

Hidrogenoa, irtenbidea ote da?

(Hydrogen, is it the solution?)

Leire Casas Camacho, Jose Miguel Campillo-Robles*

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

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

GAKO-HITZAK: 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:** Jose 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, irtenbidea ote da?», Ekaia, 48, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.27191>

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

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



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende 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 fenomeno [1]). Gainera, erregai fosilek eragindako klima-aldaketaren hasierako efektuak nabaritzen hasiak gara jadanik. Hori guztia dela eta, inoiz baino handiagoa da munduko eredu energetikoa errotik aldatzeko premia. Gure gizartea deskarbonizatu egin behar da, espezie modura bizirauteko eta, aldi berean, planetaren ekosistemak salbatzeko.

Zoritxarrez, munduko energia-eskaerak etengabe jarraitzen du handitzen. 1950ean, adibidez, 28.564 TWh kontsumitu ziren munduan eta, 2023an, aldiz, 183.230 TWh; hau da, kontsumoa sei halako 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, diru asko bideratzen ari da hidrogenoaren ekonomia abian jartzeko, eta apustu horretan garaiz ez sartzeak lekuz kanpo utz dezake bat baino gehiago.

Gauzak horrela, azken urte hauetan poliki-poliki hedatzen joan da gure gizartean hidrogenoaren aldeko diskurtsoa. Alabaina, aldekotasun hori zenbateraino ote da behartutako jarrera diru publikoa jasotzeko? Benetan da hidrogenoa bilatzen dugun mirarizko irtenbidea? Erantzuna ez da erraza, eta azaldu dira, dagoeneko, ahots kritiko batzuk ere [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 (1731-1810) zientzialari ingelesak aurkitu zuen hidrogenoa 1766an. Hala ere, hamarkada bat geroago konturatu ziren elementu kimiko berria zela. 1783an, Antoine Lavoisier (1743-1794) kimikari frantsesak grekerazko izena eman zion: *hydro-gen* (ur-sortzailea, hidrogenoa 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-tenpe-

raturan eta egurats-presioan. Hidrogeno-gasa usaingabea, koloregabea, su-koia 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, eta adibide dira bateriak, kondentsadoreak edo urtegietan pilaturiko ura.

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

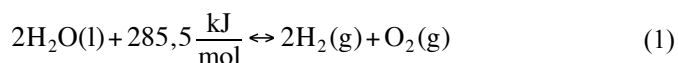
Zenbaki atomikoa	1
Masa atomikoa	1,00784 amu
Masa molekularra	2,01568 amu
Dentsitatea (20 °C, 1 atm)	0,0838 kg/m ³
Lurruntze-tenperatura (1 atm)	-252,88 °C
Lurruntze-bero sorra	447 kJ/kg
Fusio-tenperatura (1 atm)	-259,16 °C
Fusio-bero sorra	58 kJ/kg
Puntu kritikoa	-240,2 °C / 12,7 atm
Puntu hirukoitza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

Hidrogenoaren erabilgarritasuna ikustarazteko, 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 bateriak 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 bihurtzen du luzera handiko garraiorako, abiaziorako eta sektore aeroespazialerako. Hala ere, duen energia-dentsitate bolumetrikoa txikia da. Egurats-presioan, esaterako, gas guztien artean energia-dentsitate bolumetrikoa txikiena dauka, eta horrek zaildu egiten du hura aplikatzea garraioan eta sistema konpaktuetan. Hidrogenoa likidotuz gero, handitu egiten da energia-dentsitate bolumetrikoa, baina ohiko erregai likidoena baino txikiagoa da oraindik ere (ikus 2. taula). Egurats-presioan, hidrogenoaren likidotze-prozesua -252,88 °C-an gertatzen da. Baina giro-tenperaturan, 25 °C-an alegia, presioa handituz ezin dugu hidrogenoa likido bihurtu, puntu kritikoa gainera dagoelako (ikus 1. taula).

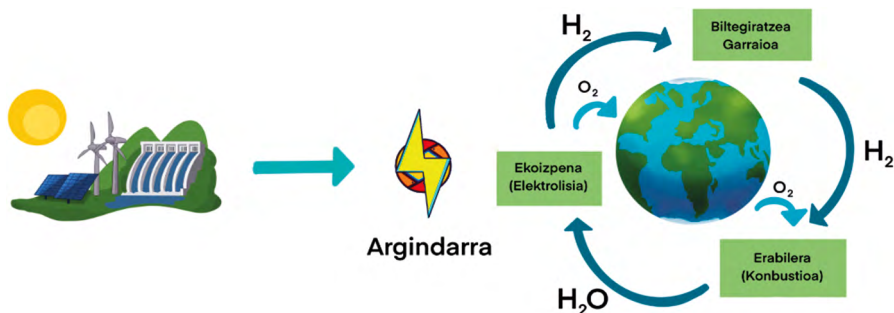
2. taula. Ohiko erregaien energia-dentsitateak [11].

	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 pasaraztzen da uretan zehar, eta eragiketa horrek ur-molekulen 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. Aldiz, hidrogenoaren konbustioan aurkako prozesua gertatzen da, eta ura sortzen da. Bi erreakzio kimiko horiek ekuazio bakarrean adieraz daitezke:



Hidrogenoa energia-bektore modura erabiltzean, ziklo itxia eratzen duten hiru urrats nagusi egon ohi dira [12, 13] (ikus 1. irudia): ekoizpena, biltegitratzea edo 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 egin zuen horren aurkikuntza Mendeleiev-ek, Donetsk-eko ikatz-meategi batean (Errusia) [14]. Alabaina, normalean, hidrogenoa beste elementu kimikoeekin konbinatuta ageri da, batez ere oxigenoarekin (ura) edo karbonoarekin (hidrokarburoak). Hori dela eta, hidrogenoa lortzeko, elementu horietatik bereizi behar da, molekularen araberrako 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 oharrean 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 araberrakoak). Zoritxarrez, erreformatzea asko zabalduetako prozesu industriala denez gero, CO₂ kantitate handiak sortzen dira.
- **Elektrolisia.** Hidrogenoa lortzeko prozesu elektrokimiko erabiliena, eraginkorra 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-aren igorpena murriztea espero zitekeen. Hala ere, lehengaiaren arabera, CO₂ kantitate handi xamarra 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 lehengaia, baina ikatza edo biomasa ere erabil 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, nikelezko katalizatzaileak erabiltzen dira erreakzioa errazteko. Horrela eginez gero, 500 °C inguruko tenperaturan banatzen da metano guztia; bestela, 700 °C-an banatuko litzateke. CO₂ igorpena lehengaiaren eta prozesuaren 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-prozesuaren, lehengaiaren eta eragindako igorpenen arabera [16, 20]. Oraindik estandarrik ezarrita ez dagoenez, bibliografian kolore asko aurki ditzakegu (ikus 3. taula).

Gaur egun, erregai fosilak dira hidrogenoa ekoizteko lehengai nagusiak (% 96 [23]), gehienbat erreformatzearen bitartez. Erreformatzean CO₂ gasa igortzen denez, grisa deritzo hidrogeno horri (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 biltegitratze-instalazioak erabiliz (negozio-eredua mantenduz). Hori dela eta, CO₂-a harrapatzeko, biltegitratzeko eta balioztatzeko teknologiak garatzen ari dira [24, 25], eta jadanik hasiak dira planta petrokimiko batzuetan inplementatzen.

Hidrogeno turkesa hidrokarburoen pirolisitik lortzen da, eta hidrogeno berdea, aldiz, uraren elektrolisiaren bitartez. Bietan energia berriztagarriak erabil daitezke, eta ez da eguratsera CO₂-rik isurtzen. Hidrogeno turkesa etorkizunerako interesgarria izan daiteke, pirolisiak sortutako karbono solidoa era egokian kudeatzen bada. Aldiz, hidrogeno berdeak ez du ingurumenean eragin negatibo nabarmenik. Zoritxarrez, gaur egun oso txikia da hidrogeno turkesaren eta berdearen ekoizpena (% 1 baino gutxiago [26]). Izan ere, txikia da ekoizpen-prozesu horien eraginkortasuna ere (ikus 3. taula).

3. taula. Hidrogeno motak eta bakoitzaren ekoizpen-ezaugarriak [15, 21, 22].
(Eraginkortasuna = (ekoiztutako hidrogenoaren energia / prozesuari emandako energia guztia) $\times$ 100).

Hidrogeno	Lehengaia	Prozesua eta eraginkortasuna	CO ₂ -aren 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
	Ikatz 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

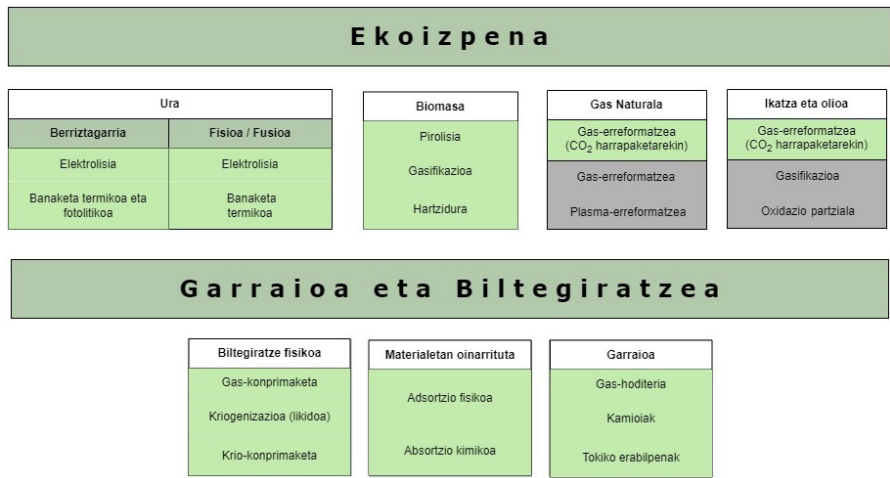
2020an ekoiztutako hidrogenoaren batez besteko kostua 2,52 €/kg izan zen, eta 2030erako 1,81 €/kg ingurura gutxitzea espero da. 3. taulan, hidrogeno mota bakoitzaren ekoizpen-kostuak ageri dira. Balio hauetan gora-behera handiak daude energia-prezioen hegakortasunagatik. Are gehiago, ez dugu ahaztu behar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

Munduan urtez urte hidrogenoaren ekoizpena handituz doan arren, oso txikia da oraindik. Adibidez, 2020. urtean, hidrogeno-ekoizpena 110 Mt izan zen, baina 2050 urterako 530 Mt ekoiztea espero da [16]. 2020ko ekoizpen hori munduko energia-eskaria asetzerantz bideratuko bagenu, soilik % 8 inguru aseko luke [22] (egiatan, ehuneko hori txikiagoa li-

tzateke, ekoizpen kimikoak beste era batera gauzatu behar zirelako eta erabilerarako hidrogenoa metatu eta garraitu behar zelako).

4. HIDROGENOAREN BILTEGIRATZEA ETA GARRAIOA

Argindarraren energia modu eraginkorrean biltegitratzea da elektrifikazioaren arazo handienetakoa. 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, argindarra berreskuratu egin daiteke beharra dagoenean. Hidrogenoa da argindarra biltegitratzeko beste aukera interesgarria.



2. irudia. Hidrogenoaren ekoizpena lehengaiaren arabera (berdea: CO₂-aren igorpenik gabe; grisa: CO₂-aren igorpenarekin), garraioa eta biltegitratzea.

4.1. Biltegitratzea

Orain arte ez da izan hidrogenoa biltegitratzeko behar handirik. Izan ere, industria kimikoak, hidrogenoaren ekoizle nagusiak, tokian bertan ekoiztu eta kontsumitzen baitzuen hidrogenoa. Alabaina, ekoizpena eta kontsumoa leku desberdinetan gertatzea ahalbidetu behar da hidrogenoaren ekonomia abian 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 (egoera normalean, kilogramo bat hidrogenok 11 m³ hartzen ditu), handitu egin behar zaio dentsitatea. Hortaz, funtsezkoa da hidrogenoa biltegitratzeko estrategia seguru, eraginkor eta merkeak garatzea [27].

4.1.1. *Biltegitratze fisikoa*

Biltegitratze fisikoan, hidrogenoa molekula moduan gordetzen da, fluido eran (gas, likido edo fluido superkritiko). Horretarako, presioarekin, tenperaturarekin edo biek in edo tenperaturarekin jokutzen da (ikus 2. irudia).

— **Gas-konpresioa:**

Giro-tenperaturan, hidrogenoaren presioa handituz gero, gora egi ten du haren dentsitateak. Alabaina, puntu kritikoaren gainetik ego teagatik, ezinezkoa da presioa handituz hidrogenoa likido bihurtzea (ikus 1. taula). Hori dela eta, mugatuta daude konpresioaren bitartez lortu daitezkeen dentsitateak. Eskala txikian, hidrogenoa giro-tenpe ratuan eta presio altuan (1.000 bar-eraino hel daitekeena) biltegitra tzen da [28]. Adibidez, 700 bar-ean, 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 likido tzeko (ikus 1. taula). Hidrogenoak likido modura lortzen du dentsi tate handiena (71 kg/m^3). Zoritxarrez, hidrogeno kriogenikoan me tatutako energiaren % 40 galtzen da hozte- eta konpresio-prozesuan (hidrogeno konprimatuan, aldiz, % 10) [30]. Hidrogenoa biltegitra tzeko teknikarik eraginkorrena, konplexuena eta garestiena da.

— **Hidrogeno krio-konprimatua:**

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

Biltegitratze fisikoa teknikarik garatuena da, baina energia asko kon sumitzen du, presioa eta tenperatura doitu behar direlako. Bestalde, presio handietan lan egitea arriskutsua izan daiteke. Izan ere, hidrogenoa oso su koia 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 sukoa eratzen du.

4.1.2. *Materialetan oinarritutako biltegitratzea*

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

— **Adsortzio fisikoa:**

Adsortzioan, hidrogeno-molekulak solidoen gainazalean pilatzen dira, van der Waals lotura ahulen ondorioz (4-10 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 antolatutako aluminosilikatozko egitura kristalinoak dira (adibidez, ZSM-5 eta Na-LEV). Egitura ordenatua daukate, poro-tamaina uniformea eta gainazal-azalera espezifiko altua (1.000 m²/g-erainokoa). Masan gehienez pilatu dezaketen hidrogenoa % 9,2ra ailega 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 % 7,5 metatzen da [32].
- **Polimero organikoak:** Material kristalino hauek arinak dira, C, H, N eta O atomoek 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:**

Hidrogeno-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:** Hidrogenoaren eta metalen arteko elkar-keta bitarra eratzen da (esaterako, MgH₂). Masan pilatu dezaketen hidrogenoa % 12,6raino ailega daiteke [30].
- **Hidruro konplexuak:** Li, B eta Al metal arinen eta hidrogenoaren arteko elkar-keta tetraedrikoak dira (esaterako, LiBH₄, NaAlH₄ eta LiNH₂). Hidruro hauek hiru taldetan sailkatzen dira [32]: boro hidruroak (masan % 18), alanatoak (masan % 10,6) eta amidak (masan % 10,4).

Ez dago biltegitratze egokienik aplikazio guztietarako [34]. Aitzitik, biltegitratze-sistema berriak 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. Alabaina, 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 abian daude lur azpiko biltegien proiektuak, energia berriztagarrien ekoizpena sare elektrikoarekin era errazagoan lotzeko, baina garapen-prozesuan dago teknologia merke hau, eta ez da eskuragarri egongo etorkizun hurbilean [35].

4. taula. Hidrogenoa biltegitratzeko metodoen ezaugarri nagusiak [33].

Biltegitratzeko metodoa	Masa-proporzioa (%)	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

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]:

- **Gurpilen 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. Gurpilen bidezko garraioan, kantitate txikiak (~ 200-1.000 kg) eraman ohi dira distantzia txikietan (100-500 km).
- **Gasbidea.** Hidrogeno-gasaren kantitate handiak gasbideen bitartez garraia daitezke presiopean, metanoa bezala. Zoritzarrez, gaur egungo hoditeriak ez daude prestatuta hidrogenoa bezalako mole-

kula txikia eta arina garraiatzeko. Gaur egungo metano-gasbideetan hidrogenoa sartzeko saiakerak egin dira (metanotan % 20 gehienez), baina horrek ihesak areagotu ditu [37]. Gasbideen bitartez, hidrogenoa distantzia handietan zehar garraia daiteke (gehienez 1.000 km). Horretarako teknologia eraginkorra da gasbidea, baina azpiegitura berriak eraiki behar dira espresuki hidrogenorako, eta hori oso garestia da.

- **Itsasontzia.** Itsasontzien bitartez ere hidrogeno kantitate handiak garraia 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).

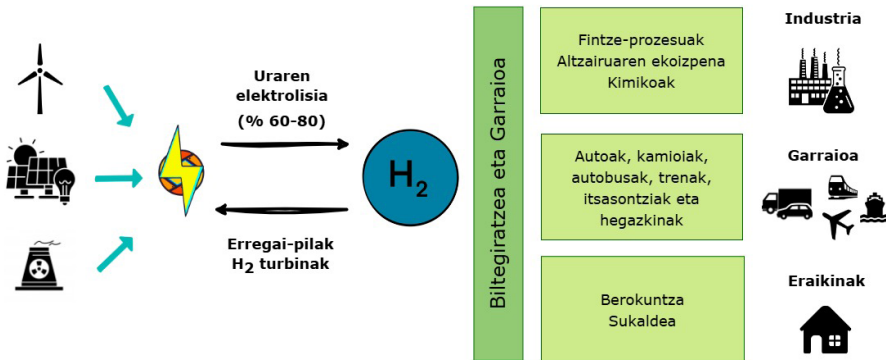
5. taula. Hidrogenoa garraiatzeko teknologia nagusiak [38, 39, 40, 36].

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, zabal da hidrogenoaren sukoitasun-tartea: airean % 4-75eko kontzentrazioa. Gainera, hidrogeno-gasa oso arina denez, biltegitratze-/garraio-sistematik ingurunera oso erraz askatzen da. Eta, gas guztien artean, eroankortasun elektriko baxuenetarikoa duenez (~ 0 S/m), oso zaila da haren presentzia detektatzea. Segurtasun faltsuaren sentrazioa ekiditeko, garraio-sistemak segurtasun-neurri handiekin diseinatu behar dira [41].

5. HIDROGENOAREN APLIKAZIOAK

Aspaldikoak dira hidrogenoaren erabilera bizitzako arlo guztietara zabaltzeko asmoak [28]. Izan ere, hidrogenoaren bidez, energia asko biltegitratu 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). Hidrogenoak etorkizun oparoa eduki dezake eremu horietan. Berez, hidrogenoaren erabilpen-arlo nagusiak hiru izan daitezke: industria, garraioa eta eraikinak (ikus 3. irudia).



3. irudia. Hidrogenorako aurreikusitako erabilerak [8].

— Industria:

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

— Garraioa:

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

Gaur egun, ordea, erregai-pilak erabiltzen dira, hidrogenoa argindar bihurtzeko eta motor elektrikoak eragiteko. Zoritxarrez, txikia da erregai-pila darabilen kotxearen (ingelesez, *Fuel Cell Electric Vehicle*, FCEV) eraginkortasuna. Hau da, FCEV delakoak jatorrizko energia-iturritik % 33 baino ez du baliatzen (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).

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 sor daiteke. NO₂ gasak ozonoa eta PM_{2,5} partikula finak eratzen ditu, kaltegarriak pertsonen osasune-

rako eta ingurunerako [43]. Hortaz, hidrogeno-teknologiak garrantzeko, NO_x gasen eraketa eta igorpena murrizteko estrategiak lan-tzen ari dira.

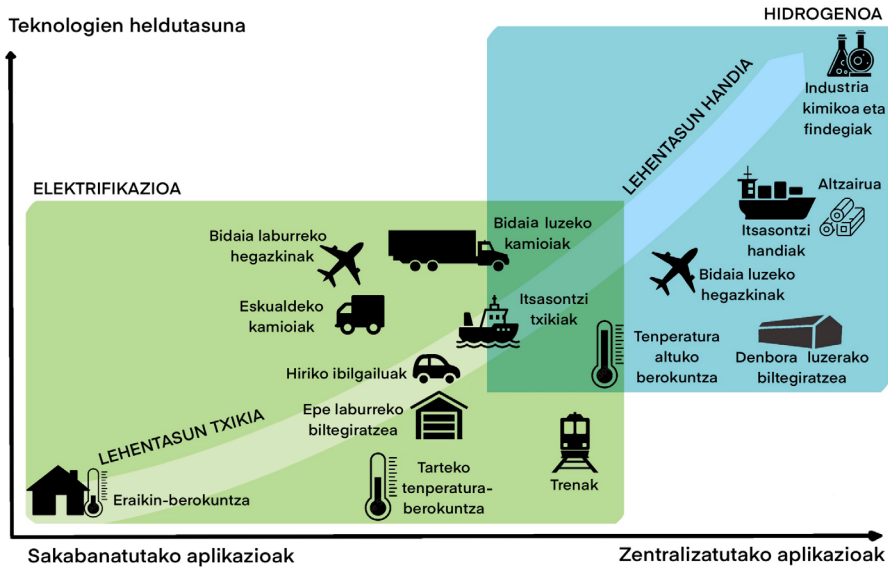
6. taula. Hidrogenoaren eta baterien arteko alderaketa garraio astunean.

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

— **Eraikinak:**

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

Laburbilduz, deskarbonizatzeko estrategiaren barruan, badaude hain-bat arlo elektrifikatu daitezkeenak (ikus 4. irudia) [46]. Hidrogenoa erai-kin-berokuntzan, energia-biltegiatze laburrean edo hiri-ibilgailuetan erabil badaiteke ere, badirudi ekonomikoki ez dela interesgarria, duen eragin-kortasun 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, itsason-tzi handiak edo industria kimikoa [47]. Hala ere, hidrogenoa eta argindarra bata zein bestea erabil ditzaketen aplikazio-eremu batzuk daude: adibidez, bidaia luzeko kamioiak, itsasontzi txikiak edo tenperatura altuko berokun-tza. Zalentzazko kasu hauetan denborak esango du zein estrategia nagusi-tuko den.



4. **irudia.** Argindarraren 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 oso garrantzitsua da alderdi ekonomikoa. Hidrogenoaren ekonomiak ekoizpen-, biltegiatze-, garraio- eta erabilpen-kostuen mendeotasun handia izango du. Hasteko, hidrogenoa modu lehiakorren 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 teknologia garatu ahala, 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, funtsezkoa dela sare-elektrikoa indartzea [8].

Politika eta erregulazioa eragile oso garrantzitsuak dira energia kontuetan. Europar Batasunak hidrogeno berdearen aldeko apustua egin du hementik 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,

eragin handia dauka gaur egungo egoera geopolitikoak ere. Esaterako, REPowerEU planak helburu eta estrategia berriak garatu ditu, Errusiako erregai fosilen mendeko izatetik 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 garatu dituzte hidrogenoaren ekonomiaren garapenerako bide-orriak eta plan nazionalak [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, oso garrantzitsuak dira ingurumeneko dimentsioa eta soziala ere. Adibidez, hidrogenoaren aplikazio berriek giza jardueretan eta kulturaren eragingo dituzten aldaketak oso ondo aztertu behar dira aldeaz aurretik.

7. ONDORIOAK

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

1. Gaur egun, ezinezkoa da energia-iturri kutsagarriak erabat ordezkatzeari. Une honetan, mugatuak dira hidrogenoaren erabilera-arloak. Gauzak horrela, hidrogenoa merkea eta garbia izatea ezinbestekoa da modu mailakatuan merkatuan sartzeko. Horretarako, gehiago garatu behar dira hidrogenoarekin loturiko teknologiak, eta azpiegitura energetikoak egokitu.
2. Gas naturalaren erreformatzea poliki-poliki bazter uzten ari da, eta garbiagoa den elektrolisiaren aldeko apustua egiten 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 baliatzeko eta horrela energia-sistemetan malgutasun handiagoa sortzeko. Gainera, elektrolisian oinarritutako

eguzki- edo haize-sistemak sare-elektrotik urrun dauden tokietan erabil daitezke energia-eskaerak asetzeko.

3. Gaur egun, ohikoa da hidrogenoa gas- eta likido-egoeran biltegi-ratzea. Etorbizunean, materialetan biltegi-ratzea estrategia nagusia izan daitekeela ematen du. Alabaina, horretarako, teknologiak garapen-fasetik atera eta merkatura jauzi egin behar du, oztopo tekniko guztiak gaituz.
4. Hidrogenoa garraiatzeko hainbat teknologia daude garapen-prozesuan. Teknologia hauen erabilera beren aplikazioaren arabera 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, besteak beste: erregai-pilak, hidrogenoaren errekontzita, prozesu industrialak eta energia biltegi-ratzea sarearen orekarako. Aplikazioetan ere kostua eta eraginkortasuna oso ezaugarri garrantzitsuak dira hedapenerako.
6. Hidrogeno-teknologia guztiek energia-galerak eta hidrogeno-ihesak dituzte. Zaila izaten da horien ebaluazio kuantitatiboa egitea. Izan ere, kasuan kasuko galerak eta ihesak ageri dira, eta batzuetan teorikoki kalkulaturako balioetatik urruntzen dira. Gauzak horrela, hidrogenoaren etorkizuneko aplikaziorako, funtsezko arazo teknikoa da galerak eta ihesak gutxitzea.
7. Erakunde publikoek hidrogenoaren alde eskaintzen dituzten 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 aukera dauka hiru esparru nagusitan lehiakorra izateko. Alde batetik, sare-elektrokoak berriztagarrien ekoizpena xurgatzen ez duenean, hidrogeno moduan gorde ahal izango da. Beste alde batetik, elektrifikatzen zailak 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 heda dadin, inbertsio handiak behar dira erakunde publikoetatik eta eragile industrialetatik. Aldi berean, ezinbestekoa da ikertzaile akademikoek, industria-eragileek eta erakunde publikoek arteko lankidetzaren sinergikoa dauden oztopoak gaituzteko eta hidrogenoaren integrazio zabala ahalbidetzeko. Hala ere, horrek ez du ziurtatzen oztopo guztiak gaitutuko direla eta hidrogenoaren erabilera gizartearen zabalduko dela.
9. Amaitzeko, mahai gainean eztabaida garrantzitsua jarri behar dela uste dugu. Izatez, gaur egungo gizartearen kontsumo-ohiturek ba-

liabideen etengabeko hazkundera eskatzen dute. Zoritxarrez, planeta finitu batean bizi gara, eta energia-kontsumoaren hazkunde etengabea ez da inolaz ere jasangarria. Beraz, arazo energetikoa ez da soilik teknologikoa. Horregatik, erregai fosilen ordezkatzeko hutsetik haratago, etorkizunerako desazkunde jasangarria proposatzen ari dira ikertzaile batzuk [51]. Beste ikertzaile batzuek jarrera baikorragoa daukate, eta fusioan energia-iturri amaigabea aurkituko dugula sinesten dute. Ikusteko dago zer gertatuko den.

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

OHARRA

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

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-lurrun 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] VOLDUND, 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.