² en la electrolisis del agua industrial [20].

El sobrepotencial total se define como la suma de los sobrepotenciales, es decir, la suma de las barreras energéticas de las reacciones de evolución de hidrógeno y oxígeno, la formación de burbujas y la diferencia de concentración del electrolito. Despreciando el efecto de gas y la diferencia de concentración, la suma de sobrepotenciales se puede calcular empleando la ecuación:

$$\sum \eta = |\eta_{ánodo}(j)| + |\eta_{cátodo}(j)| \quad (2)$$

donde la densidad de corriente se ve definida como j (intensidad dividida entre el área superficial del electrodo) a la cual opera la celda de electrolisis.

El potencial de operación a través del cual se trabajará se decide en función de la temperatura y la presión de trabajo. El valor absoluto del potencial termodinámico reversible, E_{rev} , disminuye con el aumento de la temperatura según la relación :

$$|E_{rev,T}| \left(\frac{T}{K} \right) = 1,518 - 1,542 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,523 \cdot 10^{-5} \cdot T \ln T + 9,840 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (3)$$

No solo eso, sino que además los sobrepotenciales disminuyen considerablemente a elevadas temperaturas debido al aumento conductividad del electrolito y la actividad de los electrodos. Mediante la reducción del potencial reversible y de los sobrepotenciales a través de la temperatura se consigue operar a potenciales de celda inferiores mejorando así la eficiencia de la electrolisis y disminuyendo el consumo energético.

2.4. REACCIONES DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER) Y DEL OXÍGENO (OER)

A continuación, se explicarán brevemente las reacciones de evolución del hidrógeno y del oxígeno.

2.4.1 REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO (HER).

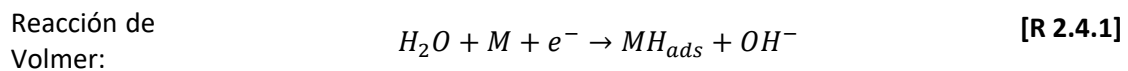
En este trabajo se ha empleado un electrolizador alcalino para llevar a cabo la electrolisis del agua, se sabe que la obtención del H₂ vendrá a partir de las reacciones de Oxidación-Reducción. Aunque la HER ha sido observada desde los inicios de siglo XX, aún no existe una información completa con respecto a la cinética y al mecanismo por el cual ocurre sobre diferentes

materiales. Existen numerosas investigaciones con respecto a la cinética de esta reacción sobre níquel en disoluciones alcalinas.

Para dar a entender cómo se lleva a cabo, aquí se explicará brevemente el desarrollo del proceso.

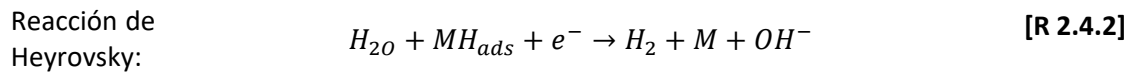
Un punto básico para tener en cuenta es entender la dependencia del grado de recubrimiento superficial con el sobrepotencial, así como la dependencia de éste con las propiedades del material empleado.

La reducción del agua da lugar a la formación átomos de hidrogeno adsorbidos al metal, este proceso se conoce como Reacción de Volmer y viene seguida de dos etapas competitivas que se llevan a cabo de manera simultánea. Dichas etapas llevarán a cabo la desorción, siendo una de ellas electroquímica (Reacción de Heyrovsky) y la otra química (Reacción de Tafel).



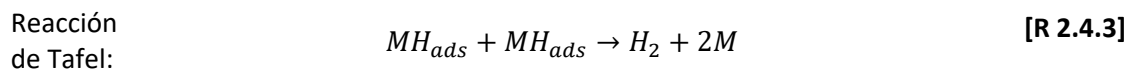
Inicialmente la superficie del electrodo se encuentra totalmente desprovista de átomos de H_2 , las moléculas de agua se descargan sobre los sitios activos que posee el metal, de manera que conforme vaya avanzando la reacción el grado de recubrimiento, Θ_{H_2} , aumentará.

La existencia de estos átomos de hidrógeno adsorbidos hará posible la aparición de reacciones alternativas.



Una vez el grado de recubrimiento, Θ_{H_2} , es suficientemente elevado, el número de colisiones de H_2O sobre el Hidrogeno adsorbido será más significativo produciéndose de este modo la desorción electroquímica, Mecanismo Volmer-Heyrovsky.

Por otro lado, se llevará de manera consecutiva y paralela a la anterior la reacción de Tafel.



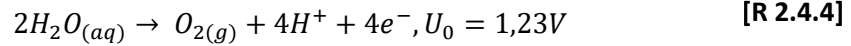
Una vez se ha llevado a cabo la etapa de adsorción empieza también la etapa de desorción química del hidrogeno, también conocida como reacción de recombinación y que se llevará a cabo a una velocidad proporcional al Θ_{H_2} . Tras un breve periodo, la velocidad de descarga sobre la superficie se igualará a la velocidad de recombinación alcanzando un estado estacionario del H_2 , Mecanismo Volmer-Tafel.

2.4.2 REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL OXÍGENO (OER)

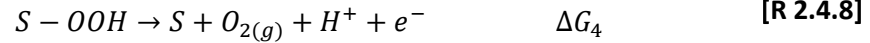
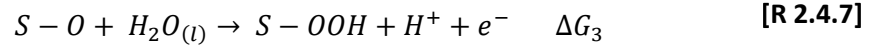
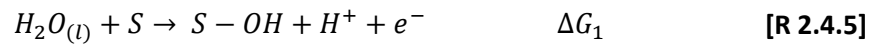
La OER se trata de un proceso crucial en el almacenamiento y la conversión de energía, especialmente en la electrólisis del agua. En la actualidad, tanto los metales preciosos como sus materiales de óxido (Ir, Ru, IrO₂ y RuO₂), se utilizan como catalizadores de última generación, estos son empleados ampliamente en el proceso de OER para reducir el consumo de energía y, por lo tanto, mejorar la eficiencia de conversión de energía [21]. No obstante, estos catalizadores no pueden satisfacer la producción a gran escala debido a su alto costo, escasez y

poca durabilidad. Actualmente, el desafío consta de hallar catalizadores alternativos sin metales preciosos para la promoción de las OER cinéticamente lentas.

La OER es un proceso de 4 electrones, en el cual las moléculas de agua se transforman en O₂ de acuerdo con la ecuación:



Rossmesl et al. (2005, 2007b) [22] calcularon el panorama de energía libre OER de acuerdo con una ruta, que asume los adsorbatos OH, O y OOH como intermedios de reacción. Se asumió que cada paso procedía a través de pasos concertados de transferencia de protones y electrones. Esto fue originalmente debido a razones técnicas, sin embargo, este mecanismo se sigue adoptando en literaturas más recientes.



En las ecuaciones (5) - (8), S denota el sitio activo de un catalizador OER. Para realizar un catalizador ideal, cada paso debe ser termoneutral en el potencial de equilibrio. Dicho de otra forma, cuando el cambio de energía libre del-ésimo paso se denota como ΔG_i, el criterio de un catalizador termodinámicamente ideal es: ΔG₁ = ΔG₂ = ΔG₃ = ΔG₄ = 0 eV en U = 1.23 V vs. RHE (**Figura 7**, líneas azules) frente a RHE. Esto da como resultado ΔG₁ = ΔG₂ = ΔG₃ = ΔG₄ = 1.23 eV en U = 0 V vs. RHE (**Figura 7**, líneas negras), que corresponde a las condiciones habituales de los cálculos de DFT.

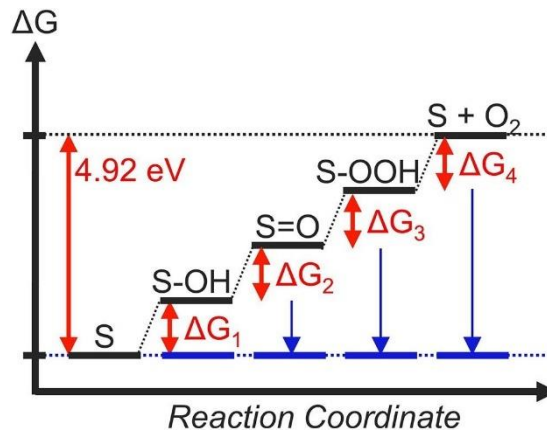


Figura 7. Visión termodinámica de una OER ideal catalítica a $U = 0$ V (líneas negras) y $U = 1,23$ V (líneas azules). Fuente: [23]

2.4.3 EFECTO DEL AUMENTO DE LA SUPERFICIE ELECTROQUÍMICA ACTIVA (ECSA)

Tal y como se menciona en el punto 2.4.1, el aumento de la superficie electroquímica activa de los electrodos es uno de los métodos más empleados y con mejores resultados para reducir el sobrepotencial de las reacciones catódicas [24] y anódicas.

La reducción del potencial de celda va ligada al incremento del área de electrodo ya que este juega un papel decisivo, aunque sólo puede considerarse como efecto electrocatalítico si va acompañado de una variación de los sitios activos superficiales. De manera que se deben considerar dos factores principales para la evaluación de los materiales de electrodo: los factores geométricos y los electrónicos.

2.4.4 MATERIALES DE LOS ELECTRODOS PARA LA HER Y OER

Un factor crucial a la hora de llevar a cabo tanto la HER como la OER, es el material sobre el cual se generará el hidrógeno y el oxígeno, para ello, es necesario que la unión entre hidrógeno u oxígeno y la superficie del metal sea buena. Dicho de otra forma, la actividad electrocatalítica para la HER de un electrodo se puede correlacionar con el calor de adsorción del intermedio de reacción (MH_{ads}) sobre la superficie de dicho electrodo. Se empleará (M-H) como representación para el calor de adsorción del hidrógeno en función de la densidad de corriente, i_0 , dicha representación da lugar a la conocida “curva de volcano” [25]. La **Figura 8** se puede emplear como una guía mediante la cual predecir la actividad catalítica de los materiales. Dichas actividades ya han sido confirmadas de manera experimental [25].

Tal y como se puede apreciar, en la zona donde inicia la curva, es decir, a M-H bajos, el grado de recubrimiento, $\Theta_{H_2} \rightarrow 0$, de manera que, la reacción es lenta pues se halla limitada por el paso de Volmer. Conforme vaya aumentando la energía de enlace M-H, Θ_{H_2} también lo hará, así como lo hará la velocidad de producción del hidrógeno por unidad de superficie. Éste incremento continuará a medida que se desplace por la siguiente serie de catalizadores, siempre y cuando la energía de enlace M-H también aumente. No obstante, a medida que el grado de recubrimiento del material crezca, decrecerá de igual manera la superficie libre de adsorción disponible. A parte, el enlace de adsorción que debe romperse en el paso de Heyrovsky o Tafel es más fuerte, lo cual hace que este paso sea menos rápido que el resto de manera que determine la velocidad del proceso. Resumiendo, desde un punto de vista cualitativo, a medida

que la fuerza de enlace M-H aumenta, la velocidad de la reacción se incrementará hasta que se alcanza un máximo, a partir del cual empezará a decrecer (dando la forma de una montaña/volcán, de ahí que esta representación reciba el nombre de “volcano”).

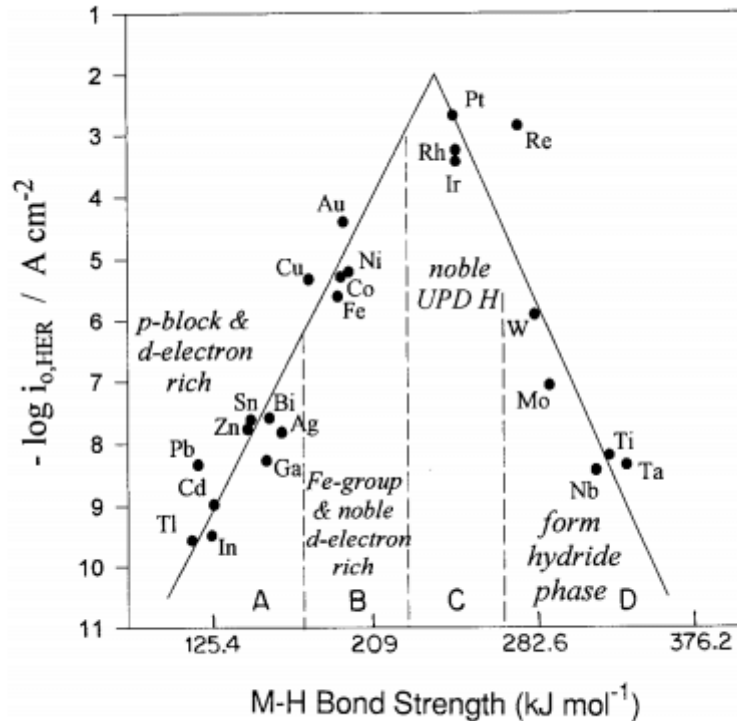


Figura 8. Curva de volcans para la generación de hidrógeno sobre la superficie de metales. Fuente: Haroldo de Araujo Ponte, 2014.

La curva de volcans tiene como base el comportamiento de metales simples, donde el calor de adsorción es el principal factor que parece ser responsable del cambio en la actividad entre un metal y otro. Se han propuesto un gran número de correlaciones para explicar este fenómeno. Sin embargo, la mayor parte de los resultados derivados de estos estudios sugieren que la actividad de la HER está fuertemente relacionada con la estructura electrónica de los metales de manera que, depende del grupo de la Tabla Periódica de los Elementos al que pertenece.

Los orbitales “d” característicos de los metales de transición tienen gran importancia para la quimisorción. Para los catalizadores de metales de transición, los electrones desapareados de los orbitales “d” se acoplan con los orbitales desapareados “s” o “p” del adsorbato; para la HER, el hidrógeno es fuertemente adsorbido a través de la formación de pares de electrones. Los elementos del Grupo VIII, poseen un amplio porcentaje de electrones apareados del orbital “d” y calores de adsorción medios, presentando las actividades electrocatalíticas más altas, particularmente el grupo de los metales del platino (Pt, Rh, Ir, Pd), y los metales de transición (Ni, Co, Fe, Mo).

Normalmente, las celdas de electrólisis que se emplean a nivel industrial utilizan electrodos basados en níquel o de acero inoxidable, ya que estos poseen una buena relación entre sus propiedades electrocatalíticas hacia la producción de hidrógeno, resistencia a la corrosión en medios fuertemente alcalinos y son baratos. No obstante, su actividad se ve disminuida con el tiempo manifestándose mediante una pérdida de corriente a un potencial fijado en el electrodo

o bien mediante un aumento en el sobrepotencial de hidrógeno a una corriente constante. Teniendo en cuenta sus propiedades catalíticas y su coste, las aleaciones basadas en Ni se consideran los mejores materiales de cátodo para la HER.

La **Figura 8** se puede emplear como una guía mediante la cual predecir la actividad catalítica de los materiales para la OER.

El trabajo de Seitz et al. [26] es otro ejemplo, donde se predijo el catalizador IrOx / SrIrO3 altamente activo para la OER basado en el marco de relaciones de escala y η_{TD} . Estos trabajos, entre otros, contribuyeron a que los procedimientos de cribado in silico se hicieran extremadamente populares en la electrocatálisis y, en la actualidad, se utilicen ampliamente para el descubrimiento de materiales catalíticos (Yao et al., 2019; Yang et al., 2020).

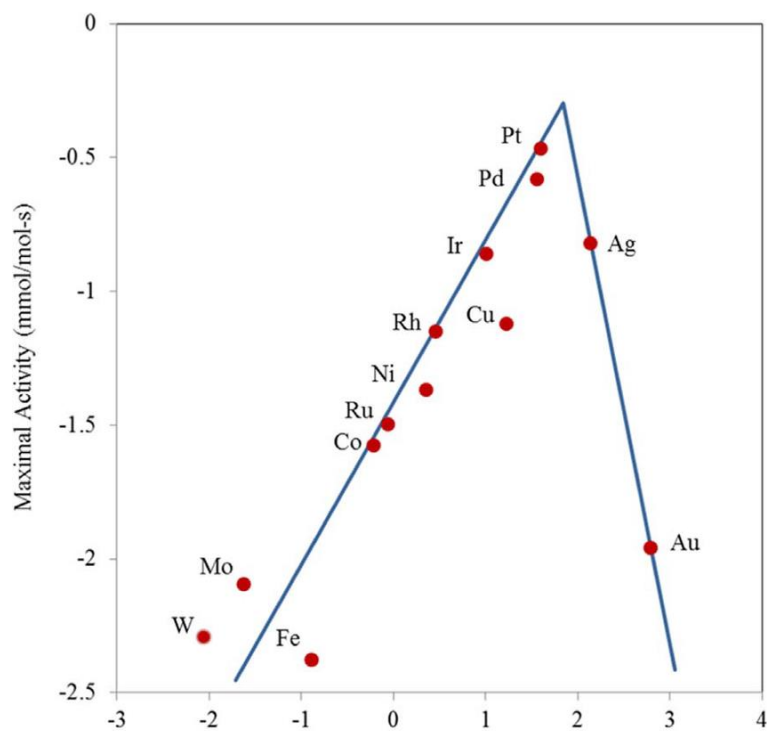


Figura 9. Curva de volcans para la OER donde se muestra la relación entre la energía de enlace y la máxima actividad calculada usando el Análisis de Sabatier. Fuente: J.K.Norskov et. al [27]

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS

El objetivo que se pretende alcanzar con estudio es: Hallar la mejor combinación de materiales de cátodo y ánodo capaces de generar gas hidrógeno con la mayor eficiencia energética.

Para ello, se emplearán distintos tipos de materiales con actividades catalíticas diversas, así como diferentes áreas superficiales para hallar la mejor combinación posible: electrodos de níquel liso (comercial), níquel poroso y mejora de este último incorporando nanopartículas de oro al electrodo de níquel poroso.

Para conseguir alcanzar dicho objetivo, se dividirá todo el proceso en unos objetivos parciales enumerados a continuación y en base a los cuales se desarrollará la metodología de trabajo.

Caracterización de los electrodos:

Se evaluarán las actividades catalíticas de los distintos electrodos, así como la reacción de evolución del hidrógeno asociando la respuesta electroquímica a la morfología y composición superficial de los empleados.

Determinación de Rendimientos Energéticos:

A continuación, se determinará la eficiencia energética a partir de las experiencias realizadas en el laboratorio que simulan las condiciones de operación normal de los electrolizadores alcalinos variando el ánodo y el cátodo.

Comparación de resultados:

Para finalizar, se llevará a cabo un análisis comparativo de los diversos electrodos empleados, siendo estos: Níquel comercial, Níquel poroso y Níquel poroso dopado con nanopartículas de oro. Así como un breve estudio económico de todas las configuraciones.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

Para la caracterización electroquímica de los materiales se ha empleado un potenciostato/galvanostato AUTOLAB PGSTAT 302N. En configuración de dos electrodos (trabajo-auxiliar). Las superficies de cátodo y ánodo quedarán dispuestas en vertical, de forma que las burbujas de gas generadas puedan fluir libremente, sin bloquear la superficie activa del electrodo.

A continuación, se presenta la celda empleada, así como un breve esquema de las conexiones eléctricas usadas en la experiencia:

Celda electroquímica de generación de gases (Patente P-200803389) [28]:

Esta celda electroquímica fue patentada por el grupo IEC de la Universidad Politécnica de Valencia con la denominación “Celda electroquímica de generación de gases para el análisis de procesos electroquímicos”, se basa esencialmente en un voltámetro de Hoffmann termostatado, con las características que se exponen a continuación:

- Posible configuración de tres electrodos.
- Permite medir el volumen de gas generado en ambos electrodos.
- Permite el control de la temperatura de la celda mediante una camisa termostatada.
- Posible visualización en tiempo real de la superficie de los electrodos sobre los que se realizan los ensayos.

A continuación, se presenta: **a)** una imagen de la celda empleada, **b)** un esquema de la celda con cada una de sus partes y conexiones.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

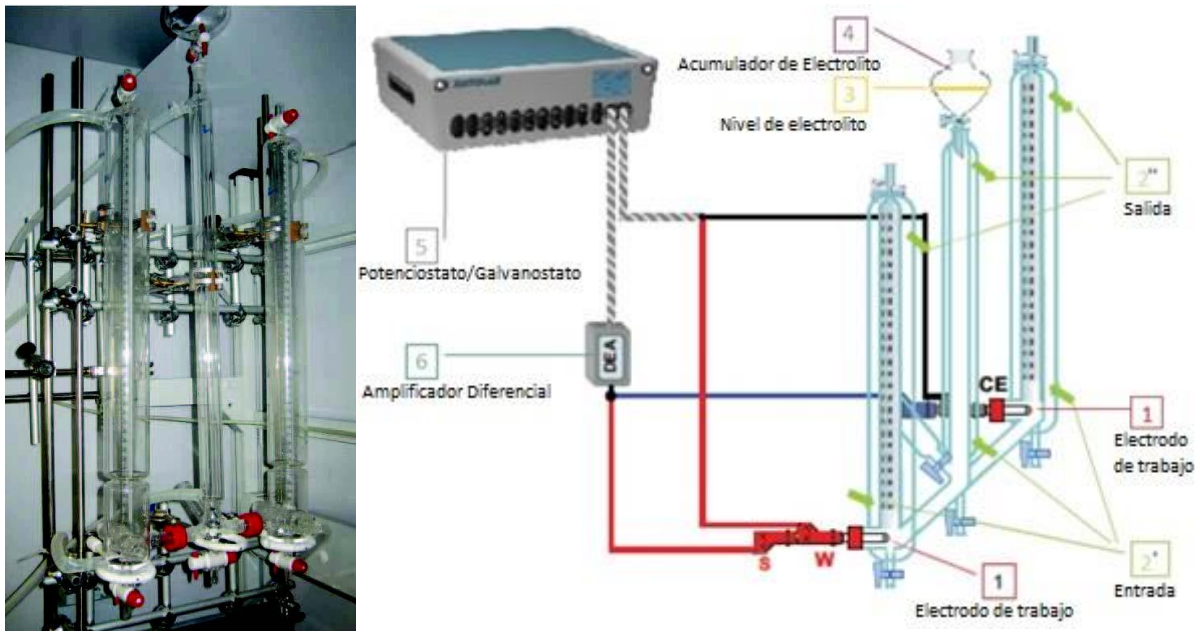


Figura 10. Celda electroquímica de generación de gases: a) Fotografía b) Disposición de electrodos y conexiones eléctricas. Fuente: Tesis Isaac Herranz Cardona.

4.2. DISOLUCIÓN DE TRABAJO.

Como se ha mencionado con anterioridad, la electrolisis alcalina del agua se lleva a cabo con el uso de KOH a concentraciones del 28% al 35% en peso [18]. En este trabajo, se ha llevado a cabo al 30% en peso. La densidad de la disolución se determinó a partir de la gráfica de la **Figura 11**.

La disolución se preparó a partir de lentejas de KOH (PANREAC 85% de riqueza mínima, PA-ACS-ISO). Para ello, se disolvieron 126'05 gramos de lentejas de KOH en agua destilada y se enrasó en un matraz aforado de 250ml. A continuación se dejó la disolución nitrogenando durante 15 minutos con una corriente de nitrógeno para cada una de las experiencias realizadas. De este modo, se consigue evitar el fenómeno de carbonatación que puede suceder con este tipo de disoluciones, que conllevan una disminución de conductividad del electrolito generando una deficiencia energética del proceso y la no reproducibilidad de los ensayos.

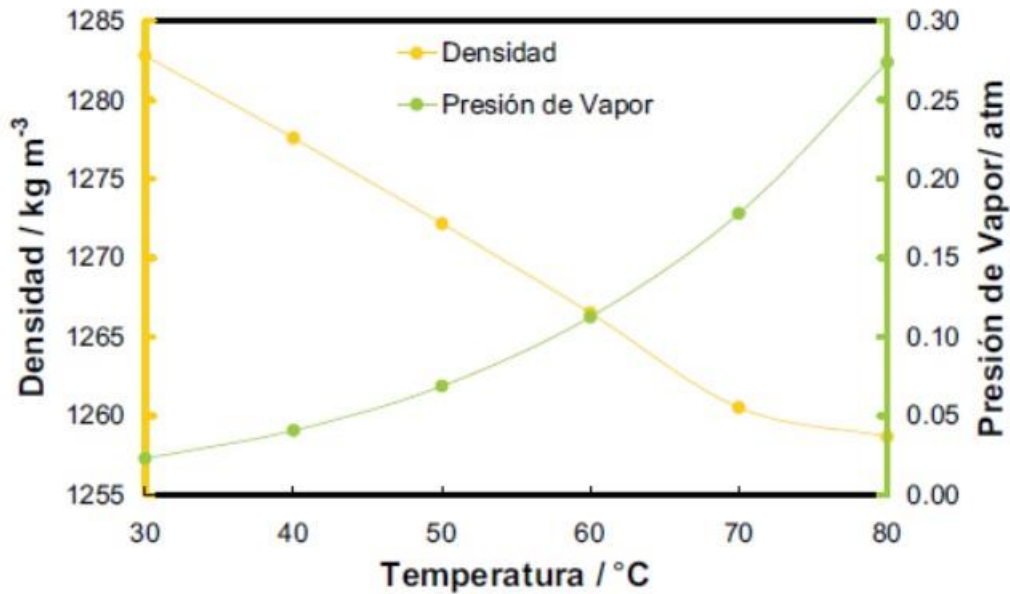


Figura 11. Evolución de la densidad másica y la presión de vapor en función de la temperatura para una disolución de KOH 30% en peso. Fuente: Tesis Isaac Herranz Cardona.

4.2.1 ELECTRODOS ENSAYADOS.

Tanto los electrodos como las diferentes configuraciones analizadas en el presente TFG fueron elegidos por el alumno de entre los electrodos disponibles del grupo IEC de la UPV. Debido a que en el momento de inicio de este proyecto se estaban caracterizando electrodos macroporoso con nanopartículas de oro y electrodos porosos, se decidió realizar los ensayos pertinentes con:

1. Electrodo de níquel liso (ENL), el más común, también conocido como níquel comercial, este tipo de electrodo se emplea habitualmente en la electrolisis alcalina del agua industrial [29].
2. Electrodo de níquel poroso (ENR), se desarrollaron mediante electrodeposición a alta densidad de corriente [30]. Primero, es necesario pulir el sustrato, acero inoxidable AISI 304, hasta que la superficie este reluciente y limpiarla con NaOH (desengrasante) para más tarde tratarla con HCl (stripping). Una vez se ha realizado los pasos anteriores para aumentar la adherencia, el electrodo pasa por un tratamiento anódico en H₂SO₄ para más tarde electrodepositar una fina capa de níquel procedente de una solución ácida de cloruro de níquel. Después, se lleva a cabo la electrodeposición a una alta densidad de corriente (1 A cm⁻²) a través de un baño con 48g L⁻¹NiCl₂ · 6H₂O y 170 g L⁻¹NH₄Cl, con pH con 4,5. Se empleó un electrodo de grafito con elevada superficie de alta pureza como contraelectrodo, y un electrodo de referencia Ag/AgCl (3 M KCl electrolito). El experimento se llevo a cabo en AUTOLAB PGSTAT302N potencióstato/galvanostato. La **Figura 12** muestra su estructura a través de dos imágenes.
3. Electrodo de níquel macroporoso dopado con nanopartículas de oro (ENAu), para este último caso, se realizó el mismo proceso que se usó para la obtención de electrodos de

níquel poroso [31]. Una vez se obtuvieron los electrodos porosos, se sintetizaron las nanopartículas de Au y se añadieron a la superficie de los mismos. Para la obtención del Au, se preparó una solución ácida de $2,5 \cdot 10^{-4}$ M de ácido tetrachloroaurico y se calentó a 100°C. Se añadieron 25 mL de 0,5% en peso de citrato de sodio a la solución caliente. Los iones de citrato son los responsables de la reducción de Au (III) a Au (0) y también de ser agentes complejantes de las nanopartículas formadas. Por tanto, se estabiliza la suspensión de las nanopartículas coloidales.

El electrodo macroporoso de níquel, fue revestido con la suspensión de oro a través de un recubrimiento por inmersión. Antes del recubrimiento, la suspensión de oro fue modificada para incrementar la viscosidad y bajar la tensión superficial añadiendo *Hydroxyethyl Cellulose* (0,5% en peso) y BYK 347 (1% en peso). Entonces, el electrodo fue recubierto por inmersión cuatro veces realizando un secado entre cada inmersión. Finalmente, el electrodo fue tratado térmicamente en un horno tubular a 350°C durante una hora bajo una atmosfera de nitrógeno.

La **Figura 13** muestra su estructura a través de dos imágenes.

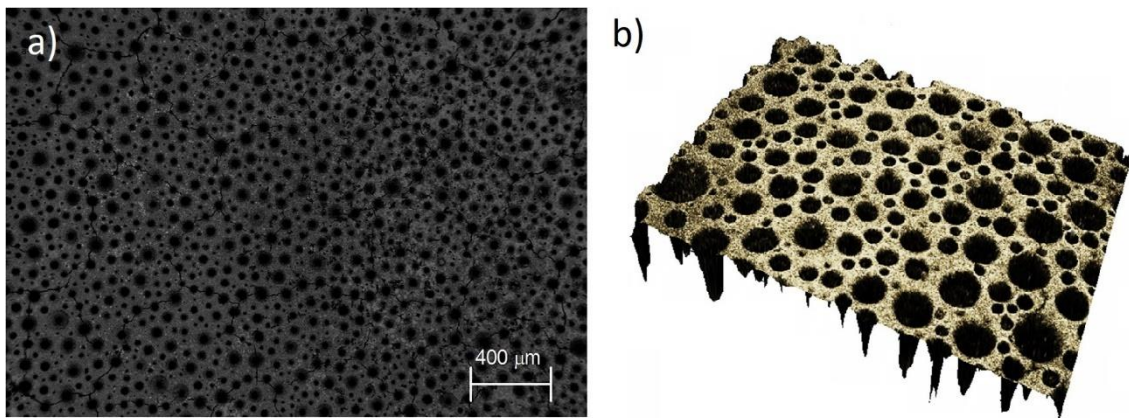


Figura 12. Imagen de un electrodo macroporoso de Ni con **a)** un microscopio tipo FE-SEM a magnificación 30 y **b)** laser confocal 3D. Fuente: [30]

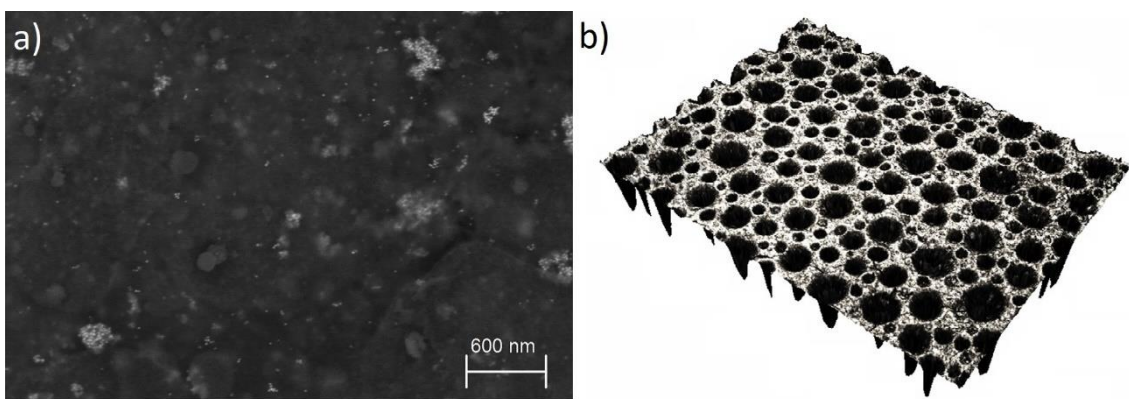


Figura 13. Imagen de un electrodo macroporoso de Ni-Au con **a)** un microscopio tipo FE-SEM a magnificación 20000 y **b)** laser confocal 3D. Fuente: [30]

4.2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Todas las experiencias se llevaron a cabo en la Celda electroquímica de generación de Gases, con la configuración de dos electrodos (siendo el cátodo el electrodo de trabajo). Se realizaron 5 combinaciones de electrodos tal y como se muestran en la **Tabla 3**, para intentar hallar la mejor combinación posible. La superficie geométrica expuesta en ambos electrodos fue de 0,5 cm² ($A_e=0,5$ cm²). Las experiencias realizadas fueron con las combinaciones que se presentan a continuación:

Tabla 3. Configuraciones de electrodos empleados en el presente estudio.

Ánodo	Cátodo
Níquel Liso (ANL)	Níquel Liso (CNL)
Níquel Liso (ANL)	Níquel con nanopartículas de oro (CNAu)
Níquel con nanopartículas de oro (ANAu)	Níquel con nanopartículas de oro (CNAu)
Níquel Liso (ANL)	Níquel Poroso (CNR)
Níquel Poroso (ANR)	Níquel Poroso (CNR)

A continuación, se muestran las etapas que se llevaron a cabo en el presente proyecto, para cada configuración de la **Tabla 3**:

1. Preparación de la disolución de trabajo; Esta etapa se ha explicado en el punto **4.2**.
2. Colocación de los electrodos en la celda electroquímica de generación de gases.
3. Llenado de la celda electroquímica de generación de gases.
4. Conexión de los electrodos al potencióstato/galvanostato, según esquema de la **Figura 10 b**.
5. Calefacción de la disolución de trabajo; En esta etapa se activa la calefacción del fluido de la camisa externa para alcanzar la temperatura de trabajo de 30°C.
6. Fijación del potencial de trabajo a -3V durante 30 minutos para acondicionar la superficie de los electrodos.
7. Realización del ensayo potenciodinámico para la obtención de la curva de descarga de hidrógeno. El barrido potenciodinámico se efectuó desde $E_{celda} = 0$ V hasta $E_{celda} = -3$ V, a una velocidad de barrido de 10 mV s⁻¹.
8. Enrase de la celda electroquímica de generación de gases.
9. Ensayos galvanostáticos a 3 densidades de corriente catódicas durante 1 hora (Condiciones en apartado **4.2.4**). Se tomarán los valores iniciales y finales de volumen en el compartimiento de producción de hidrógeno y diferencias de cota entre la superficie libre del electrolito en el compartimiento de producción de hidrógeno y el acumulador de electrolito.
10. Repetición del procedimiento desde el punto 5 para las temperaturas de 50 y 80°C.
11. Vaciado de la celda electroquímica de generación de gases.

4.2.3 CURVAS DE DESCARGA DE HIDRÓGENO.

El barrido potenciodinámico se efectuó desde $E_{celda} = 0$ V hasta $E_{celda} = -3$ V, a una velocidad de barrido de 10 mV s^{-1} . Las curvas se obtienen a 30, 50 y 80°C , como paso previo a la realización de los ensayos galvanostáticos a las temperaturas anteriormente mencionadas.

Tabla 4. Condiciones experimentales empleadas en los ensayos potenciodinámicos.

Parámetros	Características
Tipo de ensayo	Barrido Potenciodinámico.
Dispositivo experimental	Celda de generación de gases. Configuración de 2 electrodos.
Condiciones	E_{Celda} inicial 0 V E_{Celda} final -3 V Velocidad de barrido 10 mV s^{-1}
Electrolito	Disolución de KOH al 30% en peso.
Temperaturas	30, 50 y 80°C

Consisten en barridos potenciodinámicos hacia potenciales catódicos del electrodo de trabajo. Se registra el potencial de celda, es decir, la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo (en nuestro caso del cátodo al ánodo). Con esta experiencia se pretende determinar el potencial de descarga del hidrógeno, E_{H_2} , mediante el cual se produce la evolución de gases sobre la superficie de los electrodos. La **Figura 14** es un ejemplo de la curva de descarga de hidrógeno, donde se representa la densidad de corriente que atraviesa la celda ($j = I/A_e$) frente al potencial de celda. Como puede verse en la figura, el potencial de descarga del hidrógeno se obtiene al intersectar la extrapolación de la curva de potenciales catódicos (entre -2 y -3 V) con el eje de abscisas [32, 33]. Mediante los valores obtenidos con la línea de tendencia del tramo lineal de la curva de descarga se puede calcular el valor exacto del potencial de descarga del hidrógeno, que en este caso es:

$$E_{H_2} = \frac{-ordenada \text{ en origen}}{pendiente} \quad (4)$$

Si a este valor se le descuenta el potencial de equilibrio o termodinámico a la temperatura de trabajo, se obtiene el sobrepotencial de descarga del hidrógeno, η_{H_2} , que es por definición el mínimo potencial “extra” que hay que aplicar al sistema para que se produzca la reacción de evolución del hidrógeno.

$$\eta_{H_2} = E_{H_2} - E_{rev} \quad (5)$$

Donde E_{H_2} , se obtiene a través de la ecuación (4) y el potencial reversible, E_{rev} , se obtiene mediante la ecuación:

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Mediante esta técnica, es posible determinar la eficiencia máxima del proceso de evolución del hidrógeno, únicamente se debe sustituir el valor obtenido del potencial mínimo de descarga por el voltaje de celda, E_{celda} , en la ecuación (6).

$$\varepsilon_{max} = \frac{E_{HHV}}{E_{Celda}} = \frac{E_{HHV}}{E_{H_2}} \quad (6)$$

Donde:

$$\left| E_{HHV,T} \right| \left(\frac{T}{K} \right) = 1,415 + 2,205 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (7)$$

E_{H_2} : Potencial de descarga del hidrógeno.

E_{HHV} : Potencial asociado al poder calorífico superior del H_2 o potencial termoneutral.

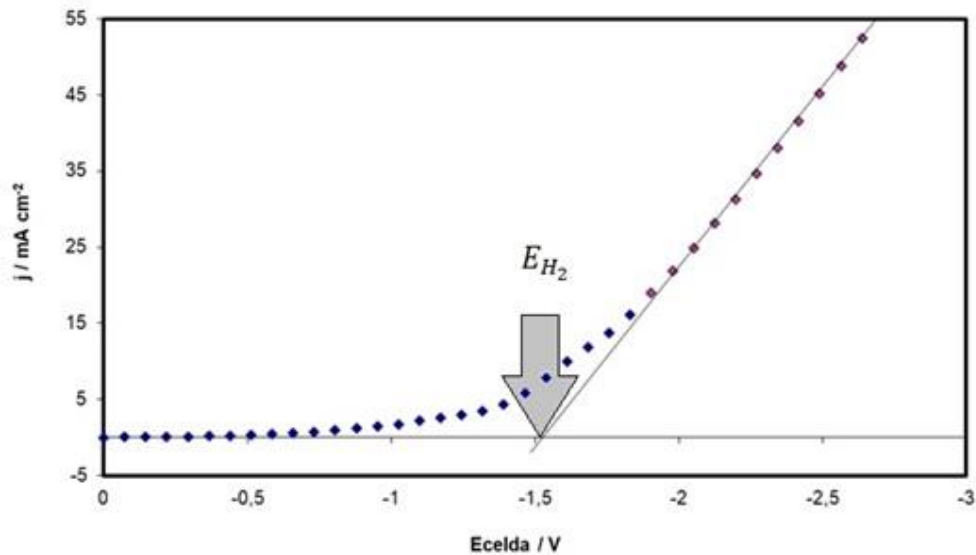


Figura 14. Curva de descarga de hidrógeno. Fuente propia.

La razón por la cual el potencial de la gráfica se mueve en valores negativos, se debe al hecho de que el electrodo de trabajo es el Cátodo en vez del Ánodo.

4.2.4 ENSAYOS GALVANOSTÁTICOS.

Tabla 5. Condiciones experimentales empleadas en los ensayos galvanostáticos.

Parámetros	Características
Tipo de ensayo	Ensayo Galvanostático
Dispositivo experimental	Celda de generación de gases. Configuración de 2 electrodos.
Condiciones	Intensidades: 10 mA, 25mA, 50mA Duración: 60 minutos
Electrolito	Disolución de KOH al 30% en peso.
Temperaturas	30, 50 y 80°C

Este ensayo se establece para valorar el comportamiento de los electrodos en condiciones que simulan las de la electrólisis industrial. Se basa en aplicar una densidad de corriente durante un periodo determinado, registrando el potencial de celda (cátodo-ánodo) que se obtiene. A la vez, como se ha mencionado en el punto 4.1, la celda electroquímica de generación de gases permite registrar el volumen de hidrógeno generado y la diferencia de cotas entre la superficie libre del electrolito en el compartimento de generación de hidrógeno y el acumulador de electrolito (**Figura 10 b**). Por lo tanto, es posible determinar tanto el consumo energético por mol de hidrógeno producido (Q_{H_2}), como el rendimiento energético y el rendimiento eléctrico del proceso.

4.2.4.1. FIGURAS DE MÉRITO DEL ELECTROLIZADOR.

A continuación, se exponen las distintas figuras de mérito del electrolizador, empezando con una breve explicación sobre éstas.

El consumo energético de Hidrógeno, Q_{H_2} , es la energía necesaria para la obtención de un mol de hidrógeno en estado gas.

$$Q_{H_2} = \frac{I \cdot \int_c^a E dt}{1000 \cdot n_{H_2}} \quad (8)$$

Donde:

Q_{H_2} : Consumo energético específico en KJ mol⁻¹.

I: intensidad del proceso en A.

$E(t)$: potencial de celda en función del tiempo en V.

n_{H_2} : moles de hidrógeno obtenidos.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

El rendimiento eléctrico, ϕ , es la fracción de corriente destinada a la producción de hidrógeno.

$$\phi = \frac{n_{H_2} \cdot n_e \cdot F}{I \cdot t} 100 \quad (9)$$

Donde:

ϕ : Rendimiento eléctrico en %.

n_{H_2} : moles de hidrógeno obtenidos.

n_e : número de electrones de la reacción intercambiados, en este caso 2.

F: Constante de Faraday en C/mol.

I: intensidad en A.

t: tiempo en s.

La eficiencia energética, ε , es el uso eficiente de la energía, dicho de otra forma, un proceso es energéticamente eficiente cuando consume menos de la cantidad media de la energía para llevar a cabo una misma actividad.

$$\varepsilon = \frac{n_{H_2} \cdot F \cdot E_{HHV}}{Q_{H_2}} \quad (10)$$

Donde:

ε : eficiencia energética

n_{H_2} : moles de hidrógeno obtenidos.

F: Constante de Faraday en C/mol.

E_{HHV} : Potencial asociado al poder calorífico superior del H₂ en V.

Q_{H_2} : Consumo energético específico en mol⁻¹.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1. CONFIGURACIÓN ANAU - CNAU

En lugar de estudiar en profundidad todas las configuraciones por separado, como los resultados son similares, se muestra el estudio detallado de la configuración ANAu-CNAu a modo de ejemplo.

En este caso se analizarán dos etapas: por un lado, se analizará el ensayo potenciodinámico y por otro lado se analizará el ensayo galvanostático. El resto de las configuraciones no se analizarán ya que se obtuvieron curvas similares a las que se obtienen para esta configuración.

5.1.1 ENSAYO POTENCIODINÁMICO ANAu – CNAu

Tal y como puede observarse en la **Figura 15**, al aumentar la temperatura el potencial de descarga se ve reducido, no solo eso, sino que además se observa un incremento más rápido de la densidad de corriente con el potencial de la celda. Esto es debido a un incremento en la actividad catalítica de los materiales del electrodo y a un incremento de la conductividad del electrolito. De esta forma se puede confirmar que a mayor temperatura es necesario menos potencial de celda para la producción de una cantidad determinada de hidrógeno.

De la **Figura 15** se pueden sacar los siguientes datos:

$$E_{H_2}, E_{50}, \eta \text{ y } \varepsilon_{max}.$$

Para el cálculo de E_{H_2} , se ha empleado la ecuación **(4)**.

E_{50} se define como el potencial de celda necesario para producir una densidad de corriente de 50 mA cm⁻². Se decidió usar una comparación a dicho potencial debido a que no se podía alcanzar el E_{100} por parte de todas las curvas.

Para η , se ha restado el valor del potencial de descarga de hidrogeno al potencial reversible que aparece en la ecuación **(5)**, donde el potencial reversible se calcula mediante la ecuación **(3)**.

Para el cálculo de la ε_{max} , se ha empleado la ecuación **(6)**.

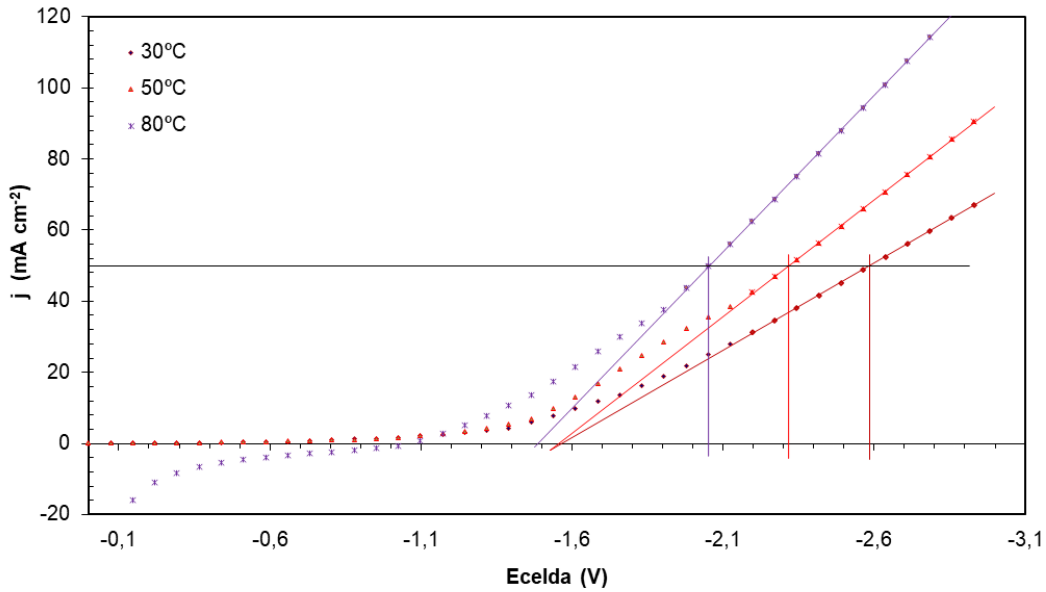


Figura 15. Curva de descarga de hidrógeno a 3 temperaturas, y cálculo de E_{50} . Fuente propia.

Los valores que se han obtenido de la anterior figura se recogen en la siguiente **Tabla 6**.

Tabla 6. Datos de la gráfica ANAu - CNAu para 3 temperaturas, y potencial 50 a una densidad de corriente de 50 mA cm^{-2} .

	30°C	50°C	80°C
E_{H_2} (V)	-1,566	-1,555	-1,487
E_{50} (V)	-2,585	-2,317	-2,055
η (V)	0,342	0,359	0,332
ε_{max} (%)	94,68	95,60	100,48

Donde se comprueba que a medida que aumenta la temperatura disminuye E_{H_2} y E_{50} , aumenta ε_{max} y oscila η .

5.1.2 ENSAYO GALVANOSTÁTICO ANAu – CNAu

La presente **Tabla 7** recoge los datos que se emplearon al realizar la configuración ANAu – CNAu a 3 densidades de corriente y 3 temperaturas.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Tabla 7. Datos tomados en el laboratorio para la configuración ANAu – CNAu a 3 temperaturas y 3 densidades de corriente.

	30°C	50°C	80°C
Densidad de corriente 10 mA			
<i>Presión en el laboratorio (Pa)</i>	102792	103192	103192
<i>Diferencia Cota (m)</i>	0,1830	0,1900	0,2240
<i>Volumen H₂ recogido (L)</i>	0,0022	0,0030	0,0059
Densidad de corriente 25 mA			
<i>Presión en el laboratorio (Pa)</i>	102792	103192	103192
<i>Diferencia Cota (m)</i>	0,2570	0,2720	0,3180
<i>Volumen H₂ recogido (L)</i>	0,0088	0,0102	0,0140
Densidad de corriente 50 mA			
<i>Presión en el laboratorio (Pa)</i>	102792	103192	103192
<i>Diferencia Cota (m)</i>	0,3820	0,4160	0,4910
<i>Volumen H₂ recogido (L)</i>	0,0197	0,0229	0,0300

En la **Figura 16** se puede ver el efecto de la temperatura sobre el potencial de celda. Aunque existe cierta oscilación en el potencial al principio del ensayo, se puede considerar estable. Como se puede contemplar, E_{celda} disminuye con la temperatura, como resultado del aumento de la conductividad del electrolito y la mayor actividad de los electrodos.

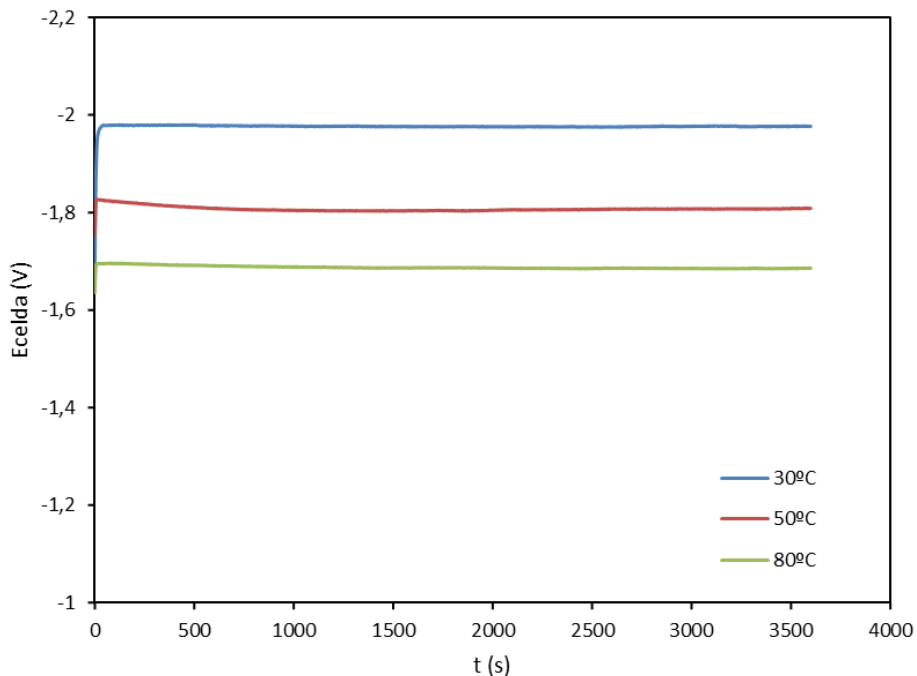


Figura 16. Evolución del potencial con el tiempo para 3 temperaturas y densidad de corriente 10mA. Fuente propia.

En la **Figura 17**, se puede observar que la densidad de corriente tiene un efecto opuesto sobre el E_{celda} con respecto a la temperatura, como era previsible, el potencial de celda aumenta con la densidad de corriente, tal y como se vio previamente en la **Figura 15**.

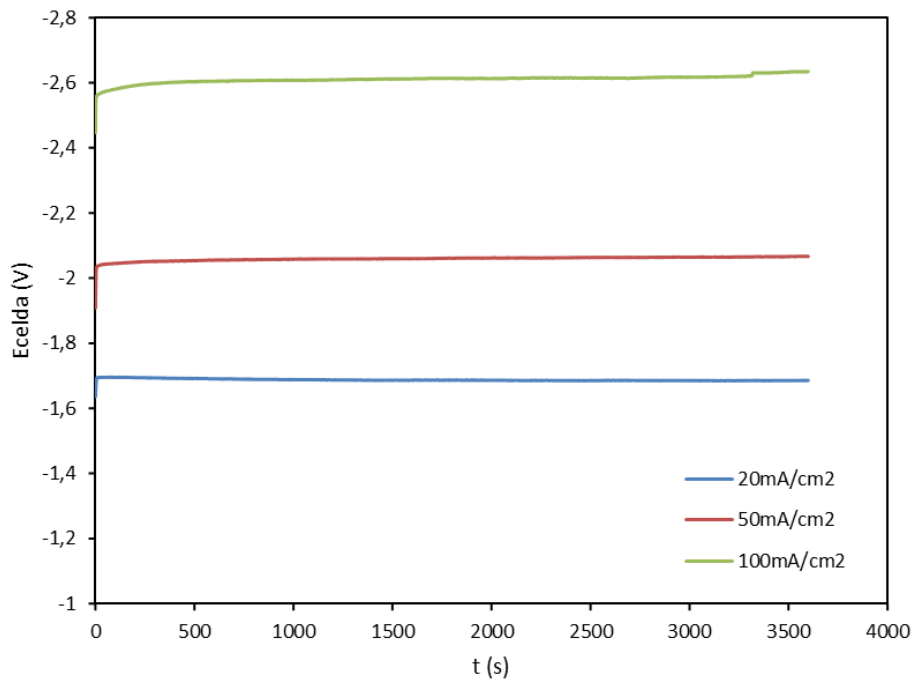


Figura 17. Evolución del potencial con el tiempo para 3 densidades de corriente y temperatura 80°C. Fuente propia.

Tal y como se puede observar en la **Figura 18**, independientemente de la densidad de corriente el consumo energético se ve disminuido al aumentar la temperatura y aumenta al aumentar la densidad de corriente. Con lo cual, mediante los datos obtenidos para esta configuración se puede concluir con que la experiencia resulta más eficiente energéticamente hablando al aumentar la temperatura y disminuir la densidad de corriente.

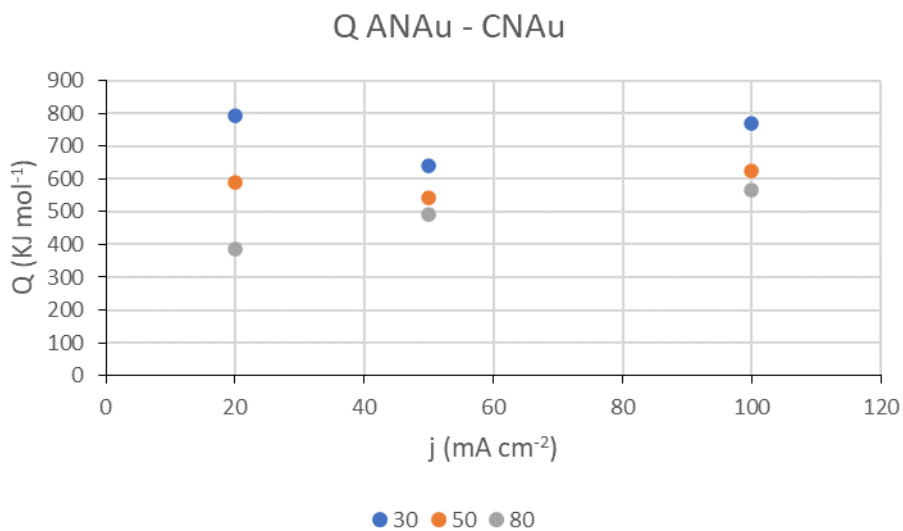


Figura 18. Consumo energético a 3 densidades de corriente: 20 mA cm⁻², 50 mA cm⁻² y 100 mA cm⁻² y 3 temperaturas para la configuración ANAu – CNAu. Fuente Propia.

Al revisar la **Figura 19**, se puede ver que el rendimiento eléctrico se incrementa cuando las temperaturas son más elevadas, así como con el aumento de la densidad de corriente. Para las temperaturas 30°C y 50°C se puede observar una pérdida considerable del rendimiento

eléctrico, esto se puede suponer que es debido a que posiblemente el tiempo de acondicionamiento de los electrodos no fue el suficiente, de manera que, parte del cátodo no llegó a reducirse completamente y se ocasionaron reacciones competitivas.

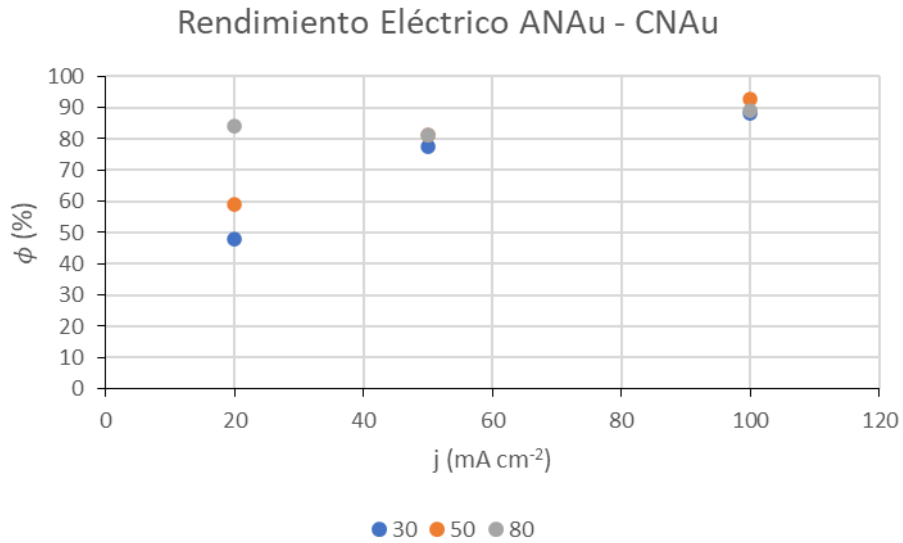


Figura 19. Rendimiento eléctrico a 3 densidades de corriente: 20mA cm⁻², 50 mA cm⁻² y 100mA cm⁻² y 3 temperaturas para la configuración ANL – CNAu. Fuente Propia.

Debido a los bajos rendimientos obtenidos en la **Figura 19** para intensidades y temperaturas bajas, hay una caída en la Eficiencia, ϵ . En la **Figura 20** se observa un aumento de la eficiencia con la temperatura y una disminución con la densidad de corriente, tal y como ya se vio en el estudio del consumo energético.

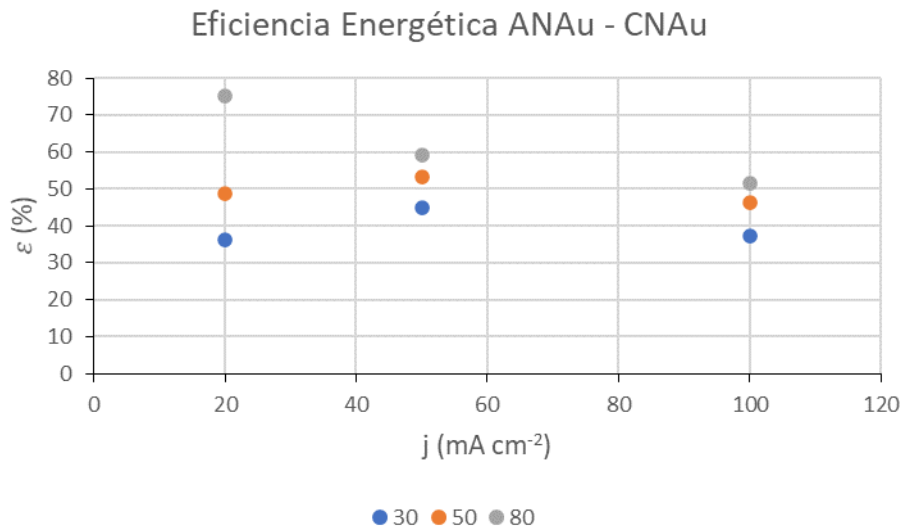


Figura 20. Eficiencia energética a 3 densidades de corriente: 20mA cm⁻², 50 mA cm⁻² y 100mA cm⁻² y 3 temperaturas para la configuración ANL – CNAu. Fuente Propia.

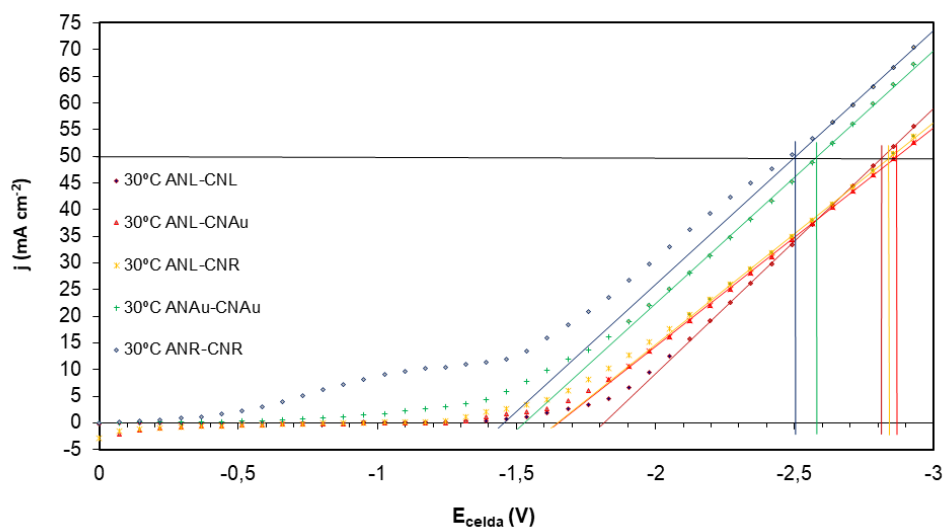
5.2. COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

De igual manera que en el punto 5.1, se procederá a realizar una comparación, pero esta vez para todas las configuraciones en dos etapas: Primero se realizará una comparación a través de los ensayos potenciodinámicos de todas las configuraciones a todas las temperaturas mediante el cual se podrá observar el comportamiento para cada tipo de electrodo, así como los valores de potencial de descarga de hidrógeno, E_{H_2} , sobrepotenciales, η_{H_2} , potencial 50, E_{50} y eficiencias máximas, ε_{max} . Y segundo, se comparará los resultados obtenidos para cada ensayo galvanostático realizado. En este caso, se revisará el efecto de la temperatura y de la densidad de corriente en las figuras de mérito del electrolizador.

5.2.1 ENSAYO POTENCIODINÁMICO

A través de las curvas de descarga de hidrógeno que se pueden observar en la **Figura 21**, se observa el comportamiento lineal para altos potenciales de celda, de cuya extrapolación se puede obtener el potencial de descarga. Además, se muestra también la línea utilizada para la obtención del potencial 50, E_{50} . A 80° la configuración que mejor comportamiento muestra (la curva que queda por encima del resto) es ANR-CNR, mientras que para la misma temperatura la que muestra peor comportamiento es ANL-CNL. Por otro lado, a 30°C a bajos potenciales se comporta peor ANL-CNL, sin embargo, a potenciales altos la peor es ANL-CNAu, dicha configuración posiblemente necesite un mayor tiempo de acondicionamiento. El estudio no se realizó a la temperatura de 50°C debido a que el comportamiento de estas era similar a las que se observan a 30 y 80°C, por esta razón, se optó a realizar el estudio sólo de las temperaturas extremas.

a.



b.

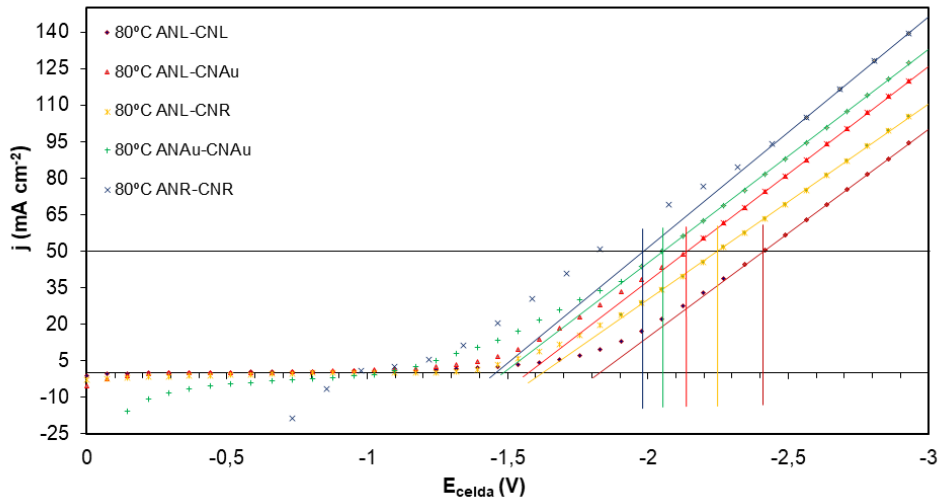


Figura 21. Efecto de la densidad de corriente sobre las curvas de descarga de 5 configuraciones a: **a.** temperatura 30°C y E_{50} . **b.** temperatura de 80°C y E_{50} . Fuente propia

La **Tabla 8** contiene los valores de potencial de descarga de hidrógeno, E_{H_2} , potencial 50, E_{50} , sobrepotencial de hidrógeno, η_{H_2} , y eficiencia máxima, ε_{max} , obtenidos en las diferentes configuraciones a las 3 temperaturas de ensayo. Como se comprueba, para cada configuración, los potenciales E_{H_2} y E_{50} disminuyen con la temperatura por el aumento de la conductividad del electrolito y la mayor actividad catalítica de los electrodos. Los sobrepotenciales η_{H_2} también disminuyen, pero lo hacen en menor grado, sin embargo la eficiencia energética máxima presenta poca variación con la temperatura.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Tabla 8. Datos de la comparación de curvas de descarga de hidrógeno de las 5 configuraciones a todas las temperaturas, y E_{50} .

	ANL-CNL	ANL-CNR	ANL-CNAu	ANAu-CNAu	ANR-CNR
Temperatura 30°C					
E_{H_2} (V)	-1,813	-1,646	-1,64	-1,566	-1,458
E_{50} (V)	-2,819	-2,848	-2,871	-2,585	-2,506
η_{H_2} (V)	0,589	0,440	0,416	0,342	0,233
ϵ_{max} (%)	81,76	92,03	90,4	94,68	101,71
Temperatura 50°C					
E_{H_2} (V)	-1,837	-1,4	-1,638	-1,556	-1,632
E_{50} (V)	-2,594	-2,296	-2,560	-2,317	-2,453
η_{H_2} (V)	0,640	0,192	0,441	0,359	0,435
ϵ_{max} (%)	80,98	106,22	90,77	95,6	91,09
Temperatura 80°C					
E_{H_2} (V)	-1,826	-1,623	-1,572	-1,487	-1,454
E_{50} (V)	-2,411	-2,247	-2,138	-2,055	-1,982
η_{H_2} (V)	0,671	0,440	0,417	0,332	0,271
ϵ_{max} (%)	81,84	92,03	94,30	100,4	102,77

A continuación, se puede apreciar el efecto que puede tener el cambio del cátodo por uno con mayor superficie específica y otro con distinta composición. Para ello se compararán las configuraciones con electrodos de níquel liso como ánodo, es decir, ANL-CNL vs ANL-CNR y ANL-CNL vs ANL-CNAu:

- 1) ANL-CNL vs ANL-CNR: en esta comparación, se puede comprobar mediante la **Figura 21** que el E_{H_2} de la configuración ANL-CNR es inferior a la de la configuración ANL-CNL, esto se debe únicamente a la superficie específica que posee el electrodo de níquel poroso, que hace que mejore el comportamiento del electrolizador.
- 2) ANL-CNL vs ANL-CNAu: con relación a estas combinaciones, se puede comprobar mediante la **Figura 21** que el E_{H_2} de la configuración ANL-CNAu es inferior a la de la configuración ANL-CNL, esto se debe a: una mayor superficie específica por parte del electrodo de oro (el cual es rugoso) y también debido al incremento de la actividad catalítica del electrodo debido a la presencia de oro. Esto, corrobora el comportamiento observado mediante el estudio cinético del cátodo observado por C. González-Buch *et al.* [30].
- 3) ANL-CNR vs ANL-CNAu: con respecto a estas configuraciones, se puede comprobar mediante la **Figura 21** que el E_{H_2} de la configuración ANL-CNAu es inferior a la de la configuración ANL-CNR, esto se debe a que además de ser poroso también posee nanopartículas de oro, el cual modifica la configuración electrónica del níquel del electrodo haciendo necesario una menor energía de activación. Lo que vuelve a

estar de acuerdo con el estudio cinético del cátodo observado por C. González-Buch *et al.* [30].

Una vez se ha realizado la comparación de las configuraciones donde se cambiaba únicamente el cátodo, se lleva a cabo una comparación de las anteriores configuraciones para estudiar el efecto del ánodo.

- 1) ANR-CNR vs ANL-CNR: como se muestra en la **Figura 21**, el potencial de descarga de hidrógeno, E_{H_2} , es apreciablemente menor al remplazar el ánodo de níquel liso por un ánodo de níquel poroso en nuestra configuración. Esto es debido a que el incremento de la superficie específica en el ánodo también ayuda a disminuir el sobrepotencial de oxígeno disminuyendo así el coste energético de esta configuración.
- 2) ANAu-CNAu vs ANL-CNAu: cómo se puede apreciar a partir de la **Figura 21**, el potencial de descarga de hidrógeno, E_{H_2} , disminuye al remplazar el ANL por un ANAu, esto se debe a que un aumento de la superficie del ánodo hace que disminuya la energía de activación del oxígeno y por tanto, también disminuimos el potencial de celda necesario para la obtención del hidrógeno.
- 3) ANAu-CNAu vs ANR-CNR: atendiendo a los resultados de la **Figura 21**, el potencial de descarga de hidrógeno, E_{H_2} , disminuye más en la configuración de electrodos puramente porosos que en electrodos porosos con nanopartículas de oro, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, esto es inesperado, ya que el estudio que se había realizado con anterioridad para la configuración ANL-CNR y ANL-CNAu mostraba ser mejor para los ENAu que para los ENR. Sin embargo, en este estudio nos queremos centrar en el efecto causado por el ánodo además de para el cátodo. Puesto que ha salido mejor la configuración ANR-CNR que la configuración ANAu-CNAu, esto podría indicar que el efecto del oro en el ánodo es mayor que respecto al cátodo, empeorando la OER por la presencia de las nanopartícula de Au .

5.2.2 ENSAYO GALVANOSTÁTICO

El ensayo anterior se realizó un estudio de las curvas de descarga para todas las temperaturas y se calculó el potencial 50, E_{50} , con vistas a poder realizar más tarde una comparación a través de un ensayo galvanostático a 50 mA cm^{-2} y poder corroborar los valores de la curva de descarga. La **Figura 21**, muestra las gráficas del potencial de descarga a 2 de las 3 temperaturas de estudio. Puesto que las curvas de descarga se observan mejor en el estudio a 80°C , a continuación, se hará una comparación del potencial 50, E_{50} , con la gráfica de la **Figura 22**, la cual muestra la evolución del potencial con el tiempo a 80°C y 50 mA cm^{-2} . Como se contempla, en menos de 5 min se ha acabado el transitorio en todas las curvas alcanzando de esta forma el estado estacionario. Mediante el uso de la **Tabla 8** y las gráficas de la **Figura 22**, se puede observar que los valores en estado estacionario del ensayo galvanostático son similares al E_{50} obtenido del ensayo galvanodinámico.

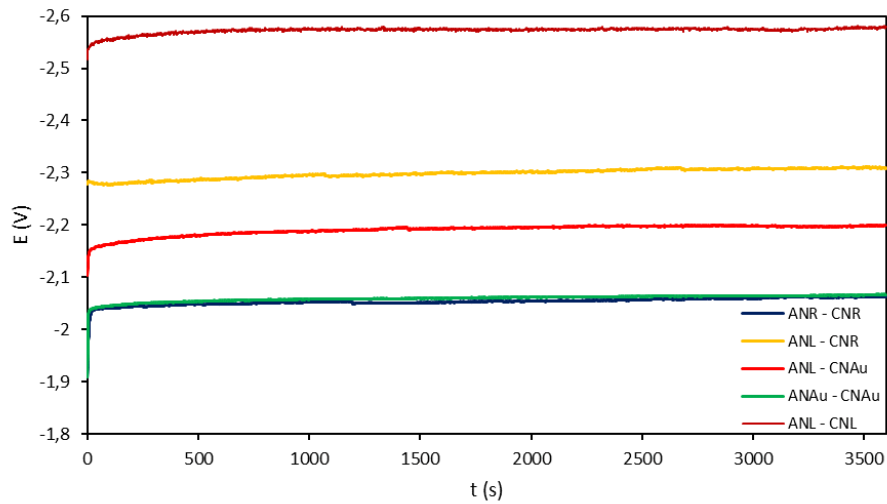
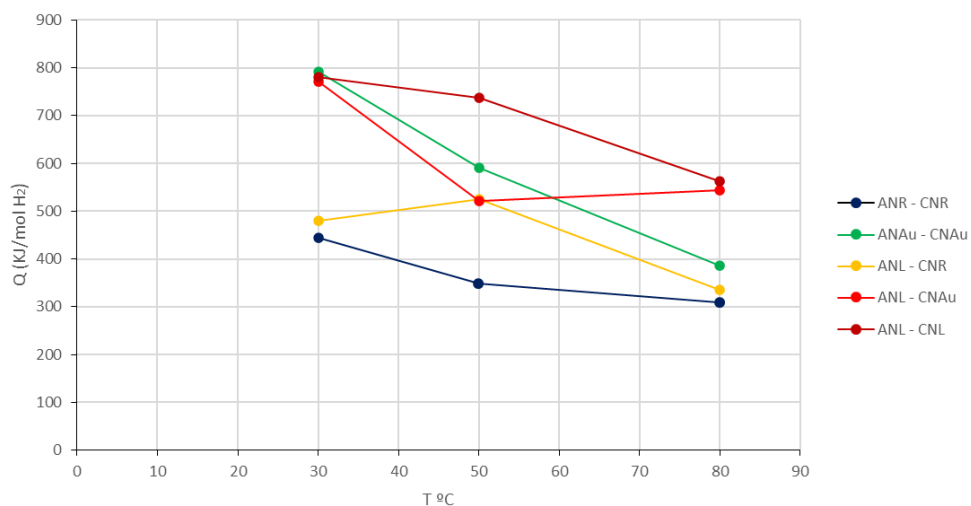


Figura 22. Evolución del potencial con el tiempo para todas las configuraciones, una temperatura de 80°C y densidad de corriente 50mA cm⁻². Fuente propia.

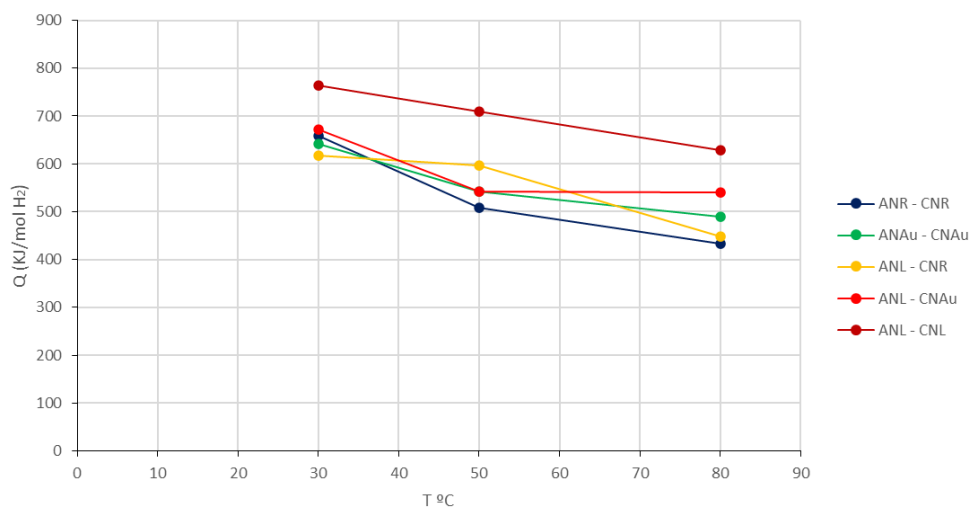
Una vez vista la evolución del potencial con el tiempo, se realizará un breve estudio del consumo energético de hidrógeno, Q_{H_2} , para ello se observará el efecto de la temperatura (a 30, 50 y 80°C) y la densidad de corriente (20, 50 y 100 mA cm⁻² **Figura 23**). Primero nos enfocaremos con el efecto de la temperatura. A través de la **Figura 23 a, b y c**, se observa que el aumento de la temperatura conlleva un descenso en el consumo energético, para todas las densidades de corriente. Tras ver el efecto de la temperatura, se puede observar el efecto de la densidad de corriente mediante la **Figura 24**, donde se comprueba que el aumento de la densidad de corriente conlleva un aumento del consumo energético.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

a.



b.



c.

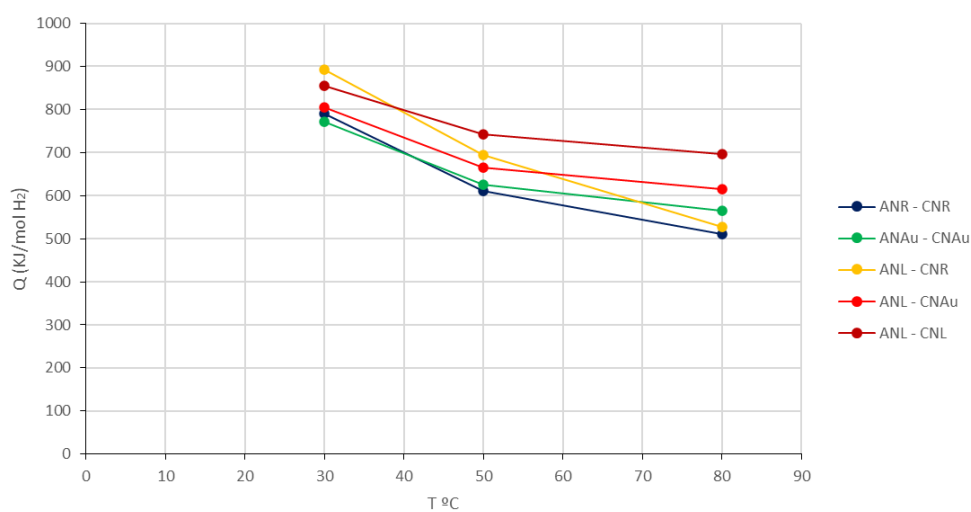


Figura 23. Influencia de la temperatura sobre el consumo energético del hidrógeno, Q_{H_2} , para todas las configuraciones y densidades de corriente: **a.** 20 mA cm^{-2} , **b.** 50 mA cm^{-2} y **c.** 100 mA cm^{-2} . Fuente propia.

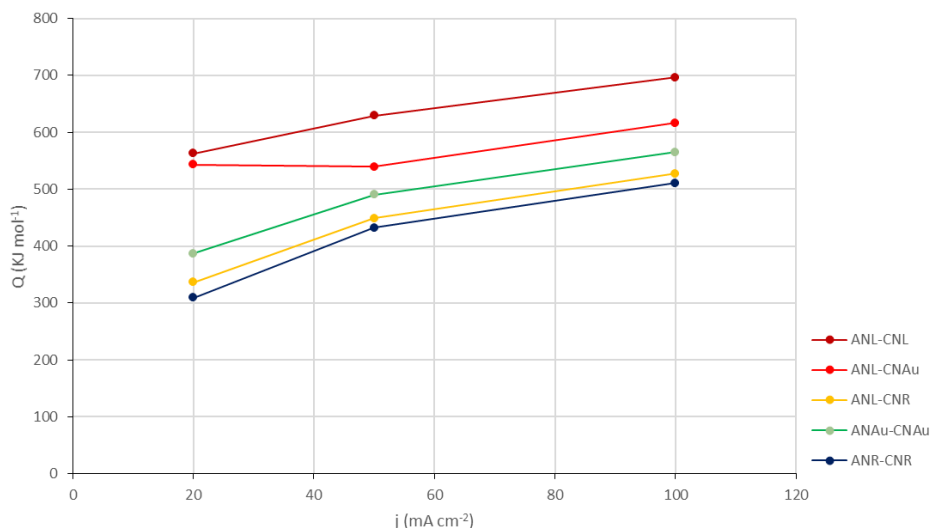


Figura 24. Influencia de la densidad de corriente sobre el consumo energético a una temperatura de 80°C. Fuente propia.

Acto seguido, se realizará una comparación del consumo energético para todas las configuraciones, donde se podrá observar el efecto obtenido tras cambiar el cátodo y más tarde el mismo efecto al cambiar el ánodo. A continuación, se exponen:

- 1) ANL-CNL vs ANL-CNR: Independientemente de qué **Figura 23** se emplee, se observa que el incremento de la superficie conlleva una gran reducción de consumo energético. Además de eso, se puede apreciar que, al incrementar la temperatura, el consumo disminuye.

A través de la **Figura 23** se puede discernir que, para todas las configuraciones, a 80°C se obtiene mejores resultados. Por ello, empleamos la **Figura 24** para estudiar el efecto de la densidad de corriente de forma más amplia. Tal y como se observa, una mayor densidad de corriente implica un mayor consumo.

- 2) ANL-CNL vs ANL-CNAu: De igual manera que sucede con la configuración anterior, al cambiar el CNL por el CNAu se consigue disminuir el consumo energético **Figura 23**. Ya sea por el aumento de superficie proporcionado como por la adición del oro en el cátodo. A mayores temperaturas menor consumo y a mayor densidad mayor consumo **Figura 24**.
- 3) ANL-CNR vs ANL-CNAu: Mediante la **Figura 23**, se puede apreciar el efecto que han otorgado ambos cátodos, CNR y CNAu. El CNR disminuye en mayor medida el consumo energético que el CNAu, esto se puede corroborar mediante los resultados de ambas configuraciones. Ciertamente la temperatura y la densidad de corriente afecta de igual manera a las dos configuraciones. Este comportamiento es contrario al obtenido en el estudio galvanodinámico y contradice las conclusiones del estudio cinético de C. González-Buch *et al.* [30].

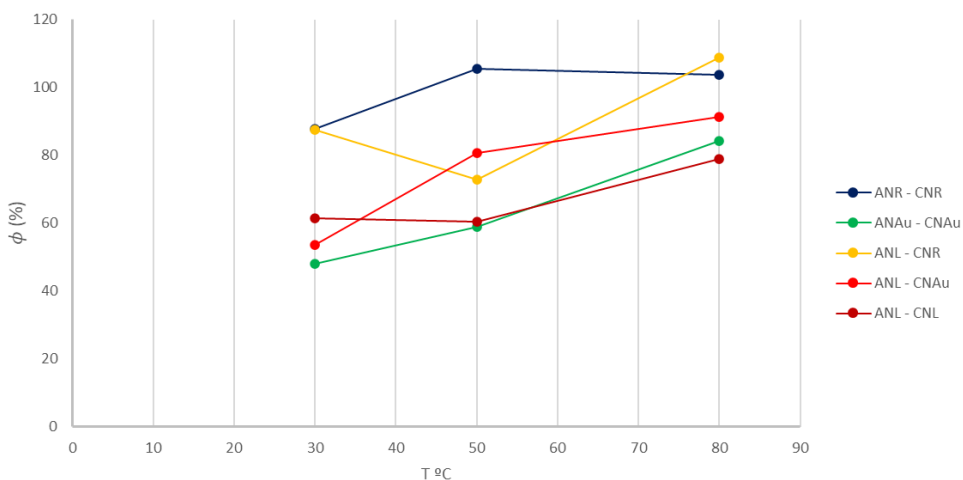
CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

A continuación, y para finalizar, se estudiará el efecto que conlleva un cambio de ánodo sobre las anteriores configuraciones:

- 1) ANL-CNAu vs ANAu-CNAu: En esta ocasión, se estudia el efecto que tiene el realizar un cambio más a la configuración anterior, tomando la configuración ANL-CNAu, el cambio a realizar esta vez se trata de remplazar el ANL por un ANAu, como se puede observar, el efecto se puede apreciar en gran medida pues dicho cambio reduce el consumo global de la reacción. Esto es debido a que, al mejorar la reacción de evolución de oxígeno (OER) el consumo total disminuye. Tal y como se vio con anterioridad, la temperatura influye a todas las configuraciones de la misma manera. A más temperatura, menor consumo. Así mismo se pudo observar el efecto de la densidad de corriente, donde un aumento de esta implicaba a su vez en un aumento del consumo energético.
- 2) ANL-CNR vs ANR-CNR: Al igual que sucede en la comparación anterior, el efecto que tiene el cambio del ANL por un ANR, conlleva a mejorar el consumo global de la reacción. Esto se debe a que el aumento en la superficie del ánodo favorece la OER.
- 3) ANR-CNR vs ANAu-CNAu: Mediante los resultados que se aprecian en la **Figura 23** y **Figura 24** se puede confirmar que un aumento de la temperatura nos genera un menor consumo energético, y un aumento en la densidad de corriente nos conlleva un mayor consumo. Sin embargo, la medida en la que se ve afectada cada configuración es diferente del resto, dando un mejor resultado a la configuración ANR-CNR.

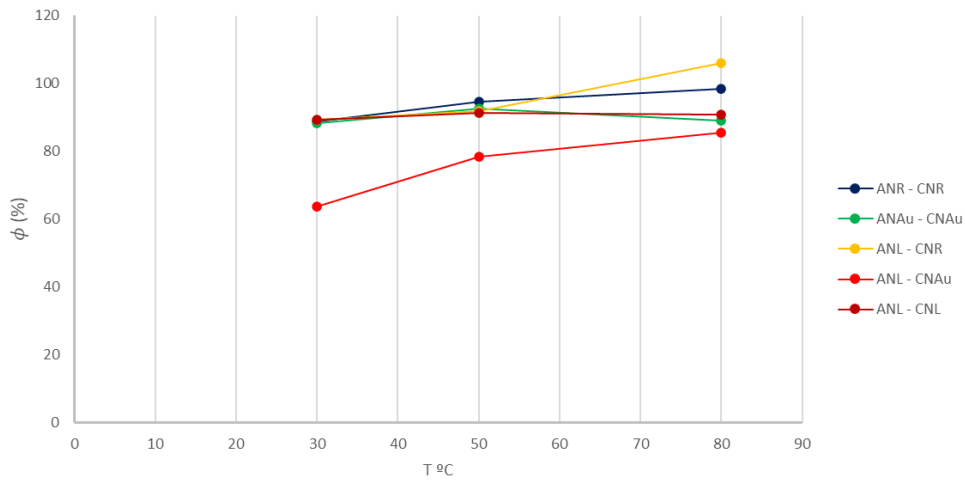
Tras la comparación realizada mediante las gráficas de consumo para todas las configuraciones, a continuación, se analizará de igual manera la comparación del rendimiento eléctrico, ϕ . Primero se observará el efecto que conlleva el cambiar el CNL por un CNR y más tarde por un CNAu.

a.



CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

b.



c.

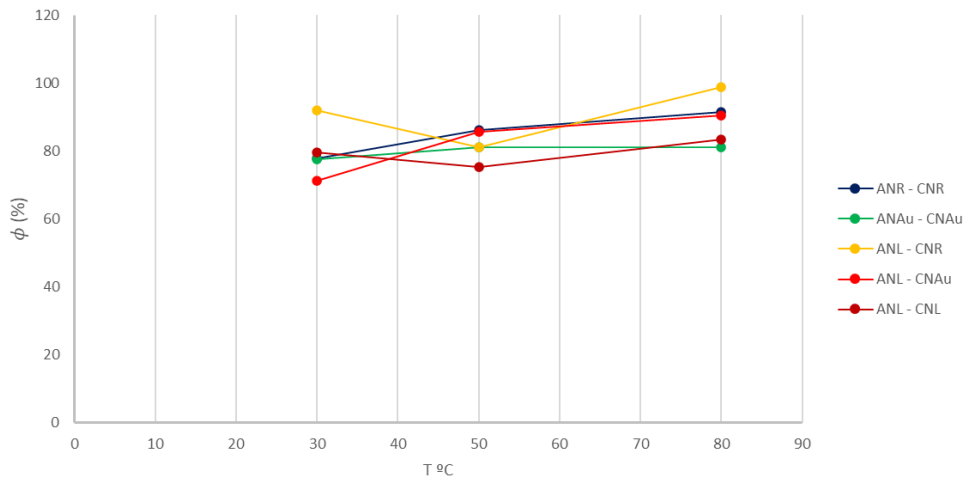


Figura 25. Influencia de la temperatura sobre el rendimiento eléctrico del hidrógeno, ϕ , para todas las configuraciones y densidades de corriente: **a.** 20 mA cm⁻², **b.** 50 mA cm⁻² y **c.** 100 mA cm⁻². Fuente propia.

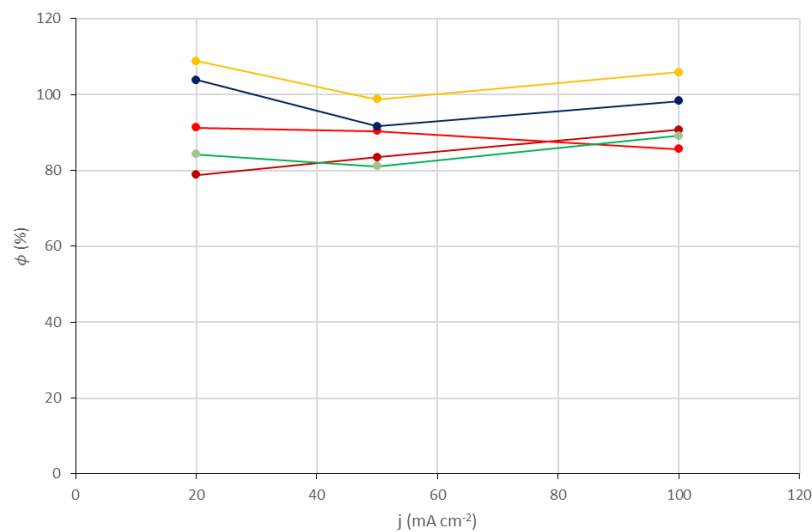


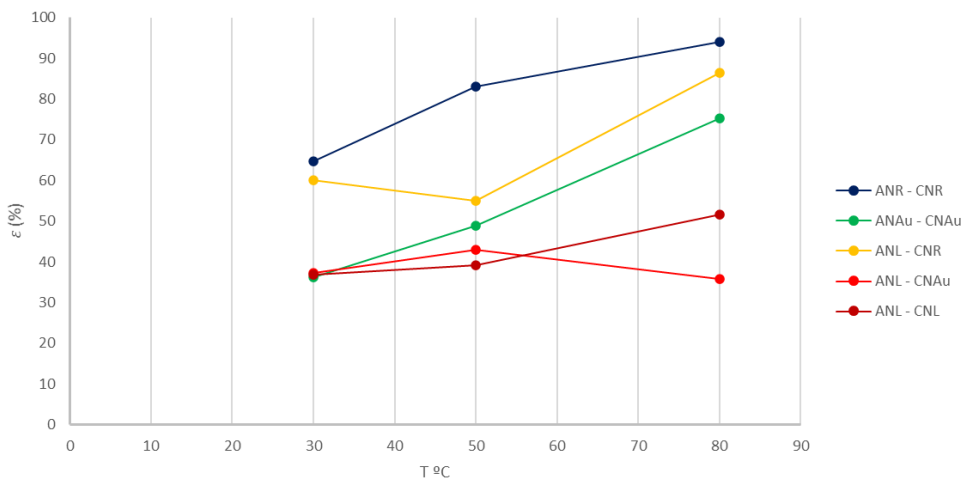
Figura 26. Influencia de la densidad de corriente sobre el rendimiento eléctrico a una temperatura de 80 °C. Fuente propia.

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

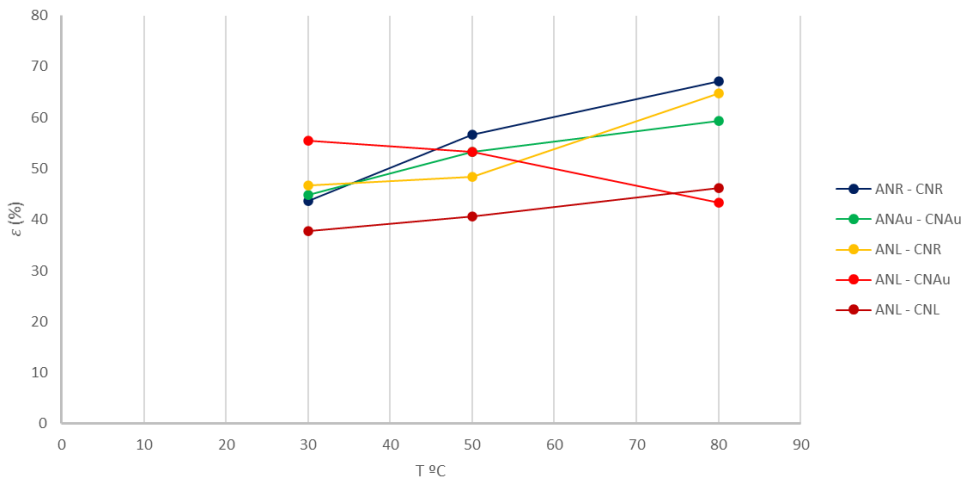
A través de la **Figura 25** y la **Figura 26**, se puede afirmar que tanto la temperatura como la densidad de corriente, no afectan apenas al rendimiento eléctrico. Ciertamente se puede observar una pequeña oscilación para las configuraciones ANL-CNAu y ANAu-CNAu cuando se trabaja a 20 mA cm^{-2} , esto puede deberse a que el tiempo de acondicionamiento de los electrodos no fue el suficiente y se deberían haber dejado un poco más de tiempo.

La última comparativa a realizar se trata de la eficiencia energética, para ello se analizará el efecto de la temperatura, así como la densidad de corriente mediante la **Figura 27** y la **Figura 28**, viendo así las repercusiones que conlleva realizar estas experiencias a distintas temperaturas y densidades de corriente. Así mismo, se compararán los resultados obtenidos en función de los cambios realizados en cada configuración.

a.



b.



c.

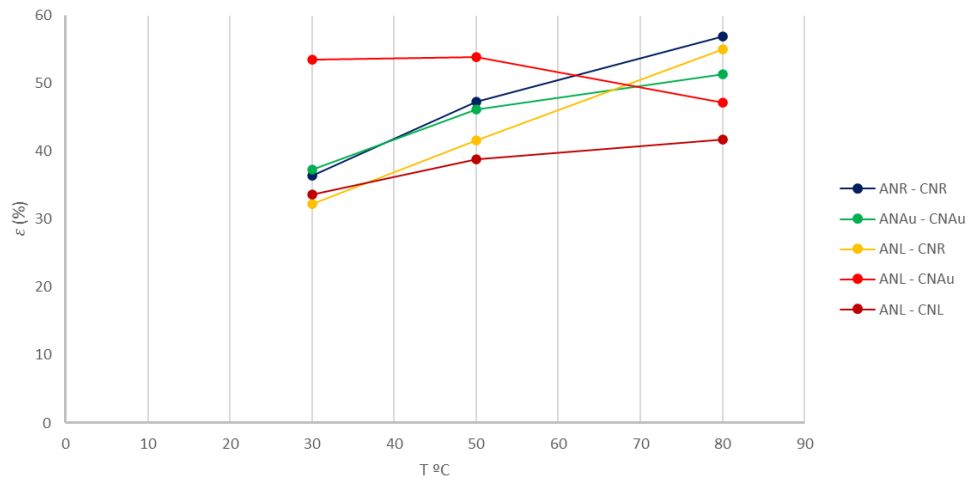


Figura 27. Influencia de la temperatura sobre la eficiencia energética del hidrógeno, ϵ , para todas las configuraciones y densidades de corriente: **a.** 20 mA cm⁻², **b.** 50 mA cm⁻² y **c.** 100 mA cm⁻². Fuente propia.

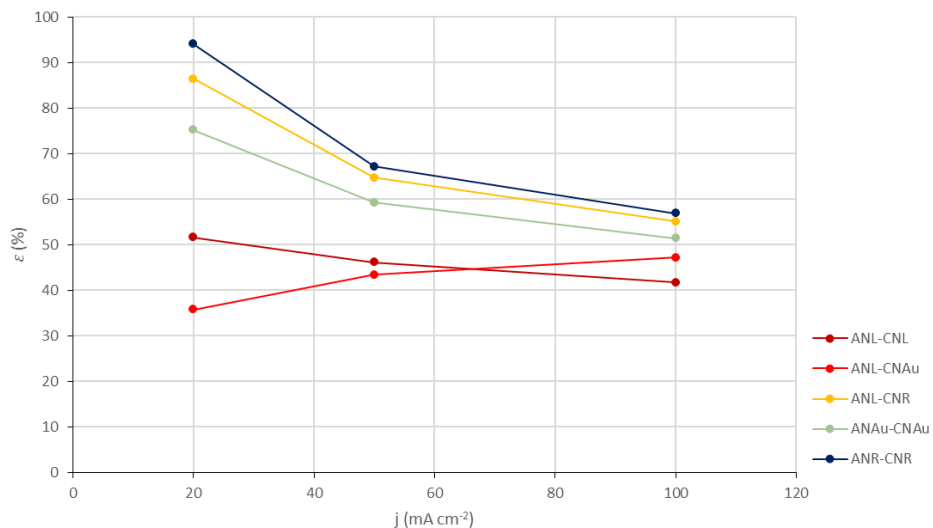


Figura 28. Influencia de la densidad de corriente sobre la eficiencia energética a una temperatura de 80°C. Fuente propia.

Primero se estudiará el efecto que conlleva cambiar el CNL por el de CNR, así como por el CNAu.

- 1) ANL-CNL vs ANL-CNR: Tal y como se puede apreciar en la **Figura 27**, la configuración ANL-CNL apenas se ve afectada por la temperatura, tiende a crecer, pero muy poco. Sin embargo, la configuración ANL-CNR posee una tendencia creciente conforme aumenta la temperatura. Además de eso y gracias a la **Figura 28**, podemos apreciar como crece la eficiencia energética al disminuir la densidad de corriente. En todos los casos la eficiencia energética de ANL-CNR es más alta que la de ANL-CNL.
- 2) ANL-CNL vs ANL-CNAu: Para la configuración ANL-CNAu, apenas hay cambios con la temperatura y la densidad de corriente, en parte, esto puede deberse a que de la misma forma que el rendimiento eléctrico se vio afectado por el tiempo de acondicionamiento,

al poder existir otras reacciones en la superficie del electrodo esta eficiencia energética se ve afectada. Como en el estudio de consumo energético ANL-CNAu es la que presenta mejor comportamiento.

- 3) ANL-CNAu vs ANL-CNR: Al comparar los resultados obtenidos de ambas configuraciones, se puede observar que la eficiencia de la configuración ANL-CNR está muy por encima de la configuración ANL-CNAu, debido al problema que hubo con los tiempos de acondicionamiento, no podemos afirmar que estos resultados sean 100% fiables, pero tampoco se puede decir que sean erróneos, ya que sobre todo afecto a las primeras experiencias realizadas de esta configuración, de manera que a altas temperaturas y densidades de corriente se espera un resultado similar.

Para finalizar con las comparativas de las eficiencias energéticas, veremos qué efecto tiene el remplazar no solo el ánodo sino también en cátodo para las anteriores configuraciones.

- 1) ANL-CNR vs ANR-CNR: Debido a que en el anterior párrafo se analizó el efecto del cambio de un CNL por un CNR, analizaremos ahora el efecto que ha conllevado cambiar el ANL por el ANR. Como se puede apreciar, ambas configuraciones dan resultados muy similares, sin embargo, al mejorar la OER se ve mejorada también la eficiencia energética del proceso.
- 2) ANL-CNAu vs ANAu-CNAu: Ya que la configuración ANL-CNAu fue analizada con anterioridad, sólo se estudiará el efecto que ha tenido cambiar el ANL por ANAu, a diferencia del efecto obtenido al cambiar el cátodo, el haber realizado el cambio de ambos si ha supuesto una gran mejoría, al comparar ambas configuraciones se puede observar tendencias que ya se podían ver antes, aunque en mucho menor escala. Con esto me refiero al efecto que se obtiene con el aumento de la temperatura, así como con el decrecimiento con la densidad de corriente.
- 3) ANR-CNR vs ANAu-CNAu: Tras haber analizado ambas configuraciones, se puede decir que, a nivel energético, el cambio a electrodos rugosos ha supuesto una mejoría mayor que la que se obtiene mediante el uso de electrodos macroporosos de oro. Como puede observarse en la **Figura 27** y **Figura 28**, la configuración ANR-CNR predomina en todos los campos.

5.3. ESTUDIO DEL COSTE DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En el presente apartado se realizará un estudio económico de todas las configuraciones de electrodos empleados en el presente TFG. Para ello, se tomará como referencia un Electrolizador tipo PEM del catálogo (<https://www.h2planet.eu/es/products/professional/Electrolysers>, concretamente el Hy-PEM ONE 175).

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

El electrolizador Hy-PEM ONE 175 posee un caudal de $H_2 = 1,75 \text{ Nm}^3/\text{h}$, se tomará como referencia una hora, de manera que se tiene un volumen de hidrógeno de $1,75 \text{ m}^3$ en condiciones normales. A través de estos datos y mediante la ley de los "gases ideales", se puede hallar el número de moles en dichas condiciones.

Ley de los gases ideales

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (11)$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$R = 0,0821 \text{ L atm /mol K}$$

$$V = 1,75 \text{ m}^3 = 1750 \text{ L}$$

$$T = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$$

Aislando los moles de hidrógeno, se tiene:

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 1750}{0,0821 \cdot 273} = \frac{1750}{22,4133} = 78,078 \text{ moles de hidrógeno}$$

Mediante el catálogo se dispone del consumo eléctrico medio, $4,8 \text{ kW/m}^3$, suponiendo que todo sea ideal, se tiene un consumo eléctrico de:

$$Q_{\text{electrico}} = 4,8 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \cdot 1,75 \text{m}^3 = 8,4 \text{ kW}$$

Tomando como referencia el coste del kWh que presenta Iberdrola en el Plan Verano a hora punta, el cual es: $0,2068 \text{ €/kW}$ se obtiene un coste de:

$$\text{Precio hora: } 8,4 \text{ kW} \cdot 0,2068 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 1,73712 \text{ €}$$

Puesto que se tomó como referencia 1 hora, el coste equivalente de los 78,078 moles de H_2 es de $1,73712 \text{ €}$.

Debido a que se conoce el número de moles de H_2 que se desea obtener, se puede suponer que disponemos de un caudal de $H_2 = 78,078 \text{ moles } H_2/\text{h}$.

Para comparar con las configuraciones estudiadas se va a elegir la densidad de corriente más baja y la T más alta, ya que es el pto. de operación que mejor comportamiento presento para todas las configuraciones.

A través de la Ley de Faraday, se puede calcular la intensidad de corriente que atravesará el circuito para así conocer las dimensiones del electrolizador. Puesto que se calculó el rendimiento eléctrico, a continuación, se procederá al cálculo del Área_{especifica} (A_e) del electrolizador.

$$m(g) = \frac{Q}{F} \left(\frac{C}{C \cdot \text{mol}^{-1}} \right) \cdot \frac{M}{n_e} \left(\frac{g \cdot \text{mol}^{-1}}{e^-} \right) \quad (12)$$

Donde M/n_e es el peso equivalente de la sustancia alterada. Puesto que se trata del hidrógeno, el número de electrones intercambiados son $2 e^-$.

Puesto que la electrólisis tiene lugar en una corriente constante, $Q = I \cdot t$. También hay que recordar que $C = A \cdot s$. De manera que la ecuación resultante quedaría de la siguiente forma:

$$m(g) = \frac{I \cdot t}{F} \cdot \frac{M}{n_e} \quad (13)$$

Sabiendo que $n = m/M$:

$$n_{H_2} \left(\frac{\text{moles}}{s} \right) = \frac{I}{F} \cdot \phi \quad (14)$$

Esta ecuación es equivalente a la ecuación (9), donde si aislamos la intensidad se alcanza la ecuación (15).

Ya que se tiene n_{H_2} , F y el ϕ de cada configuración. Aislado la intensidad quedaría:

$$I (A) = \frac{n_{H_2} \cdot F}{\phi} \quad (15)$$

Existe la posibilidad de que el margen de error respecto a los rendimientos eléctricos oscile entre un $\pm 10\%$, en este caso, los rendimientos que se obtuvieron para las configuraciones ANL-CNR y ANR-CNR superan el 100% por lo tanto, se considerara el rendimiento eléctrico de estos como 100%.

Debido al gran efecto que tiene el factor de rugosidad respecto al consumo energético, se puede apreciar que las configuraciones con electrodos rugosos poseen un menor consumo específico, debido a ello, claramente el coste que conlleva la generación de hidrógeno a través de la electrolisis alcalina se ve menguada.

Al comparar cualquier configuración con la configuración ANL-CNL, se confirma que el consumo de la celda decrece, sin embargo, el efecto que aporta el oro se nota más en otros campos, como ha sido en el ensayo potenciodinámico. Por otro lado, en el ensayo galvanostático el efecto de la porosidad del electrodo ha afectado en mayor medida.

Una vez obtenida la I , se puede obtener el A_e mediante la siguiente ecuación:

$$A_e (cm^2) = \frac{I}{j} \quad (16)$$

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

En la **Tabla 9** se pueden observar los consumos específicos de cada configuración de electrodos:

Tabla 9. Consumo energético específico a 80°C y 1 atm de cada configuración de electrodos.

	ANL-CNL	ANL-CNR	ANL-CNAu	ANAu-CNAu	ANR-CNR
Temperatura 80°C					
Q_{H_2real} (KJ/mol)	562,641	336,058	543,206	386,590	308,926
n_{H_2real} (mol)	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$2,029 \cdot 10^{-4}$	$1,189 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$1,936 \cdot 10^{-4}$
Q_{H_2} (KJ)	0,0827	0,0681	0,0645	0,0606	0,0598
Q_{H_2} (kWh)	$2,297 \cdot 10^{-5}$	$1,891 \cdot 10^{-5}$	$1,791 \cdot 10^{-5}$	$1,683 \cdot 10^{-5}$	$1,661 \cdot 10^{-5}$
$n_{H_2teórico}$ (mol)	78,078	78,078	78,078	78,078	78,078
$Q_{H_2teórico}$ (KJ)	43929,884	26238,736	42412,438	30184,174	24120,324
$Q_{H_2teórico}$ (kWh)	12,202	7,288	11,781	8,384	6,7
ϕ (%)	78,84	108,78 (100%)	91,32	84,22	103,83 (100%)
I(A)	2654,23	2092,6	2291,5	2484,68	2092,6
$Coste_{teórico}$ (€)	2,523	1,507	2,436	1,734	1,385
A_e (cm ²)	132711,5	104630	114575	124234	104630
A_e (m ²)	13,27	10,46	11,46	12,42	10,46

Si se coge como referencia las dimensiones del electrolizador tipo PEM como el del enlace: <https://www.h2planet.eu/es/products/professional/Electrolysers>, concretamente el Hy-PEM ONE 175 (700x830x1700 mm), se obtiene un área específica de:

$$A_e = 2 (L \cdot H) + 2 (L \cdot W) + 2 (W \cdot H) \quad (17)$$

$$A_e(mm^2) = 2 (700 \cdot 1700) + 2 (700 \cdot 830) + 2 (830 \cdot 1700)$$

$$A_e(m^2) = 2 (0,7 \cdot 1,7) + 2 (0,7 \cdot 0,83) + 2 (0,83 \cdot 1,7)$$

$$A_e(m^2) = 2,38 + 1,12 + 2,822 = 6,322$$

Comparando ambas áreas específicas, se puede observar que el tamaño del electrolizador alcalino es mayor al del tipo PEM puesto que estos son más compactos. El electrolizador más compacto y que da un menor coste de producción de hidrógeno es la configuración ANR-CNR. Aunque son más voluminosos, la configuración ANAu-CNAU da un coste de producción similar al del electrolizador PEM, la configuración ANR-CNR supone una mejora del 20,26% con respecto al electrolizador PEM.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

A través del estudio realizado para todas y cada una de las configuraciones y condiciones de trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) Al sustituir el CNL por un CNR o CNAu, esto conllevaba un decrecimiento del η_{H_2} y del E_{H_2} . Si además sustituimos el ánodo (ANL por ANR o ANAu), esto nos llevará a un decrecimiento aun mayor del E_{H_2} y del η_{H_2} .
- 2) Al aumentar la temperatura, los E_{H_2} y η_{H_2} se ven reducidos siendo esto más visible para las configuraciones ANR-CNR y ANAu-CNAu.
- 3) Las configuraciones ANR-CNR y ANAu-CNAu son las que más destacan pues sus E_{50} son los más bajos del estudio.
- 4) El Q_{H_2} , se ve afectado tanto por la temperatura como por la densidad de corriente. Un aumento de la temperatura siempre da lugar a un Q_{H_2} inferior, así como un aumento de la densidad de corriente da lugar a un Q_{H_2} superior. Además de volver a coincidir con que la configuración con mejor resultado, aquella con menor Q_{H_2} es la configuración ANR-CNR.
- 5) La temperatura y la densidad de corriente no afectan en gran medida al rendimiento eléctrico.
- 6) La temperatura y la densidad de corriente afectan de manera diferente a la eficiencia energética. Un aumento de temperatura se traduce a una mayor eficiencia energética y un aumento de la densidad de corriente a una menor eficiencia energética. Nuevamente, la configuración que ha dado un mayor rendimiento energético es la configuración ANR-CNR.
- 7) Puesto que se busca reducir el coste de producción de hidrógeno, la configuración más rentable ha sido ANR-CNR, esta configuración junto a la configuración ANL-CNR son las que muestran menor área específica,
- 8) Aunque las configuraciones ANL-CNAu y ANAu-CNAu han dado mejores resultados que ANL-CNL, sin embargo, han sido superadas por la configuración ANR-CNR. De manera que, no resulta eficiente el cambio con respecto a los electrodos macroporosos.
- 9) La mejor configuración hallada en este estudio se trata de ANR-CNR.
- 10) Las mejores condiciones de operación, para todas las configuraciones, son bajas densidades de corriente y altas temperaturas.

6.1. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Smink, «Hidrógeno verde: 6 países que lideran la producción de una de las "energías del futuro" (y cuál es el único latinoamericano),» *BBC News Mundo*, 31 Marzo 2021.
- [2] D. F., *Green hydrogen opportunities in selected industrial processes.*, Bruselas, 2018.
- [3] J. Proost, «State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, nº 9, pp. 4406-4413, 2019.
- [4] D. Brandy, *Nuevo récord mundial de capacidad energética renovable en 2020*, Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos, 2021.
- [5] L. Ojea, *La producción de hidrógeno verde podría ser 11 veces el consumo de gas en España*, Madrid: El Español, 2020.
- [6] J. L. G. FIERRO, *El hidrógeno: metodologías de producción*, Madrid, Madrid: LYCHNOS Cuadernos de la fundación general del CSIC, 2011.
- [7] D. F. J. M. D. S. M. Carmo, «A comprehensive review on PEM water,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nº 12, p. 4901–4934, 2013.
- [8] Z. W. X. G. Z. G. M. Wang, «The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 573-588, 2013.
- [9] M. Á. L. J. D. DELGADO, «La recuperación del material científico de los gabinetes y laboratorios de Física y de Química de los institutos y su aplicación a la práctica docente en secundaria, en XXI Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales.,» Valencia, Servicio editorial UPV, 2004, pp. 361-380.
- [10] D. M. F. Santos, C. A. C. Sequeira y J. L. Figueiredo, «Hydrogen production by alkaline water electrolysis,» *Química Nova*, vol. 36, nº 8, p. 1176–1193, 2013.
- [11] W. Kreuter y H. Hofmann, «Electrolysis: The important energy transformer in a world of sustainable energy,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 23, nº 8, pp. 661-666, 1998.
- [12] C. Bowen, H. Davis, B. Henshaw, R. Lachance, R. LeRoy y R. Renaud, «Developments in advanced alkaline water electrolysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 9, nº 1-2, pp. 59-66, 1984.

- [13] V. Rosa, M. Santos y E. d. Silva, «New materials for water electrolysis diaphragms,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 20, nº 9, pp. 697-700, 1995.
- [14] H. G. Michael A. Hickner, Y. S. Kim, B. R. Einsla y J. E. McGrath, «Alternative Polymer Systems for Proton Exchange Membranes (PEMs),» *American Chemical Society*, vol. 104, nº 10, p. 4587–4612, 2004.
- [15] A. L. S. Y. L. H.-J. K. S. J. Y. Y.-E. S. H. S. P. J. H. J. Min Kyung Cho, «A Review on Membranes and Catalysts for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Single Cells,» *Journal of Electrochemical Science and Technology*, vol. 8, nº 3, pp. 183-196, 2017.
- [16] W. Li, «Degradation of Solid Oxide Electrolysis Cells: Phenomena, Mechanisms, and Emerging Mitigation Strategies,» *Journal of Materials Science and Technology -Shenyang*, vol. 55, pp. 35-55, 2020.
- [17] W. Grot, Ionómeros fluorados 2da edición, William Andrew, 2011.
- [18] S. Dutta, «Technology assessment of advance electrolytic hydrogen production.,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 379-386, 1990.
- [19] J. Divisek, «Water electrolysis in low- and medium temperature regime.,» de *Electrochemical hydrogen technologies : electrochemical production and combustion of hydrogen*, New York, ELSEVIER, 1990, pp. 137 - 212.
- [20] K. K, Electrochemical oxygen technology. 1st Edition, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [21] Q. Y. X. C. X. W. Zhixiong Cai, «Nanomaterials With Different Dimensions for Electrocatalysis,» de *Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications*, ELSEVIER, 2019, pp. 435-464.
- [22] Z. Q. H. Z. G.-J. K. J. J. Rossmeisl, «Electrolysis of water on oxide surfaces,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 607, nº 1-2, pp. 83-89, 2007.
- [23] X. Huang, J. Wang, H. Bing Tao y H. Xu, «An essential descriptor for the oxygen evolution reaction on reducible metal oxide surfaces,» *Chemical Science*, nº 11, 2019.
- [24] D. Z. K. Zeng, «Evaluating the effect of surface modifications on Ni based electrodes for alkaline water electrolysis,» *Fuel*, vol. 116, nº 7, pp. 692-698, 2013.
- [25] S. Trasatti, «Electrocatalysis of Hydrogen Evolution: Progress in Cathode Activation,» de *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, WILEY-VCH, 2008, pp. 1-85.

- [26] C. F. D. K. N. Y. H. J. M. A. D. C. K. Linsey C. Seitz, «A highly active and stable IrO_x/SrIrO₃ catalyst for the oxygen evolution reaction,» *Science*, vol. 353, nº 6303, pp. 1011-1014, 2016.
- [27] J. R. A. L. L. J. R. K. T. B. H. J. J. K. Norskov, «Origin of the Overpotential for Oxygen Reduction at a Fuel-Cell Cathode,» *The Journal Of Physical Chemistry B*, vol. 108, nº 46, pp. 17886-17892, 2004.
- [28] J. García-Antón, E. Blasco-Tamarit, D. García-García, V. Guiñón-Pina, R. Leiva-García y V. Pérez-Herranz, «Celda electroquímica de generación de gases para el análisis de procesos electroquímicos.». España Patente P-200803389, 2008.
- [29] I. Industrial Quick Search, «Nickel Suppliers,» [En línea]. Available: <https://www.nickelsuppliers.com/nickel-bar/>. [Último acceso: 09 05 2021].
- [30] C. González-Buch, I. Herraiz-Cardona, E. Ortega, J. García-Antón y V. Pérez-Herranz, «Synthesis and characterization of macroporous Ni, Co and Ni–Co electrocatalytic deposits for hydrogen evolution reaction in alkaline media,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nº 25, pp. 10157-10169, 2013.
- [31] C. González-Buch, I. Herraiz-Cardona, E. M. Ortega, S. Mestre y V. Pérez-Herranz, «Synthesis and characterization of Au-modified macroporous Ni electrocatalysts for alkaline water electrolysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, nº 2, pp. 764-772, 2016.
- [32] B. Yazici, G. Tatli, H. Galip y M. Erbil, «Investigation of suitable cathodes for the production of hydrogen gas by electrolysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 20, nº 12, pp. 957-965, 1995.
- [33] G. Kardaş, B. Yazici y M. Erbil, «Effect of some primary alcohols on hydrogen yield on platinum cathode in chloride solution,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, nº 11, pp. 1213-1218, 2003.

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. CONSIDERACIONES	1
2. PRESUPUESTO DESGLOSADO	4

1. CONSIDERACIONES

Al realizar el presupuesto desglosado del presente Trabajo de Final de Grado, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Beneficios industriales nulos.
- Costes indirectos nulos.
- Los precios no incluyen IVA (21%), puesto que dicho impuesto sólo aplica en el presupuesto de ejecución por contrata.
- Los gastos generales cuyo valor será el 15% del presupuesto de ejecución material, incluye el consumo de agua, electricidad, gas, limpieza, etc.
- Puesto que no todos los equipos se han obtenido específicamente para este TFG, se ha calculado la amortización de estos considerando una vida útil de 10 años para todos los dispositivos excepto para el ordenador portátil, cuya duración es menor, estimada en 5 años. Donde se considera que cada año tiene 250 días laborables, que la pérdida de valor es de carácter lineal, y que el valor residual es nulo.
- En el Paquete Office, se ha considerado cierto número de horas empleadas durante los ensayos del laboratorio, ya que, a pesar de obtener los resultados a través del AUTOLAB, estos eran trasladados al ordenador y además se empezaban a realizar revisiones y gráficas a través de un documento Excel.
- El coste de amortización del ENR se ha calculado mediante el coste de los reactivos empleados para su fabricación. Si se considera que la vida útil de los electrodos ronda los 6 meses, contando 22 días al mes, donde cada día un turno normal ronda las 8 horas, se obtiene que la vida útil (teórica) del electrodo son 1056 horas. En este caso no se han tomado en consideración en qué condiciones se emplearán los electrodos, como temperatura de operación, densidad de corriente, tampoco se ha considerado el coste del consumo energético del tratamiento anódico con el H₂SO₄, el coste del Stripping con HCl, así como cualquier coste que derive de los tratamientos realizados a los electrodos.

<i>Coste reactivos y materiales ENR</i>	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe(€)
Barra de acero inox. AISI 304	Ud.	1,000	4,06	4,06
NaOH (para desengrasar)	L	0,050	59,80	2,99
HCL (stripping)	L	0,050	19,20	0,96
H ₂ SO ₄	L	0,050	12,30	0,62
NiCl ₂ · 6H ₂ O	g	48,000	0,10	5,02
NH ₄ Cl	L	0,170	41,40	7,04
Electrodo grafito	Ud.	1,000	4,00	4,00
Electrodo Ag/AgCl	Ud.	1,000	139,00	139,00
			Total:	163,68

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Tras estas consideraciones se ha obtenido un **coste de 0,15€/h del ENR**.

- El coste de amortización del ENAu se ha calculado de igual manera que el ENR. Se ha considerado que el volumen empleado de H_{Au}Cl₄ es de 50 ml, mediante el cual se ha calculado la masa en gramos que había en la mezcla.

<i>Coste reactivos y materiales ENAu</i>	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe(€)
Barra de acero inox. AISI 304	Ud.	1,000	4,06	4,06
NaOH (para desengrasar)	L	0,050	59,80	2,99
HCL (stripping)	L	0,050	19,20	0,96
H ₂ SO ₄	L	0,050	12,30	0,62
NiCl ₂ · 6H ₂ O	g	48,000	0,10	5,02
NH ₄ Cl	L	0,170	41,40	7,04
Electrodo grafito	Ud.	1,000	4,00	4,00
Electrodo Ag/AgCl	Ud.	1,000	139,00	139,00
H _{Au} Cl ₄ * 3 H ₂ O	g	4,2·10 ⁻³	246,00	1,03
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇	g	0,600	13,78	8,27
			Total:	172,98

Tras estas consideraciones se ha obtenido un **coste de 0,16€/h del ENAu**.

Los precios unitarios empleados se han obtenido a través de los siguientes enlaces:

Barra de acero inox. AISI 304:

<https://www.randrade.com/barra-inoxidable/355-barra-inoxidable-aisi-304-redonda.html>

NaOH:

<https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/sodio+hidr%C3%B3xido+soluci%C3%B3n+30%25+pv+/171690>

HCl:

<https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/acido-clorhidrico-01-moll-01n-solucion-valorada/181023>

H₂SO₄:

<https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/acido-sulfurico-95-97-para-analisis/A0655>

NiCl₂:

<https://www.fishersci.es/shop/products/nickel-ii-chloride-hexahydrate-97-acros-organics/10582031/en>

NH₄Cl: TFG Carlos Bujalance

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Electrodo de grafito:

https://www.amazon.com/-/es/varillas-cilindro-electrodo-longitud-di%C3%A1metro/dp/B074RFR9QF/ref=asc_df_B074RFR9QF/?tag=goshpdkuses-20&linkCode=df0&hvadid=461833485805&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=9609662020444584964&hvpone=&hvptwo=&hvgmt=&hvdev=c&hvdvcmld=&hvlocint=&hvlocphy=9032007&hvtargid=pla-572276082388&psc=1

Electrodo Ag/AgCl: TFG Carlos Bujalance

HAuCl₄:

https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/254169?gclid=CjwKCAjwgISIBhBfEiwALE19Sd-Jj-KjnxFrjpbujGeN96NSZhe25v_jRIIW7JK5pjAnsJb87Qj6QxoCHNcQAvD_BwE

Na₃C₆H₅O₇:

<https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/sodio-citrato-25-g-en-envases-de-100-ml-para-llenar-con-agua-destilada-para-el-equipo-a-tlc/814029RC>

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

2. PRESUPUESTO DESGLOSADO

Material de Laboratorio

Nº	Descripción	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe (€)
1.1	Matraz aforado 250 mL	Ud.	1,000	37,30	37,30
1.2	Vaso de precipitados 250 mL	Ud.	2,000	0,71	1,42
1.3	Embudo de cristal	Ud.	1,000	1,80	1,80
1.4	Espátula cuchara	Ud.	1,000	2,20	2,20
1.5	Bata de laboratorio	Ud.	1,000	20,05	20,05
1.6	Gafas de seguridad	Ud.	1,000	3,40	3,40
1.7	Pipeta graduada	Ud.	1,000	2,29	2,29
1.8	Varilla agitadora	Ud.	1,000	2,90	2,90
1.9	Cuentagotas	Ud.	1,000	0,27	0,27
1.10	Caja 100 guantes desechables látex	Ud.	0,500	11,45	5,73
				Total:	77,81

Reactivos y Electroodos

Nº	Descripción	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe (€)
2.1	Lentejas KOH (PANREAC, pureza 85%)	kg	1,000	39,75	39,75
2.2	Agua destilada	L	5,000	0,60	3,00
2.3	Botella 7 L Nitrógeno	L	0,050	112,25	5,61
2.4	Residuos H ₂ SO ₄ , HCl (Grupo IV)	kg	0,100	0,47	3,10
2.5	Residuos KOH (Grupo VI)	kg	2,500	0,47	1,18
2.6	Electrodo níquel comercial	Ud.	2,000	7,64	15,28
2.7	ENR	h	50,000	0,15	7,50
2.8	ENAu	h	30,000	0,16	4,80
2.9	Varilla agitadora	Ud.	1,000	2,90	2,90
2.10	Cuentagotas	Ud.	1,000	0,27	0,27
				Total:	83,39

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Activos

Nº	Descripción	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe (€)
3.1	Campana	días	2,000	1,94	3,88
3.2	Pulidora-Desbastadora Labo-Pol 21	días	5,000	1,20	6,00
3.3	Baño termostático	días	60,000	0,40	24,00
3.4	Balanza electrónica de precisión	días	3,000	0,44	1,32
3.5	AUTOLAB PGSTAT 302 N	días	60,000	10,80	648,00
3.6	Ordenador portátil HP	días	60,000	0,24	14,40
3.7	Paquete Office	h	200,000	0,07	14,00
3.8	Celda electroquímica vertical	Ud.	1,000	330,00	330,00
3.9	Celda electroquímica de generación de gases	días	60,000	2,00	120,00
				Total:	1.161,60

Personal

Nº	Descripción	Unidades	Medición	Precio unitario(€)	Importe (€)
4.1	Ingeniero Investigador	h	300,000	12,00	3.600,00
4.2	Cotutora Catedrática	h	40,000	30,00	1.200,00
4.3	Tutor Catedrático	h	40,000	30,00	1.200,00
				Total:	6.000,00

Nº	Presupuesto de Ejecución Material	Importe(€)
1	Material de Laboratorio	77,81
2	Reactivos y Electroodos	83,39
3	Activos	1.161,60
4	Personal	6.000,00
		Total: 7.322,8

Asciende el Presupuesto de Ejecución Material a la expresada cantidad de **SIETE MIL TRECIENTOS VEINTINIDOS EUROS CON OCHO CÉNTIMOS.**

Presupuesto de Ejecución por Contrata	Importe(€)
PEM	7.322,8
15% Gastos Generales	1.098,42
Total:	8.421,22

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrata a la expresada cantidad de **OCHO MIL CUATROCIENTOS VEINTIUN EUROS CON VEINTIDOS CÉNTIMOS.**

CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS DE NÍQUEL DOPADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO
PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Presupuesto de Base por Licitación	Importe(€)
PEC	8421,22
21% IVA	1768,46
Total:	10189,68

Asciende el Presupuesto Base por Licitación material a la expresada cantidad de **DIEZ MIL CIENTO OCHENTA Y NUEVE EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**

Anexos

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

· 1.1 Identificador de producto

· **Nombre comercial:** Potasio Hidróxido

· **Número del artículo:** 1515

· **Número CAS:**

1310-58-3

· **Número CE:**

215-181-3

· **Número de clasificación:**

019-002-00-8

· **Número de registro** 01-2119487136-33-XXXX

· 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

· Sector de uso

SU1 Agricultura, silvicultura, pesca

SU2a Industrias extractivas (sin incluir las industrias en mar abierto)

SU2b Industrias en mar abierto

SU4 Industrias de la alimentación

SU5 Industria textil, del cuero y de la peletería

SU6a Manufacturas de madera y productos de madera

SU6b Fabricación de pasta papelera, papel y artículos de papel

SU7 Artes gráficas y reproducción de soportes grabados

SU8 Fabricación de productos químicos a granel a gran escala (incluidos los productos del petróleo)

SU9 Fabricación de productos químicos finos

SU10 Formulación [mezcla] de preparados y/o reenvasado (sin incluir aleaciones)

SU11 Fabricación de productos de caucho

SU12 Fabricación de productos plásticos, incluidos la composición y la conversión

SU13 Fabricación de otros productos minerales no metálicos diversos, por ejemplo, yeso o cemento

SU14 Fabricación de metales básicos, incluidas aleaciones

SU15 Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipos

SU16 Fabricación de equipos informáticos, material electrónico y óptico y equipos eléctricos

SU17 Fabricación de maquinaria, equipos, vehículos, otros equipos de transporte, etc. de uso general

SU18 Fabricación de muebles

SU19 Construcción de edificios y obras de construcción

SU20 Servicios de salud

SU23 Suministro de electricidad, vapor, gas y agua y depuración de aguas residuales

SU24 Investigación y desarrollo científicos

· Categoría de productos

PC1 Adhesivos, sellantes

PC2 Adsorbentes

PC3 Productos de higienización del aire

PC4 Productos anticongelantes y descongelantes

PC7 Metales y aleaciones básicas

PC8 Productos biocidas

(se continua en página 2)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 1)

- PC9a Revestimientos y pinturas, disolventes, decapantes
- PC9b Rellenos, masillas, yeso, arcilla de modelado
- PC9c Pinturas de dedo
- PC11 Explosivos
- PC12 Fertilizantes
- PC13 Combustibles
- PC14 Productos de tratamiento de las superficies metálicas
- PC15 Productos de tratamiento de superficies no metálicas
- PC16 Fluidos portadores de calor
- PC17 Fluidos hidráulicos
- PC18 Tintas y tóners
- PC19 Sustancias intermedias
- PC20 Auxiliares tecnológicos como reguladores del ph, agentes floculantes, precipitantes y neutralizantes
- PC21 Productos químicos de laboratorio
- PC23 Productos para el curtido
- PC24 Lubricantes, grasas y desmoldeantes
- PC25 Líquidos para metalurgia
- PC26 Productos para el tratamiento del papel y del cartón
- PC27 Productos fitosanitarios
- PC28 Perfumes, fragancias
- PC29 Medicamentos
- PC30 Sustancias fotoquímicas
- PC31 Abrillantadores y ceras
- PC32 Preparados y componentes poliméricos
- PC33 Semiconductores
- PC34 Tintes para tejidos y productos de acabado e impregnación
- PC35 Productos de lavado y limpieza (incluidos los productos que contienen disolventes)
- PC36 Ablandadores de agua
- PC37 Productos químicos para el tratamiento del agua
- PC38 Productos de soldadura y productos fundentes
- PC39 Productos cosméticos y productos de cuidado personal
- PC40 Disolventes de extracción

· **Categoría de procesos**

- PROC1 Producción de productos químicos o refinería en procesos cerrados en los que no hay probabilidades de exposición o procesos en condiciones de contención equivalentes.
- PROC2 Producción de productos químicos o refinería en procesos cerrados y continuos con exposición ocasional controlada o procesos cuyas condiciones de contención son equivalentes.
- PROC3 Fabricación o formulación en la industria química en procesos por lotes cerrados con exposición ocasional controlada o procesos cuyas condiciones de contención son equivalentes.
- PROC4 Producción de productos químicos en los que se puede producir la exposición.
- PROC5 Mezclado en procesos por lotes
- PROC7 Pulverización industrial
- PROC8a Transferencia de sustancias o mezclas (carga y descarga) en instalaciones no especializadas
- PROC8b Transferencia de sustancias o mezclas (carga y descarga) en instalaciones especializadas
- PROC9 Transferencia de sustancias o mezclas a pequeños contenedores (líneas de llenado especializadas, incluido el pesaje)
- PROC10 Aplicación mediante rodillo o brocha
- PROC11 Pulverización no industrial
- PROC13 Tratamiento de artículos mediante inmersión y vertido
- PROC14 Tableteado, compresión, extrusión, peletización, granulación
- PROC15 Uso como reactivo de laboratorio
- PROC19 Actividades manuales en las que interviene el contacto manual
- PROC23 Procesos abiertos y operaciones de transferencia a temperaturas muy elevadas
- PROC24 Manipulación con elevado nivel de energía (mecánica) de sustancias contenidas en materiales y/o artículos
- PROC26 Manipulación de sustancias sólidas inorgánicas a temperatura ambiente

· **Categoría de emisiones al medio ambiente**

- ERC1 Fabricación de sustancias

(se continua en página 3)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 2)

- ERC2 Formulación en mezcla
- ERC4 Uso de auxiliares tecnológicos no reactivos en emplazamientos industriales (no forman parte de artículos)
- ERC5 Uso en emplazamiento industrial que da lugar a la inclusión en un artículo
- ERC6a Uso de sustancias intermedias
- ERC6b Uso de auxiliares tecnológicos reactivos en emplazamientos industriales (no forman parte de artículos)
- ERC7 Uso de fluidos funcionales en emplazamiento industrial.
- ERC8a Amplio uso de auxiliares tecnológicos no reactivos (no forman parte de artículos, interior)
- ERC8b Amplio uso de auxiliares tecnológicos reactivos (no forman parte de artículos, interior)
- ERC8c Amplio uso que da lugar a la incorporación en un artículo (interior)
- ERC8d Amplio uso de auxiliares tecnológicos no reactivos (no forman parte de artículos, exterior)
- ERC8e Amplio uso de auxiliares tecnológicos reactivos (no forman parte de artículos, exterior)
- ERC8f Amplio uso que da lugar a la incorporación en un artículo (exterior)
- ERC9a Amplio uso de fluidos funcionales (interior)
- ERC9b Amplio uso de fluidos funcionales (exterior)

· **Utilización del producto / de la elaboración**

Productos químicos de laboratorio

· **1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

· **Fabricante/distribuidor:**

PANREAC QUIMICA S.L.U.
C/Garraf 2
Polígono Pla de la Bruguera
E-08211 Castellar del Vallès (Barcelona)

Tel. (+34) 937 489 400
Fax. (+34) 937 489 401
e-mail: product.safety@panreac.com

· **Área de información:** email: product.safety@panreac.com

· **1.4 Teléfono de emergencia:**

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)
Tel.: (+34) 937 489 499

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

· **2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**

· **Clasificación con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008**

Met. Corr.1 H290 Puede ser corrosivo para los metales.

Acute Tox. 4 H302 Nocivo en caso de ingestión.

Skin Corr. 1A H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

· **2.2 Elementos de la etiqueta**

· **Etiquetado con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008**

La sustancia se ha clasificado y etiquetado de conformidad con el reglamento CLP.

· **Pictogramas de peligro**



GHS05 GHS07

· **Palabra de advertencia** Peligro

· **Indicaciones de peligro**

H290 Puede ser corrosivo para los metales.

H302 Nocivo en caso de ingestión.

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

· **Consejos de prudencia**

P280 Llevar guantes/ropa de protección/equipo de protección para los ojos/la cara/los oídos.

(se continua en página 4)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 3)

- P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua [o ducharse].
- P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.
- P310 Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico.
- P321 Se necesita un tratamiento específico (ver en esta etiqueta).
- P405 Guardar bajo llave.
- P501 Eliminar el contenido o el recipiente conforme a la reglamentación local/regional/nacional/internacional.

- **2.3 Otros peligros**
- **Resultados de la valoración PBT y mPmB**
- **PBT:** No aplicable.
- **mPmB:** No aplicable.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

- **3.1 Sustancias**
- **Denominación N° CAS**
1310-58-3 Potasio Hidróxido
- **Número(s) de identificación**
- **Número CE:** 215-181-3
- **Número de clasificación:** 019-002-00-8
- **Límites de concentración específicos**
Skin Corr. 1A; H314: $C \geq 5 \%$
Skin Corr. 1B; H314: $2 \% \leq C < 5 \%$
Skin Irrit. 2; H315: $0,5 \% \leq C < 2 \%$
Eye Irrit. 2; H319: $0,5 \% \leq C < 2 \%$
Met. Corr.1; H290: $C \geq 5 \%$

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

- **4.1 Descripción de los primeros auxilios**
- **Instrucciones generales:**
Quitarse de inmediato toda prenda contaminada con el producto.
Los síntomas de intoxicación pueden presentarse después de muchas horas, por lo que se requiere una supervisión médica durante un mínimo de 48 horas después del accidente.
Llevar las personas afectadas al aire libre.
- **En caso de inhalación del producto:**
Suministrar suficiente aire fresco y, para mayor seguridad, consultar el médico.
Si no respira, afectue la respiración artificial. Si le cuesta respirar, suministrar oxígeno. Oblenga atención médica.
Las personas desmayadas deben tenderse y transportarse de lado con la suficiente estabilidad.
- **En caso de contacto con la piel:**
Recurrir a un médico inmediatamente.
Lavar inmediatamente con agua.
Extraer la sustancia por medio de algodón impregnado con polietilenglicol 400.
Quitarse de inmediato toda prenda contaminada con el producto.
- **En caso de con los ojos:**
Limpiar los ojos abiertos durante varios minutos con agua corriente y consultar un médico.
- **En caso de ingestión:**
Enjuagar la boca.
Beber mucha agua a respirar aire fresco. Solicitar asistencia médica inmediatamente.
No proceder a pruebas de neutralización.
No provocar el vómito y solicitar asistencia médica inmediata.
- **4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**
No existen más datos relevantes disponibles.

(se continua en página 5)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 4)

- **4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**
No existen más datos relevantes disponibles.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

- **5.1 Medios de extinción**
- **Sustancias extintoras apropiadas:**
Polvo ABC
Combatir los incendios con medidas adaptados al ambiente circundante.
- **5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla** Incombustible.
- **5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**
- **Equipo especial de protección:** Llevar puesto un aparato de respiración autónomo.
- **Indicaciones adicionales**
El agua de extinción contaminada debe recogerse por separado y no debe ser vertida al alcantarillado.
Los restos de incendio así como el agua de extinción contaminada deben desecharse de acuerdo con las normativas vigentes.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

- **6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**
Evitar la formación de polvo.
Ante la presencia de vapores /polvo /aerosoles, utilizar protección respiratoria.
Llevar puesto equipo de protección. Mantener alejadas las personas sin protección.
Evitar el contacto con la sustancia.
Asegurarse de que haya suficiente ventilación.
- **6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:**
Evitar que penetre en la canalización /aguas de superficie /agua subterráneas.
- **6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:**
Recoger mecánicamente.
Evitar la formación de polvo.
Utilizar un neutralizador.
Desechar el material contaminado como vertido según item 13.
Asegurar suficiente ventilación.
Aclarer después.
- **6.4 Referencia a otras secciones**
Ver capítulo 7 para mayor información sobre una manipulación segura.
Ver capítulo 8 para mayor información sobre el equipo personal de protección.
Para mayor información sobre cómo desechar el producto, ver capítulo 13.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

- **7.1 Precauciones para una manipulación segura**
Desempolvar cuidadosamente.
Retire con regularidad el polvo que se forma inevitablemente.
- **Prevención de incendios y explosiones:** El producto no es inflamable.
- **7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**
- **Almacenamiento:**
- **Exigencias con respecto al almacén y los recipientes:**
No almacenar en recipientes de aluminio, estaño o cinc.
Conservar sólo en envases originales cerrados.
Prever suelos resistentes a los productos alcalinos.
- **Normas en caso de un almacenamiento conjunto:**
No almacenar junto con metales.
No almacenar junto con alimentos.

(se continua en página 6)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 5)

- **Indicaciones adicionales sobre las condiciones de almacenamiento:**
Mantener el recipiente cerrado herméticamente.
El recipiente solamente debe abrirse con un sistema de aspiración local.
Almacenar bajo llave o con acceso permitido solamente a profesionales o personal autorizado.
- **Temperatura de almacenamiento recomendada:** Temperatura ambiente
- **Clase de almacenamiento:** 8 B
- **7.3 Usos específicos finales** No existen más datos relevantes disponibles.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

· 8.1 Parámetros de control

- **Componentes con valores límite admisibles que deben controlarse en el puesto de trabajo:**

1310-58-3 Potasio Hidróxido

LEP Valor de corta duración: 2 mg/m³

· DNEL

Inhalatorio	Long-term - local effects, worker	1 mg/m ³
	Long-term - local effects, general population	1 mg/m ³

- **Indicaciones adicionales:**
Como base se han utilizado las listas vigentes en el momento de la elaboración.
- **8.2 Controles de la exposición**
- **Controles técnicos apropiados** Sin datos adicionales, ver punto 7.
- **Medidas de protección individual, tales como equipos de protección personal**
- **Medidas generales de protección e higiene:**
Mantener alejado de alimentos, bebidas y alimentos para animales.
Quitarse de inmediato la ropa ensuciada o impregnada.
Lavarse las manos antes de las pausas y al final del trabajo.
Evitar el contacto con los ojos y la piel.
- **Protección respiratoria:**
Protección respiratoria necesaria en presencia de polvo.
Filtro P2
Si la ventilación es insuficiente, usar protección respiratoria.
- **Protección de las manos**



Guantes de protección

El material del guante deberá ser impermeable y resistente al producto / sustancia / preparado.
Ante la ausencia de tests específicos, no se puede recomendar ningún material específico para guantes de protección contra el producto / preparado / mezcla de sustancias químicas.
Selección del material de los guantes en función de los tiempos de rotura, grado de permeabilidad y degradación.

- **Material de los guantes**
La elección del guante adecuado no depende únicamente del material, sino también de otras características de calidad, que pueden variar de un fabricante a otro.
- **Tiempo de penetración del material de los guantes**
El tiempo de resistencia a la penetración exacto deberá ser pedido al fabricante de los guantes. Este tiempo debe ser respetado.
- **Para el contacto permanente son adecuados los guantes compuestos por los siguientes materiales:**
Caucho nitrílico
Espesor recomendada: $\geq 0,11$ mm
Valor de permeación: Nivel ≥ 480 min
- **Para protegerse contra salpicaduras son adecuados los guantes compuestos por los siguientes materiales:**
Caucho nitrílico
Espesor recomendada: $\geq 0,11$ mm

(se continua en página 7)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 6)

Valor de permeación: Nivel \geq 480 min

· **Protección de los ojos/la cara**



Gafas de protección herméticas

· **Protección del cuerpo:**

Ropa de trabajo protectora

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

· 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

· Datos generales

· Estado físico	Sólido
· Color:	Blanco
· Olor:	Inodoro
· Umbral olfativo:	No determinado.
· Punto de fusión / punto de congelación	406 °C
· Punto de ebullición o punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	1.327 °C
· Inflamabilidad	No determinado. No aplicable.
· Límite superior e inferior de explosividad	
· Inferior:	No determinado.
· Superior:	No determinado.
· Punto de inflamación:	No aplicable.
· Temperatura de auto-inflamación:	No determinado.
· Temperatura de descomposición:	No determinado.
· pH	14
· Viscosidad:	
· Viscosidad cinemática	No aplicable.
· Dinámica:	No aplicable.
· Solubilidad	
· agua a 20 °C:	1120 g/l
· Coeficiente de reparto n-octanol/agua (valor logarítmico)	-3,88606
· Presión de vapor a 20 °C:	0 hPa
· Densidad y/o densidad relativa	
· Densidad a 20 °C:	2,04 g/cm ³
· Densidad relativa	No determinado.
· Densidad de vapor	No aplicable.
· Características de las partículas	Ver punto 3.

· 9.2 Otros datos

· Aspecto:	
· Forma:	Sólido
· Datos importantes para la protección de la salud y del medio ambiente y para la seguridad	
· Propiedades explosivas:	El producto no es explosivo.
· Cambio de estado	
· Tasa de evaporación:	No aplicable.

(se continua en página 8)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 7)

· Información relativa a las clases de peligro físico	
· Explosivos	suprimido
· Gases inflamables	suprimido
· Aerosoles	suprimido
· Gases comburentes	suprimido
· Gases a presión	suprimido
· Líquidos inflamables	suprimido
· Sólidos inflamables	suprimido
· Sustancias y mezclas que reaccionan espontáneamente	suprimido
· Líquidos pirofóricos	suprimido
· Sólidos pirofóricos	suprimido
· Sustancias y mezclas que experimentan calentamiento espontáneo	suprimido
· Sustancias y mezclas que emiten gases inflamables en contacto con el agua	suprimido
· Líquidos comburentes	suprimido
· Sólidos comburentes	suprimido
· Peróxidos orgánicos	suprimido
· Corrosivos para los metales	Puede ser corrosivo para los metales.
· Explosivos no sensibilizados	suprimido

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

- **10.1 Reactividad** No existen más datos relevantes disponibles.
- **10.2 Estabilidad química**
- **Descomposición térmica / condiciones que deben evitarse:**
No se descompone al emplearse adecuadamente.
- **10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas**
Posibles reacciones violentas con:
Compuestos de amonio, metales alcalinoterreos, halógenos, halogenuros de halógeno, hidrocarburos halogenados, oxihalogenuros no metálicos, halogenóxidos, nitrocompuestos orgánicos, fósforo, óxidos no metálicos, hidrocarburos, anhídridos, ácidos fuertes, azidas.
Reacciona con agua y ácidos.
Reacciona con ácidos fuertes y oxidantes.
Reacción exotérmica con:
el agua
- **10.4 Condiciones que deben evitarse** No existen más datos relevantes disponibles.
- **10.5 Materiales incompatibles:**
compuestos orgánicos
ácidos fuertes
- **10.6 Productos de descomposición peligrosos:** En caso de incendio: Véase capítulo 5.
- **Datos adicionales:**
extradamente higroscópico
disolución exotérmica con agua
Incompatible con:
metales
diversos materiales plásticos
vidrio
tejidos de animales
tejidos de plantas

ES

(se continua en página 9)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 8)

SECCIÓN 11: Información toxicológica

- **11.1 Información sobre las clases de peligro definidas en el Reglamento (CE) n.o 1272/2008**
- **Toxicidad aguda**
Nocivo en caso de ingestión.
- **Valores LD/LC50 (dosis letal /dosis letal = 50%) relevantes para la clasificación:**

Componente	tipo	valor	especie
------------	------	-------	---------

Oral	LD50	333 mg/kg	(rat)
------	------	-----------	-------

- **Corrosión o irritación cutáneas**
Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
- **Lesiones oculares graves o irritación ocular**
Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
- **Sensibilización respiratoria o cutánea**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Mutagenicidad en células germinales**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Carcinogenicidad** A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad para la reproducción**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición única**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición repetida**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Peligro por aspiración**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **11.2 Información relativa a otros peligros**
- **Propiedades de alteración endocrina** No contiene la sustancia.

SECCIÓN 12: Información ecológica

- **12.1 Toxicidad**
- **Toxicidad acuática:**

Tipo de test	Concentración efectiva	Método	Evaluación
--------------	------------------------	--------	------------

LC50/96 h	80 mg/l	(fish)	
-----------	---------	--------	--

- **12.2 Persistencia y degradabilidad** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.3 Potencial de bioacumulación** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.4 Movilidad en el suelo** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB**
- **PBT:** No aplicable.
- **mPmB:** No aplicable.
- **12.6 Propiedades de alteración endocrina**
El producto no contiene sustancias con propiedades disruptoras endocrinas.
- **12.7 Otros efectos adversos**
- **Observación:**
Efecto perjudicial por desviación del pH.
Efecto perjudicial en organismos acuáticos.
Corrosivo incluso en forma diluida.
No produce consumo biológico de oxígeno.
Posible neutralización en depuradoras.
- **Indicaciones medioambientales adicionales:**
- **Indicaciones generales:**
En estado no diluido o no neutralizado, no verter en el alcantarillado o en otros sistemas de desagüe.
El vertido de grandes cantidades en la canalización o en las aguas puede causar un aumento del valor pH. Un valor de pH alto es nocivo para los organismos acuáticos. En la dilución de la concentración de la aplicación, el valor pH se reduce considerablemente, de modo que después de utilizar el producto, las aguas residuales vertidas en la canalización son mínimamente dañinas para el agua.

(se continua en página 10)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido



(se continua en página 9)

No dejar que se infiltre en aguas subterráneas, aguas superficiales o en alcantarillados.
Nivel de riesgo para el agua 1 (clasificación de listas): escasamente peligroso para el agua

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

- **13.1 Métodos para el tratamiento de residuos**
- **Recomendación:**
Los productos químicos han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales
No debe desecharse con la basura doméstica. No debe llegar al alcantarillado.
- **Embalajes sin limpiar:**
- **Recomendación:**
Eliminar conforme a las disposiciones oficiales.
Los embalajes que no se pueden limpiar, deben desecharse de la misma manera que la sustancia.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

- **14.1 Número ONU o número ID**
- **ADR, IMDG, IATA** UN1813
- **14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas**
- **ADR** HIDRÓXIDO POTÁSICO SÓLIDO
- **IMDG, IATA** POTASSIUM HYDROXIDE, SOLID
- **14.3 Clase(s) de peligro para el transporte**
- **ADR**
- 
- **Clase** 8 (C6) Materias corrosivas
- **Etiqueta** 8
- **IMDG, IATA**
- 
- **Class** 8 Materias corrosivas
- **Label** 8
- **14.4 Grupo de embalaje**
- **ADR, IMDG, IATA** II
- **14.5 Peligros para el medio ambiente:** No aplicable.
- **14.6 Precauciones particulares para los usuarios** Atención: Materias corrosivas
- **Número de identificación de peligro (Número Kemler):** 80
- **Número EMS:** F-A,S-B
- **Segregation groups** Alkalis
- **Stowage Category** A
- **Segregation Code** SG35 Stow "separated from" SGG1-acids
- **14.7 Transporte marítimo a granel con arreglo a los instrumentos de la OMI** No aplicable.

(se continua en página 11)

Nombre comercial: Potasio Hidróxido

(se continua en página 10)

· Transporte/datos adicionales:	
· Quantity limitations	On passenger aircraft/rail: 15 kg On cargo aircraft only: 50 kg
· ADR	
· Cantidades limitadas (LQ)	1 kg
· Cantidades exceptuadas (EQ)	Código: E2 Cantidad neta máxima por envase interior: 30 g Cantidad neta máxima por embalaje exterior: 500 g
· Categoría de transporte	2
· Código de restricción del túnel	E
· IMDG	
· Limited quantities (LQ)	1 kg
· Excepted quantities (EQ)	Code: E2 Maximum net quantity per inner packaging: 30 g Maximum net quantity per outer packaging: 500 g
· "Reglamentación Modelo" de la UNECE:	UN 1813 HIDRÓXIDO POTÁSICO SÓLIDO, 8, II

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

- **15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla**
- **Directiva 2012/18/UE**
- **Sustancias peligrosas nominadas - ANEXO I** No contiene la sustancia.
- **Directiva 2011/65/UE sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos - Anexo II**
No contiene la sustancia.
- **REGLAMENTO (UE) 2019/1148**
- **Anexo I - PRECURSORES DE EXPLOSIVOS RESTRINGIDOS (Valor límite superior a efectos de la concesión de licencias con arreglo al artículo 5, apartado 3)**
No contiene la sustancia.
- **Anexo II - PRECURSORES DE EXPLOSIVOS NOTIFICABLES** No contiene la sustancia.
- **Disposiciones nacionales:**
- **Demás disposiciones, limitaciones y decretos prohibitivos**
- **Sustancias altamente preocupantes (SVHC) según REACH, artículo 57** No contiene la sustancia.
- **15.2 Evaluación de la seguridad química:**
Una evaluación de la seguridad química se ha llevado a cabo.

SECCIÓN 16: Otra información

Los datos se fundan en el estado actual de nuestros conocimientos, pero no constituyen garantía alguna de cualidades del producto y no generan ninguna relación jurídica contractual.

- **Fecha de la versión anterior:** 01.07.2021
- **Número de la versión anterior:** 11.00
- **Abreviaturas y acrónimos:**
RID: Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer (Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail)
IATA-DGR: Dangerous Goods Regulations by the "International Air Transport Association" (IATA)
ICAO: International Civil Aviation Organisation
ICAO-TI: Technical Instructions by the "International Civil Aviation Organisation" (ICAO)
ADR: Accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
IMDG: International Maritime Code for Dangerous Goods
IATA: International Air Transport Association
GHS: Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals
EINECS: European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances

(se continua en página 12)