

## UTILIZAREA HIDROGENULUI PENTRU STOCAREA ENERGIEI

Florin TESLARI<sup>1\*</sup>, Corneliu RĂILEANU<sup>1</sup>, Ciprian SAVCIUC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Inginerie electrică, ISEM-201, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova,

<sup>3</sup>Inginerie electrică, ISEM-231, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

\*Autorul corespondent: Florin Teslari, [florin.teslari@ie.utm.md](mailto:florin.teslari@ie.utm.md)

Coordonatorul științific Octavian MANGOS, lect. univ., FEIE, UTM

**Rezumat.** Stocarea energiei sub formă de hidrogen este o parte integrantă a sustenabilității viitoare a surselor de energie regenerabilă. Acest studiu analizează progresele tehnologice în domeniul stocării hidrogenului, începând cu primele studii și aplicații continuând cu inovațiile moderne. Prezenta analiză globală se concentrează atât pe progresele, cât și pe provocările asociate cu utilizarea hidrogenului în stocarea energiei electrice, acoperind aspecte de infrastructură și constrângeri tehnice. Sunt prezentate, de asemenea, metodele actuale de producere a hidrogenului, inclusiv hidrogenul verde și albastru, și tehnologiile de conversie a energiei, cum ar fi pilele de combustie și turbinele cu gaz. Articolul oferă o perspectivă detaliată asupra potențialului hidrogenului de a schimba aspectul energetic global și identifică oportunitățile de cooperare și de investiții în această direcție.

**Cuvinte cheie:** Surse regenerabile, inovare tehnologică, emisii reduse, infrastructură durabilă, integrare sistemică, stocarea energiei, utilizarea hidrogenului.

### Introducere

Această lucrare analizează utilizarea hidrogenului în stocarea energiei, subliniind rolul său esențial în promovarea sustenabilității surselor de energie regenerabilă. Prin analiza evoluției tehnologice, de la metodele inițiale până la inovațiile moderne și prin evaluarea provocărilor și oportunităților asociate cu producerea, stocarea și conversia hidrogenului Fig.1, studiul evidențiază potențialul acestui vector energetic de dezvoltare pentru a contribui la îmbunătățirea sistemului energetic global. Accentuând importanța cooperării internaționale și a investițiilor în cercetare, lucrarea prezintă o viziune globală asupra viitorului energetic durabil facilitat de integrarea hidrogenului.

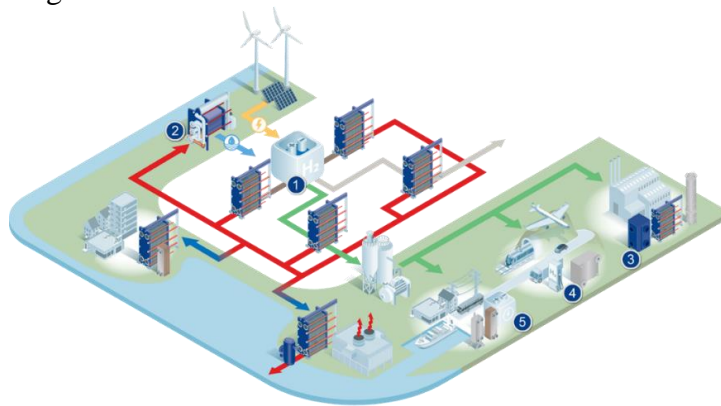


Figura 1. Diagrama sistemului energetic integrat pe bază de hidrogen [4]

### 1. Context și importanța stocării energiei

În contextul actual, marcat de creșterea cererii de energie și de importanța reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, stocarea energiei reprezintă o bază pentru tranziția către un viitor energetic sustenabil. Schimbările climatice și epuizarea resurselor fosile impun o

reorientare rapidă către surse de energie regenerabilă, cum ar fi energia solară, eoliană sau energia hidroelectrică. Cu toate acestea, natura intermitentă a acestor surse generează provocări semnificative în ceea ce privește stabilitatea și fiabilitatea rețelelor electrice. În acest context, hidrogenul este ca un vector energetic promițător, capabil să stocheze energia în exces produsă în perioadele de vârf ale producției regenerabile și să o elibereze atunci când cererea depășește oferta.

## 2. Avantajele și dezavantajele stocării hidrogenului

Avantajele stocării hidrogenului includ versatilitatea și capacitatea de a integra surse regenerabile de energie în sistemele energetice, contribuind semnificativ la reducerea emisiilor de CO<sub>2</sub>. Hidrogenul poate servi ca legătură între diferite sectoare energetice, facilitând tranziția către o economie cu emisii scăzute de carbon. Alte avantaje majore includ densitatea înaltă de energie pe unitatea de masă a hidrogenului, posibilitățile diverse de stocare (sub formă gazoasă, lichidă sau în hidruri metalice) și potențialul de utilizare într-o gamă largă de aplicații, de la vehicule electrice cu pile de combustie până la generarea de energie electrică și termică.

Dezavantajele includ provocările tehnice și costurile asociate cu stocarea și manipularea hidrogenului. Stocarea hidrogenului la presiuni înalte sau sub formă lichidă necesită recipiente speciale, rezistente la presiune și temperaturi scăzute, ceea ce poate crește costurile de infrastructură și operaționale. De asemenea, hidrogenul are o densitate energetică scăzută per volum, ceea ce impune provocări în ceea ce privește eficiența spațială a soluțiilor de stocare. Pierderile energetice în procesul de conversie (din electricitate în hidrogen și invers) sunt de asemenea un aspect care necesită optimizare continuă. În plus, există provocări legate de siguranța manipulării hidrogenului, dat fiind caracterul său extrem de inflamabil.

## 3. Metode tradiționale și metode moderne de producere

Producția de hidrogen a evoluat semnificativ de la metodele tradiționale, bazate pe combustibili fosili, până la metode inovatoare care exploatează surse regenerabile de energie. Metodele tradiționale includ reformarea cu vapori a metanului, Fig. 2, 3 și 4, un proces în care metanul reacționează cu vapori de apă la temperaturi înalte pentru a produce hidrogen și dioxid de carbon. Deși fiind eficient din punct de vedere al costurilor, această metodă generează emisii semnificative de CO<sub>2</sub>, subminând obiectivele de sustenabilitate. Pe de altă parte, metodele moderne se concentrează pe reducerea amprentei de carbon a procesului de producție. Electroliza apei, care descompune apa în oxigen și hidrogen folosind electricitate provenită din surse regenerabile, este tot mai recunoscută ca o alternativă verde. Acest proces este curat, lăsând ca subprodus doar oxigenul, dar eficiența sa energetică și costurile asociate reprezintă încă provocări mari.

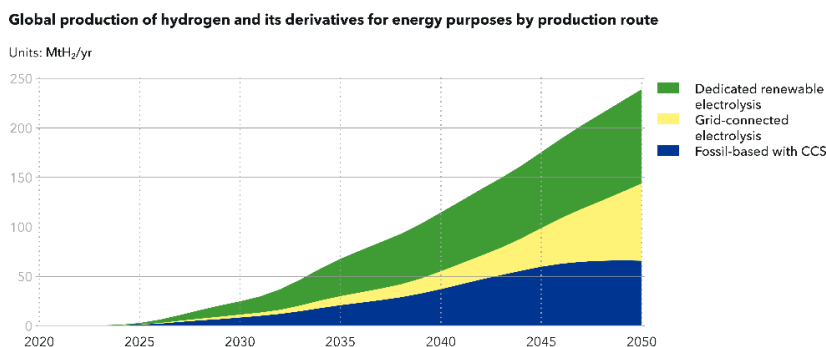


Figura 2. Producția globală de hidrogen și derivații săi în scopuri energetice, pe calea de producție [6]

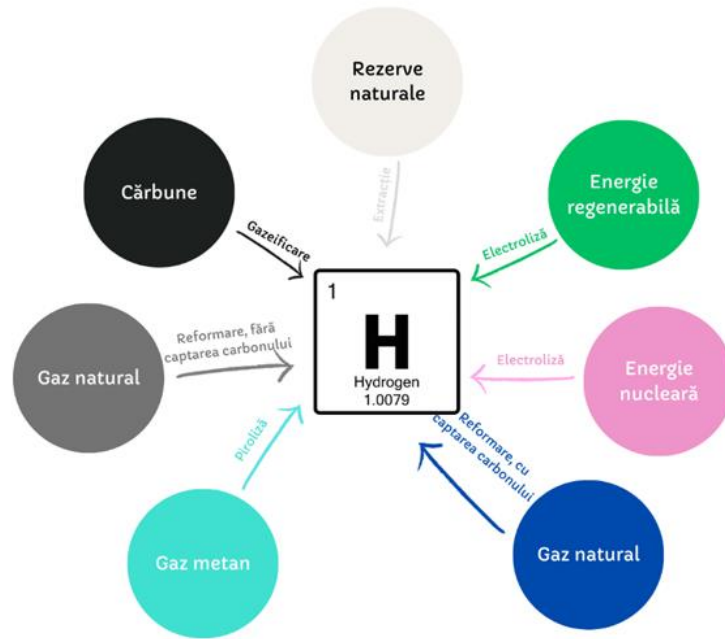


Figura 3. Metode de producere a hidrogenului după culori [2]

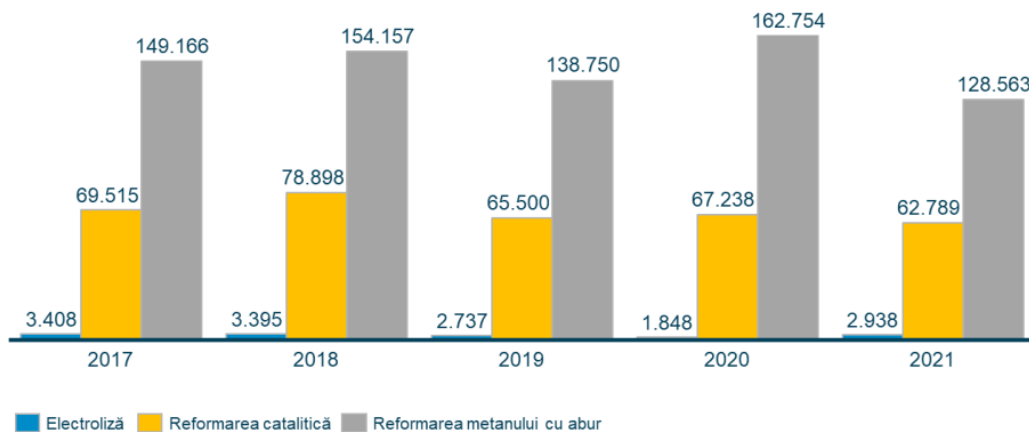


Figura 4. Analiza stării actuale cu privire la producerea hidrogenului [2]

#### 4. Stocarea fizică: comprimare, lichefiere și hidruri metalice

Stocarea fizică a hidrogenului implică transformarea acestuia într-o formă care permite stocarea eficientă din punct de vedere al spațiului și accesul facil la eliberarea energiei atunci când este necesar. Există trei metode principale în această categorie: comprimarea, lichefierea și utilizarea hidrurilor metalice.

Comprimarea hidrogenului la presiuni înalte este una dintre cele mai comune metode de stocare, care permite depozitarea unei cantități mari de hidrogen în recipiente cilindrice de înaltă rezistență. Deși tehnologia este bine dezvoltată și relativ simplă, necesită pompe de compresie cu un consum mare de energie și prezintă provocări legate de siguranța depozitării la presiuni înalte.

Lichefierea hidrogenului implică răcirea acestuia la temperaturi extrem de scăzute, sub - 252.87 °C, pentru a-l transforma în lichid. Aceasta crește densitatea hidrogenului, permițând o stocare mai compactă. Cu toate acestea, lichefierea necesită un consum semnificativ de energie pentru răcire și menținerea temperaturii, precum și recipiente de stocare izolate termic, ceea ce poate crește costurile.

Hidrurile metalice reprezintă o abordare inovatoare care permite stocarea hidrogenului sub formă solidă prin absorbția acestuia în metale sau aliaje specifice. Această metodă poate stoca hidrogenul la presiuni mai scăzute și în condiții mai sigure decât stocarea comprimată sau lichefiată. Cu toate acestea, dezavantajele includ greutatea mare a sistemelor de hidruri metalice și necesitatea unui aport de căldură pentru eliberarea hidrogenului absorbit.

### 5. Pilele de combustie: funcționare și tipuri

Pilele de combustie reprezintă o tehnologie cheie pentru conversia eficientă a hidrogenului în energie electrică, având potențialul de a juca un rol crucial în sistemele energetice sustenabile. Funcționând pe principiul invers al electrolizei apei, pilele de combustie combină hidrogenul cu oxigenul din aer pentru a produce electricitate, apă și căldură, fără emisii nocive. Principalele avantaje includ eficiența ridicată și flexibilitatea operațională, fiind utilizate într-o gamă variată de aplicații, de la vehicule electrice până la centrale electrice staționare.

Există mai multe tipuri de pile de combustie, clasificate în funcție de electrolitul utilizat, fiecare cu caracteristici specifice care influențează performanța, costul și domeniul de aplicabilitate. Cele mai comune tipuri includ pilele cu membrană schimbătoare de protoni (PEMFC), pilele alcaline (AFC), pilele cu carbonat topit (MCFC) și pilele cu oxid solid (SOFC). Pilele cu membrană schimbătoare de protoni sunt cele mai populare pentru aplicațiile mobile datorită pornirii rapide și dimensiunilor compacte, în timp ce pilele cu oxid solid sunt apreciate pentru aplicațiile staționare, având avantajul eficienței ridicate și flexibilității în combustibil.

### 6. Turbinele cu gaz și alte tehnologii de conversie

Pe lângă pilele de combustie, hidrogenul poate fi utilizat și în turbinele cu gaz pentru producerea energiei electrice. Deși această abordare nu este la fel de eficientă ca pilele de combustie în termeni de conversie directă a hidrogenului în electricitate, oferă flexibilitate în gestionarea cererii de energie la scară largă și poate servi ca soluție de backup fiabilă și rapidă pentru rețelele electrice.

Alte tehnologii de conversie, figura 4, includ motoarele cu combustie internă adaptate pentru hidrogen și sistemele hibride care combină pilele de combustie cu alte forme de stocare a energiei, cum ar fi bateriile, pentru a optimiza performanța și eficiența. Aceste tehnologii sunt în diverse etape de dezvoltare și testare, având potențialul de a diversifica și mai mult opțiunile disponibile pentru utilizarea hidrogenului ca sursă de energie.

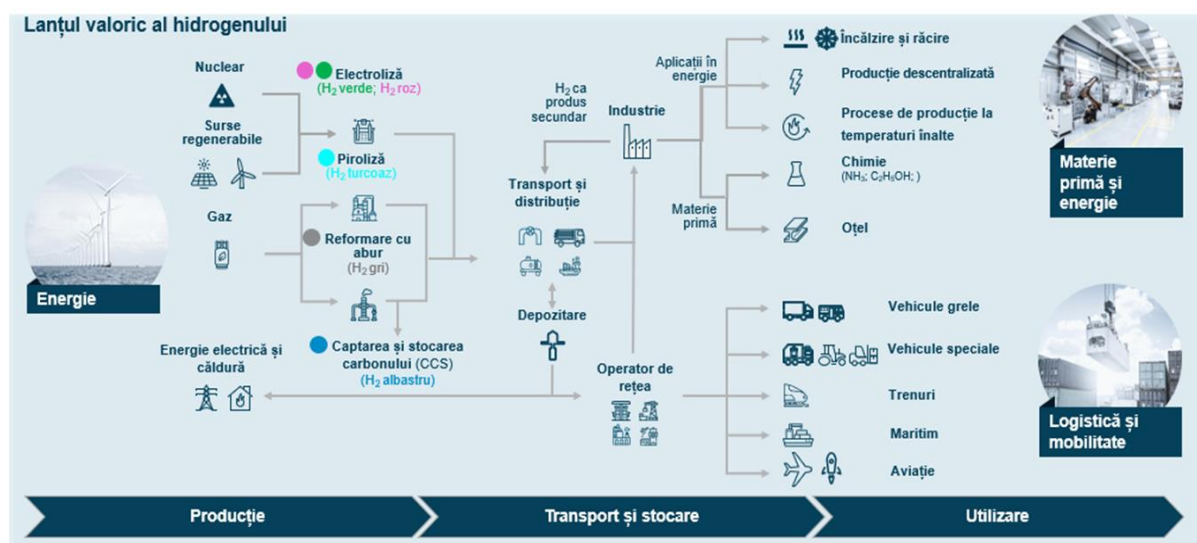


Figura 5. Metode de conversie a hidrogenului [2]

## 7. Eficiența și sustenabilitatea tehnologiilor de conversie

Eficiența conversiei energetice reprezintă un factor critic în evaluarea viabilității tehnologiilor bazate pe hidrogen. Pilele de combustie oferă unele dintre cele mai ridicate eficiențe teoretice și practice pentru conversia hidrogenului în electricitate, ajungând până la 60% eficiență electrică și chiar mai mult atunci când căldura generată este utilizată într-un proces de cogenerare.

Pe lângă eficiență, sustenabilitatea acestor tehnologii este esențială pentru a asigura o tranziție energetică reușită. Acest lucru implică nu doar reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, ei dar și adresarea provocărilor legate de durabilitatea sistemelor, costurile de producție și exploatare, precum și disponibilitatea și reciclarea materialelor utilizate.

### Concluzii

Utilizarea hidrogenului ca vector energetic de dezvoltare evidențiază un aspect energetic pentru tranziție, unde inovațiile modelează viitorul sustenabilității. Progresele în producția și stocarea hidrogenului, alături de tehnologiile de conversie, subliniază potențialul său în procesul de integrare a energiilor regenerabile în sistemele electroenergetice naționale. Cu toate acestea, succesul pe scară largă necesită o infrastructură adecvată, reglementări clare și o cooperare internațională solidă. Astfel, hidrogenul se evidențiază ca un element cheie în atingerea unui viitor energetic curat, în condiția unei abordări coordonate, care să unească cercetarea, investițiile și politicile abordate. Astfel, este esențială accelerarea eforturilor pentru a transforma hidrogenul într-un pilon fundamental al tranziției energetice globale.

### Bibliografie

- [1] International Energy Agency (IEA). (2023). The Future of Hydrogen. [Online] Disponibil la: [<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>]
- [2] Hydrogen Council. (2023). Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective. [Online] Disponibil la: [<https://hydrogencouncil.com/en/study/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>]
- [3] European Commission. (2022). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. [Online] Disponibil la: [[https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en)]
- [4] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Hydrogen Storage. [Online] Disponibil la: [<https://www.nrel.gov/hydrogen/production-storage.html>]
- [5] Smith, A., Jones, B., și Roberts, C. (2023). "Advancements in Hydrogen Production Technologies: An Analytical Review." *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, pp. 125763.
- [6] Hydrogen: Statistics and Insights." DNV, DNV, 2023, [www.dnv.com/about/statistics-and-insights/hydrogen/](http://www.dnv.com/about/statistics-and-insights/hydrogen/).