

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO D'INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA

in
sustainability transition management

**ANALISI DELLO SVILUPPO E DELLA DIFFUSIONE DI
UN' INNOVAZIONE TECNOLOGICA:
L'IDROGENO VERDE NELLA REGIONE DEL
MEDIO TEJO**

CANDIDATO
Edo Bosi

RELATORE:
Chiar.ma Prof.ssa Leticia Canal Vieira

CORRELATORE/CORRELATORI

Anno Accademico 2022/23

Sessione III

Sommario

Abstract	6
INTRODUZIONE	7
Capitolo primo	10
Dalla natura dell'Idrogeno alle applicazioni pratiche	10
1.1 L'Idrogeno e la sua natura	10
1.2 Caratteristiche applicative	11
1.3 L'Idrogeno e la sua produzione	13
1.4 Lo stoccaggio dell'idrogeno	18
1.5 L'idrogeno e il suo utilizzo	22
1.5.1 Settore industriale	22
1.5.2 Settore aerospaziale	23
1.5.3 Cofinanziamento dell'idrogeno nel gas naturale	24
1.5.4 Mobilità di veicoli ad idrogeno	25
1.6 Idrogeno e mobilità	26
1.6.1 Motori a combustione interna a idrogeno	26
1.6.2 Celle a combustibile	27
1.6.3 Attuali applicazioni	30
Capitolo secondo	33
Hy2Market	33
2.1 Introduzione al progetto	34
2.2 Opzione 1: Richiesta base per mobilità pubblica	37
2.2.1 Utilizzo dell'idrogeno	38
2.2.2 Distribuzione dell'infrastruttura	39
2.2.3 Partners coinvolti	40
2.2.4 Budget stimato	41
2.3 Opzione 2: Forte richiesta per mobilità pubblica e rete di rifornimento.	42
2.3.1 Utilizzo dell'idrogeno	43
2.3.2 Distribuzione dell'infrastruttura	44
2.3.3 Partners coinvolti	44
2.3.4 Budget stimato	45
2.4 Opzione 3: Forte richiesta per mobilità pubblica, rete di rifornimento e iniezione di idrogeno	46
2.4.1 Utilizzo dell'idrogeno	47
2.4.2 Distribuzione dell'infrastruttura	48

2.4.3 Partners coinvolti.....	49
2.4.4 Budget stimato.....	49
Capitolo terzo	50
Applicazione del Technological Innovation System	50
3.1 Introduzione al Technological Innovation System	50
3.2 Prestazioni e qualità del prodotto	52
3.3 Prezzo e costo del prodotto	57
3.4 Sistema di produzione.....	61
3.5 Prodotti e servizi complementari	62
3.6 Formazione e coordinamento della rete.....	68
3.7 Clienti	71
3.8 Istituzioni specifiche per l'innovazione.....	76
Capitolo quarto.....	81
Conclusioni e discussione	81

Indice delle Tabelle

Tabella 1:Metodi di produzione dell'Idrogeno	17
Tabella 2:Metodi di stoccaggio dell'Idrogeno.....	21
Tabella 3: Tabella riassuntiva Opzione 1	37
Tabella 4: Partners Opzione 2.....	40
Tabella 5: Budget Opzione 1.....	41
Tabella 6: Tabella riassuntiva Opzione 2	42
Tabella 7: Tabella riassuntiva Opzione 3	46
Tabella 8: Confronto Tecnologia Camion	52
Tabella 9: Prestazioni Bus Toyota Caetano	54
Tabella 10: Prestazioni Idrolizzatore.....	56
Tabella 11: Tabella del servizio di distribuzione per l'opzione 2 e 3.....	63
Tabella 12. Confronto tra tipologie di Rimorchi tubolari per idrogeno	66
Tabella 13: Servizi a contatto col cliente Pt.1	72
Tabella 14: Servizi a contatto col cliente Pt.2.....	73

Abstract

La crescente consapevolezza globale sui cambiamenti climatici ha spinto attivisti, organizzazioni e cittadini a promuovere azioni concrete, con accordi internazionali come l'Accordo di Parigi a sottolineare l'urgenza di affrontare la crisi climatica. Un impegno importante è quello della transizione energetica, volta a ridurre l'impatto ambientale, implica la riduzione delle fonti fossili e l'adozione di energie rinnovabili.

L'idrogeno emerge come protagonista chiave, specialmente l'idrogeno Verde prodotto da fonti rinnovabili. Tuttavia, aspetti come i costi e lo sviluppo infrastrutturale rappresentano sfide ancora da risolvere. La tesi esamina il progetto pubblico Hy2Market, focalizzato sull'utilizzo dell'idrogeno nella mobilità pubblica nella regione portoghese del Medio Tejo. Un approccio innovativo è adottato utilizzando il framework Technological Innovation System (TIS), mirato a studiare strategie di introduzione tecnologica di nicchia.

L'analisi del progetto rivela punti di forza e possibili criticità concentrandosi su diversi punti di vista come: prestazioni, prezzo, sistema di produzione, servizi complementari, formazione, coordinamento della rete, e clienti. La metodologia TIS, inizialmente pensata per aziende private, viene riadattata per il contesto pubblico, evidenziando che il fine non è il guadagno, ma la qualità del servizio per i cittadini. I risultati suggeriscono la fattibilità del progetto, ma sottolineano la necessità di ulteriori studi e l'analisi di progetti simili per una comprensione più approfondita delle possibili esternalità positive nel settore dell'idrogeno.

INTRODUZIONE

Il tema del cambiamento climatico è diventato sempre più popolare e rilevante negli ultimi anni. Almeno dagli anni 2000 una crescente consapevolezza globale riguardo ai cambiamenti climatici e alle loro conseguenze ha iniziato a prendere forma. Eventi climatici estremi, segnalazioni scientifiche e iniziative di sensibilizzazione hanno contribuito a porre l'attenzione su questa questione. Attivisti ambientali, organizzazioni non governative, scienziati e molti cittadini stanno lavorando per aumentare la consapevolezza e promuovere azioni concrete per affrontare il cambiamento climatico. Gli accordi internazionali come l'Accordo di Parigi hanno anche contribuito a evidenziare l'urgenza di affrontare la crisi climatica a livello globale. Le nuove generazioni, in particolare, sembrano essere particolarmente sensibili a questo problema e spingono per azioni più decise per affrontare le sfide ambientali.

Uno dei passi fondamentali da compiere contro il cambiamento climatico è quello della transizione energetica, cioè al processo di cambiamento dal sistema energetico attuale, basato principalmente su fonti di energia non rinnovabile e ad elevata emissione di gas serra, a un sistema più sostenibile, basato su fonti di energia rinnovabile e tecnologie a basse emissioni di carbonio. L'obiettivo principale della transizione energetica è ridurre l'impatto ambientale, mitigare i cambiamenti climatici e garantire una fornitura energetica sostenibile per il futuro. La transizione implica vari aspetti come la riduzione delle fonti di energia fossile come carbone, petrolio e gas naturale, principali fonti di emissioni di gas serra responsabili del cambiamento climatico a favore di energie rinnovabili. Altri aspetti importanti sono l'efficientamento energetico per ridurre il consumo energetico complessivo, lo sviluppo di nuove tecnologie come stoccaggio avanzato di energia o veicoli non inquinanti.

Un ruolo chiave nella transizione energetica è rappresentato dall'idrogeno che sta' guadagnando sempre più importanza in questo settore per diverse ragioni. L'idrogeno può rappresentare una fonte di energia pulita se prodotto da fonti rinnovabili. Questo tipo d'idrogeno è detto "Idrogeno Verde" e offre quindi un modo per ottenere energia in modo sostenibile. Inoltre, l'idrogeno può essere utilizzato come mezzo di stoccaggio energetico. Quando prodotto in eccesso durante periodi di abbondanza di energia rinnovabile, può essere conservato e utilizzato quando la produzione di energia è inferiore alla domanda. Questo aiuta ad affrontare la variabilità delle fonti rinnovabili come il sole e il vento. L'idrogeno può rivelarsi un ottimo alleato anche nei settori difficili da decarbonizzare come settori industriali e trasporti. Tuttavia, è importante notare che la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili è ancora costosa rispetto a metodi più convenzionali basati su combustibili fossili. La riduzione dei costi e lo sviluppo delle infrastrutture sono sfide chiave da affrontare per massimizzare il ruolo dell'idrogeno nella transizione energetica.

Per queste ragioni questa tesi si pone il compito di analizzare se un'introduzione di nicchia come quella dell'utilizzo dell'idrogeno per la mobilità pubblica possa rappresentare uno slancio verso una diffusione su larga scala di questo vettore energetico. Pertanto si è partiti dallo studio di un progetto pubblico chiamato Hy2Market che mira a sfruttare l'idrogeno specialmente nel settore della mobilità pubblica nella regione portoghese del Medio Tejo. In particolare il lavoro svolto è stato quello di utilizzare un framework denominato Technological Innovation System che rappresenta un utile strumento per formulare e studiare strategie di introduzione di nicchia di una tecnologia, combinando approfondimenti provenienti da due letterature: la letteratura sui sistemi socio-tecnici e la letteratura sull'innovazione e sulla gestione strategica. In particolare, il framework può aiutare a esplorare il contesto attorno a un'innovazione durante le prime fasi d'introduzione tecnologica e specificare la portata, i tempi e il tipo di strategie che si adattano a questo contesto (Ortt and Kamp, 2022). L'applicazione di questo framework su Hy2Market aiuterà a condurre un'analisi più approfondita del progetto stesso, consentendo di identificare possibili difficoltà d'implementazione e di comprendere gli approcci efficaci per superarle. Inoltre, sarà fondamentale

comprendere gli aspetti positivi legati al successo del progetto e, in modo indiretto, all'intero settore dell'idrogeno.

Per fare ciò la tesi seguente è stata suddivisa in tre macro aree. La base di questo lavoro è il progetto Hy2Market, centrato sulla promozione della mobilità sostenibile attraverso la produzione e l'impiego di idrogeno. Sarebbe impossibile procedere all'osservazione del progetto senza dedicare la prima parte di questa tesi a una comprensione approfondita della natura dell'idrogeno, inclusa la sua produzione, lo stoccaggio e i molteplici utilizzi. Particolare attenzione sarà riservata all'aspetto della sostenibilità e delle emissioni, elementi chiave nell'ambito della transizione verso soluzioni energetiche più ecocompatibili. La seconda parte definirà il progetto Hy2Market nelle sue differenti configurazioni ed opzioni, in base anche al coinvolgimento che si risconterà sul territorio interessato, descrivendone in modo schematico i punti chiave. La terza e ultima sezione della tesi si concentrerà sulla definizione del Technological Innovation System (Sistema di Innovazione Tecnologica), seguita dalla sua applicazione attraverso un'analisi dettagliata del progetto da sette prospettive differenti. Tale analisi mirerà a identificare accuratamente le sfide e le strategie d'implementazione del progetto. Infine, saranno presentate le conclusioni derivanti dai risultati ottenuti, fornendo una panoramica delle implicazioni e delle raccomandazioni emerse dalla ricerca.

Capitolo primo

Dalla natura dell'idrogeno alle applicazioni pratiche

1.1 L'idrogeno e la sua natura

L'idrogeno (H) è una sostanza gassosa incolore, inodore, insapore, infiammabile che rappresenta il componente più semplice della famiglia degli elementi chimici. L'atomo di idrogeno ha un nucleo costituito da un protone recante un'unità di carica elettrica positiva; a questo nucleo è associato anche un elettrone, portatore di un'unità di carica elettrica negativa. In condizioni ordinarie, l'idrogeno gassoso è un'aggregazione sciolta di molecole di idrogeno, ciascuna costituita da una coppia di atomi, una molecola biatomica, H₂. La prima importante proprietà chimica conosciuta dell'idrogeno è che brucia con l'ossigeno per formare acqua, H₂O, infatti, il nome idrogeno deriva dalle parole greche che significano “creatore dell'acqua”. L'idrogeno è la sostanza chimica più abbondante nell'universo, costituendo circa il 75% di tutta la materia normale¹ (tre volte più abbondante dell'elio, il secondo elemento più diffuso), ma sul nostro pianeta costituisce solo circa lo 0,14% in peso della crosta terrestre essendo anche l'elemento più leggero. L'idrogeno è non metallico (tranne quando diventa metallico a pressioni estremamente elevate) e forma facilmente un singolo legame covalente con la maggior parte degli elementi non metallici, formando composti come l'acqua e quasi tutti i composti organici. Si trova, infatti, in grandi quantità come parte dell'acqua degli oceani, dei banchi di ghiaccio, dei fiumi, dei laghi e dell'atmosfera. Come parte di innumerevoli composti del carbonio, l'idrogeno è presente in tutti i tessuti animali e vegetali e nel petrolio ('Hydrogen', 2021).

¹ **Materia normale:** “Il termine "materia normale" si riferisce alla materia comune o ordinaria che costituisce l'universo. In contrapposizione alla "materia oscura" e all'"energia oscura", la materia normale è quella di cui sono fatte le stelle, i pianeti, gli esseri viventi e tutto ciò che possiamo osservare e misurare direttamente. Va notato che, nonostante la sua abbondanza, la materia normale rappresenta solo una piccola frazione della massa-energia totale dell'universo. La maggior parte della massa dell'universo sembra essere costituita da materia oscura, una forma di materia che non emette luce e interagisce debolmente con la materia ordinaria.” Boyd, Padi (19 July 2014). "What is the chemical composition of stars?". NASA. Archived from the original on 15 January 2015. Retrieved 5 February 2008.

Dal punto di vista chimico, l'idrogeno ha tre isotopi conosciuti. I numeri di massa degli isotopi dell'idrogeno sono 1, 2 e 3, il più abbondante è l'isotopo di massa 1 generalmente chiamato idrogeno (simbolo H o 1H) ma noto anche come protio. L'isotopo di massa 2, che ha un nucleo di un protone e un neutrone ed è stato chiamato deuterio, o idrogeno pesante (simbolo D, o 2H), costituisce lo 0,0156% della normale miscela di idrogeno. Il trizio (simbolo T, o 3H), con un protone e due neutroni in ciascun nucleo, è l'isotopo di massa 3 e costituisce circa il 10-15-10-16% dell'idrogeno. La pratica di dare nomi distinti agli isotopi dell'idrogeno è giustificata dal fatto che esistono differenze significative nelle loro proprietà (Gurov 2004).

1.2 Caratteristiche applicative

L'idrogeno è un elemento estremamente versatile grazie a diverse caratteristiche che lo contraddistinguono per essere particolarmente utile in settori come quello energetico e quello industriale. Vediamo di seguito alcune di queste caratteristiche.

Alta efficienza energetica: L'idrogeno è un elemento particolarmente promettente per il settore energetico contraddistinto da caratteristiche che lo inseriscono nelle fonti energetiche ad alta efficienza. La sua energia per unità di massa è superiore a quella di molti altri combustibili convenzionali. Può essere utilizzato come carburante in celle a combustibile per produrre elettricità con un'efficienza maggiore rispetto a molte altre fonti di energia.

Zero emissioni in locazione d'uso: Quando l'idrogeno viene utilizzato in celle a combustibile, l'unico sottoprodotto è l'acqua. Ciò significa che, a differenza di molte fonti di energia convenzionali, l'uso dell'idrogeno non genera emissioni di gas serra o inquinanti nell'ambiente locale di conseguenza rappresenta un'alternativa promettente per ridurre le emissioni di gas serra nel settore dei trasporti, specialmente nei veicoli pesanti.

Stoccaggio di energia: L'idrogeno può essere utilizzato come strumento per immagazzinare energia in eccesso prodotta da fonti rinnovabili, come l'energia solare e eolica, quando non è immediatamente necessaria. Queste fonti di energia soffrono di un'importante variabilità data ovviamente dalle condizioni atmosferiche, la produzione intermittente impedisce quindi la perfetta sincronia tra la produzione e la domanda energetica. L'utilizzo dell'idrogeno aiuta ad accumulare energia nei periodi di produzione superiore alla domanda e il suo utilizzo nel caso opposto. Il processo di stoccaggio avviene normalmente mediante idrolisi dell'acqua (di cui parleremo in seguito) con successivo immagazzinamento dell'idrogeno in serbatoi ad alta pressione.

Produzione sostenibile: Esistono svariate metodologie di produzione dell'idrogeno (esposte dettagliatamente in seguito), la maggior parte delle quali sono frutto di un processo sostenibile che si serve di fonti di energia rinnovabile. Questa produzione "verde" contribuisce a ridurre l'impatto ambientale complessivo.

Applicazioni industriali: L'idrogeno è utilizzato nell'industria per diverse applicazioni, come l'idrogenazione di oli vegetali per produrre grassi alimentari solidi e la produzione di ammoniaca, che è fondamentale per la produzione di fertilizzanti.

Riduzione dipendenza combustibili fossili: L'uso diffuso dell'idrogeno può contribuire a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, contribuendo a mitigare i cambiamenti climatici e garantire una maggiore sicurezza energetica.

Potenziale per il trasporto di energia: L'idrogeno può essere utilizzato per il trasporto di energia su lunghe distanze. Ad esempio, può essere impiegato per l'approvvigionamento di energia in aree remote o per il trasporto di energia da regioni con abbondanti risorse rinnovabili a luoghi con domanda energetica elevata.

In sintesi, le caratteristiche uniche dell'idrogeno lo rendono una risorsa preziosa in vari settori, offrendo soluzioni sostenibili ed efficienti in ambito energetico ed industriale (Ibrahim, Binofai, and Mohamad 2022).

1.3 L'Idrogeno e la sua produzione

Le caratteristiche dell'idrogeno appena descritte sono il motivo del perché questo elemento ha tracciato una storia intrinsecamente legata alle evoluzioni scientifiche e industriali attraverso i secoli. Vediamo brevemente la storia dell'utilizzo dell'idrogeno, dalla sua scoperta ad oggi:

Nel 16° secolo, l'alchimista svizzero Paracelso descrisse le sue osservazioni sulla generazione di un gas infiammabile in risposta all'interazione tra ferro e acido. La vera svolta arrivò molto più tardi, quando nel 18° secolo il chimico britannico Henry Cavendish isolò l'idrogeno contribuendo in modo decisivo alla sua comprensione. Questa risorsa non venne però mai considerata seriamente in ambiti applicativi prima del 1783, quando fu utilizzata dai fratelli Montgolfier in Francia per alcuni esperimenti di volo su mongolfiera. Questo permise di vedere del potenziale in questo elemento così, nel 19° secolo divenne oggetto di studio in modo più mirato trovando applicazioni nel campo dell'illuminazione come componente dei gas utilizzati nelle lampade. Durante il 20° secolo l'utilizzo d'idrogeno aumentò in vari settori, come quello chimico ad esempio che iniziò a servirsene per la sintesi di ammoniaca nei processi petrolchimici. Dalla metà del '900 divenne un elemento comunemente usato in forma liquida come combustibile per i lanciatori spaziali. Negli anni successivi sino ad oggi gli ulteriori sviluppi nei settori legati all'uso dell'idrogeno, come l'implementazione di celle a combustibile in ambito automobilistico hanno portato a sempre un maggior interesse da parte di enti pubblici e privati rispetto a queste tecnologie. L'espansione delle applicazioni dell'idrogeno ha generato una crescente domanda e attenzione sulla sua produzione. Nonostante la sua abbondanza, l'idrogeno si trova spesso in composti come acqua o metano, richiedendo separazione per essere utilizzato puro. La produzione impiega diversi processi, con l'impatto ambientale e l'efficienza energetica che dipendono dalle metodologie. Questo ha stimolato approfonditi studi sull'argomento (Szydło 2020). Nel seguito, esamineremo i principali processi di produzione dell'idrogeno.

Gassificazione e natural gas reforming	<p>La produzione di idrogeno attraverso gassificazione e natural gas reforming sono due metodi comuni che partono dalle biomasse per isolare l'idrogeno. La gassificazione impiega materiali ricchi di carbonio, come biomasse o rifiuti, che vengono sottoposti a reazioni chimiche con un agente gassificante per formare un gas di sintesi (syngas). Questo gas deve essere pulito da impurità come polveri e composti solforati prima dell'isolamento dell'idrogeno attraverso processi come la separazione membranosa. Il natural gas reforming coinvolge la reazione del metano con vapore acqueo a temperature elevate, generando un syngas che può essere purificato per isolare l'idrogeno(Adams and Barton 2011).</p>
	<p>Pro: Diversificazione delle fonti: La gassificazione può utilizzare fonti di carbonio varie, tra cui biomasse e rifiuti. Efficienza ed economia: Il natural gas reforming è un processo efficiente ed economico per la produzione di idrogeno a livello industriale. Utilizzo di materiali abbondanti: Entrambi i metodi sfruttano materiali abbondanti come biomasse e metano. Possibilità di cattura del biossido di carbonio: La cattura del biossido di carbonio durante il processo può contribuire a ridurre le emissioni.</p>
	<p>Contro: Impurità: Entrambi i processi generano syngas contenente impurità che devono essere rimosse prima dell'isolamento dell'idrogeno. Gestione delle emissioni: L'emissione di biossido di carbonio durante il processo è un aspetto critico e richiede una gestione attenta per ridurre l'impatto ambientale. Processo complesso: La purificazione del syngas e l'isolamento dell'idrogeno richiedono processi complessi e costosi. Dipendenza da fonti fossili: Il natural gas reforming dipende da idrocarburi, come il metano, implicando una certa dipendenza da fonti fossili.</p>
Idrolisi	<p>Il processo di Idrolisi impiega l'elettricità per separare l'acqua nei suoi componenti principali, idrogeno e ossigeno, attraverso l'elettrolisi. Ci sono due tipi principali di questo processo: l'elettrolisi dell'acqua con membrana a scambio protonico e l'elettrolisi dell'acqua ad alcali. In entrambi i casi, due elettrodi immersi in acqua vengono utilizzati per far avvenire la reazione chimica(M. Wang et al. 2014).</p>
	<p>Pro: Energia verde: Se l'energia utilizzata proviene da fonti rinnovabili, come solare o eolica, l'idrogeno prodotto è considerato verde poiché non emette gas a effetto serra durante la produzione. Flessibilità: L'Idrolisi è un sistema flessibile che può essere adottato su sistemi di varie dimensioni. Zero emissioni locali: Durante la produzione, l'idrolisi non emette inquinanti locali o gas serra. Produzione decentralizzata: Può essere implementata su piccola scala, consentendo produzioni più decentralizzate.</p>
	<p>Contro: Efficienza energetica: L'efficienza energetica è generalmente più bassa rispetto ad altri metodi di produzione, specialmente se l'elettricità utilizzata non proviene da fonti rinnovabili. Alti costi iniziali: L'investimento iniziale per un impianto d'idrolisi è significativo. Costi di elettricità: Oltre ai costi iniziali, occorre considerare i costi continuativi di elettricità per mantenere l'operatività. Disponibilità dell'acqua: L'approvvigionamento d'acqua può essere un problema, rendendo il processo più consigliato per regioni ricche d'acqua. Concorrenza con altre tecnologie: In presenza di alternative più economiche o efficienti, l'idrolisi potrebbe risultare meno competitiva.</p>

Biomass-Derived Liquid Reforming (BDLR)	<p>Il Biomass-Derived Liquid Reforming (BDLR) è un processo innovativo che trasforma liquidi derivati da biomasse, come legno o rifiuti agricoli, in syngas, una miscela di idrogeno e monossido di carbonio. Questo metodo offre un modo sostenibile per ottenere idrogeno da fonti rinnovabili, riducendo le emissioni di carbonio rispetto alle fonti fossili(Cortright, Davda, and Dumesic 2002).</p>
	<p>Pro: Sostenibilità ambientale: Utilizza biomasse anziché combustibili fossili, contribuendo alla riduzione delle emissioni di carbonio. Fonte di carbonio neutrale: La biomassa è considerata una fonte di carbonio neutrale, contribuendo alla mitigazione dell'effetto serra. Risorse rinnovabili: Utilizza materiali organici come legno e rifiuti agricoli, sfruttando risorse rinnovabili. Diversificazione delle fonti energetiche: Introduce un nuovo metodo per la produzione di idrogeno, diversificando le fonti energetiche disponibili. Interesse globale: Il crescente interesse in diverse regioni potrebbe portare a investimenti pubblici e privati per lo sviluppo della tecnologia.</p>
	<p>Contro: Fase di sviluppo: La tecnologia BDLR è ancora in fase di sviluppo e richiede ulteriori investimenti e ricerche per diventare competitiva. Tempo di implementazione: L'implementazione su larga scala richiederà tempo, e nel frattempo, tecnologie consolidate come il gas reforming continuano a dominare. Complessità: La scelta del catalizzatore, l'ottimizzazione del processo di reforming e la gestione delle emissioni di carbonio sono sfide complesse che richiedono ulteriori sviluppi. Confronto con tecnologie esistenti: La BDLR deve ancora dimostrare di essere più efficiente ed economica rispetto alle tecnologie esistenti, come il gas reforming. Dipendenza dagli investimenti: Lo sviluppo futuro della tecnologia dipende dalla disponibilità di investimenti pubblici e privati, il che può essere incerto.</p>
Microbial Biomass Conversion	<p>Il processo di Microbial Biomass Conversion mira a produrre idrogeno attraverso la conversione di biomasse microbiche. Si selezionano specifici batteri o alghe che vengono alimentati con materiale organico come biomasse o scarti alimentari. Le alghe, mediante fotosintesi, convertono anidride carbonica ed acqua in zuccheri che vengono successivamente fermentati per produrre idrogeno. Nei batteri anaerobi, si verifica la metabolizzazione del materiale organico con la produzione di acidi organici, generando idrogeno come sottoprodotto. È necessario fornire condizioni ottimali di temperatura, pH e nutrienti per la crescita e l'attività dei microorganismi. Questo processo utilizza materie prime rinnovabili, riducendo gli impatti rispetto ai combustibili fossili, ma è ancora in fase di ricerca a causa dell'efficienza relativamente bassa e delle sfide nell'ottimizzazione dei ceppi di microorganismi(Cortright, Davda, and Dumesic 2002).</p>
	<p>Pro: Utilizza materie prime rinnovabili, contribuendo alla sostenibilità ambientale. Riduce gli impatti ambientali rispetto ai processi basati su combustibili fossili. Sfrutta il metabolismo di microorganismi per generare idrogeno da rifiuti o scarti agricoli. Può essere applicato sia con alghe che con batteri anaerobi, offrendo flessibilità. La fotosintesi delle alghe contribuisce anche alla cattura di anidride carbonica.</p>
	<p>Contro: L'efficienza del processo è ancora bassa rispetto ad altre tecnologie. Sono presenti difficoltà nell'ottimizzazione dei ceppi di microorganismi. La gestione delle condizioni ambientali per i microorganismi può essere complicata. È ancora in fase di ricerca, quindi potrebbero emergere nuove sfide. Richiede monitoraggio costante di temperatura, pH e presenza di nutrienti.</p>

Thermochemical Water Splitting	<p>Il Thermochemical Water Splitting (TWSC) è un processo innovativo che utilizza l'energia termica per produrre idrogeno utilizzando l'acqua come materia prima. A differenza dell'idrolisi, che richiede energia elettrica, il TWSC utilizza un solido di supporto termochimico, come zinco o ferro, che assorbe energia da fonti come la luce solare concentrata o altra fonte di calore. Il materiale subisce una reazione di decomposizione termochimica, rilasciando idrogeno e un ossido di metallo ridotto. L'idrogeno viene separato e raccolto come combustibile pulito, mentre il materiale assorbente viene rigenerato tramite una reazione di ossidazione esposta all'ossigeno dell'aria (Marques, Costa, and Pereira 2018).</p>
	<p>Pro: Utilizza l'energia termica, offrendo un approccio più sostenibile rispetto all'idrolisi elettrica. Può sfruttare direttamente fonti rinnovabili come l'energia solare concentrata. La produzione di idrogeno è pulita, senza emissioni dirette di gas serra. Il processo può essere più efficiente dell'elettrolisi ad alta temperatura.</p>
	<p>Contro: La tecnologia è ancora in fase di ricerca, e i rendimenti termici e i costi non sono completamente definiti. La scelta dei materiali è critica per aumentare l'efficienza del processo, richiedendo ulteriori sviluppi. La complessità del processo potrebbe comportare sfide nella scala industriale. Potrebbe essere necessario affrontare problemi di sicurezza legati all'uso di materiali reattivi e alle alte temperature.</p>
Photobiological Water Splitting	<p>Il Photobiological Water Splitting è un processo che sfrutta la luce solare per dividere le molecole d'acqua in ossigeno e idrogeno, utilizzando microalghe e cianobatteri coltivati in serbatoi o bioreattori. Dopo la fotosintesi, l'idrogeno viene isolato come combustibile pulito, mentre l'ossigeno viene rilasciato nell'atmosfera. Sebbene promettente per la produzione di energia rinnovabile, la tecnologia PEC richiede miglioramenti in durata, efficienza e costo per competere con fonti energetiche convenzionali (Touloupakis and Torzillo 2019).</p>
	<p>Pro: Rinnovabile: Sfrutta l'energia solare, una fonte rinnovabile e inesauribile. Pulito: Produce idrogeno come combustibile pulito, riducendo le emissioni. Nessun consumo di risorse finite: Non dipende da risorse finite come il petrolio o il gas naturale. Rilascio di ossigeno: Contribuisce al rilascio di ossigeno nell'atmosfera durante il processo.</p>
	<p>Contro: Economicità: La tecnologia PEC richiede ulteriori sviluppi per diventare economicamente competitiva. Durata dei componenti: I componenti utilizzati nel processo hanno una durata ancora poco soddisfacente. Efficienza: È necessario migliorare l'efficienza del processo per renderlo più competitivo. Costi di commercializzazione: Sono necessari miglioramenti nella durata e nel costo per la commercializzazione su larga scala. Sensibilità all'ossigeno: Gli idrogenasi utilizzati sono sensibili all'ossigeno, richiedendo ricerca sulla selezione di specie meno sensibili. Ingegneria genetica: L'ingegneria genetica delle microalghe e cianobatteri solleva preoccupazioni etiche e ambientali. Ottimizzazione fotobioreattori: La progettazione di fotobioreattori per la produzione di idrogeno richiede ulteriori ricerche e sviluppi.</p>

	<p>La tecnologia del Photoelectrochemical Water Splitting (PEC) mira a utilizzare materiali fotosensibili per assorbire l'energia solare e guidare la produzione di idrogeno attraverso la scissione dell'acqua. Una cella fotoelettrica con un elettrodo fotosensibile e un catalizzatore facilita la separazione di molecole di acqua in ossigeno e idrogeno. L'idrogeno può essere utilizzato come combustibile pulito, mentre l'ossigeno viene rilasciato nell'atmosfera. Sebbene promettente per la produzione di energia rinnovabile, la PEC richiede ulteriori sviluppi per competere economicamente con le fonti energetiche convenzionali, come miglioramenti nell'efficienza, durata e costo dei componenti (Mersch et al. 2015).</p>
<p>Photoelectrochemical Water Splitting</p>	<p>Pro: Energia Rinnovabile: Utilizza l'energia solare per produrre idrogeno come combustibile pulito. Ambiente: Riduce l'impatto ambientale, generando solo ossigeno come sottoprodotto. Indipendenza Energetica: Contribuisce alla diversificazione delle fonti energetiche, riducendo la dipendenza da combustibili fossili.</p>
	<p>Contro: Economicità: Attualmente non è economicamente competitiva rispetto alle fonti energetiche tradizionali. Durata dei Componenti: La durata dei componenti PEC è ancora in fase di studio, influenzando la sua sostenibilità a lungo termine. Efficienza: Richiede miglioramenti nell'efficienza per massimizzare la produzione di idrogeno. Commercializzazione: Necessita di ulteriori sviluppi per diventare commercialmente disponibile su larga scala. Ricerca in Corso: La tecnologia è ancora in fase di ricerca e sviluppo, con incertezze sulla sua effettiva contribuzione nella transizione sostenibile.</p>

Tabella 1: Metodi di produzione dell'Idrogeno

1.4 Lo stoccaggio dell'idrogeno

Le fasi di stoccaggio e trasporto sono ovviamente punti cardine al fine di utilizzare l'idrogeno come fonte energetica. I metodi sono molteplici e dipendono spesso dalle esigenze specifiche dell'applicazione. Di seguito verranno esposte le principali tipologie di stoccaggio.

<p>Idrogeno pressurizzato</p>	<p>Lo stoccaggio dell'idrogeno in forma gassosa tramite compressione è comune nel settore energetico. Questo processo implica la compressione dell'idrogeno a pressioni elevate (20-700 bar) per ridurne il volume. La scelta della pressione dipende dall'applicazione. Tuttavia, la compressione richiede notevole energia. L'idrogeno compresso viene immagazzinato in serbatoi speciali di alluminio o fibra di carbonio. Per l'uso successivo, la pressione viene regolata tramite valvole. L'infrastruttura esistente lo rende adatto al rifornimento veloce di veicoli. Gli svantaggi includono l'alto costo energetico, la sfida di peso e volume dei serbatoi, e la necessità di gestire attentamente le pressioni elevate per la sicurezza (Elberry et al. 2021).</p> <p>Pro: Infrastruttura esistente per distribuzione. Adatto al rifornimento rapido di veicoli. Ampia gamma di settori di utilizzo.</p> <p>Contro: Elevato costo energetico per la compressione. Sfida di peso e volume dei serbatoi. Gestione attenta necessaria per la sicurezza a pressioni elevate.</p>
<p>Idrogeno criogenico</p>	<p>La conservazione dell'idrogeno in forma liquida tramite il processo di liquefazione è una strategia sempre più rilevante nell'ambito dell'energia sostenibile. Questo processo implica il raffreddamento dell'idrogeno a temperature estremamente basse, di solito inferiore a -253°C. Sebbene sia un processo energeticamente intensivo, la liquefazione offre un notevole vantaggio in termini di riduzione del volume di stoccaggio rispetto all'idrogeno gassoso, risultando conveniente quando lo spazio è limitato. Dopo la liquefazione, l'idrogeno viene conservato in serbatoi isolati per minimizzare le perdite di calore e garantire la sua permanenza nello stato liquido. Tuttavia, vi sono sfide legate alla sua bassa temperatura, con possibili danni a materiali e apparecchiature, e alla necessità di mantenerlo costantemente liquido per motivi di sicurezza (Ni 2006).</p> <p>Pro: Riduzione del volume: La liquefazione consente uno stoccaggio più compatto rispetto all'idrogeno gassoso. Sicurezza: Il mantenimento dell'idrogeno nello stato liquido riduce il rischio di rilascio improvviso di grandi quantità di gas.</p> <p>Contro: Costo energetico elevato: Il processo di liquefazione richiede notevoli quantità di energia. Mantenimento delle temperature: Per conservare l'idrogeno a lungo termine, è necessario mantenere costanti le temperature, aumentando il consumo energetico. Complessità tecnologica: La progettazione di serbatoi e attrezzature richiede attenzione particolare a causa delle basse temperature dell'idrogeno criogenico.</p>

<p>Forma di liquido organico</p>	<p>La tecnologia di stoccaggio dell'idrogeno tramite liquidi organici rappresenta un'innovazione nell'ambito dell'energia sostenibile. Questi liquidi organici assorbono e rilasciano idrogeno in modo reversibile a temperatura ambiente o leggermente superiore. Quando necessario, il liquido trasportatore viene riscaldato per rilasciare l'idrogeno, consentendo cicli ripetitivi. Tra i vantaggi principali, la tecnologia è sicura, facile da manipolare e non richiede alte pressioni o temperature estreme. Il processo di rilascio è rapido, adatto a diverse esigenze energetiche. Tuttavia, sfide come la durata del ciclo di vita del liquido e la scelta di liquidi appropriati (stabili, economici e sicuri) sono da affrontare. Nonostante ciò, la ricerca è in corso per migliorare le prestazioni e la durata del ciclo di vita, rendendo la tecnologia promettente per il futuro dell'energia sostenibile (Chu et al. 2023).</p>
	<p>Pro: Sicurezza e facilità di manipolazione. Non richiede alte pressioni o temperature estreme. Rilascio rapido dell'idrogeno adatto a diverse esigenze energetiche. Tecnologia promettente per il futuro dell'energia sostenibile.</p>
	<p>Contro: La durata del ciclo di vita del liquido organico deve giustificare l'investimento iniziale. La selezione dei liquidi organici appropriati è una sfida. Necessità di liquidi stabili, facilmente disponibili, sicuri ed economici. Tecnologia ancora in fase di sviluppo e ricerca continua.</p>
<p>In forma di idruri metallici</p>	<p>L'utilizzo di idruri metallici è una tecnologia emergente con applicazioni nell'ambito dell'energia elettrica, fornendo una soluzione pratica per il trasporto e la conservazione dell'idrogeno. Questa tecnologia si basa sull'uso di metalli come titanio, magnesio o palladio, che reagiscono con l'idrogeno per formare idruri metallici reversibili. Ciò consente il rilascio controllato di idrogeno quando necessario. Tra i vantaggi vi è la riduzione del volume di stoccaggio rispetto all'idrogeno compresso, risparmiando spazio, e la sicurezza data dalla stabilità del composto. Tuttavia, ci sono sfide legate a temperature e pressioni elevate necessarie per il rilascio dell'idrogeno e alla limitata durata degli idruri metallici (Klopčič et al. 2023).</p>
	<p>Pro: Riduzione del volume di stoccaggio rispetto all'idrogeno compresso, risparmiando spazio. Stabilità e sicurezza nel trattenere l'idrogeno. Reversibilità del processo per il rilascio controllato dell'idrogeno.</p>
	<p>Contro: Possibilità di richiedere temperature e pressioni molto elevate per il rilascio dell'idrogeno. Limitata durata degli idruri metallici dovuta a un numero specifico di cicli. Necessità di sviluppare idruri metallici più duraturi ed efficienti attraverso la ricerca.</p>

<p>Stoccaggio in forma di idrati di gas naturali</p>	<p>L'approccio allo stoccaggio dell'idrogeno prevede l'uso di idrati di gas naturali, formati da metano e molecole d'acqua, nei quali è possibile incorporare l'idrogeno. Questi idrati si formano a pressioni elevate e temperature basse, tipicamente nelle profondità marine. L'idrogeno viene incorporato nella loro struttura cristallina, e mantenendo le condizioni favorevoli, gli idrati trattenendo l'idrogeno in forma cristallina. Per l'estrazione, è possibile variare temperature o pressioni causando la decomposizione degli idrati. I vantaggi includono la capacità di immagazzinare grandi quantità d'idrogeno in un volume ridotto e la stabilità a temperature e pressioni moderate, agevolando il trasporto. Tuttavia, i tempi per formare e decomporre gli idrati sono considerevoli, variando da ore a giorni, e la modifica degli idrati richiede tecnologie specifiche (Davoodabadi, Mahmoudi, and Ghasemi, n.d.).</p>
	<p>Pro: Alta capacità di immagazzinamento: Grande quantità d'idrogeno può essere stoccata in un volume ridotto. Stabilità a pressioni e temperature moderate: Gli idrati sono generalmente stabili, semplificando il trasporto rispetto ad altri metodi. Utilizzo di risorse naturali: Si basa su idrati di gas naturali, che si formano naturalmente nelle profondità marine.</p>
	<p>Contro: Tempi lunghi di formazione e decomposizione: Il processo richiede tempi significativi, variando da ore a giorni, limitando la rapidità di utilizzo. Complessità della modifica degli idrati: Il processo di incorporare idrogeno negli idrati richiede tecnologie specifiche e non è semplice. Condizioni specifiche di formazione: Le pressioni molto alte e le temperature relativamente basse necessarie per la formazione sono limitate alle profondità marine, rendendo il metodo geograficamente limitato.</p>
<p>Stoccaggio chimico</p>	<p>L'approccio allo stoccaggio dell'idrogeno consiste nella sua combinazione con altri composti chimici per formare composti stabili. Due metodologie sono in fase di sperimentazione e ricerca: l'utilizzo di materiali porosi come i MOF (Metal Organic Framework), che assorbono idrogeno attraverso pori nanometrici, e l'impiego di ammine metalliche come rame o litio, che formano complessi chiamati ammino-metalliduri. Entrambi i metodi permettono il rilascio dell'idrogeno variando temperatura o pressione. Queste tecnologie sono promettenti per la loro efficienza e la riduzione dei costi di stoccaggio (Ni 2006).</p>
	<p>Pro: Ripetibilità e Ottimizzazione: Entrambi i metodi offrono una buona ripetibilità nei cicli di assorbimento e rilascio, con sforzi per ottimizzare le strutture. Applicazioni Diverse: I MOF possono trovare applicazioni nella cattura di idrogeno da processi industriali, mentre le ammine metalliche sono adatte allo stoccaggio veicolare. Selettività e Sicurezza: Le ammine metalliche mostrano una selettività elevata per l'idrogeno, rendendole sicure e stabili da manipolare.</p>
	<p>Contro: Fase Sperimentale: Entrambe le tecnologie sono ancora in fase sperimentale, quindi potrebbero richiedere ulteriori sviluppi prima di essere ampiamente adottate. Variazione di Prestazioni: La capacità di assorbimento può variare tra diverse tipologie di MOF e ammine, richiedendo una selezione accurata. Costi di Ricerca: Nonostante la promessa, la ricerca e lo sviluppo di queste tecnologie potrebbero comportare costi significativi prima di una piena implementazione su larga scala.</p>

<p>Stoccaggio in forma di celle a combustibile</p>	<p>Questa metodologia è soprattutto usata per la mobilità ad idrogeno quindi veicoli come auto o autobus ma anche per sistemi di alimentazione stazionaria che forniscono energia elettrica a edifici o impianti industriali. Lo stoccaggio tramite celle a combustibile coinvolge l'uso diretto di idrogeno come carburante per generare energia elettrica. Di base, questo approccio elimina la necessità di immagazzinare l'idrogeno in serbatoi separati in quanto il gas viene utilizzato direttamente nel processo elettrochimico all'interno della cella di combustibile. Analizzeremo più avanti nel dettaglio questo metodo dal punto di vista di utilizzo dell'idrogeno come carburante (Hacking, Pearson, and Eames 2019).</p>
---	---

Tabella 2: Metodi di stoccaggio dell'idrogeno

1.5 L'idrogeno e il suo utilizzo

1.5.1 Settore industriale

L'idrogeno viene ampiamente utilizzato in svariati processi industriali, ne vediamo i più importanti:

Produzione di ammoniaca: Questo risulta essere uno dei principali utilizzi dell'idrogeno nel settore industriale per la produzione di fertilizzanti e altri prodotti chimici. L'ammoniaca si compone di azoto, che viene generalmente prelevato dall'aria, e dall'idrogeno, che può provenire da diverse fonti. L'intero processo verrà effettuato ad alte temperature (tra 300 e 500°C) e pressioni (tra 100 e 250 atmosfere) dove la reazione chimica di sintesi dell'ammoniaca troverà le condizioni ideali per poter avvenire.

Produzione di acciaio: L'idrogeno può avere svariati utilizzi anche in ambito siderurgico come la produzione dell'acciaio. Nella produzione convenzionale la riduzione del carbonio in forma coke per ricavare minerale di ferro comporta considerevoli emissioni di anidride carbonica. Proprio in questa fase l'idrogeno può rappresentare un elemento sostitutivo del carbonio come agente riducente utilizzando una tecnica denominata riduzione diretta. Inoltre, l'idrogeno può avere anche un altro utilizzo nella produzione dell'acciaio, ci si può servire di esso durante il processo di fusione dell'acciaio per rimuovere le impurità e ridurre l'ossigeno aiutando a migliorare la qualità del prodotto finito. Queste tecniche possono aiutare in modo significativo nel rendere l'industria siderurgica più sostenibile limitando notevolmente le emissioni di CO₂. Questa metodologia di produzione dell'acciaio è ancora poco utilizzata in quanto i metodi tradizionali risultano ancora economicamente più vantaggiosi.

Produzione di metanolo: Il metanolo rappresenta un importante prodotto chimico e combustibile, inoltre è anche utilizzato come vettore energetico per lo stoccaggio e il trasporto di energia rinnovabile. La sua produzione si basa sulla reazione tra monossido di carbonio e idrogeno a temperature moderate e sotto pressione.

Raffinazione del petrolio: L'idrogeno può essere sfruttato anche nel settore petrolifero col processo di desolforazione. Uno dei principali scopi di questa fase è la desolforazione durante la quale le piccole quantità di zolfo presenti nei prodotti petroliferi vengono rimossi. L'idrogeno reagendo con l'azoto e formando composti di solfuro di idrogeno che potranno essere rimossi nelle fasi successive. I benefici dell'utilizzo di idrogeno durante queste fasi sono la possibilità di ricavare prodotti più puliti andando appunto a purificare il prodotto contaminato e rendendolo conforme agli standard ambientali. Dal punto di vista della prestazione dei carburanti, quelli trattati con idrogeno bruciano in modo più pulito generando meno inquinanti atmosferici durante la combustione.

1.5.2 Settore aerospaziale

L'idrogeno ha sempre svolto un ruolo fondamentale nel settore aerospaziale, in particolare come combustibile per i razzi. Sin dal 1950, l'idrogeno liquido è stato utilizzato come principale combustibile per i razzi, grazie a una serie di caratteristiche che lo rendono, ancora oggi, dopo più di settant'anni, l'elemento più adatto per questo tipo di applicazione. Una delle principali caratteristiche dell'idrogeno è la sua capacità di fornire una spinta significativa in rapporto al suo peso. Questa caratteristica, nota come "impulso specifico", è fondamentale per la propulsione dei razzi, poiché determina quanto velocemente un razzo può viaggiare e quanto carico può portare nello spazio. Inoltre, la combustione dell'idrogeno con l'ossigeno produce solo acqua, rendendo l'idrogeno una scelta ecologicamente vantaggiosa come combustibile per i razzi. Questo è particolarmente importante in un'epoca in cui la sostenibilità ambientale è una priorità globale. Un altro vantaggio dell'uso dell'idrogeno nei viaggi spaziali è la sua capacità di produrre acqua come sottoprodotto. Questo può essere particolarmente utile durante i viaggi spaziali di lunga durata, dove la gestione delle risorse può essere un'attività critica. L'acqua prodotta può essere utilizzata per vari scopi, tra cui il sostentamento dell'equipaggio e la produzione di ossigeno respirabile. Tuttavia, l'uso dell'idrogeno nel settore aerospaziale presenta anche alcune sfide. Una delle principali è la necessità di gestire le basse temperature

necessarie per mantenere l'idrogeno nel suo stato liquido. L'idrogeno diventa liquido solo a temperature estremamente basse, vicine allo zero assoluto, e mantenere queste temperature in un ambiente di lancio o in volo può essere difficile. L'idrogeno continua a essere quindi un elemento chiave nel settore aerospaziale, e con l'avanzamento della tecnologia e la crescente enfasi sulla sostenibilità, il suo ruolo è destinato a diventare ancora più importante in futuro.

1.5.3 Cofinanziamento dell'idrogeno nel gas naturale

Il cofinanziamento dell'idrogeno nel gas naturale è una pratica innovativa che mira a facilitare la transizione verso un futuro energetico più sostenibile. Questa pratica consiste nell'aggiungere idrogeno alle reti di distribuzione del gas naturale, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra e promuovere l'uso di fonti di energia rinnovabili. Il gas risultante da questa miscelazione viene spesso definito "gas naturale rinnovabile" o "gas a idrogeno aggiunto". La percentuale di idrogeno in questa miscela può variare dal 5% al 30%, a seconda delle specifiche esigenze e delle normative locali. Uno dei principali vantaggi di questa metodologia è la capacità di utilizzare le infrastrutture esistenti per il gas naturale. Questo significa che non è necessario costruire nuove reti di distribuzione, il che può comportare un notevole risparmio in termini di costi e tempo. Tuttavia, ci sono anche alcune sfide tecniche associate a questa pratica. Ad esempio, potrebbe essere necessario apportare modifiche ai fornelli o alle caldaie per adattarli all'uso di gas a idrogeno aggiunto. Questo è particolarmente vero nel caso di alte concentrazioni di idrogeno nella miscela. Per illustrare meglio, prendiamo l'esempio di una città che decide di adottare questa pratica. La città potrebbe iniziare aggiungendo una piccola percentuale di idrogeno alla sua rete di gas naturale, monitorando attentamente l'impatto su fornelli e caldaie. Man mano che la città si adatta all'uso del gas a idrogeno aggiunto, la percentuale di idrogeno nella miscela potrebbe essere gradualmente aumentata. In conclusione, il cofinanziamento dell'idrogeno nel gas naturale rappresenta un passo importante verso un futuro energetico più sostenibile in quanto i potenziali benefici in termini

di riduzione delle emissioni e di utilizzo di fonti di energia rinnovabili rendono questa pratica una scelta promettente per molte città e paesi in tutto il mondo.

1.5.4 Mobilità di veicoli ad idrogeno

L'idrogeno è considerato una delle soluzioni più promettenti per la mobilità sostenibile. Questo elemento presenta diverse caratteristiche che lo rendono particolarmente attraente in questo settore. In primo luogo, l'autonomia dei veicoli alimentati ad idrogeno è quasi paragonabile a quella dei veicoli con motore endotermico. Questo significa che possono percorrere distanze simili a quelle dei veicoli tradizionali senza dover essere riforniti, rendendoli una scelta pratica per molti utenti. In secondo luogo, i tempi di rifornimento dei veicoli ad idrogeno sono notevolmente più brevi rispetto a quelli necessari per la ricarica completa di un'auto elettrica. Mentre un'auto elettrica può richiedere diverse ore per una ricarica completa, un veicolo ad idrogeno può essere rifornito in pochi minuti. Questo può ridurre notevolmente i tempi di inattività e aumentare la convenienza per gli utenti. Tuttavia, ci sono anche alcune sfide associate all'uso dell'idrogeno per la mobilità sostenibile. Una delle principali è la mancanza di infrastrutture. Attualmente, le stazioni di rifornimento di idrogeno sono molto meno diffuse rispetto alle colonnine per i veicoli elettrici. Questo può rendere più difficile per gli utenti trovare un posto dove rifornire i loro veicoli ad idrogeno. Sotto questo punto di vista è necessario un interesse da parte di enti pubblici e privati per contribuire nella costruzione di un'infrastruttura adatta che superi il limite necessario a rendere l'ecosistema della mobilità ad idrogeno fattibile. Ad esempio, diverse aziende automobilistiche stanno sviluppando nuovi modelli di veicoli ad idrogeno, e alcuni paesi stanno investendo in infrastrutture per l'idrogeno. Nelle prossime pagine, approfondiremo ulteriormente l'argomento dei veicoli ad idrogeno, esaminando le tecnologie emergenti, le tendenze del mercato e le politiche governative che potrebbero plasmare il futuro di questa promettente forma di mobilità sostenibile.

1.6 Idrogeno e mobilità

1.6.1 Motori a combustione interna a idrogeno

Questo genere di motore utilizza l'idrogeno come fonte primaria di combustione utilizzando una versione modificata dei motori a combustione interna alimentati a benzina. L'idrogeno viene quindi immagazzinato in un serbatoio e arriverà poi direttamente al motore a combustione interna. All'interno del cilindro l'idrogeno verrà bruciato insieme all'ossigeno dell'aria generando energia meccanica necessaria per muovere il veicolo. La potenza di un motore ad idrogeno dipende dal rapporto aria/carburante e dal metodo d'iniezione utilizzato. Il rapporto stechiometrico aria/idrogeno è 34:1. Sia utilizzando un metodo a carburatore che a iniezione miscelando idrogeno e aria prima di arrivare alla camera di combustione si ha una riduzione della potenza teorica ottenibile raggiungendo nel complesso una potenza non maggiore del 85% di quella generata da un motore a benzina. Utilizzando invece un sistema ad iniezione diretta (che miscelano idrogeno ed aria dopo la chiusura della camera di combustione) si può ottenere una potenza fino al 15% superiore a quella rispetto al motore a benzina. Nei casi descritti la temperatura di combustione è molto elevata aumentando la quantità di ossidi di azoto emessi (che sono un importante inquinante) di conseguenza, per ovviare a questa problematica, si progettano solitamente motori che utilizzano una quantità di aria pari al doppio di quella che sarebbe richiesta per la combustione totale, in questo modo la produzione di ossidi di azoto è notevolmente ridotta. L'aspetto negativo di questa soluzione è che così facendo la potenza erogata viene ridotta al 50% di quella generata da un normale motore a benzina. Questo porta alla necessità di utilizzare motori più grandi rispetto a quelli a benzina combinati con l'utilizzo di turbocompressori. Dal punto di vista dell'efficienza un motore ad idrogeno può essere efficiente tanto quanto uno a benzina. Per quanto riguarda le emissioni il principale sottoprodotto della combustione d'idrogeno è l'acqua ma bisogna considerare che poiché la combustione dell'idrogeno avviene in un'atmosfera contenente azoto e ossigeno si possono avere, come già accennato, delle emissioni di ossidi di azoto, per questo motivo questa tecnologia non può essere attualmente considerata a zero

emissioni. La ricerca sta attualmente lavorando per ridurre e portare a zero tali emissioni di azoto. Pur essendo una tecnologia promettente sotto vari punti di vista vi sono diverse ragioni del perché i veicoli ad idrogeno con motore a combustione interna non sono diffusi quanto quelli a celle di combustibile o a veicoli elettrici a batteria. In primis, come detto, emissioni e potenza erogata sono ancora delle sfide da risolvere. Inoltre, la tecnologia a celle a combustibile è stata maggiormente sviluppata e commercializzata e su di essa si concentrano la maggior parte degli investimenti dedicati al settore della mobilità ad idrogeno. Dal punto di vista della complessità i motori a combustione ad idrogeno risultano essere più complessi rispetto alle celle a combustibile. Queste motivazioni portano i veicoli a celle a combustibile ad essere una tecnologia più promettente nel panorama della mobilità sostenibile. E' necessario aggiungere che la multinazionale tedesca Bosch, maggior produttrice mondiale di componenti di autovetture, ha annunciato il debutto di un nuovo motore a combustione a idrogeno alla fine del 2024. Vista la credibilità della compagnia tutto il settore dell'automotive a idrogeno attende questo momento che potrebbe dare nuova linfa e speranza alla tecnologia del motore a idrogeno (L. Wang et al. 2017).

1.6.2 Celle a combustibile

I veicoli dotati di celle a combustibile utilizzano l'idrogeno per generare elettricità che servirà ad alimentare un motore elettrico. Il funzionamento delle celle a combustibile rappresenta un processo elettrochimico complesso che viene chiamato elettrolisi inversa in quanto sfrutta una reazione chimica inversa a quella dell'elettrolisi dell'acqua. Prima di descrivere nel dettaglio il processo è necessario comprendere come si compone una cella a combustibile. La configurazione più utilizzata, specialmente quando parliamo di veicoli a idrogeno, è la cella a membrana di scambio protonico. Essa è composta da un anodo dove avverrà l'ossidazione dell'idrogeno, è realizzata con un catalizzatore di platino posto su di una superficie porosa, solitamente in fibra di carbonio. Il catodo, dove avviene la riduzione dell'ossigeno, è anch'esso composto da platino e fibra di carbonio. La membrana elettrolitica è invece il componente posto a separare

anodo e catodo, è solitamente realizzata in polimeri, come il Nafion, capaci di condurre ioni. Infine si hanno i collettori bipolari che si presentano come piastre posizionate ai lati di catodo e anodo che hanno lo scopo di distribuire in modo uniforme i fluidi (idrogeno, ossigeno e acqua) attraverso la cella a combustione e fungono inoltre come supporto strutturale all'intero apparato. Per poter visualizzare il processo di cui stiamo parlando abbiamo la necessità di scomporlo in alcune fasi che ne possano facilitare la comprensione. Inizialmente l'idrogeno viene alimentato all'anodo dove avverrà la reazione di ossidazione dell'idrogeno stesso quindi le sue molecole subiranno una scissione di protoni a carica positiva ed elettroni a carica negativa. I protoni passeranno attraverso la membrana elettrolitica che essendo progettata per essere caratterizzata da una permeabilità selettiva, impedirà agli elettroni di passare direttamente per quella via ma saranno costretti a seguire un percorso esterno creando così una corrente elettrica utilizzabile per alimentare il motore elettrico. Gli ioni, passati attraverso la membrana, raggiungeranno il catodo dove avverrà la riduzione dell'ossigeno. Gli ioni d'idrogeno si combineranno quindi con l'ossigeno dell'aria e con gli elettroni passati dal circuito esterno per formare acqua. Riassumendo la cella a combustibile converte l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica attraverso due reazioni chiave: l'ossidazione dell'idrogeno e la riduzione dell'ossigeno (*Figura 1*).

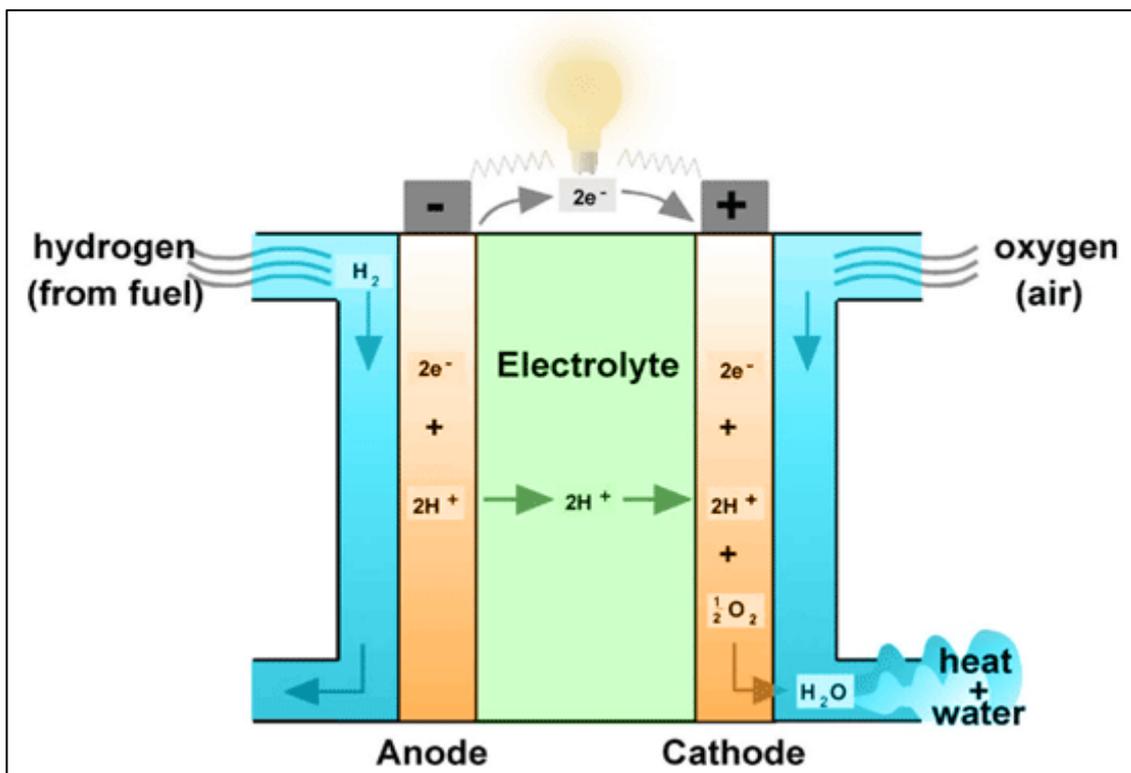


Figura 1: Schema di funzionamento di una cella a combustibile (World Fuel Cell Council)

Le celle a combustibile rappresentano una tecnologia estremamente attuale caratterizzata da investimenti sempre maggior di anno in anno ma la sua storia parte da oltre due secoli fa. Nel 1801 Humphry Davy dimostra per la prima volta il concetto di cella a combustibile, si dovrà però attendere più di quarant'anni prima di vedere la prima cella a combustibile funzionante che arrivò nel 1842 grazie al chimico William Grove. Gli esperimenti del chimico con quella che chiamò "batteria a gas voltaica" dimostrarono che una corrente poteva essere prodotta da una reazione elettrochimica tra idrogeno e ossigeno sfruttando un catalizzatore di platino. Dopo il 1939 l'ingegnere inglese Francis Thomas Bacon approfondì il lavoro di Grove costruendo varie celle a combustibile alcaline. Il primo veicolo moderno a sfruttare la tecnologia delle celle a combustibile non arrivò prima del 1959 quando un trattore agricolo venne modificato dotandolo di una cella a combustibile da 15 kilowatt. Nei decenni seguenti l'applicazione e la ricerca delle celle a combustibile si è concentrata nel settore delle missioni

spaziali con il progetto Gemini e successivamente con il programma Apollo si è testata questa tecnologia per fornire energia elettrica all'interno dei moduli lunari. Nel 1966 General Motors sviluppò il primo veicolo stradale a celle di combustibile, lo Chevrolet Electrovan, caratterizzato da un'autonomia di quasi 200 chilometri (le auto a benzina di quegli anni potevano percorrere circa il doppio dei chilometri con un pieno di carburante). Il van aveva solo due posti in quanto la pila di celle a combustibile e i grandi serbatoi d'idrogeno e ossigeno occupavano interamente la parte posteriore del mezzo. Lo Chevrolet Electrovan si limitò ad essere solo un prototipo per via degli esorbitanti costi di costruzione. Negli anni seguenti l'utilizzo delle celle di combustibile si limitò al settore spaziale, compreso lo Space Shuttle, fino a quando negli anni 90' le case di automobili si interessarono a questa tecnologia e pochi anni più tardi, nel 2001 la presentazione dei primi serbatoi ad idrogeno da 700 bar, che potevano immagazzinare una grande quantità d'idrogeno in uno spazio ridotto diede il via a grandi investimenti nel settore dei veicoli ad idrogeno. Inoltre, nell'ultimo decennio l'aumento della sensibilità verso le tematiche ambientali ha portato le aziende automobilistiche a produrre auto dotate di motori elettrici, sia a batteria che ad idrogeno. Toyota rappresenta al momento il brand che maggiormente ha investito e creduto nel futuro dei veicoli ad idrogeno (Adams and Barton 2011).

1.6.3 Attuali applicazioni

Come menzionato poco fa, Toyota è un leader nel campo dei veicoli a celle di combustibile credendo molto in questo settore già oggi ha messo a disposizione diversi modelli di auto basate su questa tecnologia. La Toyota Mirai è un veicolo che utilizza un motore elettrico alimentato da elettricità prodotta sul posto dalla riserva di celle a combustibile. Toyota ha presentato un prototipo di pick-up Hilux elettrico a celle a combustibile di idrogeno. Questo veicolo è stato sviluppato in collaborazione con partner del consorzio, sostenuto da finanziamenti del governo britannico. Il nuovo gruppo propulsore utilizza elementi comuni alla Toyota Mirai. L'idrogeno è immagazzinato in tre serbatoi ad alta pressione, che garantiscono al prototipo Hilux un'autonomia di guida prevista di oltre 600 km.

Futuri veicoli elettrici: Toyota ha presentato una gamma di futuri veicoli elettrici a batteria e a celle a combustibile. Questi veicoli sono destinati a comparire sulle strade europee nei prossimi anni. Oltre a Toyota anche altre note aziende stanno dirigendo la loro attenzione verso il mondo dell'idrogeno. Stellantis, per esempio, ha sviluppato una soluzione a celle a combustibile ad idrogeno a zero emissioni che unisce in un veicolo i vantaggi delle batterie elettriche a quelli delle celle stesse. L'energia per i lunghi tratti di percorrenza è garantita dall'idrogeno mentre una batteria di medie capacità consente di avere una buona potenza nell'immediato per favorire le prestazioni dinamiche. Questa è una soluzione ottima per i veicoli commerciali leggeri che necessitano di una buona autonomia, rapidità di rifornimento e zero emissioni. Stellantis ha inoltre progettato un'architettura mid-power che garantisce autonomie superiori ai 400 chilometri e tempistiche di rifornimento di soli 3 minuti, questa tecnologia è attualmente in attesa di certificazione. Per il lancio di questa tecnologia, Stellantis ha scelto i furgoni di medie dimensioni Citroën Jumpy, Peugeot Expert e Opel Vivaro. I primi modelli realizzati nell'impianto Opel Special Vehicles di Rüsselsheim, Germania, sono stati lanciati sul mercato europeo alla fine del 2021.

È importante notare che ad oggi la tecnologia ad idrogeno, come le celle a combustibile, nel settore della mobilità e dei trasporti è considerata da molti uno strumento promettente specialmente nel settore dei veicoli commerciali e di grandi dimensioni. Questo è spesso dovuto a considerazioni tecniche e di mercato che hanno influenzato le strategie d'implementazione. Il tema dell'autonomia e carico utile è sicuramente stato un fattore determinante nell'alimentare questo tipo di opinioni. I veicoli commerciali, come camion e autobus, necessitano una maggiore autonomia e capacità di carico utile rispetto alle automobili tradizionali. Certamente l'idrogeno, caratterizzato da un'alta densità energetica rispetto alle batterie elettriche, può rappresentare un'ottima alternativa. Un altro fattore che ne determina una maggiore predisposizione per i veicoli commerciali è il tema della velocità di rifornimento. I veicoli commerciali spesso operano in cicli di lavoro continuo e non possono certo permettersi lunghi tempi di ricarica quindi la velocità di rifornimento rapido dell'idrogeno, che necessita di pochi minuti può essere un vantaggio rispetto all'elettrico. Infatti, ad

oggi, caricare interamente la batteria di un'auto elettrica richiede mediamente dalle 4 alle 6 ore se si utilizzano le stazioni di ricarica pubbliche, i tempi raddoppiano in caso la ricarica venga effettuata a casa tramite una presa domestica standard. Considerando che queste sono le tempistiche per automobili private e non per veicoli commerciali di grandi dimensioni che richiederebbero batterie molto più grandi con un conseguente aumento dei tempi di ricarica si può facilmente intuire come la tecnologia dell'elettrico sia ancora ben lontana dal consentirne un efficace utilizzo nei settori commerciali. Un altro aspetto da tenere in considerazione è quello del peso. Le batterie infatti possono essere più pesanti rispetto al sistema a celle a combustibile che favorisce inoltre una distribuzione più uniforme dei pesi. In questo tipo di riflessioni non va sottovalutato l'aspetto dell'infrastruttura di rifornimento di idrogeno che è ancora limitata rispetto alle stazioni di ricarica delle batterie. Tuttavia, implementare stazioni di rifornimento per veicoli commerciali su percorsi specifici rappresenta una sfida più gestibile rispetto alla costruzione di una rete estesa per veicoli leggeri. Infine, l'adozione dell'idrogeno nei veicoli commerciali potrebbe essere un primo passo graduale prima di una più ampia adozione anche per le automobili private. L'implementazione in flotte commerciali potrebbe aiutare a sviluppare l'infrastruttura di rifornimento e ad accumulare esperienza operativa (Heavenn 2021).

Capitolo secondo

Hy2Market

Il progetto in questione. Hy2Market nasce dal forte interesse degli ultimi anni della regione del Medio Tejo in Portogallo riguardo al tema dell'idrogeno verde e alle tecnologie associate alle celle a combustibile. Questo interesse ha portato la creazione di un gruppo di lavoro sull'idrogeno che riunisca stakeholder pubblici e privati, unendosi quindi alla piattaforma europea Hydrogen Valley e firmando la Dichiarazione del Consiglio regionale che riconosce l'importanza dell'idrogeno verde nel più ampio contesto sistema energetico. Lo sviluppo di un ecosistema di produzione, distribuzione e utilizzo di L'idrogeno verde costituisce un'opportunità particolarmente forte nel contesto energetico e una vera transizione poiché la regione sta attualmente eliminando gradualmente la sua industria del carbone. Al fine di attrarre investimenti pubblici e privati nel settore dell'idrogeno nel Médio Tejo, il passo necessario è definire il perimetro dell'ecosistema da sviluppare. Per questo, vengono definite diverse "opzioni" di progetto in base al futuro pianificato, implementazioni delle infrastrutture e consumatori attesi di idrogeno (nella mobilità o nell'industria). Ciascuna opzione integra la descrizione degli utenti identificati, dell'infrastruttura (ad esempio: produzione e distribuzione) necessari per fornire idrogeno a questi utenti, dello stakeholder dell'organizzazione necessaria e del budget per implementare tale ecosistema.

Basato su un'analisi della potenziale domanda di idrogeno da parte del pubblico e del privato locale stakeholders, si suggeriscono le seguenti opzioni:

- *Opzione 1*: Domanda di base derivante dalla mobilità con produzione e distribuzione centralizzate a Pego: l'idrogeno sarà prodotto nella centrale di Pego, per fornire (attraverso a stazione di rifornimento in loco) una flotta di autobus a celle a combustibile che collegano diverse città del regione e una flotta di camion che trasportano i residui forestali utilizzati nella futura biomassa centrale elettrica.

- *Opzione 2:* Elevata domanda da parte della mobilità con produzione centralizzata a Pego e rete di stazioni di rifornimento di idrogeno (HRS): l'idrogeno sarà prodotto presso Centrale Pego, per rifornire (tramite una rete di HRS) diverse flotte di veicoli:

pullman, camion per il trasporto dei residui forestali, una flotta di autobus pubblici urbani per comuni, una flotta di furgoni utilizzati dalle aziende locali.

- *Opzione 3:* Elevata domanda da parte della mobilità con produzione centralizzata a Pego e rete di HRS nella regione e iniezione di idrogeno con produzione dedicata: questo l'opzione ha la stessa infrastruttura e gli stessi utenti dell'Opzione 2, oltre al sito dedicato alla produzione di idrogeno che verrà utilizzato per l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale

2.1 Introduzione al progetto

La Regione del Medio Tejo si è impegnata in una strategia a lungo termine per raggiungere la neutralità carbonica nel 2030, denominata SmartTejo, fornendo l'orientamento generale e i piani per raggiungere questo obiettivo. La strategia copre molti settori come l'edilizia, le biomasse, l'illuminazione pubblica, le rinnovabili, l'elettricità e il settore trasporti. Per quest'ultimo vengono esplorate diverse fonti energetiche alternative, come i biocarburanti, l'elettricità delle batterie e l'idrogeno, insieme alla volontà d'incentivare spostamenti a minore impatto di emissioni come l'utilizzo del trasporto pubblico e la bicicletta. Il piano identifica proprio il trasporto pubblico come una risorsa chiave per collegare le città di medie dimensioni della regione riducendo al contempo l'uso delle auto private. La transizione energetica che Médio Tejo sta affrontando avrà un forte impatto anche sulla produzione elettrica, specialmente dopo la chiusura della centrale a carbone di Tejo Energia avvenuta il 22 Novembre 2021. La centrale si trovava a Pego, un comune situato nel centro del portogallo non troppo lontano dalla città di Abrantes, sulla riva del fiume Tago, a circa 150 chilometri a nord-est

di Lisbona. Con la chiusura di quest'ultima centrale a combustibili fossili il Portogallo è diventato il quarto paese europeo a dire addio al carbone dopo Belgio, Austria e Svezia. La centrale in questione era caratterizzata da due unità di produzione di energia, ognuna delle quali era dotata di un generatore di vapore, un'unità turbina-generatore e un trasformatore principale. Il sistema di produzione era anche dotato di turbine, mulini a carbone, caldaie, generatori e sistema di controllo principale. La prima unità è entrata in funzione nel marzo 1993 ma la centrale di Pego ha raggiunto la completa operatività commerciale nell'ottobre 1995, quando la seconda unità è entrata in funzione. Le due unità della centrale avevano ciascuna una potenza di 314 MW, entrambe fornite di un proprio sistema di aspirazione dell'acqua di alimentazione, infrastruttura di supporto di torre di raffreddamento e sistemi di scarico. Le due unità utilizzavano invece gli stessi impianti di estrazione dell'acqua dal fiume e l'impianto di trattamento della stessa, la stazione di lavorazione, il sistema di movimentazione del carbone, la ciminiera e diversi altri servizi generali comuni. Con la direttiva europea LCPD (Large Combustion Plants Directive 2001/80/EC), nel 2009 le unità sono state fornite di un sistema di desolforazione dei gas di scarico (FGD) e di una riduzione catalitica selettiva (SCR). Il governo portoghese sta attualmente considerando più di un possibile progetto di riconversione della centrale. Tra questi la possibilità di riconvertire la centrale in una a biomassa che brucerebbe il legno. La tecnologia basata sulle biomasse sta diventando sempre più rilevante nel processo di transizione energetica che mira alla totale decarbonizzazione. Il termine 'biomassa' si riferisce a vari materiali, tutti provenienti da fonti biologiche. La maggior parte di questi materiali proviene da residui di attività agricole. Questi materiali, attraverso trattamenti o processi di combustione, portano alla produzione di combustibili o direttamente di energia elettrica e termica. La decisione di optare per la biomassa legnosa si basa presumibilmente sulla sua capacità di produrre più energia rispetto alle fonti intermittenti, offrendo al contempo una maggiore programmabilità e flessibilità. Questo permette alle strutture di sostituire le centrali termoelettriche, sia per coprire il carico base, sia per equilibrare il sistema elettrico.

La nuova centrale si potrebbe aggiungere all'insieme delle fonti energetiche rinnovabili che dovranno andare a svolgere un ruolo chiave nel mix energetico della regione. Questo comporta nuove sfide, come l'integrazione delle fonti elettriche rinnovabili, poiché attualmente gran parte della capacità è inattiva nei periodi di bassa energia periodi di domanda (ad esempio la notte). Nell'ambito del Piano di Mobilità Médio Tejo e SmartTejo, l'idrogeno è visto come una soluzione per la transizione di diversi settori. Innanzitutto, l'idrogeno potrebbe essere un modo per utilizzare la capacità elettrica inattiva delle fonti rinnovabili e conseguentemente favorire la realizzazione di nuova capacità nella zona. Inoltre, l'idrogeno rappresenta un'opportunità per sviluppare un'offerta di trasporti a basse emissioni di carbonio (parte dell'impegno a raggiungere la neutralità del carbonio nel 2030) che soddisfi le esigenze della regione e della sua popolazione e aiuti nella riduzione dell'impronta di carbonio. Un gruppo di partner ha lavorato da maggio 2019 intorno alla valle regionale dell'idrogeno chiamata HyTagus, e anche la regione è parte del partenariato European Hydrogen Valleys della Commissione Europea insieme a 34 altre Regioni. Inoltre, è stata definita una strategia regionale sull'idrogeno nel documento "Idrogeno - Proposte per un piano d'azione 2020-2030" per promuovere le tecnologie delle celle a combustibile e la loro creazione di una catena del valore locale dell'idrogeno, anche per i trasporti: Médio Tejo è un'area a bassa densità territoriale con 13 comuni e la sua posizione, nel centro del Portogallo, sono caratteristiche che la renderebbero un hub ideale per la produzione di idrogeno che potrebbe poi servire anche il resto del Paese. Questo è concretizzato dalla firma di una dichiarazione da parte del Consiglio regionale, che riunisce tutte le realtà locali rappresentate dai sindaci, affermando che l'idrogeno è una priorità nell'ambito della transizione energetica. A seguito della pandemia globale del 2020, l'idrogeno è più che mai visto come un punto forte opportunità per la Regione e potrebbe beneficiare di fondi strutturali e di ripresa, come ad esempio NextGenerationEU, il Just Transition Fund o il Green Deal.

Nelle prossime pagine verranno introdotte diverse opzioni per lo sviluppo di una catena del valore dell'idrogeno Medio Tejo. L'obiettivo è fornire budget indicativi, piani di progetto e stakeholder organizzazioni per vari livelli di implementazione

delle infrastrutture in base alla domanda di idrogeno la Regione. Ciò aiuterà quindi i decisori a costruire un quadro che allinei e sincronizzare gli investimenti pubblici e privati che portano all'attuazione del progetto.

2.2 Opzione 1: Richiesta base per mobilità pubblica.

La prima opzione prevede una domanda di base derivante dalla mobilità centralizzata e indica Pego come locazione per la produzione e distribuzione e distribuzione dell'idrogeno.

Articolo	Descrizione
Produzione d'Idrogeno	<ul style="list-style-type: none"> • 3,5 MW (capacità nominale di 1.527 kgH₂/giorno) di elettrolizzatore installato presso l'ex centrale a carbone di Pego • 392 tH₂ prodotte all'anno per coprire la domanda identificata
Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> • Due stazioni di rifornimento di idrogeno a Pego (capacità totale 1.400 kgH₂/giorno) • Stazioni di rifornimento situate nello stesso sito dell'elettrolizzatore, nessuna logistica significativa da implementare (rimorchi tubolari)
Utilizzo	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilità: 12 autobus a celle a combustibile (197 tH₂/anno), da 12 a 18 camion per trasporto residui forestali (195 tH₂/anno) • Iniezione di idrogeno: nessuna richiesta • Industria: nessuna richiesta

Tabella 3: Tabella riassuntiva Opzione 1

2.2.1 Utilizzo dell'idrogeno

Autobus a celle a combustibile

Numero : 12 autobus.

Caratteristiche veicoli: devono ancora essere fornite dei partner coinvolti.

Domanda d'idrogeno stimata: 197 tH₂/anno.

Anno d'implementazione: da definire.

Applicazione: I veicoli opereranno su un percorso circolare lungo 150 km che collega 6 città di medie dimensioni: Abrantes, Entroncamento, Torres Novas, Fátima, Ourém e Tomar. Ogni pullman effettuerà 3 giri al giorno, per un totale di 1.971.000 km percorsi all'anno per l'intera flotta (164.250 km/veicolo/anno).

Disponibilità tecnologica: tecnologia non ancora disponibile in commercio, attività di sviluppo necessario da parte dei partner di progetto.

Operatori: normale operatore del trasporto pubblico della Regione, non ancora individuato dal CIMT (il servizio pubblico autorità dei trasporti).

Camion per il trasporto dei residui forestali

Numero: Da 12 a 18 camion a celle a combustibile. Stima basata sul presupposto che ogni camion lo sia dedicato al trasporto di biomassa e fa da 4 a 6 viaggi al giorno, quindi da 200 a 300 km percorsi al giorno (il gestore della centrale stima che siano necessari 26.000 viaggi/anno trasporto residui forestali, pari a 1.300.000 km/anno, quindi 50 km/viaggio). Il numero di camion dipenderà anche dalle caratteristiche operative dell'attività, ancora non note come: numero massimo di viaggi giornalieri richiesti, ubicazione del deposito del veicolo, ecc.

Caratteristiche veicoli: autocarri con semirimorchio (25 tonnellate)

Domanda d'idrogeno stimata: 195 tH₂/anno (intera flotta convertita a idrogeno)

Anno d'implementazione: il gestore della centrale prevede che questa attività di consegna dei residui forestali al centrale elettrica dal 2024, con un progressivo dispiegamento dallo stesso 2024 (10% della flotta convertito a idrogeno quindi 1-2 camion) fino al 2026 (100% della flotta convertita a idrogeno quindi 12-18 camion). Questo approccio progressivo deve ancora essere confermato, poiché il progetto è ancora a in una fase molto iniziale, ma rappresenta bene il tipo di implementazione che ci si può aspettare.

Applicazione: La centrale a carbone di Pego, sarà riadattata per utilizzare la biomassa come parte della transizione energetica che questo settore si trova ad affrontare per combattere il cambiamento climatico. Lo farà utilizzando i residui forestali raccolti nella regione per produrre elettricità nelle ore di punta, che richiedono l'impiego di camion per trasportare la biomassa dalle foreste alla centrale elettrica. Si stima dal gestore della centrale che 26.000 viaggi/anno, pari a 1.300.000 km/anno (50 km/viaggio), verranno percorsi per conferire le quantità necessarie di residui forestali.

Disponibilità tecnologica: Diversi produttori hanno annunciato nuovi modelli in linea con le necessità del progetto.

Operatori: operatore di trasporto specializzato in questo tipo di attività, non ancora identificato dal gestore.

2.2.2 Distribuzione dell'infrastruttura

Produzione di idrogeno a Pego

L'idrogeno sarà prodotto dall'elettrolisi dell'acqua nella centrale elettrica di Pego. Un elettrolizzatore sarà installato in loco, per alimentare tutti gli usi individuati nella regione.

Potenza dell'elettrolizzatore: 3,5 MW

Numero stimato di ore di funzionamento all'anno: ~ 6.200 h/anno

Produzione di idrogeno all'anno: 392 tH₂/anno

Rifornimento di idrogeno

L'idrogeno sarà fornito agli autobus e ai camion da due stazioni di rifornimento situate presso sito produttivo dell'idrogeno stesso, presso la centrale di Pego. In base alla domanda degli autobus e dei camion, ci saranno in media 1,1 tH₂ di domanda al giorno. (in attesa di input dal CIMT e dall'allenatore agli operatori di confermare la possibile ubicazione del deposito dei pullman, che potrebbe avere un impatto sulla posizione delle stazioni di rifornimento).

Dimensione: una stazione di rifornimento media (capacità di 400 kgH₂/giorno) e una grande (capacità di 1000 kgH₂/giorno) (capacità nominale totale di 1400 kgH₂/giorno).

Pressione di rifornimento: 350 bar

2.2.3 Partners coinvolti

Partner	Ruolo
Pegop	Pegop è il gestore della centrale elettrica di Pego e sarà responsabile dell'infrastruttura per la produzione dell'idrogeno.
CIMT	CIMT è l'ente pubblico del trasporto nella regione del Médio Tejo.
Sconosciuto	L'operatore dell'HRS non è noto in questa fase: può esserlo Pegop, l'operatore del veicolo o un subappaltatore, ad esempio.
Sconosciuto	Operatore di autobus a celle a combustibile non ancora determinato dal CIMT.
Sconosciuto	Trasportatore di residui forestali non ancora determinato da Pegop.

Tabella 4: Partners Opzione 2

2.2.4 Budget stimato

Articolo	Costo Totale del Capitale (€M)
Elettrolizzatore 3 MW	~ €6M
Stazioni di rifornimento (una da 400 kgH2/giorno e uno da 1000 kgH2/giorno, entrambi 350bar)	<ul style="list-style-type: none"> • Stazione di rifornimento media (400 kg/day): ~ €1.8M • Stazione di rifornimento grande (1000 kg/day): ~ €3M • Total: ~ €4.8M
12 pullman a celle a combustibile	Sconosciuto. Gli autobus a celle a combustibile attualmente non sono disponibili in commercio.
12-18 camion a celle a combustibile	~ €6M - €9M

Tabella 5: Budget Opzione 1

2.3 Opzione 2: Forte richiesta per mobilità pubblica e rete di rifornimento.

La seconda opzione prevede una domanda elevata da parte della mobilità centralizzata. Pego è identificato come punto per la produzione e per la rete di stazioni di rifornimento.

Articolo	Descrizione
Produzione d'Idrogeno	<ul style="list-style-type: none"> • Elettrolizzatore (capacità nominale di 1.527 kgH₂/giorno) installato presso l'ex centrale a carbone di Pego (Potenza da definire) • tH₂ prodotte all'anno per coprire la domanda identificata da definire
Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> • Rete di stazioni di rifornimento • Due stazioni di rifornimento di idrogeno a Pego (capacità totale 1.400 kgH₂/giorno) • Una stazione di rifornimento dedicata agli autobus urbani (capacità e posizione da definire) • Una stazione di rifornimento per i furgoni (capacità e posizione da definire) • Rimorchi tubolari per la distribuzione dell'idrogeno proveniente dalla produzione fino al sito (numero di rimorchi, pressioni e capacità da definire)
Utilizzo	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilità: 12 autobus a celle a combustibile (197 tH₂/anno), da 12 a 18 camion per trasporto residui forestali (195 tH₂/anno), bus urbani e furgoni per compagnie private locali (numero e consumi da definire) • Iniezione di idrogeno: nessuna richiesta • Industria: nessuna richiesta

Tabella 6: Tabella riassuntiva Opzione 2

2.3.1 Utilizzo dell'idrogeno

Questa opzione non è ancora totalmente definita, si attendono ancora informazioni dai partners coinvolti nel progetto. In particolare si attende:

- Da parte del CIMT (ente pubblico dei trasporti nella regione) per la caratterizzazione della domanda di autobus a celle a combustibile
- CIMT e MédioTejo21 (Agenzia Regionale per l'Energia e l'Ambiente per Médio Tejo e Pinhal Interior Sul) per la stima della potenziale domanda di idrogeno da flotte di veicoli pubblici (autobus urbani, camion della raccolta rifiuti, ecc.)
- Nersant (associazione imprenditoriale della regione di Santarém) per la stima della potenziale domanda di idrogeno da parte delle organizzazioni private (furgoni, automobili, camion, ecc.).

Autobus a celle a combustibile

Tutte le informazioni legate agli autobus a celle a combustibile sono rimaste invariate rispetto all'Opzione1.

Camion per il trasporto dei residui forestali

Tutte le informazioni legate ai camion per il trasporto dei residui forestali sono rimaste invariate rispetto all'Opzione1.

Bus urbani

Si tratta di bus per il trasporto che offrono un servizio all'interno della città a differenza degli autobus descritti precedentemente pensati per percorrere distanze maggiori offrendo un servizio tra una città e l'altra. Si attendono informazioni da parte del CIMT per stimare l'entità delle opportunità nelle città del Médio Tejo (stima del numero di autobus urbani che potrebbero essere convertiti a idrogeno).

Camion della spazzatura

Anche in questo caso, si attendono informazioni da parte del CIMT per stimare l'entità delle opportunità nelle città del Médio Tejo (stima del numero di camion dei rifiuti che potrebbero essere convertiti in idrogeno).

Furgoni per compagnie private locali all'interno della città

In attesa di input da Nersant per stimare l'entità delle opportunità nelle città del Médio Tejo (stima del numero di furgoni che potrebbero essere convertiti a idrogeno)

2.3.2 Distribuzione dell'infrastruttura

Produzione di idrogeno a Pego

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare l'infrastruttura di produzione (dimensione dell'elettrolizzatore) necessaria in questo scenario.

Consegna dell'idrogeno tramite rimorchi tubolari

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare la logistica di consegna (numero e dimensioni dei rimorchi tubolari) necessaria in questo scenario.

Rifornimento di idrogeno

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare l'infrastruttura di rifornimento (numero e dimensione degli HRS) necessaria in questo scenario.

2.3.3 Partners coinvolti

I partners e gli enti coinvolti restano gli stessi dell'Opzione1.

2.3.4 Budget stimato

Per quest'opzione gli unici costi stimati sono quelli dei camion a celle di combustibile per la raccolta della biomassa. La stima resta invariata rispetto l'opzione1 e pari a circa €6M - €9M.

2.4 Opzione 3: Forte richiesta per mobilità pubblica, rete di rifornimento e iniezione di idrogeno.

L'opzione 3 prevede una domanda elevata da parte della mobilità centralizzata, il punto pianificato per la produzione resta Pego. Si prevedono inoltre delle stazioni di rifornimento nella regione ed un sistema di iniezione di idrogeno nel gas naturale.

Articolo	Descrizione
Produzione d'Idrogeno	<ul style="list-style-type: none"> Elettrolizzatore (capacità nominale di 1.527 kgH₂/giorno) installato presso l'ex centrale a carbone di Pego (Potenza da definire) tH₂ prodotte all'anno per coprire la domanda identificata da definire
Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> Rete di stazioni di rifornimento Due stazioni di rifornimento di idrogeno a Pego (capacità totale 1.400 kgH₂/giorno) Una stazione di rifornimento dedicata agli autobus urbani (capacità e posizione da definire) Due stazioni di rifornimento per i furgoni (capacità e posizione da definire) Rimorchi tubolari per la distribuzione dell'idrogeno proveniente dalla produzione fino al sito (numero di rimorchi, pressioni e capacità da definire)
Utilizzo	<ul style="list-style-type: none"> Mobilità: 12 autobus a celle a combustibile (197 tH₂/anno), da 12 a 18 camion per trasporto residui forestali (195 tH₂/anno), bus urbani e furgoni per compagnie private locali (numero e consumi da definire) Iniezione di idrogeno: nella rete di distribuzione del gas naturale (500 tH₂/anno) Industria: nessuna richiesta

Tabella 7: Tabella riassuntiva Opzione 3

Rispetto all'opzione precedente sono state portate da una a due le stazioni di rifornimento dedicate ai furgoni per utilizzo di aziende private. Questo consentirà di avere una copertura di rifornimento maggiore per i rifornimenti ai furgoni.

Inoltre, in aggiunta all'opzione precedente, è previsto anche il cofinanziamento d'idrogeno e gas naturale, descritto nel primo capitolo.

2.4.1 Utilizzo dell'idrogeno

Come nel caso precedente l'opzione non è ancora ben definita, si resta in attesa di informazioni.

Autobus a celle a combustibile

Tutte le informazioni legate agli autobus a celle a combustibile sono rimaste invariate rispetto alle opzioni precedenti.

Camion per il trasporto dei residui forestali

Tutte le informazioni legate ai camion per il trasporto dei residui forestali sono rimaste invariate rispetto alle opzioni precedenti.

Bus urbani

Tutte le informazioni legate ai bus urbani sono rimaste invariate rispetto alle opzioni precedenti.

Camion della spazzatura

Tutte le informazioni legate ai camion della spazzatura sono rimaste invariate rispetto alle opzioni precedenti.

Furgoni per compagnie private locali all'interno della città

Tutte le informazioni legate ai furgoni dedicati all'utilizzo di compagnie private locali all'interno delle città sono rimaste invariate rispetto alle opzioni precedenti.

Immissione d'idrogeno nella rete di distribuzione del gas

TaguGas è l'operatore del sistema di distribuzione del gas nel Médio Tejo e potrebbe esser interessato all'immissione di idrogeno nella rete di distribuzione del gas. In base alla corrente domanda di gas naturale nel Médio Tejo, la società

ha stimato un 5% d' idrogeno nella rete di distribuzione del gas naturale del Medio Tejo, questo rappresenta una domanda di 500 tH₂/anno. La potenziale ubicazione del punto di iniezione dell'idrogeno non è ancora determinata: dipende in particolare sulla disponibilità di tubi di distribuzione e sulla presenza (o meno) di tubi di gas naturale sensibili sulla rete che potrebbero riscontrare dei problemi in caso di apporto d'idrogeno nel gas naturale, impedendo così la diffusione di questo utilizzo. Quindi, la fattibilità tecnico-economica di questa attività necessita di ulteriori indagini. Se l'iniezione nella distribuzione sarà tecnicamente possibile presso la centrale di Pego, verrà prodotto idrogeno per questo utilizzo nello stesso sito tramite elettrolisi. Tuttavia, se l'immissione nella rete di distribuzione non è possibile presso la centrale di Pego, un altro sito dovrebbe poi essere trovato nel Médio Tejo, e l'idrogeno dovrebbe essere prodotto nel punto di iniezione o consegnato con rimorchi tubolari da Pego (il costo della fornitura di idrogeno probabilmente renderebbe la soluzione successiva non economicamente sostenibile).

2.4.2 Distribuzione dell'infrastruttura

Produzione di idrogeno a Pego

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare l'infrastruttura di produzione (dimensione dell'elettrolizzatore) necessaria in questo scenario.

Consegna dell'idrogeno tramite rimorchi tubolari

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare la logistica di consegna (numero e dimensioni dei rimorchi tubolari) necessaria in questo scenario.

Rifornimento di idrogeno

Opzione non completamente definita: in attesa di input da CIMT, MédioTejo21 e Nersant per caratterizzare l'infrastruttura di rifornimento (numero e dimensione degli HRS) necessaria in questo scenario.

2.4.3 Partners coinvolti

I partners e gli enti coinvolti restano gli stessi rispetto alle opzioni precedenti. Si valutano accordi con l'ente di distribuzione di gas.

2.4.4 Budget stimato

Come per l'Opzione 2 gli unici costi stimati sono quelli dei camion a celle di combustibile per la raccolta della biomassa. La stima resta invariata rispetto le opzioni precedenti e pari a circa €6M - €9M.

Capitolo terzo

Applicazione del Technological Innovation System

3.1 Introduzione al Technological Innovation System

Il Technological Innovation System (TIS) è un framework analitico che si concentra sull'analisi e sulla comprensione del processo di introduzione e diffusione di innovazioni tecnologiche radicali.

La creazione di tale metodologia non può essere attribuita a una singola persona, ma rappresenta il risultato di contributi e sviluppi provenienti da vari ricercatori nel campo degli studi sull'innovazione. Tuttavia, Christopher Freeman, un economista inglese, è spesso associato allo sviluppo iniziale di concetti chiave relativi ai sistemi di innovazione tecnologica.

La teoria del Technological Innovation System è stata ulteriormente elaborata e sviluppata da altri studiosi nel corso degli anni. È un approccio analitico che esamina il processo di innovazione non solo da una prospettiva tecnologica, ma considera anche i fattori istituzionali, sociali ed economici che influenzano l'innovazione in una determinata area o settore.

Questo sistema si basa su una metodologia strutturata che identifica e valuta i diversi elementi costitutivi che influenzano il successo dell'innovazione:

- Prestazioni e qualità del prodotto
- Prezzo e costo del prodotto
- Sistema di produzione
- Prodotti e servizi complementari
- Formazione e coordinamento della rete
- Clienti
- Istituzioni specifiche per l'innovazione

La metodologia del TIS framework prevede un'approfondita analisi di ciascun elemento costitutivo e delle condizioni influenti che possono impattare il processo

di introduzione e diffusione dell'innovazione. Questo approccio strutturato consente alle aziende di sviluppare strategie mirate e personalizzate per l'introduzione di nuove tecnologie sul mercato, tenendo conto di tutte le variabili rilevanti (Ortt and Kamp, 2022).

L'applicazione pratica del TIS framework coinvolge l'utilizzo degli elementi costitutivi identificati per sviluppare strategie di introduzione di nicchia per le innovazioni tecnologiche radicali. Le aziende possono utilizzare questo framework per valutare il contesto in cui l'innovazione sarà introdotta, identificare le opportunità e le minacce presenti sul mercato, nonché comprendere le esigenze dei clienti e le dinamiche competitive.

I vantaggi per le aziende nell'utilizzo del TIS framework includono la possibilità di formulare strategie di introduzione più efficaci e mirate, riducendo al contempo i rischi e massimizzando il ritorno sull'investimento nelle innovazioni tecnologiche.

Come è stato descritto nel precedente capitolo, il progetto si articola in 3 possibili opzioni, di cui la prima risulta essere quella "base"; per quanto concerne la seconda e, successivamente, terza opzione, il progetto diventerà ogni volta più approfondito, tramite l'utilizzo di ulteriori componenti e proposte. L'applicazione del TIS si è svolta per intero alla proposta base, dove si sviluppano le azioni di maggiore rilevanza. Tuttavia, per maggiore completezza, sono state inserite anche alcune componenti della seconda e terza opzione in determinate sezioni.

Prima di iniziare l'applicazione del TIS con l'esplorazione degli elementi costitutivi è necessario notare che questo framework viene generalmente applicato a prodotti o progetti di aziende private con l'obiettivo di comprendere la strategia da adottare per portare un prodotto dalla nicchia all'utilizzo su larga scala. Il quadro appena descritto tende però a divergere da Hy2Market in quanto quest'ultimo si tratta di un lavoro pubblico, di conseguenza in alcuni casi andranno affrontati dei discorsi di riadattamento per poter inquadrare il progetto in modo adeguato.

3.2 Prestazioni e qualità del prodotto

Il primo elemento costitutivo del TIS è considerata le prestazioni e la qualità del prodotto che dovranno essere sufficientemente buone ora, o nel prossimo futuro, rispetto ai prodotti concorrenti. I clienti target dovrebbero considerare il prodotto come un'opzione praticabile o come una valida alternativa rispetto ad altre opzioni. Talvolta le prime versioni di un prodotto possono essere caratterizzate da una bassa qualità e potrebbero non essere in grado di soddisfare le esigenze dei clienti. Pertanto, la diffusione su larga scala può essere ostacolata (Ortt and Kamp, 2022).

Mezzi di trasporto

Autocarri

Attualmente non è stato ancora definito un particolare modello di camion con le rispettive specifiche tecniche, le considerazioni riguardo a questo tema si baseranno quindi prestazioni medie degli autocarri. Possiamo valutare, attraverso la tabella riassuntiva di seguito, lo stato della tecnologia degli autocarri a idrogeno confrontando le prestazioni raggiungibili (escludendo mezzi per trasporti eccezionali) tra autocarri che utilizzano diverse fonti di energia:

	Autocarri a Idrogeno a celle a combustibile	Autocarri a Diesel	Autocarri elettrici
Potenza	480 kW (645 CV)	560 kW (750 CV)	480 kW (645 CV)
Autonomia	1000Km	1600Km	500Km
Velocità di rifornimento/Ricarica	10-20 minuti	15-20 minuti	Diverse ore
Emissioni	Zero	Elevate	Zero

Tabella 8: Confronto Tecnologia Camion

Come si evince dalla tabella la potenza media tende a favorire i comuni autocarri a Diesel rispetto alle altre due tipologie. L'autonomia incrementa invece partendo dai mezzi elettrici, passando a quelli a idrogeno per poi arrivare ai camion a diesel che risultano ancora i più prestanti. Per quanto riguarda il tempo di ricarica autocarri ad idrogeno e diesel tendono a equivalersi a differenza dei mezzi elettrici contraddistinti da lunghissimi tempi di ricarica, 2-3 ore in caso di "colonnine super-fast" e fino a più di 10 ore con colonnine normali. Per quanto riguarda le emissioni i motori Diesel di grande cilindrata hanno valori di emissioni di CO₂ estremamente elevati a differenza delle emissioni nulle degli altri due casi.

Considerando, come già specificato nella descrizione delle opzioni di progetto nel capitolo precedente, che il progetto Hy2Market prevede degli autocarri di circa 25 tonnellate (compreso di rimorchio) con una richiesta di autonomia giornaliera di 200-300 Km. La tecnologia, già allo stato attuale, consente di avere senza problemi mezzi più che adatti a questo compito. Gli autocarri potrebbero infatti venir riforniti ogni 2 o 3 giorni o più realisticamente si ha la possibilità di utilizzare autocarri con minore autonomia che possano completare la tratta giornaliera con meno di 20 kg di idrogeno a 350 bar e venir riforniti in pochi minuti prima di ogni utilizzo.

Valutando la qualità del prodotto, sicuramente un fattore da considerare è quello della sicurezza. Teniamo in considerazione i mezzi che utilizzano il gas in forma gassosa dato che ad oggi sono quelli maggiormente utilizzati. L'idrogeno è un gas estremamente infiammabile ma va considerato che gli attuali serbatoi dei mezzi di trasporto sono progettati in modo da prevenire perdite e gestire in modo sicuro eventuali incidenti. Se è vero che data la dimensione molto ridotta delle molecole d'idrogeno queste possono facilmente uscire dai serbatoi va considerato che questi mezzi sono dotati di specifici sensori per rilevare ogni eventuale perdita. Per quanto riguarda invece la struttura dei serbatoi, questi sono progettati per resistere a forti impatti senza rompersi. Inoltre, l'idrogeno tende a disperdersi con grande velocità riducendo notevolmente il rischio di incendi o esplosioni.

Bus

Come per i camion anche il modello di bus non è stato ancora definito di conseguenza è possibile anche in questo caso fare delle considerazioni di fattibilità e livello tecnologico sulla base di ciò che è attualmente in utilizzo sul mercato. I dati previsti dal progetto riguardo ai bus sono legati al percorso giornaliero che dovranno percorrere. La tratta risulta essere un percorso circolare di 150 km che collega 6 città ed ogni pullman dovrà effettuare tale percorso 3 volte al giorno. Di conseguenza è auspicabile optare per bus con una capacità maggiore a 450 km. Possiamo prendere in considerazione la collaborazione che l'azienda giapponese Toyota e la compagnia di bus portoghese Caetano-autobus che unendo le loro capacità permettono ad alcune città europee di offrire ai loro cittadini una mobilità sostenibile grazie ad autobus a celle di combustibile a idrogeno. La prima di queste città a dare il via a questa collaborazione è stata La Roche-sur-Yon in Francia che dal 2022 utilizza questi bus e dichiara di voler aumentarne l'utilizzo dati gli ottimi risultati (O.Bassi 2023).

I dati relativi al bus in questione sono riassunti nella seguente tabella:

Modello	Toyota Caetano H2 City Gold – 2 nd generation
Dimensioni	12m x 2,5m x 3,46m
Potenza	180 kW (245 CV)
Autonomia	Oltre 500 Km
Capacità serbatoio	312 Litri stoccati a 350bar
Tempo di rifornimento	9 minuti
N°passeggeri	94

Tabella 9: Prestazioni Bus Toyota Caetano

Anche in questo caso, dalle caratteristiche di questo bus, si può notare come l'idea dell'utilizzo di bus dotati di celle a combustibile sia fattibile. Infatti, un'autonomia di oltre 500 Km sarebbe ottima per il percorso previsto, inoltre il tempo per rifornire totalmente il serbatoio d'idrogeno risulta essere pari a soli 9 minuti, una tempo d'attesa paragonabile a quella di un veicolo ad alimentazione tradizionale. Inoltre, per quanto riguarda il tema della sicurezza, le 5 bombole da 312 litri (37,5 kg ciascuna) sono poste sopra il tetto del veicolo per proteggerle in caso di collisioni.

È importante precisare che il modello di bus Toyota Caetano H2 City Gold – 2nd generation è progettato per la mobilità urbana e non extraurbana, di conseguenza alcuni valori come l'autonomia vanno riconsiderati in quanto un bus urbano tende a muoversi a velocità che variano tra i 30 ai 50 Km orari, certamente molto inferiori a quelli di un bus extraurbano che può compiere anche tratte autostradali. Quindi a velocità più basse il consumo energetico, in questo caso d'idrogeno, sarà nettamente inferiore. Sono già in utilizzo alcuni bus a lunga percorrenza a idrogeno, come quelli dell'azienda austriaca Van Hool ma non superano i 400 Km di autonomia. Il modello Toyota Caetano H2 City Gold – 2nd generation resta una possibilità interessante da prendere in considerazione per i bus urbani descritti nella seconda e terza opzione del progetto Hy2Market osservando anche che l'azienda Caetano-autobus è portoghese.

Si potrebbe vedere, di conseguenza, l'autonomia dei bus come la prima sfida di questa applicazione. Va però considerato che, come visto poco fa, esistono camion ad idrogeno caratterizzati da importanti valori di autonomia di conseguenza questo, più che essere un vincolo tecnico, può essere identificato più come un limite di mercato in quanto essendo un settore relativamente giovane e in continua crescita la richiesta prestazionale da parte dei clienti si fa ogni anno più esigente portando i produttori a offrire mezzi sempre migliori anche dal punto di vista dell'autonomia. Un esempio di questo è il caso della nota azienda di trasporti con bus a lunga percorrenza tedesca Flixbus che ha già annunciato che durante il 2024 inizierà ad utilizzare, per alcune delle sue tratte, autobus a celle di combustibile a idrogeno caratterizzati da autonomie oltre i 500 Km e pensati

per effettuare piccole soste di rifornimento che consentano di percorrere tratte di oltre 1000 Km. Considerando i brevi tempi di rifornimento è evidente che questa soluzione risulti essere un'ottima soluzione garantendo anche un buon livello di confort per i viaggiatori che potranno attendere il totale rifornimento d'idrogeno per giusto il tempo di uno spuntino. Di conseguenza anche questo aspetto tecnico può considerarsi fattibile.

Produzione d'idrogeno

Secondo le previsioni di progetto la produzione d'idrogeno dovrà essere affidata ad un idrolizzatore con le seguenti caratteristiche:

Potenza	3,5 MW
Ore di funzionamento stimate	6200 h/anno
Produzione d'idrogeno	392 tH ₂ /anno

Tabella 10: Prestazioni Idrolizzatore

Come fatto precedentemente per camion e bus a idrogeno considereremo attuale stato tecnologico sul mercato e la letteratura per valutare se la tecnologia prevista dal progetto possa rappresentare in qualche modo un ostacolo per il progetto stesso oppure no.

Per valutare ciò possiamo prendere in considerazione il progetto REFHYNE della multinazionale Shell nato nel 2021 che prevedeva la costruzione in Germania di un elettrolizzatore di potenza 10 MW e produzione annua di 1300 tonnellate di idrogeno con in previsione progressive espansioni che porteranno l'impianto ad una potenza complessiva di 100 MW. Un altro esempio di riferimento può essere dato dal progetto HySynergy di Everfuel che ha realizzato a Fredericia, in

Danimarca, un impianto elettrolizzatore già in funzione dal 2022. La potenza di questo impianto è di 20 MW e come nel caso del progetto di Shell, sono previste diverse fasi d'implementazione per portare la potenza totale a 1 GW entro la fine del decennio (Danfoss 2023).

L'analisi di questo primo elemento costitutivo risulta essere convincente, le tecnologie proposte dal progetto Hy2Market prese singolarmente costituiscono prodotti relativamente recenti ma già testati sul mercato. Sotto il punto di vista prestazionale e qualitativo il progetto rappresenta un'opzione praticabile.

3.3 Prezzo e costo del prodotto

Il prezzo del prodotto è un elemento costitutivo del TIS. Spesso le innovazioni tecnologiche sono inizialmente molto costose rispetto alle alternative competitive, il che può ostacolarne la diffusione. Diverse tecnologie legate all'idrogeno rientrano esattamente in questa casistica tendendo ad essere mediamente piuttosto costose. Le ragioni di ciò sono molteplici e nelle precedenti pagine sono stati fatti degli accenni ad alcune di queste (Ortt and Kamp, 2022).

Produzione di idrogeno: La produzione di idrogeno richiede energia, e il metodo più comune, come descritto nel primo capitolo, è l'elettrolisi dell'acqua. Questo processo richiede elettricità, che può provenire da fonti rinnovabili o fossili. L'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili (noto come idrogeno verde) è preferibile, ma è ancora costoso da produrre su larga scala. Tali costi derivano da diversi fattori come l'efficienza che può variare tra il 65% e l'82% in base a diverse caratteristiche ma questi valori mostrano come ancora molta energia venga persa, la ricerca scientifica definisce il 90% dell'efficienza un buon valore e possibile risultato da raggiungere nel corso dei prossimi anni (Gabriel Mathias 2020). Un altro costo importante riguarda i materiali di alta qualità che compongono gli elettrodi. Infine, manutenzione costante delle celle elettrolitiche e soprattutto il tema dell'investimento iniziale che per un impianto elettrolitico rappresenta una spesa importante.

Stoccaggio e trasporto: L'idrogeno è difficile da immagazzinare e trasportare. Deve essere compresso o liquefatto, entrambi processi costosi. Inoltre, le perdite durante il trasporto possono essere significative.

Infrastrutture: Per utilizzare l'idrogeno come carburante per veicoli o per alimentare caldaie, è necessaria un'apposita infrastruttura. Questo richiede investimenti significativi, che si riflettono nei costi complessivi.

Cellule a combustibile: Le celle a combustibile a idrogeno, utilizzate per produrre elettricità, sono ancora costose da sviluppare e implementare. Anche se ci sono progressi, il costo rimane un ostacolo.

In sintesi possiamo affermare quindi che per svariate ragioni le tecnologie ad idrogeno, dalla sua produzione fino ad arrivare alla mobilità ad idrogeno risultino essere piuttosto costose e rappresentano uno dei principali ostacoli per il suo sviluppo. A tal proposito, restando nell'ambito della mobilità, possiamo analizzare la letteratura scientifica sui temi legati alle auto elettriche che vent'anni fa soffrivano esattamente delle stesse problematiche e apparivano come una tecnologia che non sarebbe mai riuscita ad approdare concretamente sul mercato o quanto meno non su larga scala ma il tempo ha dimostrato il contrario.

Il tema dei veicoli elettrici è diventato significativamente popolare negli anni 90' e i primi anni duemila insieme al crescente interesse pubblico verso i temi legati ai problemi ambientali e la conseguente volontà di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. Nel 2000 Toyota ha lanciato sul mercato un modello di Toyota Prius ibrido, la prima auto ibrida ad essere davvero commercializzata. Questo avvenimento svolse un ruolo significativo nell'introduzione di veicoli ibridi nel mercato automobilistico di massa, contribuendo a sensibilizzare l'opinione pubblica sulle tecnologie a propulsione ibrida e aprendo la strada per lo sviluppo di ulteriori veicoli ibridi da parte di altri produttori. Un punto importante di svolta è stato quando la nuova azienda Tesla ha lanciato sul mercato la Tesla Roadster, un'auto totalmente elettrica con un'autonomia di oltre 300Km per un prezzo di 109 000 dollari. Questo modello ha dato il via a grandi investimenti nel settore

della mobilità elettrica dando il via alla produzione di questo tipo di veicoli da parte di diverse grandi aziende automobilistiche. Ovviamente, come per l'idrogeno, le prime auto di questo tipo erano per una clientela di nicchia e caratterizzate da prezzi superiori alla media. Nel corso degli anni prezzo e vendite seguono una relazione inversa con la riduzione costante dei prezzi, sempre più simili a quelli delle auto a motore endotermico, e vendite sempre maggiori. Si pensi che nel 2023 sono state vendute 81 milioni di auto, 13,6 delle quali elettriche o ibride (16.8% del totale) di cui 9,5 totalmente elettriche (11.7% del totale). Gli analisti di Goldman Sachs prevedono che i veicoli elettrici raggiungeranno vendite superiori ai 20 milioni già nel 2025 fino ad arrivare a 75 milioni nel 2035. Questi dati potrebbero anche essere al ribasso considerando le sempre più stringenti direttive ambientali.

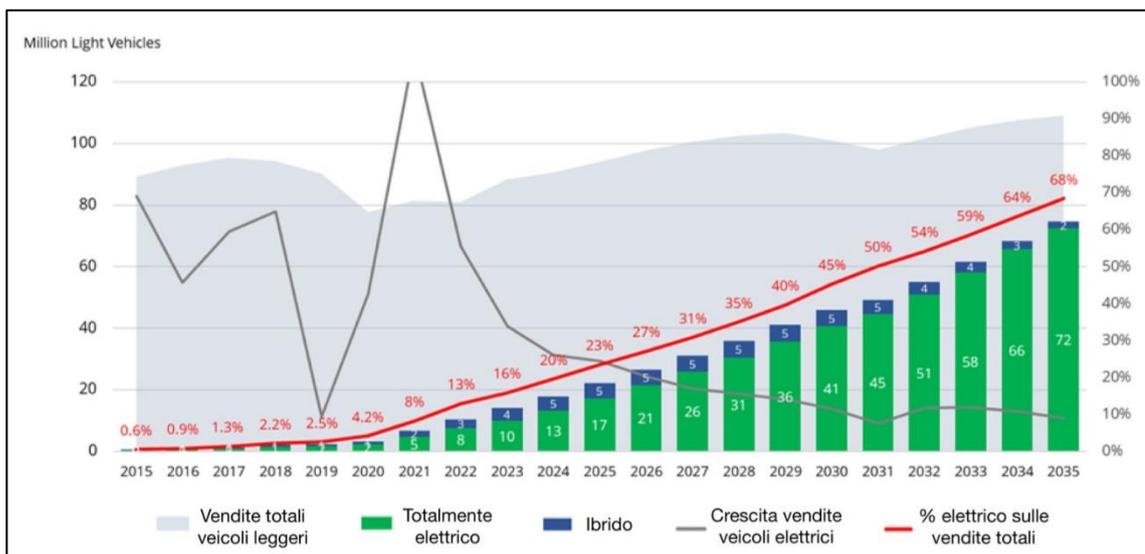


Figura 2: Andamento vendite veicoli elettrici

Questi dati aiutano a comprendere come nel corso degli anni i veicoli elettrici siano passati ad essere estremamente più costosi delle auto normali e di conseguenza per clienti di nicchia con un numero estremamente limitato di vendite a raggiungere ai giorni nostri prezzi in linea con le auto a benzina o gasolio aumentando la clientela e le vendite.

Sulla base delle considerazioni e del processo che ha portato le auto elettriche a diventare una tecnologia a largo utilizzo lo potrebbe accadere per le tecnologie ad idrogeno giovando degli stessi fattori che hanno contribuito alla crescita del mercato dell'elettrico (Weiss, Zerfass, and Helmers 2019) come:

Economie di Scala: Con l'aumento della produzione di veicoli a idrogeno, i produttori possono beneficiare delle economie di scala. La produzione su larga scala potrà permettere di ridurre i costi di produzione.

Avanzamenti Tecnologici: La ricerca e lo sviluppo nel settore dell'Idrogeno porterà miglioramenti significativi in termini di capacità, durata e costo. Le nuove tecnologie in questo settore stanno aprendo nuove opportunità per ridurre ulteriormente i costi di questi prodotti.

Concorrenza e Competizione: La crescente concorrenza tra i produttori di veicoli a idrogeno potrà, così come per le auto elettriche, spingere l'innovazione e a offrire prezzi più competitivi. Marchi automobilistici tradizionali e nuovi attori nel settore stanno investendo pesantemente nei veicoli a idrogeno per guadagnare quote di mercato nei prossimi anni.

Incentivi Governativi: Molti paesi offrono incentivi finanziari legati al settore della transizione energetica, come sconti fiscali, sovvenzioni e agevolazioni. Questi incentivi riducono il costo effettivo per i consumatori e stimolano la domanda. In sintesi, una combinazione di fattori, tra cui economie di scala, innovazione tecnologica e incentivi governativi, così come è avvenuto per le auto elettriche potrà aiutare il settore dell'idrogeno a crescere.

Più specificatamente sul progetto in analisi Hy2Market, bisogna tenere sempre a mente il fatto che il progetto, essendo un progetto pubblico, non pone come obiettivo principale quello del fatturato bensì un obiettivo sociale o ambientale come quello di contribuire nella transizione energetica verso fonti più sostenibili e a basse emissioni come nel nostro caso l'utilizzo dell'idrogeno. Di conseguenza, già questa differenza rispetto a un progetto privato può facilitare la buona riuscita dell'impresa di avere prezzi accessibili a tutti. Infatti, dopo le

considerazioni fatte su prezzo d'acquisto per il cliente finale e costo di produzione, la caratteristica di essere un progetto pubblico che giova di finanziamenti europei può slegare il legame economico prezzo/costo portando ad offrire prezzi accessibili alla clientela dei bus pubblici ad idrogeno, che avranno prezzi pari a quelli degli altri bus. Stessa cosa vale per i furgoni a idrogeno (previsti solo per la seconda e terza opzione) che potranno essere noleggiati da aziende private per prezzi ragionevoli.

3.4 Sistema di produzione

Un altro elemento essenziale del TIS è un sistema di produzione in grado di fornire prodotti di alta qualità in grandi quantità. Nel corso del tempo, la crescente esperienza con il processo di produzione e con il prodotto stesso aumenterà la qualità del prodotto e ne diminuirà i costi di produzione (Kamp et al., 2004). In questa sezione, a differenza della precedente, risulta necessario suddividere come per la sezione *prestazioni e qualità del prodotto* l'analisi in alcuni sottogruppi, in questo caso due:

Veicoli

Per quanto riguarda la produzione dei veicoli non vi sono grandi variazioni rispetto alla produzione di normali elettrici se non per la parte delle celle a combustibile, che non soffrono di problematiche di produzione quanto più legate al reperimento di materiali costosi come il Nafion, utilizzato per comporre la membrana all'interno delle celle a combustibile, rappresenta un polimero a base di fluoro. Il Nafion ha eccellenti proprietà di conduzione protonica, ma il suo elevato costo ha un impatto significativo sul costo complessivo delle celle di combustibile. Detto ciò è ovvio che non essendoci ancora un grande mercato per questo tipo di veicoli la grande produzione delle aziende del settore di mezzi di trasporto, spesso, non ha ancora predisposto i propri macchinari e centri di lavoro alla costruzione di questo genere di prodotti. Le problematiche che potrebbero nascere dalla produzione di veicoli a idrogeno su larga scala riprendono la stessa

linea definita dalla sezione precedente. Quindi, economie di scala, avanzamento tecnologico, competizione e incentivi governativi contribuirebbero nel supportare anche l'aspetto produttivo vero e proprio. Concentrandoci invece solo sul progetto Hy2Market, i mezzi citati nella descrizione del progetto sarebbero tutti acquistati da partner esterni, non sono quindi previste grandi barriere legati a questo aspetto.

Produzione d'idrogeno

La produzione d'idrogeno, ampiamente descritta nel primo capitolo, soffre ancora delle problematiche tipiche delle nuove tecnologie nel settore energetico, quindi: Elevati costi di produzione ed efficienza migliorabile. Ciò non toglie, però, che la produzione d'idrogeno verde resti una delle più promettenti tecnologie per i prossimi decenni e i grandi investimenti citati nella sezione *prestazioni e qualità del prodotto* ne sono l'esempio. Ponendo l'attenzione sulla produzione a idrolisi prevista nel progetto Hy2Market non dovrebbero esserci particolari difficoltà in quanto, anche se migliorabile, questo tipo di tecnologia risulta essere, come spiegato, già in utilizzo in svariate zone del mondo e dell'Europa di conseguenza la costruzione e utilizzo di una centrale caratterizzata anche da dimensioni relativamente contenute non rappresenterà una barriera al progetto.

3.5 Prodotti e servizi complementari

Un quarto elemento costitutivo del TIS è la disponibilità di prodotti e servizi complementari che supportano lo sviluppo, la produzione, la distribuzione, l'adozione, l'uso, la riparazione, la manutenzione e lo smaltimento dell'innovazione. La diffusione dell'innovazione può essere ostacolata quando è complementare prodotti e servizi non disponibili, incompatibili o troppo costosi (Ortt and Kamp 2022). Sulla base di ciò, sicuramente il primo prodotto complementare necessario alla mobilità ad idrogeno sono delle stazioni di rifornimento presenti sul territorio che garantiscano il riempimento dei serbatoi a idrogeno in tempi ragionevoli. Partendo dal caso in questione, Hy2Market, ciò

che è condiviso in ognuna delle tre opzioni è di costruire due stazioni di rifornimento di idrogeno a Pego, direttamente attaccate alla centrale per la produzione dell'idrogeno stesso. La vicinanza all'impianto semplificherebbe notevolmente l'aspetto logistico eliminando la necessità di trasportare idrogeno. Ciò che si prevede è quindi di rifornire i mezzi direttamente alla centrale ogni volta che se ne abbia la necessità. Inoltre, il progetto prevede l'utilizzo di due stazioni di rifornimento ad idrogeno per una capacità totale di 1400 kg al giorno, di conseguenza si sta descrivendo due stazioni ognuna delle quali caratterizzata da una capacità di 700 kg/giorno. È necessario confrontare questo valore con i valori medi per comprendere più approfonditamente questo valore. La capacità effettiva delle stazioni di rifornimento d'idrogeno può variare in base a fattori quali l'ubicazione, la domanda e lo sviluppo delle infrastrutture. In media, le stazioni di rifornimento d'idrogeno gestiscono tipicamente capacità che vanno da circa 160 kg/giorno a 1.500 kg/giorno. Questi valori dipendono dalla stazione specifica e dalla sua percentuale di utilizzo. Pertanto, anche se i requisiti normativi specificano una capacità minima, le stazioni effettive possono superare questa media a seconda delle esigenze locali e dei modelli di utilizzo. È possibile dire che, dal punto di vista capacitivo, non si riscontrano barriere tecniche. Possiamo considerare anche il caso della seconda e terza opzione dove oltre ai bus di lunga percorrenza e gli autocarri per la biomassa sono previsti bus urbani e furgoni per aziende private, tutto ciò rigorosamente a idrogeno. Vediamo di seguito ciò che viene descritto nella voce *distribuzione* proprio nel caso della seconda o terza opzione.

Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> • Rete di stazioni di rifornimento • Due stazioni di rifornimento di idrogeno a Pego (capacità totale 1.400 kgH₂/giorno) • Una stazione di rifornimento dedicata agli autobus urbani (capacità e posizione da definire) • Una stazione di rifornimento per i furgoni (capacità e posizione da definire) • Rimorchi tubolari per la distribuzione dell'idrogeno proveniente dalla produzione fino al sito (numero di rimorchi, pressioni e capacità da definire)
---------------	--

Tabella 11: Tabella del servizio di distribuzione per l'opzione 2 e 3

Ovviamente la rete distributiva risulta essere molto più fitta sul territorio dove si prevede una stazione di rifornimento per gli autobus urbani che potrebbe essere posizionata presumibilmente nel magazzino dei bus urbani per poterli rifornire direttamente prima o dopo l'utilizzo. Infatti se dovessimo immaginare una decina di autobus urbani con un tempo di rifornimento di qualche minuto sarebbe necessario un tempo di circa un'ora per rifornire l'intera flotta. L'unico punto da tenere in considerazione sarebbe la capacità in kg/giorno d'idrogeno della stazione, ponendone solo una diventerebbe difficile gestire un numero elevato di bus. Stesso discorso varrebbe per i furgoni pensati per il noleggio ad aziende private anche se per il discorso capacitivo la gestione sarebbe sicuramente più semplice essendo mezzi che data la loro massa, minore di quella di un bus, avrebbero anche un consumo medio certamente inferiore a quello dei bus stessi. Di conseguenza anche sulle altre opzioni il discorso capacitivo non dovrebbe rappresentare una barriera ovviamente valutando oculatamente il numero di bus e furgoni da utilizzare considerando un numero limitato di stazioni. Come spiegato, nella seconda e terza opzione, due delle quattro stazioni di rifornimento previste non sarebbero situate vicino la centrale di Pego, ciò implica anche un ragionamento sulla logistica dell'idrogeno dalla centrale ai vari punti di rifornimento che secondo la descrizione del progetto dovrebbe avvenire attraverso l'utilizzo di rimorchi tubolari con pressioni e capacità da definire.

E' comunque possibile analizzare l'attuale stato tecnologico legato ai rimorchi tubolari per il trasporto dell'idrogeno in modo da comprendere cosa sarebbe possibile considerare per questo specifico progetto.

I rimorchi tubolari sono dei semirimorchi dotati di un gruppo di serbatoi tubolari in acciaio. Ci sono differenze significative tra quelli utilizzati per l'idrogeno gassoso e quelli per l'idrogeno liquido.

Rimorchi per Idrogeno Gassoso:

Pressione di Esercizio: I rimorchi per idrogeno gassoso operano generalmente ad una pressione di 300 - 500 bar. Questo significa che devono essere progettati per resistere a forti sollecitazioni.

Materiali: Sono realizzati con serbatoi tubolari in acciaio. L'acciaio offre robustezza e resistenza alla corrosione, essenziali per il trasporto di gas ad alta pressione.

Capacità: Possono trasportare quantità considerevoli di idrogeno gassoso. La loro capacità è significativa, ma non paragonabile a quella dei rimorchi per idrogeno liquido.

Applicazioni: Questi rimorchi sono utilizzati per il trasporto di idrogeno verso le stazioni di rifornimento. Sono parte integrante della catena logistica che collega la produzione di idrogeno alla sua distribuzione.

Rimorchi per Idrogeno Liquido:

Isolamento Termico: I rimorchi per idrogeno liquido sono altamente isolati per mantenere la temperatura criogenica. L'idrogeno liquido è estremamente freddo, con una temperatura di circa -253°C . Pertanto, l'isolamento è fondamentale per evitare la vaporizzazione dell'idrogeno.

Capacità: Qui sta la differenza principale. I rimorchi per idrogeno liquido possono trasportare quantità ancora maggiori di idrogeno rispetto ai rimorchi per idrogeno gassoso. La loro capacità supera quella dei rimorchi a gas.

Applicazioni: Sono utilizzati per il trasporto di grandi quantità di idrogeno liquido a temperature estremamente basse. Anche questi rimorchi sono spesso coinvolti nel collegamento tra le centrali di produzione di idrogeno e le stazioni di rifornimento.

Tipologia	Pressione	Capacità
Rimorchio tubolare 300 bar	300 bar	600 kg
Rimorchio tubolare 500 bar	500 bar	1100 kg
Rimorchio tubolare Idrogeno liquido	1,7 bar	7700kg

Tabella 12. Confronto tra tipologie di Rimorchi tubolari per idrogeno (Brown, 2019)

Risulta lampante come l'idrogeno liquido offra capacità decisamente maggiori rispetto alle alternative in gas sotto pressione. La scelta seppur apparentemente semplice è invece molto complessa in quanto il trasporto di idrogeno liquido è caratterizzato da alcune insidie, come descritto nel primo capitolo nella parte dedicata allo stoccaggio dell'idrogeno, come la complessità tecnica e l'impegno economico nella costruzione di cisterne con isolamenti termici avanzati. Le bassissime temperature portano al rischio di congelamento delle apparecchiature o valvole durante il rifornimento e scarico. Infine, La produzione di idrogeno liquido è più energivora rispetto a quella di idrogeno gassoso. Il processo di liquefazione richiede energia aggiuntiva. In sintesi, mentre l'idrogeno liquido offre vantaggi come una maggiore capacità di trasporto, gli svantaggi legati alla complessità tecnica e alla necessità di infrastrutture specializzate devono essere attentamente considerati. Ad ogni modo, viste le capacità raggiungibili da entrambe le opzioni di trasporto, anche dal punto di vista logistico della seconda e terza opzione il progetto non dovrebbe andare incontro a particolari sfide e barriere.

Analizzando la sezione *prodotti e servizi complementari* è doveroso spostarsi dal particolare al generale ponendo l'attenzione sulla tecnologia dell'idrogeno in generale, come fatto anche per la sezione *prezzo e costo del prodotto*.

Una delle tesi più condivise nel campo energetico è che uno dei più grandi ostacoli alla diffusione della tecnologia d'idrogeno su larga scala è proprio quello legato alla mancanza di servizi complementari, primo tra tutti quello di una fitta rete di stazioni di rifornimento. Questa carenza di infrastrutture di ricarica è una barriera significativa per l'adozione dei veicoli a idrogeno e limita la loro accessibilità e convenienza per i consumatori. I fattori chiave legati a questa problematica sono svariati, sicuramente gli elevati costi di costruzione di stazioni di rifornimento d'idrogeno associati alla progettazione, all'installazione e all'approvvigionamento dell'idrogeno possono scoraggiare gli investitori. Un altro fattore è quello della bassa domanda iniziale, la mancanza di veicoli a idrogeno in circolazione può rendere difficile giustificare finanziariamente la costruzione di nuove stazioni di rifornimento. D'altra parte, la mancanza di stazioni può scoraggiare i potenziali acquirenti di veicoli a idrogeno. Importante è anche considerare la difficoltà nella distribuzione richiede una rete dedicata di stazioni di rifornimento, simile alla rete di stazioni di servizio per i veicoli a benzina o diesel. La pianificazione e la costruzione di questa rete possono essere complesse e richiedere coordinazione tra vari attori, inclusi governi, produttori di veicoli e fornitori di idrogeno. Inoltre, dal punto di vista finanziario e di mercato, la percezione di rischio per gli investitori legati alla natura relativamente nuova della tecnologia dell'idrogeno e l'incertezza riguardo alla domanda futura possono rendere gli investimenti nelle stazioni di rifornimento ad idrogeno più rischiosi rispetto ad altre infrastrutture di ricarica, come le stazioni di ricarica elettriche. Infine, la diversità di tecnologie e standard nelle stazioni di rifornimento ad idrogeno può complicare la pianificazione e la costruzione di una rete unificata. La standardizzazione può semplificare la costruzione e la manutenzione della rete di stazioni di rifornimento.

Nella ricerca di una strategia per portare l'idrogeno all'utilizzo su larga scala, si possono trovare dei parallelismi nel settore dell'elettrico che soffriva anni fa della mancanza di una rete di rifornimento capillare sul territorio. Affiancare elettrico e idrogeno per ciò che concerne la mobilità può apparire come un paragone azzeccato ma non tiene conto di alcune divergenze per pochi punti fondamentali,

almeno per ciò che concerne l'argomento della struttura di rifornimento. A differenza dell'idrogeno, le auto elettriche hanno potuto godere di investimenti ed interesse già dagli arbori da parte di un discreto numero di clienti per il fatto che era possibile fin da subito ricaricare questi veicoli nei propri garage o cortili di casa senza necessitare di strutture esterne. Questo ha dato il via ad un largo utilizzo di auto elettriche specialmente in ambito urbano, nel tragitto casa-lavoro o per i percorsi quotidiani che permettevano appunto di ricaricare la macchina durante la notte. Ciò ha stimolato fin da subito gli investimenti e a seguire, un numero sempre crescente di auto elettriche all'interno delle città, ha portato ad un numero sempre crescente di colonnine di ricarica lungo i tragitti. Per l'idrogeno questo non è un percorso replicabile in quanto nessuno ha una fornitura d'idrogeno direttamente a casa per rifornire l'auto. La strategia quindi va cercata altrove sfruttando dei mezzi pesanti, come quello dei bus, lasciato ancora libero dall'elettrico. È possibile considerare infatti, i vari progetti pubblici, anche sostenuti da incentivi europei, o la collaborazione tra aziende e autorità locali come piccoli passi che possono favorire, col tempo e in modo indiretto, l'espansione di una rete di rifornimento. Gli investimenti pubblici che mirano, come Hy2Market, alla realizzazione di una rete di trasporti pubblici all'interno delle città o anche per le linee extra urbane possono mobilitare gli investimenti e l'attenzione verso questo settore. Inoltre, dare il via alla costruzione di un'infrastruttura di rifornimento pensata per i veicoli pubblici porterà negli anni ad avere il territorio cosparso di stazioni di rifornimento che potranno essere utilizzate anche per i veicoli privati.

3.6 Formazione e coordinamento della rete

La rete di attori all'interno della catena di approvvigionamento costituisce un elemento fondamentale del Technological Innovation Systems e dell'analisi strategica di un progetto. Diverse categorie di attori sono essenziali per la diffusione su vasta scala di un'innovazione come fornitori di componenti, entità coinvolte nell'assemblaggio o nella produzione del prodotto, distributori e soggetti che offrono prodotti e servizi complementari. Il coordinamento di tali attori risulta

fondamentale non limitandosi alla collaborazione pratica, ma richiedendo anche una visione condivisa dell'innovazione (Ortt and Kamp, 2022).

Gli attori che verranno coinvolti in un progetto come questo sono molteplici. In primo luogo gli enti pubblici come enti regionali e sindaci. Da questo lato non si dovrebbero riscontrare problematiche in quanto il progetto stesso è in primo luogo promosso da questi enti pubblici per contribuire e continuare un lavoro più grande di transizione energetica nel quale tutto il Portogallo è già impegnato da molti anni. Come già spiegato, la centrale a carbone di Pego è stata l'ultima centrale a combustibili fossili ad esser chiusa in tutto il paese, appena dopo il termine delle sue attività nel 2021 si è iniziato a lavorare alla ricerca di un progetto alternativo che desse nuova linfa a livello energetico alla zona Médio Tejo. Per questi motivi gli enti pubblici sono la parte di attori più convinti nel progetto.

Un altro attore fondamentale già proposto nella descrizione del progetto è la società Pegop - Energia Eléctrica, essa è responsabile dell'esercizio (manutenzione e operazione) del Centro di Produzione di Elettricità di Pego. Fondata nel 1993, la Pegop è stata creata specificamente per gestire e mantenere la Centrale Termoelettrica di Pego (alimentata a carbone), lavorando inizialmente per un solo cliente, la Tejo Energia, proprietaria di tale centrale. La Pegop si è ampliata negli anni successivi. Dopo la chiusura della centrale a carbone Pegop resta la società di gestione energetica di fiducia sul territorio e la gestione della produzione dell'idrogeno sarà destinata a lei. Ovviamente, anche tutte le attività complementari legate alla centrale d'idrogeno saranno compito di Pegop, attività come manutenzione delle strutture e erogazione d'idrogeno. Anche nel caso si ritenesse necessario organizzare un apparato logistico per il trasporto d'idrogeno tramite l'utilizzo di rimorchi tubolari, descritto nella precedente sezione *prodotti e servizi complementari*, sarebbe sempre sotto la responsabilità dell'azienda Pegop. L'azienda in questione ha già un'esperienza di trent'anni nella gestione energetica di conseguenza rappresenta un valido attore su cui fare affidamento.

Il terzo attore da prendere in considerazione è il CIMT (Comunidade Intermunicipal do Médio Tejo) è un'organizzazione intercomunale situata nella regione del Médio Tejo. La sua missione è promuovere lo sviluppo sostenibile e coordinare le attività nei settori del trasporto, dell'ambiente, dell'urbanistica e dello sviluppo economico nella regione. In particolare, la CIMT si concentra su diverse aree:

Trasporto: La CIMT lavora per migliorare l'efficienza dei trasporti nella regione, promuovendo soluzioni sostenibili e connettività tra i comuni. Questo può includere il miglioramento delle infrastrutture stradali, la promozione del trasporto pubblico e la pianificazione di reti di mobilità.

Ambiente: La CIMT si impegna a preservare l'ambiente naturale della regione. Ciò può comportare la promozione di pratiche sostenibili, la gestione delle risorse naturali e la protezione delle aree ecologicamente sensibili.

Urbanistica: La pianificazione urbana è un aspetto importante per garantire uno sviluppo armonioso e sostenibile. La CIMT collabora con i comuni per pianificare l'uso del territorio, la distribuzione degli insediamenti e la creazione di spazi pubblici.

Sviluppo economico: La CIMT lavora per stimolare l'economia locale, promuovendo investimenti, creando opportunità di lavoro e supportando lo sviluppo di settori chiave.

In sintesi, la CIMT svolge un ruolo cruciale nel coordinare gli sforzi tra i comuni della regione del Médio Tejo per migliorare la qualità della vita dei cittadini e promuovere uno sviluppo sostenibile. Risulta evidente che quest'organizzazione sia un partner ottimale per questo progetto da una parte per il forte interesse verso l'ambito ambientale dall'altra per la sua esperienza nel settore dei trasporti pubblici.

Altri attori come il fornitore di bus o camion per il trasporto della biomassa non sono ancora stati individuati, ciò non può essere identificato come una barriera

ma allo stesso modo è fondamentale stringere dei rapporti con società che si occupino di tali funzioni il prima possibile. Un partner promettente per la fornitura degli autobus extraurbani può essere la società portoghese Caetano-autobus, citata nella sezione *prestazioni e qualità del prodotto*, che con il suo modello Toyota Caetano H2 City Gold ha già riscontrato un discreto successo in diverse città europee, inoltre come già detto il modello in questione si adatterebbe perfettamente alle esigenze del progetto.

3.7 Clienti

Nel contesto del Sistema di Innovazione Tecnologica (TIS), i clienti sono un elemento fondamentale e insostituibile. È di vitale importanza identificare in modo tempestivo un segmento di clientela composto da individui che necessitano di innovazione. Questi individui possono essere coloro che hanno risolto un problema attraverso l'innovazione o coloro che traggono un notevole vantaggio dal suo utilizzo (Ortt and Kamp, 2022).

Per trasformare questi potenziali clienti in clienti effettivi, è necessario prima di tutto che siano consapevoli dell'innovazione, che ne comprendano e riconoscano i vantaggi rispetto ad altri prodotti e possiedano la conoscenza, i mezzi e la volontà di acquisirla e utilizzarla. Questo processo richiede una comprensione approfondita dell'innovazione e una valutazione dei suoi benefici rispetto ad altre opzioni disponibili sul mercato. Tuttavia, se le innovazioni vengono sviluppate senza coinvolgere i clienti, possono sorgere vari ostacoli alla loro diffusione. Ad esempio, i potenziali clienti potrebbero desiderare di utilizzare un prodotto, ma potrebbero non avere i mezzi per acquistarlo, questo potrebbe accadere in caso di una mancata attenta valutazione del target di clientela. Inoltre, i clienti potrebbero non essere a conoscenza di un prodotto e quindi percepire dei rischi a causa dell'incertezza, questo potrebbe derivare da inefficaci o assenti attività pubblicitarie e di marketing. Un altro aspetto importante da considerare è l'integrazione delle nuove tecnologie nelle routine quotidiane degli utenti. Questo processo richiede apprendimento e adattamento da parte degli utenti. L'adozione

di nuove tecnologie può richiedere cambiamenti significativi nelle abitudini e nei comportamenti degli utenti, il che può rappresentare una sfida. In conclusione, l'identificazione e l'engagement dei clienti nel processo di innovazione è un aspetto cruciale per il successo del TIS. È fondamentale comprendere le esigenze e le aspettative dei clienti e coinvolgerli attivamente nel processo di sviluppo dell'innovazione. Solo così si può garantire che le innovazioni siano accettate e adottate dai clienti, contribuendo al successo a lungo termine del TIS.

Basandosi su queste considerazioni è necessario porre l'attenzione sul ruolo giocato dai clienti nel progetto Hy2Market, per fare ciò è importante innanzi tutto identificare quali delle attività e servizi previste dal progetto sono direttamente a contatto col cliente finale e quali invece no.

Prodotto o servizio	Contatto con cliente	Motivazioni
Idrolizzatore	No	È sull'Idrolizzatore che si basa la produzione e il successivo utilizzo dell'idrogeno quindi ogni prodotto e servizio del progetto dipende dal corretto funzionamento di questa centrale. Per quanto riguarda i clienti però, il funzionamento dell'idrolizzatore non è direttamente collegato ai clienti finali.
Camion a celle di combustibile	No	I camion a celle di combustibile avranno il compito di trasportare i residui forestali fino alla centrale elettrica per essere utilizzati come biomassa per la produzione energetica. Anche questo rappresenta un servizio interno che non si connette agli utilizzatori finali.

Tabella 13: Servizi a contatto col cliente Pt.1

Prodotto o servizio	Contatto con cliente	Motivazioni
Autobus a idrogeno per la lunga percorrenza	Si	Gli autobus a lunga percorrenza sono pensati per offrire ai cittadini un servizio pubblico sostenibile per muoversi comodamente tra le città della regione. Ovviamente, i cittadini rappresentano il cliente finale di questo progetto.
Stazioni di rifornimento	Si / No	Le stazioni di rifornimento rappresentano nella prima opzione un supporto e complemento al servizio di autobus ma non sono direttamente collegate col cliente. Per la seconda e terza opzione però il servizio di rifornimento offerto per i furgoni a noleggio potrebbe essere direttamente utilizzato dai clienti finali, in questo caso i dipendenti delle aziende che noleggeranno questi furgoni.
Navette per il servizio urbano (2° e 3° Opzione)	Si	Le navette verranno utilizzate per il servizio urbano per offrire ai cittadini un'alternativa sostenibile per i loro spostamenti quotidiani. Come per gli autobus a lunga percorrenza anche in questo caso si ha un collegamento col cliente finale.
Furgoni per aziende private (2° e 3° Opzione)	Si	Nel progetto è presente la possibilità di offrire alle aziende un servizio di noleggio furgoni a celle a combustibile. Ovviamente è presente un collegamento col cliente finale anche se in questo caso quest'ultimo non è rappresentato dai cittadini ma dai dipendenti delle aziende che usufruiranno del servizio.
Logistica per la movimentazione d'idrogeno tramite rimorchi tubolari (2° e 3° Opzione)	No	L'utilizzo di rimorchi tubolari trainati dai camion rappresenta un'attività di supporto che mira a garantire il corretto funzionamento delle stazioni di rifornimento d'idrogeno. Anche in questo caso è possibile comprendere come questo non sia un servizio connesso in modo diretto al cliente.

Tabella 14: Servizi a contatto col cliente Pt.2

Come evidenziato nella tabella, ci sono svariate attività che non si connettono al cliente finale bensì ne servono da supporto in modo più o meno diretto. Analizzando quelli che sono i prodotti le attività connesse direttamente al cliente, è possibile dividere in due sottogruppi i prodotti o servizi. Il gruppo dei bus caratterizzati quindi dal servizio pubblico urbano e extra urbano e il gruppo legato ai furgoni considerando anche il supporto delle stazioni di rifornimento che in questo caso può essere ritenuto a diretto contatto col cliente.

Nel sottogruppo dei bus possiamo individuare come cliente Target colui che è già precedentemente all'implementazione del progetto della disponibilità di bus a idrogeno già si serviva del trasporto pubblico, queste persone infatti non percepiranno nessuna differenza rispetto al loro quotidiano utilizzo di bus normali. Per loro, la maggior differenza potrebbe essere percepita nell'utilizzo dei bus urbani relativamente al fatto che questi non inquinano, contribuendo anche se in minima parte a rendere l'aria delle città più pulita. Inoltre, attraverso delle operazioni di marketing per pubblicizzare il progetto si potrebbe forse riuscire a convincere qualche automobilista a considerare l'utilizzo di mezzi pubblici ad idrogeno come un modo per potersi muovere a impatto zero invogliandolo quindi a lasciare l'auto a casa laddove esista per lui la possibilità di muoversi con questi nuovi veicoli. Questo discorso può valere soprattutto per i cittadini più giovani spesso più vicini alle tematiche ambientali.

Il sottogruppo dei furgoni ha caratteristiche totalmente diverse dal precedente in quanto il cliente Target è rappresentato da aziende che potrebbero già individuare la possibilità di noleggiare furgoni pubblici come qualcosa di nuovo inoltre l'aspetto dell'idrogeno, quindi zero emissioni, rappresenterebbe un surplus non da poco. Da una parte l'utilizzo dei furgoni ad idrogeno da parte di piccole aziende del territorio potrebbe essere un vanto, è infatti sempre più ricorrente vedere aziende che pubblicizzano il loro impegno verso la transizione energetica, l'utilizzo di questi furgoni in alternativa a mezzi convenzionali potrà quindi rappresentare un'occasione interessante e un modo efficace per le aziende di limitare la propria impronta ambientale. D'altra parte la convenienza nell'adottare questo tipo di veicoli per le aziende private si avrebbe non solo sul piano

dell'immagine ma anche su quello pratico. Infatti, i centri cittadini di tutta Europa sono soggetti a limitazioni sempre più stringenti per quanto riguarda la circolazione di veicoli inquinanti. Queste limitazioni possono tradursi in accessi a fasce orarie o anche al totale divieto di circolazione per i mezzi a combustione all'interno del centro cittadino. L'utilizzo di questi furgoni a idrogeno consentirebbe a queste organizzazioni di poter circolare senza limitazioni in ogni zona della città agevolando in modo diretto le loro attività commerciali.

Un esempio di questo è il progetto appena implementato a Bologna che si basa sull'effettuare le consegne all'interno del centro storico tramite veicoli elettrici di piccole dimensioni che riceveranno la merce da consegnare all'ingresso del centro da furgoni tradizionali per poi percorrere l'ultimo miglio a impatto zero. Questo serve a rispondere alla crescita esponenziale delle vendite online e il potente aumento dei veicoli di consegna all'interno delle aree urbane. Bologna è uno dei quattro Lighthouse Living Labs coinvolti insieme a Helsinki, Salonicco e Valladolid. L'obiettivo principale del è di implementare un sistema di consegna delle merci b2b in ambito urbano sostenibile, innovativo e a basso impatto ambientale. La cornice è il progetto Urbane per la logistica sostenibile, finanziato dal programma quadro per la ricerca e l'innovazione Horizon Europe dell'Unione Europea. Viene così potenziato il ruolo della città nell'attuazione degli obiettivi dell'Agenda 2030 per la trasformazione green e nella partecipazione alla Missione 100 città a impatto climatico zero entro il 2030 (Raphael Garcia 2022). Tra le 100 città sono presenti ben nove città italiane (Bergamo, Bologna, Firenze, Milano, Padova, Parma, Prato, Roma e Torino) e tre portoghesi (Guimarães, Lisbona e Porto).

Riassumendo questa sezione dedicata all'importante tema dei clienti è possibile affermare che non sono state individuate particolari problematiche o barriere al successo del progetto Hy2Market. Bisognerà porre la giusta attenzione, come già spiegato, sulla parte di pubblicizzazione del progetto in modo da sensibilizzare e coinvolgere i cittadini nel limitare l'impatto climatico sul territorio. Se per i mezzi pubblici non sarà necessario attrarre i clienti per poter vedere il prodotto utilizzato, in questo caso i bus, per il noleggio dei furgoni il discorso è

differente in quanto pur vantando numerosi vantaggi, come abbiamo visto precedentemente, è importante riuscire a comunicare al meglio questi punti di forza anche ai possibili clienti. Una particolare riflessione andrà quindi effettuata su come pubblicizzare e organizzare al meglio l'offerta del noleggio dei furgoni per le aziende private.

3.8 Istituzioni specifiche per l'innovazione

Le istituzioni specifiche per l'innovazione costituiscono un importante elemento costitutivo del TIS. Queste istituzioni si riferiscono a regole formali e informali come politiche governative, leggi, standard e regolamenti. Tali norme possono favorire o bloccare lo sviluppo e la diffusione di un'innovazione. Le norme di qualità e i diritti di proprietà possono produrre fiducia. La mancanza di una politica coerente a lungo termine può influenzare lo sviluppo e la diffusione delle innovazioni. Istituzioni stabili e di sostegno specifiche per l'innovazione aumentano la certezza per le aziende e gli investitori e quindi facilitano lo sviluppo e la diffusione delle innovazioni (Ortt and Kamp, 2022).

Hy2Market, come molti altri progetti europei, deve la sua ideazione e futuro sviluppo a iniziative e finanziamenti europei volti a sostenere progetti sostenibili all'interno del territorio europeo secondo una linea di combattimento al cambiamento climatico, stimolazione della transizione energetica e limitazione delle emissioni. Le iniziative europee su cui questo progetto fa affidamento sono diverse.

European Hydrogen Valleys

Le "Valli europee dell'idrogeno" si riferiscono a un'iniziativa strategica della Commissione europea per promuovere lo sviluppo e l'implementazione delle tecnologie dell'idrogeno in tutta Europa. Questa iniziativa fa parte del Clean Hydrogen Partnership e mira a creare una rete di regioni, note come "Hydrogen

Valleys", dove le tecnologie dell'idrogeno vengono sviluppate e implementate. Le Hydrogen Valley sono regioni in cui varie applicazioni dell'idrogeno sono integrate in un approccio sistematico, che copre l'intera supply chain dell'idrogeno: dalla produzione e stoccaggio, alla distribuzione e all'uso finale. L'obiettivo è creare un'economia dell'idrogeno sostenibile ed economicamente fattibile. La Commissione Europea ha investito 105,4 milioni di euro per finanziare inizialmente 9 Hydrogen Valley in tutta Europa che ora si sono moltiplicate diventando diverse decine di Hydrogen Valley pianificate o già in funzione. Si prevede che queste valli fungeranno da modello per il resto dell'Europa e del mondo, mostrando come le tecnologie dell'idrogeno possano essere integrate nei nostri sistemi energetici. Per una panoramica dettagliata di ciascuna Hydrogen Valley, inclusi gli sviluppatori principali, i volumi di investimento, le sedi principali e gli stati di produzione dell'idrogeno (Directorate-General for Energy 2023).

NextGenerationEU

NextGenerationEU è un pacchetto di ripresa economica da 806,9 miliardi di euro lanciato dalla Commissione europea per sostenere gli Stati membri dell'UE nella ripresa dalla pandemia di COVID-19. L'iniziativa mira a trasformare l'Europa per renderla più sana, più verde e più digitale. Le principali aree di investimento includono:

Green: l'Europa mira a diventare il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. Verranno effettuati investimenti in tecnologie rispettose dell'ambiente, veicoli e trasporti pubblici più ecologici, edifici e spazi pubblici efficienti dal punto di vista energetico. Verranno inoltre compiuti sforzi per migliorare la qualità dell'acqua, ridurre i rifiuti e i rifiuti di plastica, piantare miliardi di alberi, creare spazi verdi nelle città, aumentare l'uso di energie rinnovabili e rendere l'agricoltura più rispettosa dell'ambiente.

Digitale: i prossimi 10 anni vengono definiti il decennio digitale dell'Europa. Verranno effettuati investimenti per garantire la connettività ovunque con il 5G e

la banda larga ultraveloce in tutta l'UE. Verranno adottate iniziative per fornire un'identità digitale (e-ID), rendere le città più intelligenti ed efficienti, proteggere gli acquisti online e utilizzare l'intelligenza artificiale per combattere il cambiamento climatico e migliorare l'assistenza sanitaria, i trasporti e l'istruzione.

Salute: l'iniziativa mira a costruire un'UE più sicura e più sana per prepararsi meglio a qualsiasi crisi futura (European Commission 2022).

Just Transition Fund

Il Just Transition Fund (JTF) è uno strumento finanziario istituito dalla Commissione europea come parte della sua politica di coesione. Il fondo mira a sostenere i territori che affrontano importanti sfide socioeconomiche derivanti dalla transizione verso la neutralità climatica. Le caratteristiche principali del Fondo per una transizione giusta includono:

Sostegno alla diversificazione economica: il JTF sostiene la diversificazione economica e la riconversione dei territori più colpiti dalla transizione verso la neutralità climatica. Ciò include il miglioramento delle competenze e la riqualificazione dei lavoratori, gli investimenti nelle piccole e medie imprese, la creazione di nuove imprese, la ricerca e l'innovazione, il ripristino ambientale, l'energia pulita, l'assistenza nella ricerca di lavoro e la trasformazione degli impianti esistenti ad alta intensità di carbonio.

Budget e durata: il fondo dispone di un budget totale di 19,32 miliardi di euro per il periodo 2021-2027. Di questi, 10,87 miliardi di euro rientrano nel piano di ripresa NextGenerationEU.

Contributo sul clima: l'obiettivo del contributo sul clima per il meccanismo per una transizione giusta, che include il JTF, è del 100%.

Gestione: il fondo è gestito dalla direzione generale della Politica regionale e urbana in regime di gestione concorrente (European Commission 2021).

Green Deal

Il Green Deal europeo è un insieme di iniziative politiche della Commissione europea con l'obiettivo generale di rendere l'Unione europea (UE) climaticamente neutrale entro il 2050. Gli obiettivi chiave del Green Deal europeo includono:

Neutralità climatica: l'UE mira a non avere emissioni nette di gas serra entro il 2050. Disaccoppiare la crescita economica dall'uso delle risorse: il piano è trasformare l'UE in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva.

Non lasciare nessuno indietro: il Green Deal europeo è visto anche come un'ancora di salvezza per uscire dalla pandemia di Covid-19. Un terzo dei 1,8 trilioni di euro di investimenti del piano di ripresa NextGenerationEU e del bilancio settennale dell'UE finanzieranno il Green Deal europeo (Perotto 2022).

La Commissione Europea ha adottato una serie di proposte per rendere le politiche dell'UE in materia di clima, energia, trasporti e tassazione idonee a ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990.

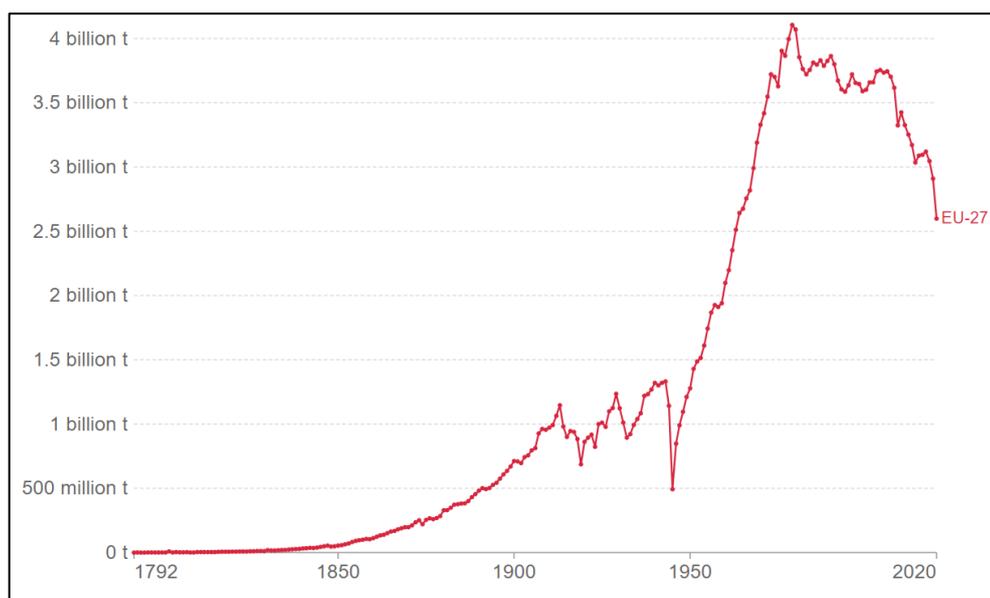


Figura 3: Emissioni annuali CO2 (Source: Global Carbon Project)

Descritte queste iniziative europee è possibile affermare che, data la natura del progetto Hy2Market, questo dovrebbe poter ottenere i finanziamenti necessari per la sua realizzazione. Questo dipenderà dal rispetto delle conformità richieste da questi programmi di finanziamento. Sicuramente, ci sono ancora alcuni step da fare prima di poter richiedere i finanziamenti, infatti alcuni dettagli del progetto sono ancora troppo vaghi. I modelli di veicoli per esempio non sono ancora stati definiti e soprattutto non lo sono nemmeno tutti i partner in gioco. Una documentazione quanto più dettagliata possibile aumenta le possibilità di ricevere finanziamenti da parte dell'unione europea. Riassumendo, per questa sezione è possibile affermare che, anche se la documentazione progettuale è ancora in una fase preliminare, non ci sono ragioni per identificare delle difficoltà o barriere future all'ottenimento dei fondi europei necessari per la sopravvivenza del progetto.

Capitolo quarto

Conclusioni e discussione

Nell'introduzione iniziale era stato delineato l'obiettivo di analizzare e contestualizzare attraverso il Technological Innovation System il progetto Hy2Market al fine di approfondire il ragionamento su quelle che potrebbero rivelarsi delle difficoltà o delle barriere durante la fase d'implementazione. Problematiche che potrebbero quindi compromettere il successo dell'intero progetto. Inoltre, l'analisi di Hy2Market si spinge anche nel voler identificare delle esternalità positive che potrebbero contribuire nel settore più ampio dell'idrogeno. Come un progetto di questo tipo può favorire l'implementazione e l'utilizzo di questo vettore energetico su larga scala?

Attraverso l'utilizzo del TIS è stato possibile ottenere dei diversi punti di vista sul progetto da differenti aspetti e settori di competenza.

- **Prestazioni:** Per quanto riguarda la mobilità, le prestazioni dei mezzi analizzati sono in grado di soddisfare le esigenze di progetto. La parte negativa potrebbe essere individuata nei costi maggiori rispetto a mezzi tradizionali, ma questo aspetto può essere mitigato attraverso i finanziamenti europei. Per quanto riguarda, invece, la produzione d'idrogeno, le tecnologie esistenti possono soddisfare senza problemi le esigenze di progetto.
- **Prezzo:** dal punto di vista del progetto, come detto in precedenza, l'implementazione di veicoli a idrogeno non è certamente la scelta più conveniente in termini di prezzo ma va considerato che il focus del progetto non è il fatturato bensì fornire ai cittadini della regione del Medio Tejo delle soluzioni sostenibili che contribuiscano al miglioramento dell'ambiente e del territorio in un ottica di transizione energetica. Anche in questo caso va poi considerato che gran parte dei costi saranno coperti dai fondi europei.

- Sistema di produzione: non sono stati riscontrate particolari problematiche di progetto. L'osservazione di altri lavori già completati, di dimensioni anche maggiori, porta a pensare che non ci saranno barriere di produzione.
- Prodotti e servizi complementari: le informazioni disponibili per questa sezione sono ancora molto preliminari ma a livello di progetto non sono stati riscontrate problematiche in quanto le esigenze già definite rappresentano dei valori raggiungibili dallo stato attuale tecnologico. Ancora molti aspetti dei servizi complementari sono da definire di conseguenza sarà un aspetto da tenere monitorato.
- Formazione e coordinamento della rete: molti partner non sono ancora stati definiti, questo non può rappresentare una barriera in quanto ci si trova ancora allo stadio iniziale del progetto ma sarà un aspetto da affrontare con attenzione prima di richiedere i fondi europei.
- Clienti: non sono state riscontrate delle problematiche di progetto. Bisognerà dedicare la giusta attenzione alla campagna pubblicitaria, specialmente per ciò che riguarda la possibilità di noleggiare i furgoni a idrogeno.
- Istituzioni specifiche per l'innovazione: per supportare il progetto sono stati individuati svariate iniziative e fondi europei che potrebbero sostenere economicamente l'implementazione del progetto. Risulterà di cruciale importanza presentare una documentazione dettagliata nei tempi previsti per poter accedere ai fondi messi a disposizione dalla UE. Risultano quindi ancora da definire gli aspetti economici in modo più dettagliato e i partner coinvolti. Ma non vi sono ragionevoli motivi per credere che il progetto non possa riuscire ad ottenere i fondi sufficienti per la sua realizzazione.

Si può concludere che il progetto risulti fattibile secondo i sette elementi costitutivi del TIS che influenzano l'innovazione.

Per quanto concerne le esternalità positive di cui si è parlato durante la definizione degli obiettivi il discorso risulta essere più ampio. Per riassumere si può dire che il mondo dell'idrogeno presenta ancora degli aspetti critici o come quello dei costi, dei servizi complementari e dell'efficienza (soprattutto per quanto è legato alla produzione). Per quanto riguarda l'efficienza sempre maggiori investimenti contribuiscono nella ricerca in questo promettente settore, si prospettano notevoli miglioramenti nei prossimi anni. Legato al discorso dei costi, durante l'analisi degli elementi costitutivi è stato fatto spesso riferimento al mondo dell'elettrico (per quanto riguarda la mobilità) e analizzando i dati storici risulta evidente come dapprima i costi legati a questo settore fossero esorbitanti ma negli anni l'aumento dell'interesse ha portato ad un aumento di clienti e ricerca, entrambi fattori che (come spesso accade) si sono rivelati inversamente proporzionali ai costi, di conseguenza questo è ciò che ci si aspetta anche per l'idrogeno. Restando sul tema della mobilità, ciò che rappresenta forse il più grande tallone d'Achille per un'implementazione su larga scala, specialmente anche per veicoli privati, è quello dei servizi complementari. Le stazioni di rifornimento risultano assolutamente carenti e a differenza del mondo elettrico un privato cittadino acquistando un'auto ad idrogeno non potrà sperare di rifornirla a casa.

È proprio sotto questo aspetto che sono state trovate le principali esternalità positive per un progetto come Hy2Market. Questi progetti, finanziati dall'unione europea forniscono un servizio pubblico a idrogeno iniziando anche a ragionare a stazioni di rifornimento ad asso associate, sia nel caso dei bus ma anche per quello dei furgoni a noleggio. In questo caso progetti come questo porteranno alla costruzione di pompe di rifornimento almeno all'interno delle città e questo consentirà di "tappezzare" col tempo il territorio di punti di rifornimento che potranno essere, in un secondo momento, adattati anche alle esigenze dei privati. Altri aspetti positivi derivanti da questi progetti pubblici saranno anche un maggior interesse da parte dei cittadini verso l'idrogeno che acquisterà una credibilità sempre maggiore e questo, come detto, stimolerà sempre maggiori investimenti.

È necessario spendere alcune parole sulla metodologia applicata e l'utilizzo che è stato fatto del TIS. Il TIS, come spiegato dettagliatamente nel capitolo precedente, è pensato per prodotti innovativi provenienti da aziende private. L'utilizzo del TIS per un progetto pubblico ha richiesto un riadattamento dovuto ad un aspetto fondamentale: a differenza dell'azienda privata, il progetto pubblico non ha come fine ultimo il guadagno bensì la qualità del servizio offerto ai cittadini. Questo ha impattato particolarmente sull'aspetto dei costi che sarebbero stati probabilmente troppo elevati per un'azienda privata rispetto ai possibili ricavi. Tale riadattamento ha permesso comunque di inquadrare in modo dettagliato il progetto all'interno di un contesto d'innovazione più ampio.

I risultati ottenuti in questa analisi potranno sicuramente essere di supporto durante il proseguo del progetto offrendo buoni spunti e riflessioni su quello che potrebbe essere l'approccio e la strategia d'implementazione.

Questo studio ha sofferto anche di alcuni limiti come una mancanza di dati per poter compiere analisi più approfondite. Tale analisi è infatti basata su ipotesi e speculazioni che pongono le fondamenta sui pochi dati a disposizione. Di conseguenza potrebbe rivelarsi utile un futuro studio del progetto in una fase più avanzata, confrontando anche quali delle attuali ipotesi si sono rivelate corrette. Inoltre, un ulteriore lavoro interessante nell'ottica di stimolare l'implementazione dell'idrogeno per l'utilizzo su larga scala seguendo il discorso fatto per i servizi complementari, sarebbe quello di riuscire ad analizzare quali tipologie di progetto nel dettaglio potrebbero essere adatte a tale scopo, cioè portare benefici sul territorio d'implementazione ma anche esternalità positive nel settore dell'idrogeno in senso più largo.

Bibliografia

- Adams, Thomas A., and Paul I. Barton. 2011. 'Combining Coal Gasification, Natural Gas Reforming, and Solid Oxide Fuel Cells for Efficient Polygeneration with CO₂ Capture and Sequestration'. *Fuel Processing Technology* 92 (10): 2105–15. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.06.019>.
- Chu, Chenyang, Kai Wu, Bingbing Luo, Qi Cao, and Huiyan Zhang. 2023. 'Hydrogen Storage by Liquid Organic Hydrogen Carriers: Catalyst, Renewable Carrier, and Technology – A Review'. *Carbon Resources Conversion*. KeAi Publishing Communications Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.03.007>.
- Cortright, R. D., R. R. Davda, and J. A. Dumesic. 2002. 'Hydrogen from Catalytic Reforming of Biomass-Derived Hydrocarbons in Liquid Water'. *Nature* 418 (6901): 964–67. <https://doi.org/10.1038/nature01009>.
- Danfoss. 2023. 'HySynergy Everfuel Project'. 12 March 2023.
- Davoodabadi, Ali, Ashkan Mahmoudi, and Hadi Ghasemi. n.d. 'IScience The Potential of Hydrogen Hydrate as a Future Hydrogen Storage Medium'. <https://doi.org/10.1016/j.isci>.
- Directorate-General for Energy. 2023. 'Hydrogen Valleys: European Commission Signs Joint Declaration with European Stakeholders to Boost the EU Hydrogen Economy'.
- Elberry, Ahmed M., Jagruti Thakur, Annukka Santasalo-Aarnio, and Martti Larmi. 2021. 'Large-Scale Compressed Hydrogen Storage as Part of Renewable Electricity Storage Systems'. *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.080>.
- European Commission. 2021. 'Just Transition Fund'. 2022. 'NextGenerationEU'.
- Gabriel Mathias. 2020. 'Hydrogen Production through Electrolysis'. *Process the Ecology*, November.
- Gurov, Y. B.; Aleshkin, D. V.; Behr, M. N.; Lapushkin, S. V.; Morokhov, P. V.; Pechkurov, V. A.; Poroshin, N. O.; Sandukovsky, V. G.; Tel'kushev, M. V.; Chernyshev, B. A.; Tschurenkova, T. D. 2004. 'Spectroscopy of Superheavy Hydrogen Isotopes in Stopped-Pion Absorption by Nuclei'.
- Hacking, Nick, Peter Pearson, and Malcolm Eames. 2019. 'Mapping Innovation and Diffusion of Hydrogen Fuel Cell Technologies: Evidence from the UK's Hydrogen Fuel Cell Technological Innovation System, 1954–2012'. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (57): 29805–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.137>.
- Heavenn. 2021. 'Hydrogen Applications in Heavy-Duty Transportation Hydrogen Applications in Heavy-Duty Transportation Green Planet'.
- 'Hydrogen'. n.d. *Encyclopædia Britannica* 2021.

- Ibrahim, Mustapha D., Fatima A.S. Binofai, and Maha O.A. Mohamad. 2022. 'Transition to Low-Carbon Hydrogen Energy System in the UAE: Sector Efficiency and Hydrogen Energy Production Efficiency Analysis'. *Energies* 15 (18). <https://doi.org/10.3390/en15186663>.
- Klopčič, Nejc, Ilena Grimmer, Franz Winkler, Markus Sartory, and Alexander Trattner. 2023. 'A Review on Metal Hydride Materials for Hydrogen Storage'. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>.
- Marques, João G.O., Antonella L. Costa, and Cláudia Pereira. 2018. 'Na–O–H Thermochemical Water Splitting Cycle: A New Approach in Hydrogen Production Based on Sodium Cooled Fast Reactor'. *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (16): 7738–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.027>.
- Mersch, Dirk, Chong Yong Lee, Jenny Zhenqi Zhang, Katharina Brinkert, Juan C. Fontecilla-Camps, A. William Rutherford, and Erwin Reisner. 2015. 'Wiring of Photosystem II to Hydrogenase for Photoelectrochemical Water Splitting'. *Journal of the American Chemical Society* 137 (26): 8541–49. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b03737>.
- Ni, Meng. 2006. 'An Overview of Hydrogen Storage Technologies'. *ENERGY EXPLORATION & EXPLOITATION* . Vol. 24.
- O.Bassi. 2023. 'Largest Framework Agreement Ever in France for Hydrogen-Powered Buses Signed by CaetanoBus and CTS Strasbourg'. 23 April 2023.
- Ortt, J. Roland, and Linda M. Kamp. 2022. 'A Technological Innovation System Framework to Formulate Niche Introduction Strategies for Companies Prior to Large-Scale Diffusion'. *Technological Forecasting and Social Change* 180 (July). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121671>.
- Perotto, Gabriella. 2022. 'Il Green Deal Europeo e Il Sistema Delle Risorse Proprie; The European Green Deal and the Own Resources System; Il Green Deal Europeo e Il Sistema Delle Risorse Proprie'. *European Papers Www.Europeanpapers.Eu ISSN 7 (1)*: 385–98. <https://doi.org/10.15166/2499-8249/571>.
- Raphael Garcia. 2022. 'The 100 Climate-Neutral and Smart Cities by 2030'. *EuroCities*, April.
- Szydło, Z. A. 2020. 'Hydrogen - Some Historical Highlights'. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*.
- Touloupakis, Eleftherios, and Giuseppe Torzillo. 2019. 'Photobiological Hydrogen Production'. In *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, 511–25. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00014-X>.
- Wang, Lijun, Zhenzhong Yang, Yan Huang, Dong Liu, Junfa Duan, Shuman Guo, and Zhaoju Qin. 2017. 'The Effect of Hydrogen Injection Parameters on the Quality of Hydrogen–Air Mixture Formation for a PFI Hydrogen Internal Combustion Engine'. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (37): 23832–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.086>.
- Wang, Mingyong, Zhi Wang, Xuzhong Gong, and Zhancheng Guo. 2014. 'The Intensification Technologies to Water Electrolysis for Hydrogen Production - A Review'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.090>.

Weiss, Martin, Andreas Zerfass, and Eckard Helmers. 2019. 'Fully Electric and Plug-in Hybrid Cars - An Analysis of Learning Rates, User Costs, and Costs for Mitigating CO₂ and Air Pollutant Emissions'. *Journal of Cleaner Production* 212 (March): 1478–89. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.019>.