

Hidrogenoa, soluzioa ote da?

(Hydrogen, is it the solution?)

*Leire Casas Camacho, Jose Miguel Campillo-Robles**

Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU, Leioa)

LABURPENA: Azken urteetan, hidrogenoa nonahi azaltzen ari da. Erakunde publikoek eta enpresa pribatuek etengabe errepikatzen digute hidrogenoak trantsizio-energetikoa gauzatzeko zutaberik garrantzitsuena izango dela. Baina, benetan, hidrogenoa gure arazoen soluzioa izango ote da? Izatez, industria petrokimikoaren etorkizuneko apustua da hidrogenoa, gaur egungo azpiegitura erabiliz klimatikoki neutroa den erregaia merkaturatzeko aukera ematen dielako. Hidrogenoak abantaila batzuk eduki badauzka, eta ekonomiaren sektore batzuk deskarbonizatzeko aukera erraztuko du, baina erronka propioak ere baditu. Horregatik, hidrogenoa ez da mirarizko soluzioa izango. Trantsizio-energetikoa ezin da hidrogenoan soilik oinarritu, bestelako “eragile” batzuk ere tartean egon behar izango dira (bateriak, kondentsadoreak, energia termikoa, etabar). Hori dela eta, problematika energetikoari aurre egiteko soluzioen konbinazioa jarri beharko da indarrean. Dokumentu honetan, hidrogeno-ekonomiaren berrikuspen orokorra aurkezten da, ekoizpenaren, biltegitratzearen, garraioaren, aplikazioen eta oraingo ekonomiaren erronka nagusiak azalduz.

HITZ GAKOAK: Hidrogenoa, energia-bektorea, ekoizpena, biltegitratzea, garraioa, erabilera, ekonomia, erronkak.

ABSTRACT: *In recent years, hydrogen has been appearing everywhere. Public institutions and private companies continuously tell us that hydrogen will be the most important pillar in achieving the energy transition. But will hydrogen truly be the solution to our problems? In fact, hydrogen is the future bet of the petrochemical industry, because it allows them to market a climatically neutral fuel using current infrastructure. Hydrogen has some advantages, and it will facilitate the decarbonisation of certain sectors of the economy, but it also has its own challenges. Therefore, hydrogen will not be a miraculous solution. The energy transition can not only rely on hydrogen; other “players” will also need to be involved (batteries, capacitors, thermal energy, etc.). For this reason, a combination of solutions will need to be implemented to tackle the energy challenge. This paper presents a general review of hydrogen economy, with the analysis of most important challenges in production, storage, transportation, applications and economics.*

KEYWORDS: *Hydrogen, energy vector, production, storage, transport, use, economy, challenges.*

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** José Miguel Campillo-Robles, Fisika saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Sarriena auzoa z/g 48940 Leioa.  <https://orcid.org/0000-0002-2565-6343>, josemiguel.campillo@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: Casas-Camacho, Leire; Campillo-Robles, Jose Miguel (2025). << Hidrogenoa, soluzioa ote da?>>, Ekaia, 48, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.27191>)

Jasoa: abenduak 28, 2024; Onartua: martxoak 11, 2025

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2025 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

1. SARRERA

Azken urteetako gerrek eta bestelako zoritxarreko gertakariak (COVID birusa, esaterako) erregai fosilen prezioaren hegakortasuna handitu dute, aspaldian ikusi ez bezala. Horretaz gain, eskuragarria den erregai fosilen kantitatea etengabe murrizten ari da, eta etorkizun ez oso urrunean agortuko dira (petrolioaren gailurra deituriko fenomenoak [1]). Gainera, erregai fosilek eragindako klima-aldaketaren hasierako efektuak nabaritzen hasiak gara jadanik. Hori guztia dela eta, munduko eredu energetikoa errotik aldatzeko premia inoiz baino handiagoa da. Gure gizartea deskarbonizatu egin behar da, espezie modura bizirauteko eta, aldi berean, planetaren ekosistemak salbatzeko.

Zoritxarrez, munduko energia-eskaerak etengabe handitzen jarraitzen du. 1950ean, adibidez, 28.564 TWh kontsumitu ziren munduan eta, 2023an, aldiz, 183.230 TWh; hau da, kontsumoa sei aldiz baino gehiago handitu zen [2]. Beraz, gizartearen deskarbonizazio-prozesuan, energiaren ekoizpena eta kudeaketa eraberritu behar dira handituz doan energia-eskaera asetzeko [3]. Bide horretan, hidrogenoa eragile garrantzitsua izan daitekeela iradokitzen digute hainbat erakundetatik [4, 5]. Horren ondorioz, zientzia, teknologia, industria eta ekonomiako eragile gehienek hidrogenoaren inguruko dinamikak abiatu dituzte. Izan ere, hidrogenoaren ekonomia martxan jartzeko diru asko bideratzen ari da, eta apustu horretan garaiz ez sartzeak lekuz kanpo utzi dezake bat baino gehiago.

Gauzak horrela, azken urte hauetan, hidrogenoaren aldeko diskurtsoa poliki poliki hedatzen joan da gure gizartean. Baina, aldekotasun hori, zenbateraino da behartutako jarrera diru publikoa jasotzeko? Benetan, hidrogenoa da bilatzen dugun mirarizko irtenbidea? Erantzuna ez da erraza, eta honez gero, ahots kritiko batzuk ere azaldu dira [6, 7]. Hori dela eta, hidrogenoaren aldeko apustu horren arrisku eta alde negatiboak buruz ere hitz egitea komeni dela uste dugu.

2. HIDROGENOA

Henry Cavendish-ek (1731-1810), zientzialari ingelesak, aurkitu zuen hidrogenoa 1766an. Hala ere, hamarkada bat geroago konturatu ziren elementu kimiko berria zela. 1783an, Antoine Lavoisier-ek (1743-1794), kimikari frantsesak, grekerazko izena eman zion: *hydro-gen* (ur-sortzailea, bera erretzean ura sortzen delako).

Hidrogenoa elementu kimiko sinpleena eta arinena da (ikus 1. taula), unibertsoan ugariena. Lurrean ur modura ageri da gehien. Egoera puruan, hidrogeno diatomiko forman azaltzen da, H_2 alegia, eta gasa da giro-tenperaturan eta egurats-presioan. Hidrogeno gasa usaingabea, koloregabea,

sukoia eta ez-toxikoa da. Berez, hidrogenoa energia-bektorea da, ez energia-iturria. Hau da, energia metatu eta askatzeko gaitasuna duen substantzia edo gailua da energia-bektorea, hala nola, bateriak, kondentsadoreak edo urtegietan pilaturiko ura.

1. Taula. Hidrogenoaren ezaugarri garrantzitsuenak [8, 9].

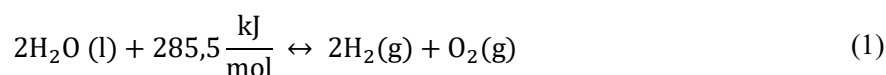
Zenbaki atomikoa	1
Masa atomikoa	1,00784 amu
Masa molekularra	2,01568 amu
Dentsitatea (20 °C, 1 atm)	0,0838 kg/m ³
Lurruntze-tenperatura (1 atm)	-252,88 °C
Lurruntze-bero sorra	447 kJ/kg
Fusio-tenperatura (1 atm)	-259,16 °C
Fusio-bero sorra	58 kJ/kg
Puntu kritikoa	-240,2 °C / 12,7 atm
Puntu hirukoitza	-259,3 °C / 0,07 atm
Autosutze-tenperatura (1 atm)	571 °C

Hidrogenoaren erabilgarritasuna balioztatzeko, gaur egungo erregaiekin alderatu behar da (ikus 2. taula). Erregaien artean, hidrogenoak energia-dentsitate grabimetriko handiena dauka (143 MJ kg⁻¹). Gure eguneroko bizitzako elementu batekin alderatu daiteke; adibidez, litio-ioi bateria batek 0,46-0,72 MJ kg⁻¹-ko energia-dentsitatea dauka [10]. Hortaz, masaren ikuspegitik energia metatzeko aukerarik onena litzateke hidrogenoa), eta hori oso interesgarria egiten du luzera handiko garraiorako, abiaziorako eta sektore aeroespazialerako. Hala ere, bere energia-dentsitate bolumetrikoa txikia da. Egurats-presioan, esaterako, gas guztien artean energia-dentsitate bolumetrikoa txikiena dauka, eta horrek zaildu egiten du bere aplikazioa garraioan eta sistema konpaktuetan. Hidrogenoa likidotuz gero, energia-dentsitate bolumetrikoa handitu egiten da, baina ohiko erregai likidoena baino txikiagoa da oraindik ere (ikus 2. taula). Egurats presioan, hidrogenoaren likidotze-prozesua -252,88 °C-tan gertatzen da. Baina giro-tenperaturan, 25 °C-tan alegia, presioa handituz ezin dugu hidrogenoa likido bihurtu, puntu kritikoaren gainetik dagoelako (ikus 1. taula).

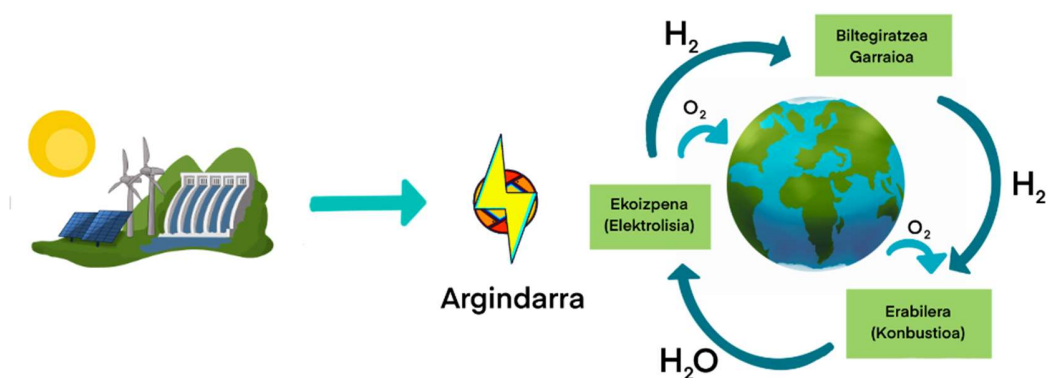
2. Taula. Ohiko erregaien energia-dentsitateak [11].

	Energia-dentsitate grabimetrikoa (MJ kg ⁻¹)	Energia-dentsitate bolumetrikoa (MJ m ⁻³)
Hidrogeno likidoa	143	10.100
Hidrogenoa (700 bar)	143	5.600
Hidrogenoa (1 atm)	143	10,7
Metanoa (1 atm)	55,6	37,8
Gas naturala (1 atm)	53,6	36,4
Gasolina	46,4	34.200
Diesela	45,4	34.600
Biodiesela	42,2	33.000

Hidrogenoarekin loturiko erreakzio kimiko garrantzitsuenak elektrolisia eta konbustioa dira. Elektrolisian argindarra uretatik pasatzen da, eta horrek ur-molekularen banaketa eragiten du. Baldintza estandarretan (25 °C eta 1 atm), uraren mol bakoitzari 285,5 kJ-eko energia eman behar zaio oxigeno- eta hidrogeno-molekulak sortzeko. Berriz, hidrogenoaren konbustioan aurkako prozesua gertatzen da, eta ura sortzen da. Bi erreakzio kimiko horiek ekuazio bakarrean adierazi daitezke:



Hidrogenoa energia-bektore modura erabiltzean, ziklo itxia eratzen duten hiru urrats nagusi egon ohi dira [12, 13] (ikus 1. irudia): ekoizpena, biltegitratzea edota garraioa eta erabilera. Hidrogenoaren ekonomiarako funtsezkoak diren hiru urrats horiek aztertuko ditugu artikuluan, aldeko eta kontrako faktoreak kritikoki analizatuz.



1. irudia. Hidrogeno berdearen ziklo itxia (Egilea: C. E. Pineda).

3. EKOIZPENA

Naturan, hidrogenoa ez da bereizitako lehengai gisa azaltzen, behintzat, erabiltzeko moduan. Adibidez, ikatzean harrapatutako gas naturalak hidrogeno kantitate txikiak eduki ditzake. 1888an, Mendeleiev-ek egin zuen horren aurkikuntza Donetsk-eko ikatz-meategi batean (Errusia) [14]. Baina, normalean, hidrogenoa beste elementu kimikoekin konbinatuta ageri ohi da, batez ere, oxigenoarekin (ura) edo karbonoarekin (hidrokarburoak). Hori dela eta, hidrogenoa lortzeko, elementu hauetatik bereizi egin behar da, molekularen arabera energia emanaz (adibidez, ikus (1) ekuazioa uraren kasurako).

3.1. Ekoizpen-metodoak

Hidrogenoa lortzeko metodo asko daude, eta garrantzitsuenak metodo termokimikoak, elektrokimikoak eta fotokimikoak dira [15]. Hidrogenoa industrialki ekoizteko, nagusiki, lau teknologia erabiltzen dira [15, 16]:

- Erreformatzea

Gaur egun, hidrogenoa sortzeko prozesurik erabiliena da erreformatzea (prozesu termokimikoa). Hidrokarburoak erabili ohi dira lehengai modura, eta horien artean gas naturala (metanoa) da ohikoena, baina biomasa ere erabil daiteke. Izatez, munduko hidrogeno-ekoizpenaren % 90-95 gas naturalaren ur-lurrun bidezko erreformatzetik dator [17]. Prozesuaren hasieran, gas naturala ur-lurrunarekin nahasten da (700-1.000 °C, 3-25 bar) [17] eta, ondoren, nikelzko katalizatzailez osoturiko ohantzean zehar pasarazten da erreakzioak errazteko. Erreformatzearen ondorioz, sintesi-gas izeneko gas-nahasketa lortzen da eta, bertan, gehienbat hidrogenoa dago, baina, baita CO₂ eta CO ere (proportzioak prozesuaren ezaugarrien arabera). Zoritxarrez, erreformatzea asko zabaldutako prozesu industrial izanik, CO₂ kantitate handiak sortzen dira.

- Elektrolisia

Hidrogenoa lortzeko prozesu elektrokimiko erabiliena, eraginkorrena eta garbiena da elektrolisia (ikus (1) ekuazioa). Aspalditik finkatutako metodo honek ez du karbonodun oinarriko lehengairik erabiltzen eta, gainera, energia berriztagarrien bitartez lortutako argindarra erabiliz gero, ez du negutegi-efektuko gasik isurtzen. Energia berriztagarrien argindarrak, erregai fosiletatik lortutakoarekin alderatuz, negutegi efektuko % 90-99 gas gutxiago askatzen du, eta kutsadura % 70-90 murrizten du [8].

- Gasifikazioa

Gasifikazioa prozesu termokimikoa da. Lehengaia karbonodun oinarriko material organikoa (biomasa, adibidez) edo fosila (ikatz, esaterako) izan ohi da. Gasifikazioan, lehengaia gasifikatzaile batekin nahasten da (ur-lurruna, oxigenoa, airea, CO₂-a), tenperatura oso altuetan

deskonposatzeko (727-1.227 °C eta 30 bar edo gehiago [18]), eta sintesi-gasa lortzen da. Prozesuan ez da konbustioa gertatzen eta, horren ondorioz, CO₂-ren igorpena murriztea espero zitekeen. Hala ere, lehengaiaren arabera CO₂ nahikoa sor daiteke.

- **Pirolisia**

Pirolisian karbonodun oinarriko materialen deskonposizio termikoa gertatzen da, tenperatura altuetan eta ingurune geldoan (oxigenorik gabekoa) [19]. Normalean, gas naturala izan ohi da lehengai, baina ikatza edo biomasa ere erabili daitezke. Prozesu termokimiko honetan, karbono solido elementala (kokea), bio-olioa eta sintesi-gasa lortzen dira. Pirolisi erreakzioa endotermikoa da (metanoaren kasuan, 74,9 kJ/mol [16]). Normalean, nikelazko katalizatzaileak erabiltzen dira erreakzioa errazteko. Horrela eginez gero, 500 °C inguruko tenperaturan metano guztia banatzen da, bestela 700 °C-etan banatuko litzateke. CO₂ igorpena lehengaiaren eta baldintzen arabera da.

3.2. Hidrogeno-motak

Hidrogeno-ekoizpenaren alderdi teknikoak garrantzitsuak badira ere, alderdi ekonomikoei eta ekologikoei ere erreparatu behar zaie. Horrela, hidrogenoari kolorea esleitu ohi zaio ekoizpen-prozesua, lehengai eta eragindako igorpenen arabera [16, 20]. Oraindik, estandarrik ezarrita ez dagoenez, bibliografian kolore asko aurkitu ditzakegu (ikus 3. Taula).

3. Taula. Hidrogeno motak eta beraien ekoizpen-ezaugarriak [15, 21, 22]. (Eraginkortasuna = (ekoiztutako hidrogenoaren energia / prozesuari emandako energia guztia) × 100).

Hidrogeno	Lehengaia	Prozesua eta eraginkortasuna	CO ₂ -ren igorpenak	Energia-iturria	Kostua (\$/kg)
Zuria	---	Berez Naturan	Ez	---	---
Berdea	H ₂ O	Elektrolisia (% 60-80)	Ez	Eguzkia Haizea	5,78-23,27 5,89-6,03
Larrosa	H ₂ O	Elektrolisia (% 60-80)	Ez	Nuklearra	4,15-7,00
Turkesa	Gas naturala Biomasa	Pirolisia (% 35-50)	Ez	Berriztagarria	1,59-1,70 1,25-2,20
Urdina	Gas naturala	Erreformatzea (%74-85)	CO ₂ harrapaketa	Gas naturala	2,27
	Ikatza Biomasa	Gasifikazioa (% 30-40)		Gas naturala	1,34-1,63 1,77-2,05
Grisa	Gas naturala	Erreformatzea (% 74-85)	Bai	Gas naturala	2,08-2,27

Gaur egun, erregai fosilak dira hidrogenoa ekoizteko lehengai nagusiak (% 96 [23]), gehienbat erreformatzearen bitartez. Erreformatzean CO₂ gasa igortzen denez, grisa deritzo hidrogeno honi (munduan ekoiztutakoaren % 92). Igorritako CO₂-a harrapatuz gero, ekoiztutako hidrogenoa urdina litzateke. Aurreikuspenen arabera, hidrogeno urdinaren garapena ezinbestekoa izango da hidrogeno-merkatu berria sortzeko. Horregatik, petrolio- eta gas-industriak hidrogeno urdina bultzatzen ari dira. Izan ere, erregai garbietarako bidea eskaintzen die, gaur egungo ekoizpen-, garraio- eta biltegiatze-instalazioak erabiliz (negozio-eredua mantenduz). Hori dela eta, CO₂-a harrapatzeko, biltegiatzeko eta balioztatzeko teknologiak garatzen ari dira [24, 25], eta jadanik planta petrokimiko batzuetan inplementatzen hasiak dira.

Hidrogeno turkesa hidrokarburoen pirolisitik lortzen da, eta hidrogeno berdea, aldiz, uraren elektrolisiaren bitartez. Bietan energia berriztagarriak erabili daitezke, eta ez da eguratsera CO₂-a isurtzen. Hidrogeno turkesa etorkizunerako interesgarria izan daiteke, pirolisiak sortutako karbono solidoa era egokian kudeatzen bada. Berriz, hidrogeno berdeak ez du ingurumenean eragin negatibo

nabarmenik. Zoritxarrez, hidrogeno turkesa eta berdearen gaur egungo ekoizpena oso txikia da (% 1 baino gutxiago [26]). Izan ere, ekoizpen-prozesu horien eraginkortasuna txikia da (ikus 3. taula).

2020an ekoiztutako hidrogenoaren batezbesteko kostua 2,52 €/kg izan zen, eta 2030erako 1,81 €/kg ingurura txikitzea espero da. 3. taulan, hidrogeno mota bakoitzaren ekoizpen-kostuak ageri dira. Balio hauetan gorabehera handiak daude energia-prezioen hegakortasunagatik. Are gehiago, ez dugu ahaztu behar karbonoaren gaineko zergek zuzenean eragiten dutela hidrogenoaren kostuan. Biomasaren pirolisia eta ikatzaren gasifikazioa prozesu merkeenak dira, energia-iturriak eta lehengaiak merkeak direlako. Erreformatzearen ekoizpen-kostuak pixka bat garestiagoak dira. Azkenik, nahiz eta energia-iturriak eta lehengaiak merkeak izan, hidrogeno berdearen ekoizpen-kostuak oso altuak dira (ikus 3. taula) [15].

Urtez urte hidrogenoaren munduko ekoizpena handituz doan arren, oraindik oso txikia da. Adibidez, 2020. urtean, hidrogeno-ekoizpena 110 Mt izan zen, baina 2050 urterako 530 Mt ekoiztea espero da [16]. 2020ko ekoizpen hori munduko energia-eskaria asetzera bideratuko bagenu, soilik % 8 inguru asetuko luke [22] (Egitan, ehuneko hori txikiago litzateke, ekoizpen kimikoak beste era batera gauzatu behar zirelako eta erabilerarako hidrogenoa metatu eta garraitu behar zelako).

4. HIDROGENOAREN BILTEGIRATZEA ETA GARRAIOA

Argindarraren energia eraginkorki biltegitratzea da elektrifikazioaren arazo handienetarikoa. Gaur egun, argindarra zuzenean biltegitratzea ez da bideragarria. Hori dela eta, argindarra energia hidrauliko edo energia fisiko-kimiko (bateriak eta kondentsadoreak) bihurtu ohi da. Horrela, beharra dagoenean, argindarra berreskuratzea egin daiteke. Hidrogenoa da argindarra biltegitratzeko beste aukera interesgarria.



2. irudia. Hidrogenoaren ekoizpena lehengaiaren arabera (berdea: CO₂-ren igoerpenik gabe, eta grisa: CO₂-ren igoerpenarekin), garraioa eta biltegitratzea.

4.1. Biltegitratzea

Orain arte, hidrogenoa biltegitratzeko behar handirik ez zegoen. Izan ere, industria kimikoak, hidrogenoaren ekoizle nagusiak, tokian bertan ekoiztu eta kontsumitzen baitzuen hidrogenoa. Halabaina, ekoizpena eta kontsumoa leku desberdinetan gertatzea ahalbidetu behar da hidrogenoaren ekonomia martxan jartzeko. Are gehiago, energia-iturri berriztagarrien bidezko ekoizpena aldizkakoa izan ohi denez, soberakinak hidrogeno modura biltegitratzeko gordailuak behar dira. Gainera, hidrogeno-gasa oso arina denez (baldintza normaletan, kilogramo bat hidrogenok 11 m³ behar ditu), bere dentsitatea handitu egin behar da. Hortaz, hidrogenoa biltegitratzeko estrategia seguru, eraginkor eta merkeak garatzea funtsezkoa da [27].

4.1.1. Biltegitratze fisikoa

Biltegitratze fisikoan, hidrogenoa molekula moduan gordetzen da, fluido eran (gas, likido edo fluido superkritiko). Horretarako, presioa edota tenperaturarekin jokatzen da (ikus 2. irudia).

- Gas-konprimaketa

Giro-tenperaturan, hidrogenoaren presioa handituz gero, bere dentsitatea handitzen da. Baina, puntu kritikoaren gainetik egoteagatik, ezinezkoa da presioa handituz hidrogenoa likido bihurtzea (ikus 1. taula). Hori dela eta, konprimaketaren bitartez lortu daitezkeen dentsitateak mugatuta

daude. Eskala txikian, hidrogenoa giro-tenperaturan eta presio altuan (1.000 bar-eraino heldu daitekeena) biltegitratzen da [28]. Adibidez, 700 bar-etan, 42 kg/m^3 -ko dentsitatea lortzen da. Hidrogeno kantitate handiak biltegitratzeko, lur azpiko biltegiak erabil daitezke presio baxuagoekin (50-200 bar) [29].

- Kriogenizazioa (likidoa)

Egurats-presioan, $-252,88 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra jaitsi behar da hidrogenoa likidotzeko (ikus 1. taula). Hidrogenoak likido modura lortzen du dentsitate handiena (71 kg/m^3). Zoritxarrez, hidrogeno kriogenikoan metatutako energiaren % 40 galtzen da hozte- eta konpresio-prozesuan (hidrogeno konprimatuan, aldiz, % 10) [30]. Hidrogenoa biltegitratzeko teknikarik eraginkorrena, konplexuena eta garestiena da.

- Hidrogeno krio-konprimatua

Aurreko bi estrategiak bateratu daitezke, presioan eta tenperaturan aldi berean eraginez. Horrela, fluido superkritikoa lortu daiteke, dentsitate handienarekin (80 kg/m^3).

Biltegitratze fisikoa teknikarik garatuena da, baina energia asko kontsumitzen du, presioa eta tenperatura doitu behar direlako. Bestalde, presio handietan lan egitea arriskutsua izan daiteke. Izan ere, hidrogenoa oso sukoia da, eta leherketak eragin ditzake. Hidrogeno-gasa biltegitik ihes eginez gero, oso bizkor hedatzen da ingurunean. Gainera, likido egoeran isurtzen bada, epe labur batez airea baino astunagoa den hodei sukoia eratzen du.

4.1.2. Materialetan oinarritutako biltegitratzea

Hidrogenoa hainbat solido eta likidotan biltegitratu daiteke xurgapen-askapen zikloak burutuz [31]. Horrelako materialak seguruagoak izaten dira eta, gainera, energia-dentsitate (grabimetrikoko eta bolumetrikoko) handiagoak lortzen dituzte. Material hauek honako ezaugarriak izan behar dituzte: itzulgarritasuna, zinetika azkarra, giro-baldintzetan lan egitea, merkeak izatea eta toxikoak ez izatea. Materialetan bi biltegitratze-mekanismo nagusi daude: adsortzio fisikoa eta absortzio kimikoa.

- Adsortzio fisikoa

Adsortzioan, hidrogeno molekulak solidoen gainazaletan pilatzen dira, van der Waals lotura ahulen ondorioz ($4\text{-}10 \text{ kJ/mol}$). Horrek zinetika azkarra eta itzulgarria ahalbidetzen du [32]. Lau material porotsu erabili ohi dira:

- **Karbono-egiturak:** Material hauen karbonoek egitura hexagonalak izaten dituzte (grafenoa, karbono-nanohodiak, etab.) edo irregularrak (ikatz aktibatua, karbono-aparra, etab.). Karbono-egituretan, gehienez % 8ko hidrogeno-masa pilatu daiteke [30].
- **Zeolitak:** Hiru-dimentsiotan antolaturiko aluminosilikatozko egitura kristalinoak dira (adibidez, ZSM-5 eta Na-LEV). Egitura ordenatua daukate, poro-tamaina uniforme eta gainazal-azalera espezifiko altua ($1.000 \text{ m}^2/\text{g}$ -rainokoa). Masan gehienez pilatu dezaketen hidrogenoa % 9,2ra ailegatu daiteke [30].
- **Egitura metal-organikoak** (ingelesez, Metal Organic Frameworks, MOF): Material kristalinoak dira (adibidez, MOF-5 eta MOF-177). Hidrogenoa kristal-egituran zehar barreiatzen da eta, bertan, gehienez masan % 7,5a metatzen da [32].
- **Polimero organikoak:** Material kristalino hauek arinak dira, C, H, N eta O atomoez osaturik daudelako. Gainera, gainazal-azalera espezifiko altua daukate, eta oso egonkorak eta merkeak dira (adibidez, COF eta PAF). Gehienez, masan % 10eko hidrogeno-kantitatea biltegitatu dezakete [32].

- Absortzio kimikoa

Hidrogenozko molekulak materialen gainazalera ailegatzean, atomo moduan disoziatzen dira, eta difusioaren bidez materialaren egituran hedatzen dira lotura kimikoak eratuz [32]. Lotura kimikoaren arabera, honako talde bi hauetan sailkatzen dira:

- **Hidruro metalikoak:** Hidrogenoa eta metalen arteko elkarketa bitarra eratzen da (esaterako, MgH_2). Masan pilatu dezaketen hidrogenoa % 12,6raino ailegatu daiteke [30].
- **Hidruro konplexuak:** Li, B eta Al metal arinak eta hidrogenoaren arteko elkarketa tetraedrikoak dira (esaterako, LiBH_4 , NaAlH_4 eta LiNH_2). Hidruro hauek hiru taldetan sailkatzen dira [32]: borozko hidruroak (masan % 18), alanatoak (masan % 10,6) eta amidak (masan % 10,4).

4. Taula. Hidrogenoa biltegitatzeko metodoen ezaugarri nagusiak [33].

Biltegitratzeko metodoa	Masa- proportzioa (%)	Biltegitratze- /bihurketa- temperatura (°C)	Presioa (Mpa)	Dentsitatea (kg H ₂ /m ³)	Kostua (\$/kg H ₂)
Altzairuzko gordailua	< 1	20-40	15	10,9	0,19-0,24
Metalezko eta konpositezko gordailua	5-7	20-40	35	23	0,22-0,27
Konpositezko gordailua	10,5-13,8	20-40	70	40	-
Gordailu kriogenikoa (hidrogeno likidoa)	< 7,1	-252	0,1	70,8	1,67-2,04
Hidruro organiko likidoak	< 7,2	20-40/180-280	0,1-1	70	-
Hidruro metalikoak	1,5-8	20-40/100-300	0,1-5	110	-
Amoniako likidoa	17	25/400-600	1	107	0,91-1,09

Ez dago biltegitratze egokienik aplikazio guztietarako [34]. Aitzitik, biltegitratze-sistema desberdinak garatzen ari dira aplikazioen berezitasunen arabera. 4. taulan, biltegitratze-mekanismo garrantzitsuenen ezaugarriak alderatzen dira. Hidrogeno likidoa eta gas-biltegitratzea dira teknologiarik helduenak epe laburreko biltegitratzerako. Baina, likidoak energia-eraginkortasun txikia du eta gas-biltegitratzeak, aldiz, bolumen handiak behar ditu dentsitate baxuagatik. Materialetan oinarritutako biltegitratze-aukerek dentsitate grabimetriko eta segurtasun handiagoak dituzte. Hori dela eta, epe luzerako biltegitratze-aukeratzat hartzen dira. Hala ere, oraindik garapen-fasean daude, eta denbora gehiago behar izango dute epe luzerako irtenbide bideragarriak direla frogatzeko. Munduan zehar lur azpiko biltegien proiektuak martxan daude, energia berriztagarrien ekoizpena sare elektrikoarekin era errazagoan lotzeko. Baina, teknologia merke hau garapen-prozesuan dago, eta etorkizun hurbilean ez da eskuragarri egongo [35].

4.2. Garraioa

Etorkizuneko hidrogeno-kontsumitzaileak sakabanatuta egongo direnez, garraio-azpiegitura eraginkor eta seguruak diseinatu eta inplementatzeari ekin zaio. Hidrogenoaren garraio-teknologia garrantzitsuenak honako hauek dira [36]:

- Gorpil bidezko garraioa

Gaur egun, hidrogeno gehiena kamioien, trailerren edo trenen bidez garraiatzen da. Horretarako, gordailu bereziak erabiltzen dira. Ohikoena, hidrogenoa gas- edo likido-egoeran eramatea da, baina materialetan ere garraiatu daiteke. Gorpil bidezko garraioan, kantitate txikiak (~ 200-1.000 kg) eraman ohi dira distantzia txikietan (100-500 km).

- Gasbidea

Hidrogeno-gasaren kantitate handiak gasbideen bitartez garraiatu daitezke presiopean, metanoa bezala. Zoritxarrez, gaur egungo hoditeriak ez daude prestatuta hidrogeno bezalako molekula txikia eta arina garraiatzeko. Gaur egungo metano-gasbideetan, hidrogenoa sartzeko saiakerak egin dira (metanotan % 20 gehienez), baina honek ihesak areagotu ditu [37]. Gasbideen bitartez, hidrogenoa distantzia handietan zehar garraia daiteke (gehienez 1.000 km). Horretarako gasbidea teknologia eraginkorra da, baina azpiegitura berriak eraiki behar dira espresuki hidrogenorako, eta hori oso garestia da.

- Itsasontzia

Itsasontzien bitartez ere hidrogeno kantitate handiak garraiatu daitezke (~ 2.000 tona), gas, likido edo materialetan. Normalean, kontinenteen arteko garraioa izaten da (1.000 km baino gehiago). Azpiegitura berririk ez denez behar, itsasontzien garraioa gasbideen bidezkoa baino merkeagoa izaten da.

Garraio-teknologia aukeratzean, gehienbat bi faktore hartu behar dira kontuan, hidrogeno-kantitatea eta distantzia (ikus 5. taula).

5. Taula. Hidrogeno garraiatzeko teknologia nagusiak [38, 39, 40, 36].

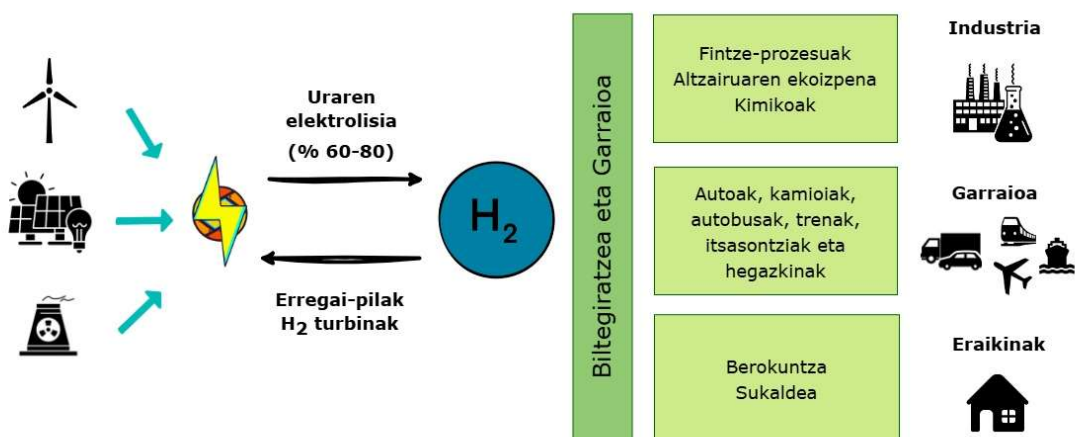
Egoera	Baldintzak	Distantzia maximoa	Garraio-mota
Gasa	27 °C, 150-300 bar	500 km	Hoditeria eta trailerra
Likidoa	-253 °C, 248 bar	1.000 km	Trena, trailerra eta itsasontzia
Materialetan	25 °C, 1 bar	> 1.000 km	Trena, kamioia eta itsasontzia

Hidrogenoaren ihesa arrisku-faktore handia da garraioan. Izan ere, hidrogenoaren sukoitasun-tartea zabala da, airean % 4-75eko kontzentrazioa. Gainera, hidrogeno gasa oso arina denez, biltegitarte-/garraio-sistematik ingurunera oso erraz askatzen da. Eta, gas guztien artean, eroankortasun elektriko baxuenetarikoa izanik (~ 0 S/m), bere presentzia detektatzea oso zaila da. Segurtasun faltsuaren sentrazioa ekiditeko, garraio-sistemak segurtasun-neurri handiekin diseinatu behar dira [41].

5. HIDROGENOAREN APLIKAZIOAK

Hidrogenoaren erabilera bizitzako arlo guztietara zabaltzeko asmoak aspaldikoak dira [28]. Izan ere, hidrogenoaren bidez, energia asko biltegitatu daiteke epe luzean, bateriekin edo energia

termikoarekin baino gehiago. Gainera, iturri berriztagarrietatik lortutako argindarrarekin ezin dira elikatu aplikazio guztiak (adibidez, energia-kontsumo handiko prozesu industrialak, fundizioak bezalakoak). Eremu horietan hidrogenoak etorkizun handi eduki dezake. Berez, hidrogenoaren erabilpen-arlo nagusiak hiru izan daitezke: industria, garraioa eta eraikinak (ikus 3. irudia).



3. irudia. Hidrogenorako aurreikusitako erabilerak [8].

- Industria

Industria kimikoan hidrogenoa aspalditik erabiltzen da, nagusiki erregai fosilei sufrea kentzeko, ongarriak ekoizteko eta metanola egiteko. Baina, purutasun handiko hidrogenoa (> % 99,999) industriako beste erabilera batzuetan ere beharrezkoa da, adibidez, industria farmazeutikoan, elikaduran eta elektronikan. Etorkizunean, gas naturala energia elektrikoarekin ordezkatu nahi da. Hori posiblea ez den jardueretan hidrogenoa erabiliko da gas naturalaren ordeztasun, siderurgian, beiragintzan, tutugintzan eta abar [39].

- Garraioa

Hidrogenoa turbinetan eta barne-errekuntzako motorretan erre daiteke higidurarako potentzia lortzeko. Horrek kotxeak, itsasontziak eta hegazkinak mugiarazi ditzake. Esan dugun moduan, hidrogenoak energia-dentsitate grabimetrikoko handiena dauka (ikus 2. taula), eta hori oso egokia egiten du garraiorako, baina bere energia-dentsitate baxua oztopo bat da.

Gaur egun, ordea, erregai-pilak erabiltzen dira, hidrogenoa argindar bihurtzeko eta motor elektrikoak eragiteko. Zoritzarrez, erregai-pila darabilen kotxearen (ingelesez, *Fuel Cell Electric Vehicle*, FCEV) eraginkortasuna txikia da. Hau da, FCEV delakoak jatorrizko energia-iturritik % 33 baino ez du aprobetxatzen (baterien bidez dabilen kotxe baten kasuan, % 77 ingurukoa da)

[42]. Etorkizunean, garraio astuna hidrogenoarekin edota bateriekin elikatuko dela ematen du. Baina, oraindik ez dago argi “lehia” hau zeinek irabaziko duen (ikus 6. taula).

6. Taula. Hidrogenoa eta baterien arteko alderaketa garraio astunean.

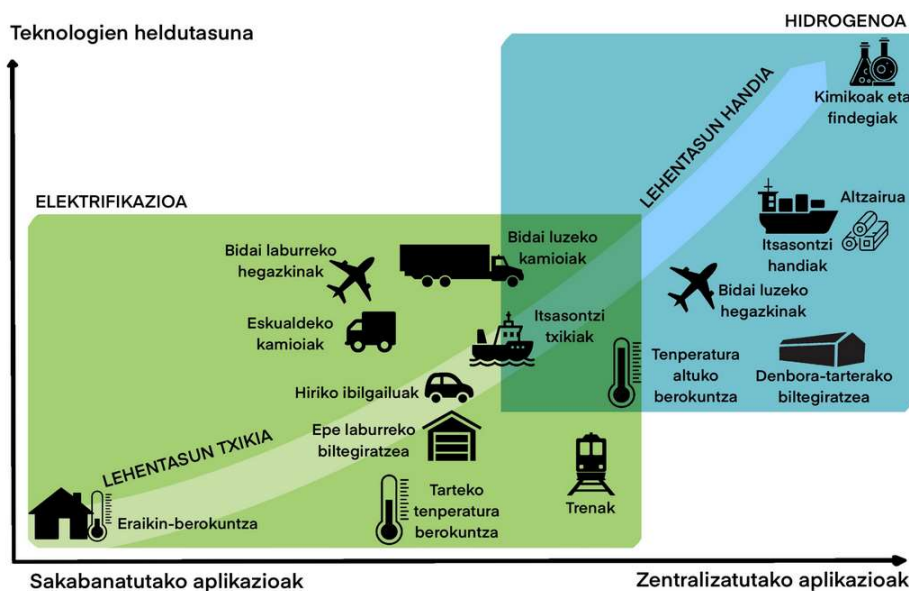
Parametroak	Hidrogenoa	Bateriak
Ekipoaren kostua	Oso handia	Handia
Erregaiaren kostua	Garestia	Merkea
Egin daitezkeen kilometroak	Asko	Gutxiago
Kargatzeko denbora	Gutxi	Asko
Ekipoa eguneratzea	Ez	Bateria-multzoa aldatu beharra dago
Eraginkortasun energetikoa (elikatutako energiarekiko)	% 60-70	% 85-90
Igorpenak erabileran	Ura	Ez

Barne-errekuntzako motorretan edo turbinetan hidrogenoa erretzean, NO eta NO₂ gasak askatzen dira (NO_x gasak deiturikoak) [43]. NO gasa erraz eratzen da, eta atmosferako oxigenoarekin kontaktuan jartzean, NO₂ gasa sortu daiteke. NO₂ gasak ozonoa eta PM_{2.5} partikula finak eratzen ditu, pertsonen osasunerako eta ingurunerako kaltegarria izanik [43]. Hortaz, hidrogeno-teknologiak garatzeko, NO_x gasen eraketa eta igorpena murrizteko estrategiak lantzen ari dira.

- Eraikinak

Eraikinetan energia asko kontsumitzen da klimatizazioan, uraren beroketan eta jakiak prestatzean [44]. Hidrogenoa eraikinetako behar horiek asetzeko ere erabili daitekeela uste da. Horretarako, gaur egun hainbat estrategia frogatzen ari da: hidrogeno-galdarak berokuntzarako, erregai-pilak beroa eta argindarra sortzeko, gas bidezko bero-ponpak klimatizaziorako, eta abar [45]. Gaur egungo azpiegiturak aldatu gabe, hidrogenoa gas naturalarekin nahastuta erabili daiteke (gehienez % 20ko proportzioan). Hala ere, kasu gehienetan, azpiegitura berriak behar dira, hidrogenorako bereziki prestatuak. Gauzak horrela, hidrogenoak eraikinetan izango duen garrantzia bere azken prezioaren araberakoa izango da.

Laburbilduz, deskarbonizatzekeo estrategiaren barruan, badaude hainbat arlo elektrifikatu daitezkeenak (ikus 4. irudia) [46]. Hidrogenoa eraikin-berokuntzan, energia-biltegitratze laburrean edo hiri-ibilgailuetan erabili badaiteke ere, badirudi ekonomikoki ez dela interesgarria, bere eraginkortasun baxuagatik. Orduan, aplikazio horietan argindarra erabiliko dela uste da. Beste arlo batzuk, aldiz, ezin dira elektrifikatu, eta deskarbonizatu ahal izateko hidrogenoa behar izango da, esaterako, altzairugintza, itsasontzi handiak edo industria kimikoa [47]. Hala ere, hidrogenoa eta argindarra indiferenteki erabili ditzaketen aplikazio-eremu batzuk daude, adibidez, bidai luzeko kamioiak, itsasontzi txikiak edo tenperatura altuko berokuntza. Zalantzazko kasu hauetan denborak esango du zein estrategia nagusituko den.



4. irudia. Argindarra eta hidrogenoaren erabilera-esparruak [47] (Egilea: C. E. Pineda).

6. POLITIKA ETA EKONOMIA

Zalantzarik gabe, hidrogenoaren eredu ekonomiko-energetikoaren etorkizuneko bilakaera faktore askoren menpe dago, eta horien artean alderdi ekonomikoa oso garrantzitsua da. Hidrogenoaren ekonomiak ekoizpen-, biltegiatze-, garraio- eta erabilpen-kostuen menpekotasun handia izango du. Hasteko, hidrogenoa modu lehiakorrean ekoiztu behar da karbono-igorpenik gabe. Gauzak horrela, 3. taula begiratzea besterik ez dago hidrogeno berdearen ekoizpena gainerakoekin alderatuta oso garestia dela ikusteko. Hidrogenoaren erabilera handitzen den neurrian eta teknologiaren garapenarekin, 3. taulako ekoizpen-kostu horiek txikitzen joatea espero da. Aldi berean, biltegiatze-, garraio eta

erabilpen-kostuen txikitzea ere gertatzea espero da. Baina ez dago ziurtatuta horrela gertatuko denik. Gainera, ez dugu ahaztu behar eredu ekonomiko orekatua lortzeko sare-elektrikoa indartzea funtsezkoa dela [8].

Politika eta erregulazioa eragile oso garrantzitsuak dela energia kontuetan. Europar Batasunak hidrogeno berdearen aldeko apustua egin du, hemendik 2050. urterako karbono neutraltasuna helburu duen Pariseko Itun Berdearen baitan [48]. Gauzak horrela, *Next Generation* diru-funtsen zati handia hidrogeno berdea ekoizteko proiektuetarako bideratu da. Bestalde, gaur egungo egoera geopolitikoak ere eragin handia dauka. Esaterako, REPowerEU planak helburu eta estrategia berriak garatu ditu, Errusiako erregai fosilen menpekotasunetik aldentzeko xedearekin. Beraz, hurrengo urteetan hidrogenoaren bideragarritasuna administrazioen laguntzei esker gertatuko da, instalazio eolikoekin eta eguzki-energiarekin gertatu zen moduan. Etorkizunean, ikusteko dago ea hidrogenoak berak, laguntza publikorik gabe, aurrera egin dezakeen ala ez.

Oraingoz, hidrogenoa nagusiki industrian erabiltzen da, erregai fosiletatik eratorrita, baina hurrengo hamarkadetan garraioan eta eraikinetan erabiltzen hastea espero da [49]. Herrialde askok hidrogenoaren ekonomiaren garapenerako bide-orriak eta plan nazionalak garatu dituzte [50], 2030etik aurrera aplikatzekoak (adibidez, Hidrogenoaren Euskal Estrategia [4]). Hala ere, aurretik merkatua prestatu behar da (eskaera handitu eta hiritarrei hidrogeno-azpiegiturak erabiltzeko erraztasunak eman).

Amaitzeko, gizartearen premiak ere kontuan hartu behar dira. Dimentsio ekonomiko-energetikoaz gain, ingurumenekoa eta soziala ere oso garrantzitsuak dira. Adibidez, hidrogenoaren aplikazio berriek giza jardueretan eta kulturen eragingo dituzten aldaketak oso ondo aztertu behar dira aldeztu aurretik.

7. ONDORIOAK

Artikuluaren zehar ikusi dugunez, hidrogenoaren teknologia garapen-prozesuan dago. Mota askotako arazoak (teknikoak, ekonomikoak, sozialak, eta abar) gainditu behar izango dira indarrean jartzeko. Aditu batzuen ustez, ikerketa eta diruaren bitartez arazo horiek gainditu ahal izango dira, baina beste batzuk ez dira hain optimistak. Hurrengo puntuetan, ondorio nagusiak jasoko ditugu:

1. Gaur egun, energia-iturri kutsakorren erabateko ordezkapena ezinezkoa da. Momentu honetan, hidrogenoaren erabilera-arloak mugatuak dira. Gauzak horrela, hidrogenoa merkea eta garbia

izatea ezinbestekoa da modu mailakatuan merkatuan sartzeko. Horretarako, hidrogenoarekin loturiko teknologiak gehiago garatu behar dira, eta azpiegitura energetikoak egokitu.

2. Gas naturalaren erreformatzea poliki poliki baztertu, eta garbiagoa den elektrolisiaren aldeko apustua egiten ari da. Elektrolisia ekoizpen-metodo garbia da, eta energia berriztagarrien aldizkakotasunaren arazoa konpon dezake. Izatez, hidrogenoa alternatiba interesgarria da eguzkitik eta haizetik lortutako argindarraren gehiegizko ekoizpena aprobetxatzeko, energia-sistemetan malgutasun handiagoa ahalbidetuz. Gainera, elektrolisian oinarritutako eguzki- edo haize-sistemak sare-elektrikotik urrun dauden tokietan erabili daitezke energia-eskaerak asetzeko.

3. Gaur egun, hidrogenoa gas- eta likido-egoeran biltegitratzea ohikoa da. Etorkizunean, materialetan biltegitratzea estrategia nagusia izan daitekeela ematen du. Baina, horretarako, teknologia garapen-fasetik atera eta merkatura jauzi egin behar du, oztopo tekniko guztiak gaindituz.

4. Hidrogenoa garraiatzeko hainbat teknologia daude garapen-prozesuan. Teknologia hauen erabilera beraien aplikazioaren araberakoa da, baina eraginkortasuna, segurtasuna eta kostua ere faktore garrantzitsuak dira. Garraio-teknologiak hidrogenoaren ekonomiarekin batera garatu eta hobetu behar dira.

5. Hidrogeno-teknologiek jadanik aplikazio ugari dituzte hidrogenoa energia-iturri modura erabiltzeko. Teknologia horien artean honako hauek ditugu: erregai-pilak, hidrogenoaren errekontza, prozesu industrialak eta energia-biltegitratzea sarearen orekarako. Aplikazioetan ere kostua eta eraginkortasuna faktore oso garrantzitsuak dira beraien hedapenerako.

6. Hidrogeno-teknologia guztiek energia-galerak eta hidrogeno-ihesak dituzte. Horien ebaluazio kuantitatiboa egitea zaila izaten da. Izan ere, kasuan kasuko galerak eta ihesak ageri dira, eta batzuetan teorikoki kalkulaturako balioetatik urruntzen dira. Gauzak horrela, hidrogenoaren etorkizuneko aplikaziorako galerak eta ihesak txikitzea funtsezko arazo teknikoa da.

7. Erakunde publikoen hidrogenoaren aldeko laguntza ekonomikoen eraginez (karbonoaren gaineko zergak), hurrengo urteetan hidrogenoaren erabilera sektore askotan areagotuko dela uste da. Horri esker, hidrogeno berdearen ekoizpena eta benetako erabilera abiatuko dela ematen du. Hidrogenoak hiru esparru nagusietan lehiakorra izateko aukera dauka. Alde batetik, sare-elektrikoak berriztagarrien ekoizpena xurgatzen ez duenean, hidrogeno moduan gorde ahal izango

da. Beste aldetik, elektrifikatzeko sailak diren esparruak deskarbonizatzen lagundu ahal izango du. Azkenik, hidrogenoak erregai fosilak ordezkatzeko ditzake karbonorik gabeko lehengai modura produktu kimikoak eta erregaiak ekoizteko.

8. Hidrogenoaren ekonomia benetan hedatzeko inbertsio handiak behar dira erakunde publikoetatik eta eragile industrialetatik. Aldi berean, ikertzaile akademikoek, industria-eragileen eta erakunde publikoen arteko lankidetzaren sinergikoa ezinbestekoa da dauden oztopoak gainditzeko eta hidrogenoaren integrazio zabala ahalbidetzeko. Hala ere, horrek ez du ziurtatzen oztopo guztiak gaindituko direla eta hidrogenoaren erabilera gizartean zabalduko dela.

9. Amaitzeko eztabaida garrantzitsua mahai gainean jarri behar dela uste dugu. Izatez, gaur egungo gizartearen kontsumo-ohiturek baliabideen etengabeko hazkundera eskatzen dute. Zoritxarrez, planeta finitu batean bizi gara, eta energia-kontsumo hazkundera etengabea ez da inolaz ere jasangarria. Beraz, arazo energetikoa ez da soilik teknologikoa. Horregatik, erregai fosilen ordezkatzeko hutsetik haratago, etorkizunerako desazkundera jasangarria proposatzen ari dira ikertzaile batzuk [51]. Beste ikerlari batzuk jarrera baikorragoa daukate, eta fusioan energia-iturri amaigabea izango dugula sinesten dute. Ikusteko dago zer gertatuko den.

Gauzak horrela, zaila egiten da etorkizun energetikoa aurreikustea. Ez du ematen teknologia bakarra nagusituko dela. Orduan, aplikazio bakoitzean, ekonomikoki errentagarria eta ingurunearekiko erasokorra ez den teknologia ezarriko da. Aplikazio batzuetan, teknologia bat baino gehiago batera erabiltzea ez dugu baztertu behar. Hortaz, energia-teknologiaren pot-pourri bat izango dugula uste dugu.

OHARRA

Artikulu hau L. Casas-en Ingeniaritza Kimikoko Gradu Amaierako Lanean oinarritzen da.

3. BIBLIOGRAFIA

- [1] GATES, J. E., TRAUGER, D. L. eta CZECH, B. (ed.). 2014. *Peak oil, economic growth and wildlife conservation*. Springer, New York.
- [2] RITCHIE, H., ROSADO, P. eta ROSER, M. 2024. «Energy Production and Consumption». *Our World in Data*. Eskuragarri: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> (azken kontsulta: 2024-12-06).
- [3] GANDÍA, L. M., ARZAMENDI, G. eta DIÉGUEZ, P. M. 2013. «Renewable Hydrogen Energy: An Overview». *Renewable Hydrogen Technologies*, Elsevier, Amsterdam, 1-17.

- [4] EKONOMIAREN GARAPEN, JASANGARRITASUN ETA INGURUMEN SAILA (EUSKO JAURLARITZA) eta ENERGIAREN EUSKAL ERAKUNDEA. 2021. *Hidrogenoaren Euskal Estrategia*. Eskuragarri: <https://www.eve.eus/conoce-la-energia/la-energia-en-euskadi/Estrategia-Hidrogeno.aspx> (azken kontsulta: 2024-12-06).
- [5] EUROPAR KOMISIOA. 2020. *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Eskuragarri: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf (azken kontsulta: 2024-12-06).
- [6] VAN RENSSSEN, S. 2020. «The hydrogen solution?». *Nat. Clim. Change*, **10**, 799-801.
- [7] VILLAMOR, E. eta ALBIZU, U. 2021. «Hidrogeno berdea: alde ala kontra?». *Berria*, 2021/04/14.
- [8] SHARMA, S., AGARWAL, S. eta JAIN, A. 2021. «Significance of Hydrogen as Economic and Environmentally Friendly Fuel». *Energies*, **14**, 7389.
- [9] KEÇEBAŞA, A. eta KAYFECİB, M. 2019. «Hydrogen properties». *Solar Hydrogen Production. Processes, Systems and Technologies*. Academic Press, Londres, 3-29.
- [10] FANG, H. 2021. «Challenges with the ultimate energy density with Li-ion batteries». *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **781**, 042023.
- [11] MAZLOOMI, K. eta GOMES, C. 2012. «Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges». *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **16**, 3024-3033.
- [12] AYASTUY, J.L. 2008. «Hidrogeno energia-bektorea I. Iturriak eta ekoizpena». *EKAIA*, **21**, 65-88.
- [13] AYASTUY, J.L. 2009. «Hidrogeno energia-bektorea II. Gordetzea eta energia-lorpena». *EKAIA*, **22**, 40-55.
- [14] ZGONNIK, V. 2020. «The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review». *Earth-Sci. Rev.*, **203**, 103140.
- [15] NIKOLAIDIS, P. eta POULLIKKAS, A. 2017. «A comparative overview of hydrogen production processes». *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **67**, 597-611.
- [16] HERMESMANN, M. eta MÜLLER, T. 2022. «Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems». *Prog. Energy Combust. Sci.*, **90**, 100996.
- [17] GONDRA, A., ARANETA, M. eta CAMPILLO-ROBLES, J. M. 2021. «Gaur egungo hidrogeno-ekoizpena: metanoaren ur-lurrin bidezko erreformatzea». *EKAIA*, **41**, 253-273.
- [18] BREAUULT, R. W. 2010. «Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies». *Energies*, **3**, 216-240.

- [19] SCHNEIDER, S., BAJOHR, S., GRAF, F. eta KOLB, T. 2020. «State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas». *Chem. Bio. Eng. Rev.*, **7**, 150-158.
- [20] AJANOVIC, A., SAYER, M. eta HAAS, R. 2022. «The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen». *Int. J. Hydrog. Energy*, **47**, 24136-24154.
- [21] ZHANG, B., ZHANG, S.-X., YAO, R., WU, J.-S. eta WU, Y.-H. 2021. «Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges». *J. Electron. Sci. Technol.*, **19**, 100-080.
- [22] AGYEKUM, E., NUTAKOR, C., AGWA, A. eta KAMEL, S. 2022. «A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation». *Membranes*, **12**, 173.
- [23] HOWARTH, R.W. eta JACOBSON, M. Z. 2021. «How green is blue hydrogen?». *Energy Sci. Eng.*, **9**, 1676-1687.
- [24] VOLDSUND, M., JORDAL, K. eta ANANTHARAMAN, R. 2016. «Hydrogen production with CO₂ capture». *Int. J. Hydrog. Energy*, **41**, 4969-4992.
- [25] KOVAČ, A., PARANOS, M. eta MARCIUŠ, D. 2021. «Hydrogen in energy transition: A review». *Int. J. Hydrog. Energy*, **46**, 10016-10035.
- [26] IEA. 2022. *World Energy Outlook 2022*. Eskuragarri: <https://www.iea.org/reports/hydrogen> (azken kontsulta: 2024-12-06).
- [27] TARHAN, C. eta ÇIL, M. A. 2021. «A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods». *J. Energy Storage*, **40**, 102-676.
- [28] STOLTEN, D. eta EMONTS, B. 2016. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, bol. 1. Wiley-VCH, Germany.
- [29] MUHAMMED, N.S., HAQ, B., SHEHRI, D. A., AL-AHMED, A., RAHMAN, M.M. eta ZAMAN, E. 2022. «A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook». *Energy Reports*, **8**, 461-499.
- [30] MORADI, R. eta GROTH, K. M. 2019. «Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis». *Int. J. Hydrog. Energy*, **44**, 12254-12269.
- [31] GUPTA, R., BASILE, A. eta VEZIROGLU, T. 2016. *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure*, bol. 2. Elsevier, Cambridge.
- [32] AMIRTHAN, T. eta PERERA, M. 2022. «The role of storage systems in hydrogen economy: A review». *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 104-843.
- [33] KINDRA, V., MAKSIMOV, I., OPARIN, M., ZLYVKO, O. eta ROGALEV, A. 2023. «Hydrogen Technologies: A Critical Review and Feasibility Study». *Energies*, **16**, 5482.

- [34] HASSAN, I. A., HAITHAM, S. R., SALEH, M. A. eta DANIEL, H. 2021. «Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives». *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **27**.
- [35] TARKOWSKI, R. 2019. «Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects». *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **105**, 86-94.
- [36] YANG, M.; HUNGER, R.; BERRETTONI, S.; SPRECHER, B. eta WANG, B. 2023. «A review of hydrogen storage and transport technologies». *Clean Energy*, **7**, 190-216.
- [37] SÁNCHEZ-LAÍNEZ, J., CEREZO, A., STORCH, M., ARAGÓN, J., FERNÁNDEZ, E., MADINA, V. eta GIL, V. 2024. «Enabling the injection of hydrogen in high-pressure gas grids: Investigation of the impact on materials and equipment». *Int. J. Hydrog. Energy*, **52**, 1007-1018.
- [38] VALVERDE, S. M. F. 2002. «Hydrogen as energy source to avoid environmental pollution». *Geofísica Internacional*, **41**, 223-228.
- [39] ZHANG, L., JIA, C., BAI, F., WANG, W., AN, S., ZHAO, K., LI, J. eta SUN, H. 2024. «A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies». *Fuel*, **355**, 129455.
- [40] ACEVES, S., MARTINEZ, J., GARCIA, O. eta ESPIONAS, F. 2001. «Insulated Pressure Vessels for Vehicular Hydrogen Storage: Analysis and Performance Evaluation». *American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 11-16.
- [41] DEPKEN, J., DYCK, A. eta ROß, R. 2022. «Safety Considerations of Hydrogen Application in Shipping in Comparison to LNG». *Energies*, **15**, 3250.
- [42] ALBATAYNEH, A., JUAIDI, A., JARADAT, M. eta MANZANO-AGUGLIARO, F. 2023. «Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview». *Energies*, **16**, 3230.
- [43] ALASTAIR, C. 2021. «Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: A case for hydrogen-specific standards for NOx emissions». *Royal Society of Chemistry*, **1**, 201-207.
- [44] DODDS, P.E., STAFFELL, I., HAWKES, A. D., LI, F., GRÜNEWALD, P. eta MCDOWALL, P.E.W. 2015. «Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review». *Int. J. Hydrog. Energy*, **40**, 2065-2083.
- [45] KNOSALA, K., LANGENBERG, L., PFLUGRADT, N., STENZEL, P., KOTZUR, L. eta STOLTEN, D. 2022. «The role of hydrogen in German residential buildings». *Energy Build.*, **276**, 112480.
- [46] ISHAQ I., DINCER, I. eta CRAWFORD, C. 2022. «A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities». *Int. J. Hydrog. Energy*, **47**, 26238-26264.
- [47] IRENA. 2022. *World energy transitions. Outlook 2022: 1.5 C pathway*. Eskuragarri: <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>.

- [48] EUROPAKO KOMISIOA. *Europako Itun Berdea*. Eskuragarri: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (azken kontsulta: 2024-12-06).
- [49] ABEAB, J. O., POPOOLA, A. P. I., AJENIFUJA, E. eta POPOOLA, O. M. 2019. «Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation». *Int. J. Hydrog. Energy*, **44**, 15072-15086.
- [50] DE-LEÓN ALMARAZ, S., KOCSIS, T., AZZARO-PANTEL, C. eta SZÁNTÓ, Z. O. 2024. «Identifying social aspects related to the hydrogen economy: Review, synthesis, and research perspectives». *Int. J. Hydrog. Energy*, **49**, 601-618.
- [51] FITZPATRICK, N., PARRIQUE, T. eta COSME, I. 2022. «Exploring degrowth policy proposals: A systematic mapping with thematic synthesis,» *J.Clean. Prod.*, **365**, 132-764.