



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea aprile 2024

Cella a combustibile: analisi di una tecnologia emergente

Confronto con tecnologie tradizionali e alternative per il futuro
del settore automotive

Relatrici:

Montagna Francesca

Monti Teresa

Candidata:

Cavanna Greta

Matricola 302274

Sommario

Introduzione	3
1. Il settore automotive nell'ultimo decennio	6
1.1 La cella a combustibile: storia, struttura e applicazioni	8
2. Teoria dell'innovazione	18
2.1 Cos'è l'innovazione	18
2.1.2 Scoperta, invenzione e innovazione.....	22
2.1.3 Sviluppo prodotto e processo innovativo: cosa cambia.....	24
2.1.4 Gli attori dell'innovazione.....	25
2.2 Finanziare l'innovazione	26
2.2.1 Finanziamenti pubblici.....	28
2.2.2 Finanziamenti privati.....	30
2.2.3 Modello lineare dell'innovazione.....	32
2.2.4 Critica al modello.....	35
2.3 Il ruolo della conoscenza nell'innovazione tecnologica	38
2.3.1 Le forme della conoscenza.....	39
2.3.2 Conoscenza scientifica e tecnologica.....	41
2.3.3 Teoria evolutiva dell'impresa.....	42
2.3.4 Apprendimento organizzativo.....	44
2.4.1 La traiettoria tecnologica e il salto del paradigma.....	46
2.4.2 Tipologie di innovazione.....	49
2.4.3 Disruption: quando avviene e perchè.....	52
2.4.4 Come avviene l'innovazione.....	57
3. Investire nell'innovazione: l'esempio della cella a combustibile	69
3.1 Investimenti pubblici	69
3.2 Investimenti privati	94
3.3 Modello lineare dell'innovazione della cella a combustibile	103
4. Le nuove competenze per emergere nel settore automotive	106
4.1 Tecnologie tradizionali ed emergenti	106
4.1.1 Motore a combustione interna.....	106
4.1.2 Batteria agli ioni litio.....	110
4.2 Confronto delle competenze: somiglianze e differenze	113
4.3 Le grandi aziende	120
4.3.1 Toyota.....	121
4.3.2 Ballard Power Systems.....	123
4.3.3 General Motors.....	125
4.3.4 Bosch Group.....	127
5. La nuova traiettoria tecnologica del settore automotive	130
5.1 Identificare l'innovazione del futuro	130
5.1.1. Tassonomie e modello di Henderson e Clark.....	130
5.1.2 Paradigmi tecnologici a confronto: analisi della disruption.....	133
5.2 Batteria o cella a combustibile in futuro?	142
5.2.1 Modello di Abernathy Utterback.....	142
5.2.2 Opportunità e minacce del settore automotive: il modello di Porter.....	150
Conclusione	158

Bibliografia	161
Figure e Tabelle	168
Fonti dei bilanci aziendali	170

Introduzione

Negli scorsi decenni il tema della sostenibilità, come è noto, è diventato sempre più centrale nelle politiche degli Stati e delle aziende. Tale interesse segue l'emergere dei cambiamenti climatici estremi, le cui conseguenze sono diventate ormai visibili in modo rilevante.

L'attenzione si pone sui principali settori responsabili: l'agricoltura e l'allevamento, l'energia e ovviamente il trasporto. Secondo i dati del Parlamento europeo, il settore automobilistico rappresenta una delle principali fonti di inquinamento a livello globale. È infatti l'unico che negli ultimi tre decenni ha aumentato la propria produzione di emissioni di gas serra di circa il 33,5%, a differenza di altri settori che sono riusciti ad abbassare i valori [1]. Il segmento che impatta maggiormente risulta essere il trasporto su strada, con il 71.7%, al cui interno pesano in particolare le emissioni generate dalle automobili, circa il 60,6%. Nonostante si sia verificata una diminuzione delle emissioni negli anni, essa non è in linea con i targets definiti dall'Unione Europea, che si aspettano un livello pari a 59 g di CO₂/km entro il 2030, nonostante i livelli sperati siano già stati disattesi a partire dal 2017.

In questo contesto, il presente elaborato di tesi si concentra sull'analisi dell'evoluzione tecnologica nel settore automobilistico, allo scopo di individuare le soluzioni sostenibili che potrebbero sostituire l'attuale tecnologia dominante, il motore a combustione interna (da qui in poi 'ICE'¹, abbreviazione della traduzione inglese del termine). Nello specifico, l'obiettivo che ci si pone è quello di indagare il mercato della cella a combustibile (da qui in poi 'fuel cell'), in quanto tecnologia emergente con differenti ambiti di applicazione, in particolare, appunto, quello della mobilità.

La fuel cell non è una novità tecnologica degli ultimi anni: esiste da circa due secoli, ma il suo utilizzo come sistema di propulsione è stato utilizzato per la prima volta solo 60 anni fa.

Tuttavia, solo nell'ultimo decennio il suo ruolo nel processo di de-carbonizzazione dei veicoli è stato preso sul serio tanto dalle istituzioni quanto dalle imprese. In parte ciò è dovuto all'ascesa dell'idrogeno come nuovo combustibile, il quale, avendo come unico prodotto di scarto il vapore acqueo, consente ai veicoli di generare zero emissioni.

Coerentemente, questa tesi si pone come domanda centrale: "Se e quando arriverà l'era della fuel cell?".

Tale lavoro vuole provare a tracciare il profilo di tale tecnologia adottando una prospettiva legata alla gestione dell'innovazione, ed effettuando un confronto con la tecnologia

¹ Internal combustion engine

tradizionale del motore a combustione interna e con un'altra tecnologia in ascesa, la batteria agli ioni litio.

Per introdurre questo elaborato, nella prima parte si compie un'analisi approfondita della letteratura scientifica relativa alla gestione dell'innovazione tecnologica, in modo tale da fornire struttura metodologica al lavoro e spiegare le basi della teoria applicata al caso studiato.

In seguito, la ricerca si concentra sull'analisi del modello lineare dell'innovazione, per riuscire a comprendere in quale fase la tecnologia fuel cell si colloca: a partire da un'analisi dettagliata degli investimenti del settore pubblico e del settore privato a livello di macroaree geografiche, si indaga come i principali Stati e aziende abbiano impostato le spese in tale tecnologia negli ultimi decenni.

Successivamente, il lavoro si focalizza sulle conoscenze e competenze richieste per operare nel mercato della fuel cell, effettuando un confronto con quelle necessarie per lo sviluppo delle altre tecnologie prese in considerazione. Ciò permette di investigare il comportamento dei player più rilevanti del settore nell'affrontare il passaggio da una tecnologia a un'altra: tra di essi sono analizzati in particolare Toyota, General Motors e Bosch, in quanto pionieri di tale tecnologia.

L'ultima parte è dedicata all'analisi dei paradigmi tecnologici delle tecnologie. Miratamente è stato sviluppato il modello di Abernathy-Utterback (1978) per studiare il ciclo di vita delle tecnologie e comprendere l'evoluzione del settore industriale attraverso l'analisi di tre componenti fondamentali: l'innovazione, la competizione, e le dinamiche di mercato e le performance tecnologiche. Questi elementi riescono insieme a spiegare lo status della tecnologia e a far comprendere la rapidità con cui le aziende devono muoversi per ottenere successo competitivo.

Tali analisi sono così risultate funzionali alla valutazione del fenomeno della disruption, al fine di capire come si potrebbe modificare il settore industriale nei prossimi anni. Infine, ancora in questa sezione, è stato costruito il modello di Porter (1979) del settore automobilistico in contesti innovativi per dedurre la struttura competitiva, e quindi determinarne l'attrattività economica, intesa come capacità di generare profitti nel lungo termine.

Tali approfondimenti sugli investimenti nel settore, gli attori coinvolti, le competenze necessarie, i legami dell'ecosistema e le differenti tipologie di innovazione, sono risultati utili per comprendere la direzione di sviluppo del settore automotive e, soprattutto, se la fuel cell

sarà la tecnologia che subentrerà ai motori a combustione, oppure se la fase di rivoluzione del paradigma vedrà il prevalere di un'altra tecnologia come la batteria.

1. Il settore automotive nell'ultimo decennio

Negli ultimi anni l'attenzione verso la sostenibilità ambientale è cresciuta notevolmente. Il termine si riferisce al soddisfacimento delle necessità della generazione presente, senza compromettere le possibilità di quelle future [2]. Significa agire nell'interesse collettivo, e non individuale, tentando di ridurre gli impatti negativi delle aziende sull'ecosistema. Questo non si traduce semplicemente nella riduzione degli sprechi produttivi o nel minor consumo di energia, ma anche e soprattutto nello strutturare processi aziendali efficienti per l'intera società, e non solo per gli interessi degli investitori delle aziende. In questo contesto, e con le continue pressioni delle istituzioni pubbliche, il miglioramento della sostenibilità nei settori del trasporto, dell'agricoltura e dell'energia è diventato gradualmente sempre più importante. Finora tutto questo è avvenuto per lo più con un graduale miglioramento della tecnologia attualmente presente, ovvero con un progressivo abbattimento delle emissioni generate dai motori a combustione. Questo fenomeno interessa ormai la quasi totalità dei Paesi sviluppati, e anche numerosi altri hanno iniziato a imporre programmi di progressivo miglioramento delle emissioni dei veicoli circolanti, si veda ad esempio il PROCONVE² in Brasile o i Bharat Stages in India.

Tuttavia, per raggiungere una totale neutralità di emissioni è necessario compiere un passo ulteriore. L'Unione Europea ha infatti imposto il divieto di vendita di automobili e veicoli commerciali leggeri con motori endotermici entro il 2035 [3]. Tale provvedimento contempla tutti veicoli che durante il loro periodo di marcia su strada producono emissioni, escludendo invece quelle necessarie alla produzione dell'energia necessaria per il movimento stesso del veicolo.

Dunque, nell'ottica di ottenere un taglio maggiormente rilevante delle emissioni è necessario un cambiamento di tecnologia. ciò implica. la comunità scientifica ha infatti iniziato a indagare nuove tecnologie potenzialmente sostitutive e proposto alcune soluzioni, come le auto elettriche dotate di batterie agli ioni di litio. Tali veicoli, si stanno lentamente diffondendo in Europa, Cina e Stati Uniti, nonostante i prezzi dei veicoli ancora elevati, la mancanza di un'infrastruttura di ricarica massicciamente sviluppata e ovviamente i timori classici dei consumatori all'inizio di un nuovo percorso tecnologico.

Negli scorsi anni, alla possibilità di un salto tecnologico ormai certo verso l'elettrico, si è affiancata la possibilità di un "powertrain mix", ovvero un mix di più tecnologie a disposizione dei consumatori, così da accontentare le esigenze di una più ampia platea e

² Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

soprattutto capace di incastrarsi in maniera armoniosa con un altro importante problema: la disponibilità energetica. Quest'ultima è profondamente intrecciata con la mobilità, in primis in Europa, in seguito allo scoppio della guerra in Ucraina, e alla conseguente crisi energetica. Le istituzioni e imprese europee hanno compreso quanto sia fondamentale affrancarsi da Paesi terzi e iniziare a investire nella produzione interna di energia, se possibile pulita [4].

I due temi sono strettamente connessi: una maggiore varietà di fonti energetiche permetterebbe di usufruire di un mix di sistemi di propulsione veicolari. È indispensabile, pertanto, creare le condizioni per sviluppare una rete di produzione di energia, se possibile a basse o nulle emissioni, per giungere così alla realizzazione di un ecosistema interamente sostenibile. Comprare un'auto elettrica, infatti, non abbassa in modo significativo le emissioni totali se l'elettricità introdotta nel veicolo non è anch'essa prodotta in modo sostenibile.

Nel valutare le varie soluzioni si dovrebbero tenere in considerazione le emissioni totali rilasciate nell'ambiente, che, nel caso, di un veicolo iniziano con la produzione dell'energia necessaria al suo movimento. Tale analisi in inglese prende il nome di *Well-to-Wheel Analysis* e si suddivide in due sottofasi:

- Well-to-Tank, ovvero dal pozzo, inteso metaforicamente come luogo in cui inizia la catena di emissioni, alla cisterna. In questa fase è bene notare che il veicolo anche se non ancora in movimento è già potenzialmente responsabile della produzione di gas serra. Questa è la fase solitamente tralasciata nel commentare il beneficio ambientale di una tecnologia.
- Tank-to-Wheel, cioè dalla cisterna alle gomme del veicolo. Questa fase si riferisce alle emissioni "in-use", quelle generalmente considerate perché idealmente immaginate come più impattanti.

Una spiegazione dettagliata è presentata in Figura 1.

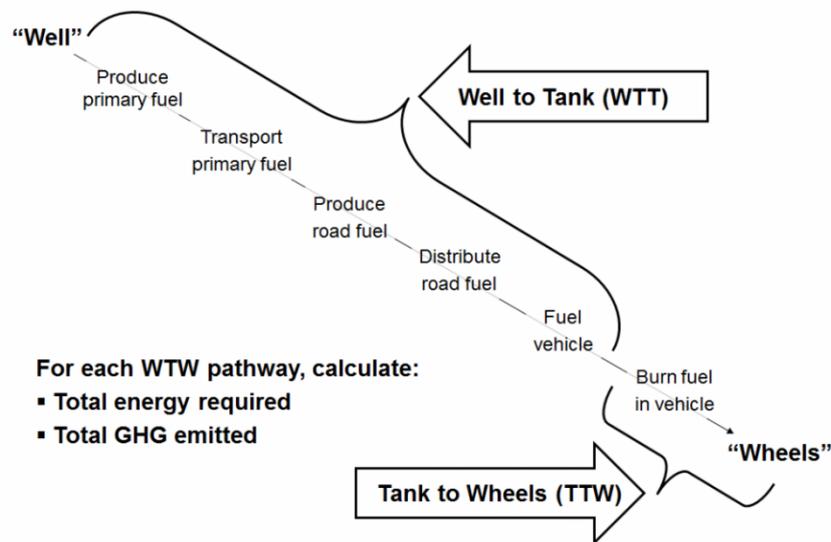


Figura 1. - Well-to-Wheels Analyses (fonte: [EU Science Hub](#))

Allo stesso tempo, nel valutare la diffusione dei nuovi sistemi di propulsione, bisogna tenere conto degli interventi degli enti governativi per facilitare tale processo, con particolare attenzione agli aspetti infrastrutturali, fondamentali per il settore automobilistico. Quest'ultimo ragionamento vale tanto per i battery electric vehicles (BEVs) quanto per i fuel cell electric vehicles (FCEVs): incoraggiare il loro acquisto è ragionevole solo se il consumatore ha a disposizione un'infrastruttura di distribuzione della materia prima a un prezzo accessibile, tale quindi da giustificare il cambiamento di abitudini e i costi annessi. Nell'ottica del powertrain mix, la cella a combustibile rappresenta una soluzione sostenibile così come la batteria. Si tratta di un dispositivo capace di produrre energia elettrica, sfruttando delle reazioni elettrochimiche che non rilasciano emissioni di gas serra nell'ambiente. L'ipotesi più plausibile è l'affiancamento dei BEVs con tecnologie alternative come le FCEVs, così da ampliare il ventaglio di possibilità dei consumatori per superare così l'utilizzo dei mezzi a combustibili fossili. [5].

1.1 La cella a combustibile: storia, struttura e applicazioni

Per comprendere meglio le specificità e le motivazioni che hanno riportato in auge la cella a combustibile risulta necessario ripercorrere la sua storia. questa tecnologia è nata circa due secoli fa: nel 1839, William Grove, scienziato britannico considerato l'inventore delle celle a combustibile, condusse una serie di esperimenti con i quali mostrò che era possibile generare

corrente elettrica attraverso la reazione di idrogeno e ossigeno all'interno di una cella elettrochimica [6].

Il termine cella a combustibile venne coniato da Charles Langer e Ludwig Mond nel 1889, dopo che sperimentarono la fuel cell tramite l'utilizzo di carbone per la produzione dell'elettricità. Tuttavia, dopo questa serie di esperimenti e scoperte, la tecnologia rimase sconosciuta ai più per parecchi anni. Essa tornò in voga negli anni '30 del secolo scorso, grazie ad alcune applicazioni veicolari condotte da Francis Bacon, professore di ingegneria di Cambridge, ma fu intorno al 1960, che la cella a combustibile tornò protagonista, questa volta grazie al coinvolgimento della NASA, che elaborò una versione specifica per le spedizioni spaziali. Allo stesso tempo, anche l'Unione Sovietica iniziò a fare uso della fuel cell per applicazioni militari sottomarine.

Una delle prime aziende automobilistiche a sperimentare applicazioni su strada fu General Motors, celebre per aver motorizzato nel '66 l'Electrovan, mostrato in Figura 2, con una fuel cell detta Union Carbide.

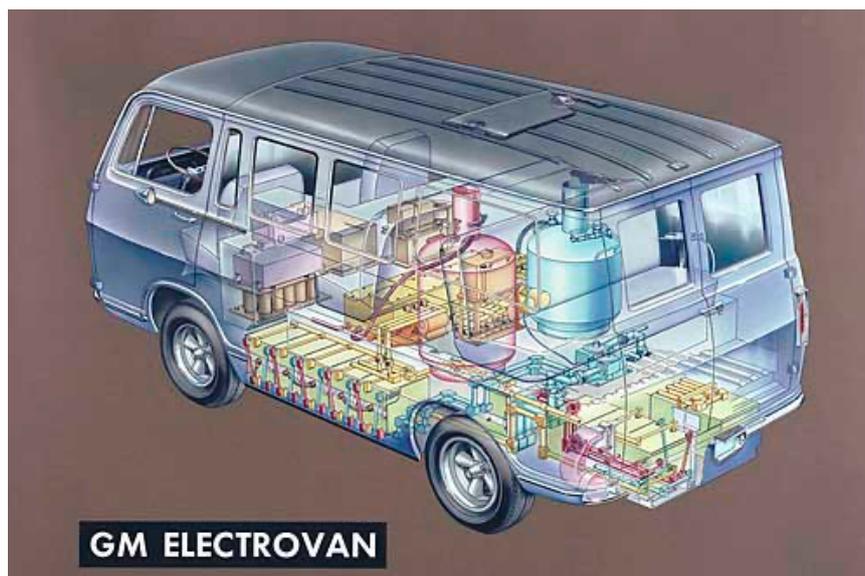


Figura 2 - Illustrazione dell'Electrovan di General Motors (fonte: [Hydrogen Cars Now](#))

General Motors aprì dunque la strada alla sperimentazione della cella a combustibile su veicoli: nel 1970 numerose aziende, specialmente tedesche, americane e giapponesi, condussero varie dimostrazioni, allo scopo di migliorare le performance della cella. Negli ultimi decenni, tutti i principali produttori di veicoli hanno sviluppato soluzioni, anche solamente a livello dimostrativo, di mezzi dotati di cella a combustibile a idrogeno. Tutto questo ovviamente è stato possibile grazie all'intervento degli enti statali, nazionali e sovranazionali.

La fuel cell è un dispositivo elettrochimico in grado di convertire in modo continuo l'energia chimica contenuta nel combustibile, solitamente idrogeno, in elettricità attraverso la reazione con il comburente, di solito ossigeno. I prodotti di scarto generati sono solamente calore e vapore acqueo [7].

I quattro elementi principali che compongono la cella sono [8]:

- il catodo, ovvero l'elettrodo positivo;
- l'anodo, ovvero l'elettrodo negativo;
- l'elettrolita, che costituisce la membrana che divide i due elettrodi;
- il circuito esterno, attraverso il quale gli elettroni della reazione si muovono in direzione del catodo per ricombinarsi e ricominciare il processo.

La Figura 3 mostra i vari elementi elencati sopra.

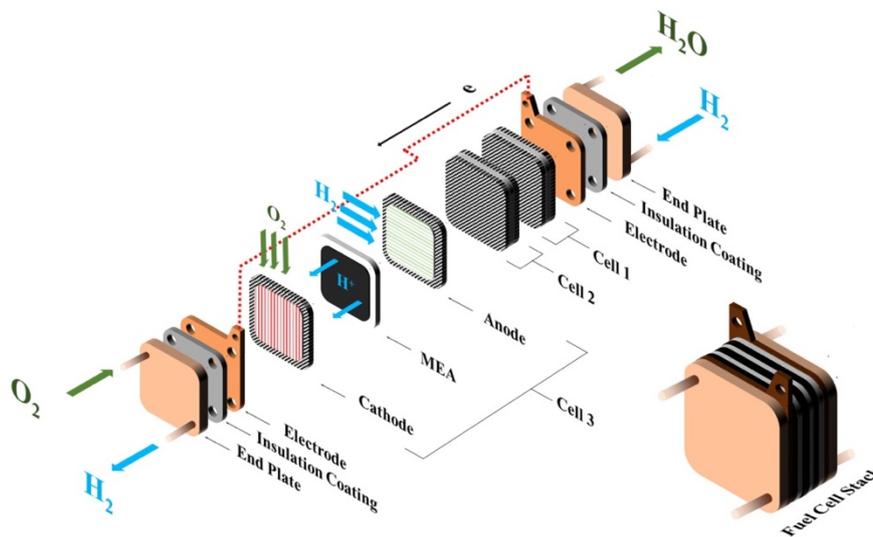
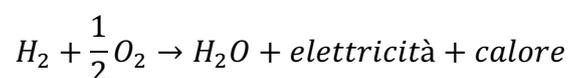


Figura 3 – Disegno di una fuel cell (fonte: Y. Chen, *Journal of Applied Mechanical Engineering* 5, no. 6: 6.)

Per favorire la corretta evoluzione del processo, spesso agli elettrodi sono applicate sostanze catalizzatrici, tipicamente dei metalli nobili come il platino.

Durante la reazione, il combustibile viene ossidato all'anodo dove si scinde in protoni ed elettroni, che sono rispettivamente le particelle positive e negative che compongono l'atomo. I primi possono attraversare la membrana elettrolitica per raggiungere il catodo, dove reagiscono a loro volta con le molecole di ossigeno. Gli elettroni invece devono passare attraverso il circuito esterno per riunirsi al catodo e ricombinarsi all'ossigeno, andando così a generare corrente elettrica. [9].

Qui la reazione chimica completa:



In tutto ciò è molto importante che calore e vapore acqueo vengano continuamente rimossi per permettere le migliori condizioni operative ed evitare il surriscaldamento della cella. In Figura 4, è presentato uno schema esemplificativo del percorso che avviene nella cella

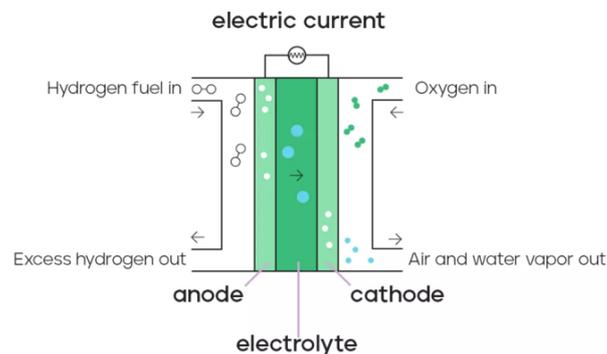


Figura 4 - Schema di funzionamento della fuel cell (fonte: *Accelera*)

La cella a combustibile assomiglia notevolmente alla batteria: entrambe sono celle elettrochimiche, in cui un elettrolita è racchiuso tra due elettrodi di segno opposto, e producono energia attraverso una reazione di ossido-riduzione per convertire l'energia chimica in energia elettrica. Ciò che cambia tra le due tecnologie è principalmente la natura degli elettrodi, i quali nella batteria sono costituiti generalmente da metalli come zinco o litio immerso in acidi leggeri, mentre nella fuel cell sono composti da uno strato catalizzatore e da uno strato per la diffusione del gas realizzato con mezzi conduttivi come i carbonati. Inoltre, è bene sottolineare che ciò che differenzia batterie e celle a combustibile è lo scopo finale: la batteria è usata per lo stoccaggio e la conversione di energia, mentre la fuel cell effettua solamente la seconda delle due operazioni. La batteria usa l'energia immagazzinata negli elettrodi tramite il combustibile per dare avvio alle reazioni elettrochimiche per generare l'elettricità. Per questi motivi, la batteria ha una vita limitata fino al momento in cui i materiali componenti degli elettrodi non sono consumati. Viceversa, nella fuel cell i reagenti sono forniti da uno strumento di stoccaggio separato senza impatti sugli elementi interni elettrochimicamente attivi. Pertanto, teoricamente la fuel cell può funzionare all'infinito, a meno di rotture, o almeno fintanto che i reagenti vengono forniti al sistema. La tecnologia delle batterie verrà successivamente approfondita nel capitolo dedicato alle competenze necessarie per sviluppare ciascuna tecnologia.

Con il termine fuel cell solitamente ci si riferisce alla fuel cell come singola unità, ma nei contesti applicativi, la fuel cell è composta da tante singole unità in serie, così da formare quella che è definita stack. In questo elaborato, a meno di indicazioni, si userà la parola fuel cell per riferirsi all'unità complessiva funzionante in un'applicazione automotive.

Esistono differenti tipologie di fuel cell a seconda della composizione dell'elettrolita [10]:

- Cella alcalina, AFC (alkaline fuel cell): l'elettrolita è composto da una soluzione acquosa di idrossido di potassio, in presenza di elettrodi porosi a base di nichel o platino, che consentono di operare a temperature comprese tra i 60° e i 100°C, ma possono toccare anche i 250°C in particolari condizioni operative. Esse vengono utilizzate con l'idrogeno come combustibile, e patiscono il contatto con il biossido di carbonio che le renderebbe inutilizzabili. L'efficienza è elevata, raggiungendo valori anche superiori al 70%. Lo svantaggio principale è rappresentato dal costo dei materiali costitutivi, i quali ne precludono ad ora la commercializzazione di massa e le rendono appetibili solamente per scopi spaziali o militari.
- Cella con membrana a scambio protonico, PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell): l'elettrolita è composto da una lega di materiali metallici (platino o altri meno costosi) con funzione catalizzatrice e da uno strato di plastica per facilitare il passaggio di idrogeno o altro combustibile. Tali pile operano a temperature basse, fino a 100°C, consentendo un'alta densità di energia e un avvio veloce. Le basse temperature operative, tuttavia, complicano il rilascio del calore prodotto, perché sono molto vicine alle temperature ambiente e pertanto è necessario un impianto di raffreddamento.
- Cella ad ossidi solidi, SOFC (Solid oxide fuel cell): l'elettrolita usato è l'ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio. Il vantaggio principale di tale cella è l'elevata temperatura a cui può lavorare, circa 800-1000°C. Ciò la rende una cella semplice, altamente efficiente, e utilizzabile con una differente gamma di carburanti, tra cui metano, metanolo e diesel in quanto tollerante alle impurità. Questa fuel cell garantisce prestazioni superiori al 60% senza necessità di raffreddamento e catalizzatori per alimentare la reazione. Ciò implica ovviamente un notevole abbassamento dei costi di esercizio, il che la rende molto appetibile per applicazioni veicolari che necessitano di un funzionamento in continuità nonostante un avvio più lento.
- Cella ad acido fosforico, PAFC (Phosphoric acid fuel cell): l'elettrolita costituito da acido fosforico è immerso in una matrice di carburo di silicio contenuta tra i due elettrodi in grafite. Si tratta di una cella che lavora tra i 150 e i 200°C, che può soffrire di importanti problemi di corrosione: il catalizzatore deve pertanto appartenere alla famiglia del platino così come l'acido non deve essere volatile. Tale categoria è stata

la prima ad essere commercializzata perché lavora in un range di temperatura che permette la dispersione del calore prodotto facilmente.

- cella a metanolo diretto, DMFC (Direct methanol fuel cell): è la categoria tecnologicamente più recente, e in modo simile a quella con membrana a scambio protonico, utilizza un polimero come elettrolita. La particolarità di tale cella sta nel processo di lavoro: all'anodo le particelle di idrogeno vengono estratte direttamente dal metanolo senza bisogno del processo di trasformazione del combustibile. Data la poca maturità della tecnologia, essa raggiunge rendimenti vicini al 40%, o nel peggiore dei casi intorno al 20%, lavorando a temperature comprese tra 60° e 90°C. Punto a favore è sicuramente la dimensione estremamente ridotta che permette di utilizzarla in numerose applicazioni.
- cella a carbonati fusi, MCFC (Molten carbonate fuel cell): utilizza come elettrolita carbonati miscelati di litio e potassio ed elettrodi costituiti da nichel, in particolare ossido di nichel litiato al catodo e nichel con cromo all'anodo. Senza l'utilizzo di metalli nobili, questa cella è maggiormente sfruttabile per la diffusione della tecnologia avendo impatti economici inferiori. Tale cella a carbonati fusi lavora a temperature molto elevate, tra i 600° e i 700°C. Il combustibile utilizzato può essere ricavato da petrolio o altri combustibili fossili e raggiunge performance del 60% circa. Nonostante la necessità di alcune migliorie tecnologiche, si può ritenere la cella pronta per la commercializzazione.

Nella Tabella 1 un breve riassunto delle caratteristiche principali di ciascuna categoria.

Tipo	Elettrolita	Ione	T (°C)	Catalizzatore	Combustibile	Efficienza (%)
AFC	Idrossido di potassio	OH-	60-100	platino, palladio, nichel	H ₂ puro	60-70
PEMFC	Membrana polimerica	H+	≤ 100	platino	H ₂ puro	35-45
SOFC	Ossido di zirconio	O ²⁻	800-1000	-	H ₂ , CO, CH ₄	50 - 60
PAFC	Acido fosforico e carburo di silicio	H+	150-200	platino	CH ₄ e altri idrocarburi, alcoli	35-40
DMFC	Membrana polimerica	H+	60-90	platino	Metanolo	20-40

MCFC	Carbonato di litio e potassio	CO ₃ ²⁻	600-700	Nichel e cromo (anodo), ossido di nichel (catodo)	H ₂ , CO, (CH ₄)	40-50
-------------	-------------------------------	-------------------------------	---------	---	---	-------

Tabella 1. Categorie di fuel cell e relative caratteristiche

Si può facilmente notare come maggiori livelli di efficienza, e dunque maggiore produzione di potenza elettrica, si raggiungono con maggiori temperature operative.

I principali vantaggi nella scelta di una fuel cell sono [11] :

- elevata efficienza, che in alcuni casi può arrivare all' 80-90%, con un potenziale recupero del calore pari al 30-40%. Questa condizione è determinata dalla natura stessa della tecnologia, che converte semplicemente l'energia chimica in energia elettrica, senza conversioni intermedie e reazioni termiche. A ciò si aggiunge il fatto che lavorando a elevatissime temperature in taluni casi, il calore prodotto può essere recuperato al posto di essere buttato nell'ambiente. Dunque, rispetto all'efficienza, la fuel cell batte notevolmente i motori endotermici.
- Basse o nulle emissioni: è una tecnologia eco-friendly, perché riduce notevolmente o elimina del tutto le emissioni inquinanti in atmosfera. La differenza tra basse o nulle emissioni è legata alla produzione del combustibile usato: se l'idrogeno immesso è prodotto a partire da metano o altre fonti fossili, le emissioni non possono essere considerate nulle secondo la Well-to-Wheel analysis.
- Rumorosità nulla: l'emissione sonora è nulla, pertanto adatta anche ad applicazioni in cui il controllo dei rumori risulta rilevante.
- Affidabilità: a differenza delle batterie, il grado di degradazione della cella a combustibile è minimo grazie all'assenza di parti in movimento oltre che temperature maggiormente contenute.
- Ampia gamma di tipologie: esistono numerose tipologie di celle, ciascuna delle quali può essere utilizzata con differenti combustibili organici o inorganici, liquidi o gassosi, rendendo la tecnologia flessibile e modulare a seconda dell'utilizzo, della locazione geografica e dal costo delle materie prime, contrapponendosi così alle caratteristiche tipiche dei carburanti fossili.
- Fornitura continua di energia: la cella, a differenza dei motori a combustione, da una generazione costante di potenza elettrica.

Sebbene i vantaggi siano numerosi, è bene anche evidenziare anche alcuni importanti svantaggi relativi alle celle a combustibile, che, molto probabilmente, contribuiscono alla limitata diffusione [12]:

- Produzione dell'idrogeno: la fuel cell utilizza principalmente l'idrogeno come combustibile. Questo, nonostante sia l'elemento maggiormente diffuso sulla Terra, non esiste così come viene utilizzato, ma deve essere prodotto tramite l'elettrolisi dell'acqua, che scinde l'acqua in particelle di idrogeno e ossigeno. Alternativamente l'idrogeno si può produrre tramite reforming, un processo che sfrutta i combustibili fossili, con conseguente emissione di inquinanti. Entrambi i processi portano con sé la necessità di utilizzare una grande quantità di energia, che in taluni casi, potrebbe essere maggiore dell'energia prodotta dalla stessa reazione di ossido-riduzione della cella, oltre a comportare costi addizionali. Di conseguenza, la diffusione della tecnologia necessita della sovrabbondanza di energia da fonti rinnovabili, ottenibile durante i picchi di produzione, tali da essere superiori alla domanda di energia stessa.
- Costo: la cella a combustibile necessita per la sua costruzione di materiali spesso pregiati come metalli nobili, la cui scarsa disponibilità fa rimbalzare in alto i prezzi degli stessi.
- Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno: sono più complessi di quelli dei combustibili fossili, a causa dell'elevata esplosività e infiammabilità.
- Costi di sviluppo e investimenti: nonostante la tecnologia non sia nuova, per permettere la sua diffusione è necessario continuare a investire massicciamente sulle infrastrutture e sugli incentivi pubblici, al fine di abbattere le barriere prettamente logistiche. Questi temi, vicini ai contesti dell'innovazione, saranno ripresi più avanti nell'elaborato.

Recentemente, l'interesse nei confronti delle celle a combustibile si è riaperto per le loro due principali applicazioni: la mobilità e la produzione di energia. L'attenzione su tali impegni è aumentata in concomitanza con la pandemia da COVID-19 all'inizio del 2020 e successivamente in seguito allo scoppio della guerra in Ucraina. Entrambi questi eventi catastrofici hanno messo in luce alcune problematiche legate a tali settori, come la necessità di ripensare in maniera sostenibile le due filiere, intrinsecamente connesse tra loro.

Il COVID ha sottolineato come la logistica sia centrale per l'economia globale e porti con sé alcune problematiche: in presenza del blocco parziale dei movimenti di persone e beni, è sorto il bisogno di ripensare la mobilità, cercando di affrancarsi dai combustibili fossili, che si

trovano in generale in aree del mondo sottosviluppate e lontane dalle principali tratte commerciali internazionali. Le alternative sostenibili ai motori endotermici, come batterie e cella a combustibile, hanno idealmente svincolato il movimento dei Paesi carenti di fonti fossili, ovviamente in presenza di un'alternativa energetica adeguata, e possibilmente sostenibile. Due anni dopo, la guerra in Ucraina, ha ulteriormente evidenziato il problema, in particolare nel continente europeo, facendo emergere la necessità di indipendenza dai pochi Paesi esportatori.

In seguito a tutte queste considerazioni, la ricerca, lo sviluppo e gli investimenti in parte, sono fortemente tornati sul tema. In particolare, i Paesi maggiormente sviluppati hanno iniziato a investire pesantemente su nuove forme di mobilità, in primis la mobilità elettrica, ma anche soprattutto in Europa, Giappone e Stati Uniti nelle celle a combustibile, di cui esistono differenti configurazioni, a seconda della centralità della cella.

Di seguito una semplice distinzione tra i differenti tipi di veicoli a celle a combustibile:

- Full FCEV, ovvero veicoli con solamente la cella a combustibile come unità di energia-SI tratta di un veicolo totalmente elettrico, dotato di una piccola batteria necessaria alla gestione, ma non deputata alla conversione. Si tratta di una soluzione adottata principalmente per architetture semplici [13].
- FCHEV, ovvero veicoli ibridi con a bordo una cella a combustibile, che sfruttano sistemi di stoccaggio e supporto differenti, che sono principalmente le batterie e i super condensatori. La fuel cell produce l'energia che non viene direttamente mandata al motore elettrico ma viene accumulata nei sistemi di accumulo per poi essere utilizzata. Lo svantaggio principale è sicuramente l'efficienza inferiore al full FCEV, a causa della doppia conversione di energia. Tale categoria di veicoli è poi ampliabile in altre sottocategorie, illustrate in Figura 5.

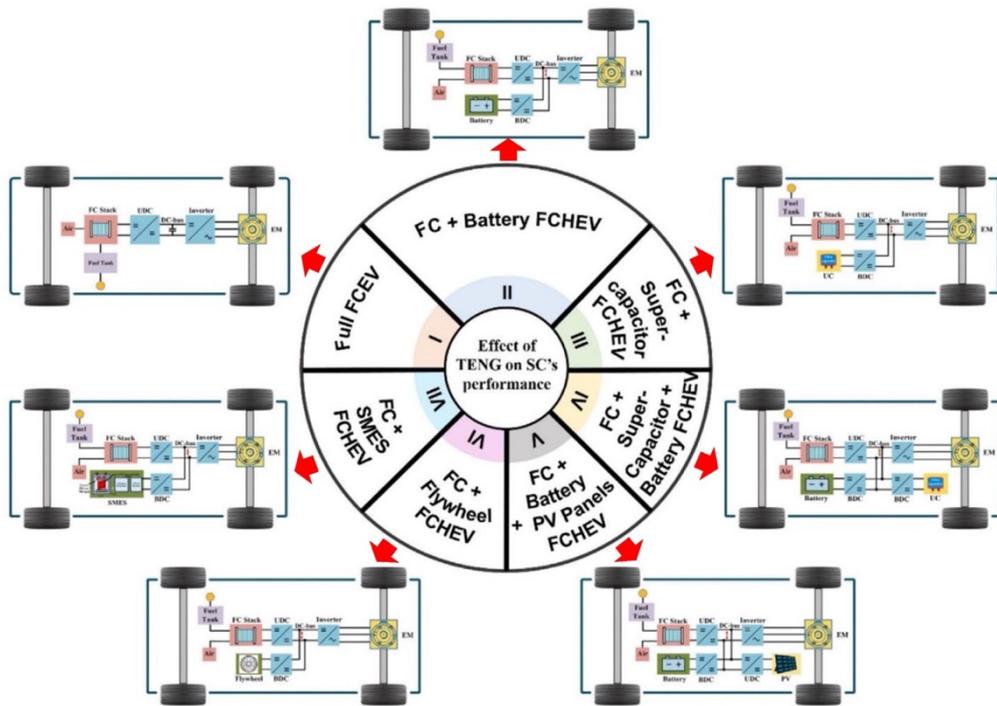


Figura 5 - combinazioni di veicoli con cella a combustibile (fonte: *Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies*)

2. Teoria dell'innovazione

In questo capitolo verranno trattati alcuni dei principali argomenti alla base della teoria dell'innovazione, materia fondamentale per comprendere come nasce e si sviluppa un'innovazione, in particolar modo se tecnologica. I temi trattati sono:

- il concetto di innovazione a 360°, in cui si affrontano in modo ampio tutte le implicazioni che essa porta con sé;
- come si costruisce l'innovazione, ovvero come si finanzia e quali entità entrano in gioco lungo il percorso;
- il ruolo della conoscenza e dell'apprendimento, in quanto fase fondante dell'innovazione senza le quali essa non esisterebbe;
- le modalità con cui avviene un'innovazione, ovvero quali sono le caratteristiche che portano alla sua realizzazione e alle sue varie caratterizzazioni.

2.1 Cos'è l'innovazione

Il termine innovazione è stato usato negli anni passati in maniera spesso scorretta per spiegare un ampio gruppo di fenomeni economici, sociali, culturali e tecnologici. Per il fine di tale tesi, quest'ultimo campo è quello maggiormente rilevante, in quanto l'innovazione tecnologica impatta a 360 gradi l'intera società, coinvolgendo di volta in volta stakeholders privati, come le aziende, e pubblici come istituzioni governative e centri di ricerca.

In senso generico, l'innovazione è tutto ciò che riguarda i cambiamenti che avvengono e coinvolgono la società. In particolare, considerando l'etimologia del termine, "innovare" significa "modificare lo stato attuale per introdurre qualcosa di nuovo" [14]. Di conseguenza, l'innovazione può essere interpretata come la realizzazione concreta di un concetto o di una nuova soluzione una volta che quest'ultima ha trovato il favore del mercato. L'intuizione, che segna l'inizio del processo, si riferisce a un prodotto o servizio in grado di migliorare la qualità della vita e favorire lo sviluppo sociale.

Si potrebbe pensare che l'innovazione riguardi solamente il presente, ma non è così: l'innovazione è intrinseca alla società umana dalla sua costituzione, con differenti gradi di successo e implementazione. A causa del presentismo³, si tende a giudicare il passato con i

³ filosofia del tempo, convinzione che esista solo il presente, mentre il futuro e il passato siano irreali o che se ne si possa debitamente prescindere, in quanto inutili e privi di valore euristico

valori del presente e appare dunque difficile vedere le innovazioni dei secoli scorsi come idee dirompenti. Ma dopo un'attenta analisi, appare chiaro quanto il passato sia stato ugualmente una fucina di idee geniali: la ruota, la stampa e la penicillina sono solo tre delle più grandiose innovazioni degli scorsi secoli, senza i quali l'umanità non si troverebbe nello stato attuale. Dunque, l'innovazione nasce con la comparsa del genere umano e non è un fenomeno tipico della sola età contemporanea.

Oggi l'innovazione gioca un ruolo cruciale anche e soprattutto nelle aziende, che compreso il suo meccanismo, investono quantità ingenti di denaro per fare innovazione, tattica vincente soprattutto in periodi di gravi crisi, economiche e non solo [15]. Ad esempio, la crisi finanziaria del 2008 e la pandemia da COVID19, nonostante la tragicità del momento, hanno permesso al genere umano di avanzare tecnologicamente e di imparare a uscire dai momenti di emergenza.

L'importante connessione tra innovazione e crescita economica è stata dimostrata da Robert Solow, premio Nobel per l'economia nel 1987 [16]. Egli dimostrò come i fattori di produzione, il lavoro e il capitale, da soli non bastano a spiegare come avvenga la crescita: entrano infatti in gioco sia la produttività di tali fattori, che si traduce nella misurazione di quanto bene essi siano utilizzati, sia l'innovazione, resa possibile dal progresso tecnologico. Sulla base di questa teoria, l'assunzione che segue in questo elaborato è che non tutte le innovazioni sono di tipo tecnologico, ma viceversa la tecnologia, in qualche modo si interfaccia sempre con l'innovazione. Inoltre, quest'ultima non può essere studiata solamente da un punto di vista tecnologico, ma deve essere analizzata mediante altri strumenti gestionali di tipo organizzativo, strategico e pianificativo.

Andando in profondità, si può notare che, come qualunque materia riguardante, la sfera economica risulta indispensabile rapportare l'innovazione sia alla domanda che all'offerta. Rispetto alla prima, l'innovazione appare come la risposta a un bisogno nascente della società e corre sempre il rischio di faticare ad essere accettata dalla stessa quando è dirompente. Rispetto all'offerta invece, l'innovazione deve essere vista come conseguenza dell'interazione positiva di un gruppo di persone interne e/o esterne all'azienda dove ha inizio il fenomeno. Dunque, la definizione più appropriata di innovazione è quella di un fenomeno che riguarda e interagisce con l'intera società e che pertanto, dato la sua estrema complessità, necessita di un approccio manageriale strutturato per garantire la piena comprensione del progresso di cui essa si fa portatrice.

2.1.1 La teoria schumpeteriana

Uno dei primi a interessarsi allo studio dell'innovazione con un approccio sistematico è stato Joseph Schumpeter, economista austriaco conosciuto principalmente per essere il fondatore di quella branca dell'economia nota come economia dell'innovazione [17] [18]. Il suo contributo risulta fondamentale per un aspetto in particolare: nella sua teoria, innovazione e tecnologia non assumono più il ruolo di fattori esogeni e dunque impattanti il panorama economico dall'esterno, ma piuttosto si configurano come fattori endogeni. Qui risiede la chiave di tutti i successivi studi sull'innovazione, che diventa materia da affrontare con un approccio multidisciplinare, includendo scienze sociali e tecniche.

Osservando l'innovazione come un fenomeno sociale complesso e vario risulta evidente che essa possa essere studiata con un metodo invariato per differenti settori, indipendentemente dalla tecnologia in questione.

L'innovazione non è un fenomeno statico, ma si configura piuttosto come un mutamento qualitativo della società, che avviene nel momento di rottura dello stato stazionario dell'economia. Ciò è permesso dall'intervento di una figura chiave della teoria capitalistica, l'imprenditore. Per l'economista austriaco, tale figura ha il compito di introdurre l'innovazione nel tessuto economico generando sviluppo non solo di tipo quantitativo, e dunque crescita della produttività, ma anche di tipo qualitativo attraverso l'introduzione di nuovi beni, nuove tecnologie e nuovi sistemi organizzativi. Il ruolo dell'imprenditore schumpeteriano si distingue da quello del manager: il primo modifica la routine quotidiana dell'azienda, il secondo la amministra.

L'innovazione gioca un ruolo cruciale nella generazione del profitto, in quanto esso è il compenso che tocca all'imprenditore. Tuttavia, tale rendita è solamente momentanea perché una volta che l'innovazione si è diffusa su larga scala essa scomparirà. Un esempio è il seguente: un imprenditore introduce un'innovazione nella propria area professionale che permette di abbassare notevolmente i costi di produzione del bene. In questo modo inizialmente egli godrà del profitto generato dal vendere il bene a un prezzo equivalente a prima dell'innovazione, ma con costi più bassi. Tale profitto però cesserà di esistere quando l'innovazione entrerà anche nelle altre aziende, cosicché l'imprenditore innovatore sarà obbligato ad abbassare il prezzo a causa dei meccanismi di competizione.

Per Schumpeter l'innovazione può avvenire secondo diverse gradazioni all'interno di un'azienda. Le aree interessate possono essere:

1. prodotti e/o servizi;

2. processi produttivi;
3. nascita di un nuovo mercato;
4. materie prime e/ semilavorati;
5. forme organizzative.

Le prime due fanno riferimento a innovazioni di tipo tecnologico, le altre hanno sfaccettature più ampie e riguardano in generale i potenziali miglioramenti aziendali.

Un'altra affermazione dello studioso austriaco riguarda la visione temporale delle innovazioni: egli ritiene che lo sviluppo non avvenga in maniera lineare e regolare, ma piuttosto che le innovazioni si verifichino "a grappoli", rimanendo ammassate in determinati momenti storici [19]. Questa teoria si spiega facilmente con il pensiero logico:

un'innovazione di successo molto probabilmente influenzerà positivamente il contesto economico del momento, aiutando pertanto gli altri imprenditori a svilupparne di altre, generando così innovazioni indotte. In sintesi, dunque, condizioni favorevoli innescano un sistema che rende l'andamento delle innovazioni di tipo ciclico.

Un altro ruolo strategico è giocato dalle banche e dagli istituti di credito che generano la moneta necessaria per gli imprenditori per pagare le risorse necessarie all'innovazione. A sua volta gli imprenditori pagano l'interesse su quel denaro alle banche attraverso i profitti dell'innovazione. In questa visione, le banche sono gli istituti che prendono le decisioni in merito a quali innovazioni sono meritevoli e quali no.

Assemblando ciascuna parte della teoria schumpeteriana, si arriva ad affermare che ciclicamente, si hanno periodi di forte espansione innovativa che generano alti profitti. Quando invece le innovazioni perdono il loro grado di novità e diventano generalizzate, i profitti si abbassano e si chiude un ciclo. In tutto ciò, il ruolo del credito amplifica tale andamento: nei momenti di sviluppo, le banche sono maggiormente propense a concedere credito grazie al clima di fiducia. Dopodiché nei periodi di stagnazione innovativa solamente i progetti più rischiosi, ovvero quelli che hanno un ritorno atteso più elevato, saranno finanziati. Qui si inverte il ciclo: inizia una fase di deflazione, a cui si aggiunge la tendenza degli imprenditori schumpeteriani di restituire il denaro con interesse alle banche. Per finire, i profitti si abbassano perché il potere d'acquisto diminuisce, così che le aziende non sono più in grado di innovare e falliscono: è qui per Schumpeter che può avere inizio un periodo di crisi, che per lo studioso, non per forza assume un'accezione negativa, ma anzi diventa un periodo di "distruzione creatrice", come verrà spiegato tra qualche riga.

Data la dinamicità di tale percorso, con la teoria schumpeteriana è nato il termine "dinamiche dell'innovazione". Per Schumpeter, l'evoluzione del panorama tecnologico avviene mediante

due meccanismi: distruzione creatrice e accumulazione creatrice [20]. La prima si riferisce al processo con cui un'innovazione arriva sul mercato distruggendo la tecnologia precedentemente diffusa, rendendola obsoleta. Tale forza è considerata in questa teoria come una forza positiva perché stimola il progresso tecnologico, creando una sorta di competizione tra nuove e vecchie tecnologie, le quali per sopravvivere devono mantenere un'efficienza alta. Allo stesso tempo, le aziende esistenti devono adattarsi ai cambiamenti per non soccombere e questo richiede di avere accumulazione creatrice, ovvero la capacità, indotta dalla pressione competitiva, delle grandi organizzazioni di continuare a mantenere la leadership innovativa, sfruttando e andando oltre alle proprie precedenti tecnologie.

2.1.2 Scoperta, invenzione e innovazione

Prima di approfondire le tematiche centrali dell'innovazione, è necessario distinguere nettamente i seguenti tre concetti:

- scoperta: ha a che fare con il raggiungimento di qualcosa precedentemente sconosciuto e per questo è facilmente riconducibile ai risultati della scienza. Ha come scopo la creazione di nuova conoscenza a partire da fenomeni esistenti. Si pensi alle grandi scoperte scientifiche nei campi della biologia, della fisica o dell'astronomia: esse non sono altro che l'emergere agli occhi della società di qualcosa che esisteva già. Ovviamente la scoperta si basa sulla conoscenza pregressa della scienza, la quale costituisce un bene pubblico proprio perché se così non fosse gli sforzi della comunità scientifica si moltiplicherebbero. Da osservare è poi il carattere prettamente astratto dei fenomeni oggetto di scoperta: gli scienziati, infatti, non pongono attenzione all'applicabilità futura del loro studio, si concentrano su solamente sui risvolti relativi alla ricerca pura;
- invenzione: riguarda la realizzazione della soluzione a un problema ed è infatti riconducibile ai risultati dell'attività tecnologica. Ha lo scopo di creare e validare degli artefatti, cioè tutto ciò che può essere materiale o immateriale, semplice o complesso. La risoluzione di un problema non passa semplicemente dall'osservazione di un fenomeno, ma dalla capacità di rispondere a un'esigenza, ed è proprio per questo motivo che l'invenzione è legata alla tecnologia. Ovviamente l'invenzione per realizzarsi necessita della scienza: risultano pertanto indispensabili sia la conoscenza scientifica per comprendere, sia la conoscenza tecnologica per risolvere. Un esempio è fornito dall'invenzione della ruota: essa esiste per rispondere a una problematicità, il trasporto di

materiale pesante, ma per realizzarla è stato necessario conoscere cos'è l'attrito e come si manifesta;

- **innovazione:** è definita come lo sfruttamento economico di un'invenzione, ovvero quando quest'ultima viene messa sul mercato e trova consenso tra i consumatori. Un artefatto diventa innovazione se riesce a produrre per il consumatore un'utilità maggiore del suo costo. Il passaggio da invenzione a innovazione può essere lungo e avvenire in contesti e ambienti differenti rispetto a quelli in cui l'invenzione è stata sviluppata. La diffusione è pertanto il processo che segue all'innovazione ed è la fase in cui il mercato accetta e adotta l'innovazione. La differenza temporale che caratterizza le diverse innovazioni imputa a ciascuna una differente attrattività finanziaria, motivo per cui alcuni settori beneficiano di aiuti finanziari molto più frequentemente che altri quando si parla di progresso tecnologico.

I due aspetti essenziali di un'innovazione sono:

- la componente tecnica, che fa riferimento al “prodotto in uso” e alla sua producibilità;
- la componente economica, legata alle condizioni del mercato.

Infine, è bene tenere conto delle tre componenti fondamentali per la realizzazione di un'innovazione: il soddisfacimento del bisogno, la definizione di un costo adeguato e la scelta di un prezzo sostenibile.

Le innovazioni possono:

- *prodotti*
- *processi*
- *organizzazioni*
- *modelli di business*

Ovviamente non esiste una distinzione così netta tra queste categorie. Ad esempio, le vendite online tramite e-commerce potrebbero configurarsi sia come innovazione di servizio, e dunque processo, ma anche come innovazione di business model.

Analogamente, i servizi di delivery intrecciano simultaneamente innovazione di processo, di organizzazione e di modello di business.

2.1.3 Sviluppo prodotto e processo innovativo: cosa cambia

Un processo cruciale per la piena realizzazione dell'innovazione è lo sviluppo prodotto, condotto dalle aziende per portarne i risultati al mercato.

Rispetto agli altri processi aziendali, lo sviluppo prodotto presenta alcune particolarità: innanzitutto si configura come un'attività di lunga durata, il cui risultato è visibile solo a distanza di mesi o anni. A ciò si aggiunge che esso è un processo multifunzione, fortemente interdisciplinare e con un elevato contenuto di conoscenza tecnica e manageriale. Data la sua natura, ciascuna divisione aziendale viene coinvolta in tale processo, solitamente guidato in maniera congiunta dal marketing di prodotto e dalle funzioni tecniche.

È tuttavia indispensabile distinguere nettamente il processo di sviluppo prodotto e il processo di innovazione.

Ad esempio, si pensi al “post-it”: è nato per caso, in seguito a un processo creativo, il cui scopo non era arrivare a un'invenzione precisa. Questo è un esempio di processo innovativo, che dopo la generazione dell'idea, ha proseguito con un processo di sviluppo prodotto.

Quest'ultimo rappresenta un'attività che oggi viene condotta quotidianamente dalle imprese: in questo modo, la fase innovativa si configura come una singola parte del processo di sviluppo prodotto, in cui si esaminano delle possibilità migliorative o radicali delle soluzioni attuali.

Il processo di innovazione include una fase di brainstorming, secondo uno schema “a imbuto”, conosciuto appunto come funnel tunnel, in cui da tante idee iniziali si giunge alla fine ad avere un'unica idea, scelta in quanto ritenuta di successo. Un esempio di innovation process funnel è mostrato in Figura 6.

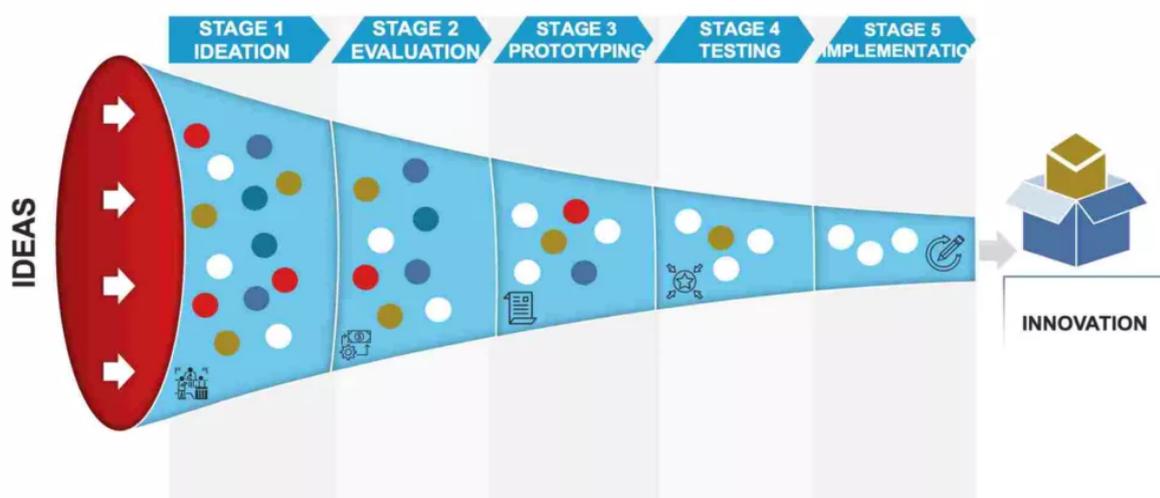


Figura 6. Processo innovativo (fonte: The Big Bang Partnership)

Un processo vincente richiede fortuna, abilità decisionale, capacità di gestire le incertezze tecnologiche e di mercato così come la corretta impostazione di una strategia: tutte ciò ha lo scopo di garantire all'azienda di raggiungere il successo.

Il processo di sviluppo prodotto invece è l'insieme della attività propedeutiche alla definizione e allo sviluppo dei processi, prodotti, organizzazioni e servizi fondamentali volti alla realizzazione dell'intero ciclo di vita del prodotto, dalla sua concezione al momento in cui è stabilmente presente sul mercato. Come si può vedere in Figura 7 processo innovativo e processo di sviluppo prodotto sono intrinsecamente connessi, essendo il primo parte del secondo.



Figura 7. Processo di sviluppo prodotto (fonte: Maze)

2.1.4 Gli attori dell'innovazione

Secondo Schumpeter, i principali attori che portano avanti il processo di innovazione sono essenzialmente:

- gli innovatori imprenditori, figure ibride che riescono ad unire le competenze tecniche del loro specifico settore a capacità manageriali spiccate per introdurre novità nel mercato. Oggigiorno esempi per comprendere questa figura sono sicuramente i fondatori delle cosiddette big tech companies come Amazon e Meta, ovvero personaggi del calibro di Jeff Bezos e Mark Zuckerberg;
- le grandi aziende, che nel corso del tempo accumulano, tramite la loro forza lavoro, numerose competenze in modo continuativo, le quali a loro volta costituiscono la base dell'innovazione evolutiva, anche detta incrementale.

Successivamente agli scritti di Schumpeter, gli studi sull'innovazione sono andati avanti e dopo diversi dibattiti si è scelto di inserire tra gli attori anche:

- i networks, ovvero gli ecosistemi di aziende, la cui presenza negli ultimi anni è aumentata notevolmente. Infatti, non è banale per una singola azienda possedere tutte

le competenze necessarie per fare innovazione. Grazie all'information technology però le aziende oggi possono collaborare in modo semplice per un obiettivo comune: le piattaforme digitali mettono in contatto non solamente le grandi aziende tra di loro, ma permettono a queste ultime di conoscere startups, centri di ricerca e università.

All'ICT si lega poi un'altra tematica, che è l'open innovation, una strategia aziendale che attraverso dei cosiddetti mercati di incontro, tipicamente piattaforme, mette in comunicazione aziende con competenze specifiche con aziende che ricercano proprio quelle competenze per risolvere un problema. In pratica, l'open innovation crea il perfetto match tra domanda e offerta di soluzioni innovative;

- i clienti, in particolare quando diventano fornitori di idee e soluzioni. Attraverso attività di co-design e co-development, le aziende clienti offrono aiuto ai propri fornitori per lo sviluppo di soluzioni efficaci. Si parla dunque di co-creazione perché il cliente smette di essere semplicemente un'entità che usa e consuma il bene e/o servizio, ma contribuisce attivamente alla sua realizzazione. Il supporto dei clienti in fase di sviluppo prodotto è tipico nei mercati B2B o in quelli nei quali il cliente deve personalizzare anche in minima parte il prodotto.

2.2 Finanziare l'innovazione

Il processo di innovazione riguarda anche i concetti di fallimento e rischio, che soprattutto nelle società e nelle culture sviluppate, sono visti come aspetti fortemente negativi. Tuttavia, è necessario per studiare l'innovazione provare ad astrarre questi termini dai loro contesti abituali e provare ad analizzarli in un'ottica più appropriata. Infatti, il rischio riesce a stimolare il processo innovativo aumentando il grado di selezione, e conseguentemente quello di competizione delle aziende, le quali metteranno tutto l'impegno possibile per creare prodotti di valore, in quanto solo i migliori sopravviveranno [21].

Secondo questa logica darwiniana, la società tutta dovrebbe allora beneficiare da tale situazione. In assenza di competizione, non esisterebbe l'incentivo a sviluppare soluzioni tecnologicamente migliori.

L'altro tassello fondamentale in questa dinamica è sicuramente il fallimento, che si manifesta attraverso il processo di selezione e fa uscire le soluzioni meno convincenti, premiando i vincitori con maggiori quote di mercato.

Tuttavia, il fallimento e il rischio potrebbero non indurre le aziende a percorrere la strada dell'innovazione per paura di perdere la propria impresa nonostante tutti i sacrifici sostenuti

precedentemente. Proprio a causa dell'instabilità del processo di innovazione è importante individuare le entità in grado di sostenere gli investimenti: il rischio e il tempo necessario per generare un ritorno economico fanno emergere il bisogno di una miscela di differenti fonti di finanziamento. Senza ciò, le imprese private, volte per loro natura al profitto, non potrebbero sobbarcarsi l'intero ammontare di denaro necessario per innovare.

Questo fa comprendere che l'intero processo è sostenuto da più enti: a monte, in particolare, le imprese non possono investire più di tanto, data l'alta rischiosità di questa fase. Qui intervengono gli enti pubblici, senza il cui aiuto alcuna azienda investirebbe in un'innovazione ancora tanto incerta. Oggigiorno si dibatte molto sul preciso ruolo da assumere da parte delle istituzioni: anche le politiche più neoliberiste prevedono un intervento statale in tali processi, sia perché essi smetterebbero di esistere, sia perché ciò causerebbe un tracollo culturale-scientifico molto grande. Infatti, se le aziende private fossero obbligate a investire in ricerca pura e applicata dovrebbero tenere nascoste le conoscenze acquisite al fine di mantenere vantaggio, e ciò provocherebbe un enorme fallimento: gli sforzi degli scienziati verrebbero duplicati e il progresso sarebbe molto ritardato. Dunque, il finanziamento pubblico nelle fasi iniziali non ha solamente lo scopo di evitare il collasso delle imprese in caso di fallimento, ma anche di assicurare all'umanità di progredire efficientemente tramite una corretta evoluzione della conoscenza scientifica e tecnologica. Essendo finanziata dagli enti pubblici, la conoscenza appresa nelle prime fasi è per definizione di dominio pubblico, permettendo alla comunità scientifica di sfruttare i risultati altrui attraverso scoperte, invenzioni e prototipi.

Infine, gli enti pubblici anche agli enti regolatori per la definizione degli standard di prodotto, che per natura, presentano ingenti costi di investimento, si pensi al mondo delle telecomunicazioni o dei trasporti. Gli Stati si fanno cioè portatori dell'interesse pubblico a beneficio delle comunità per evitare l'opportunismo dei privati. Quindi, una volta che l'innovazione si avvicina al mercato è fondamentale che i governi continuino a essere partecipi nel processo nelle vesti però di un altro ruolo diverso da quello di finanziatore. Allo stesso tempo, le imprese private sono svincolate dall'impegno nelle attività di ricerca, più rischiose, e possono dedicarsi maggiormente a rendere commercialmente appetibili le invenzioni sviluppate nelle prime fasi. Ovviamente l'intervento pubblico cessa prima che abbia inizio la fase competitiva sia perché ormai il mercato dovrebbe essere in grado di recepire l'innovazione sia perché le aziende corrono ormai un rischio basso e possono godere di un ritorno economico vicino nel tempo. Altro motivo valido per cui smettono gli aiuti statali è legato al corretto funzionamento della concorrenza, la quale altrimenti risulterebbe

distorta. Per questo motivo l'intervento statale negli stadi avanzati del modello è solitamente vietato, anche attraverso accordi internazionali. Questo non vieta ai governi di aiutare il processo innovativo anche durante le ultime fasi, ma l'aiuto è concesso sottoforma di incentivi o sovvenzioni al mercato e non attraverso finanziamenti diretti.

Nei Paesi che adottano un sano equilibrio tra investimenti pubblici e privati per l'innovazione si è visto che questa ripartizione funziona bene e genera progresso.

2.2.1 Finanziamenti pubblici

I governi possono favorire concretamente l'innovazione secondo due modalità principali: il sostenimento dell'offerta e il sostenimento della domanda. Dato che ciascuna delle due politiche presenta pregi e difetti, la soluzione maggiormente proficua deriva sicuramente da una miscela di più metodi.

Tra le misure utilizzate lato offerta vi sono:

- **fondi diretti:** è la forma più semplice e comune di finanziamento pubblico. È particolarmente indicato in quelle situazioni in cui gli enti privati non avrebbero in alcun modo la capacità di ottenere risorse autonomamente. I fondi sono spesso elargiti sotto forma di bando. Rappresentano un modo veloce per distribuire denaro ex-ante, cioè prima che il progetto abbia inizio, nonostante i problemi burocratici annessi. I fondi diretti soffrono spesso di una scorretta allocazione delle risorse nei progetti, a volte anche volontariamente, andando a creare distorsione e spreco di denaro pubblico;
- **incentivi:** è una modalità di finanziamento che inserisce un presupposto, ovvero obbliga l'azienda a muoversi in una certa direzione innovativa. Un esempio classico è il taglio della tassazione, in cui le imposte vengono diminuite in caso di rispetto di certe operazioni consigliate dallo Stato, si pensi all'industria 4.0. Si tratta sicuramente di un meccanismo rapido, che porta un doppio beneficio alle imprese: non solo uno sgravio fiscale, ma anche un miglioramento concreto di determinati aspetti, che possono riguardare la digitalizzazione, la customer service e altro ancora;
- **boosting:** si tratta di meccanismi di carattere amministrativo che permettono alle aziende di spostare risorse economico-finanziarie all'interno del bilancio per ottenere maggiore liquidità;

Invece, lato domanda le misure maggiormente adottate sono:

- **procurement:** è una metodologia utilizzata dagli Stati che prevede la creazione di mercati precoci. I governi utilizzano il proprio potere d'acquisto, ovvero agiscono come primi clienti di soluzioni innovative, indirizzando così le imprese verso prodotti conformi alle necessità del settore pubblico. Si tratta di una misura che stimola la competitività ma necessita di una cultura amministrativa specifica. Sono particolarmente indicati per il raggiungimento di obiettivi “sociali”: ad esempio, lo Stato agisce per ottenere benefici ambientali contro la crisi climatica attraverso progetti legati ai trasporti e all'energia pulita. Si tratta di una potente leva che funziona abbastanza efficientemente perché assegna i fondi solo al raggiungimento degli obiettivi prefissati e non alle promesse;
- **regolazione e standardizzazione:** si tratta di un meccanismo che solitamente accompagna l'utilizzo di fondi pubblici. Solitamente le misure in questione riguardano in genere la sicurezza, l'efficienza e la qualità. Oggi ha assunto rilevanza anche la regolamentazione della sostenibilità. Il vantaggio principale di tale metodo consiste nel facilitare l'adozione di un percorso tecnologico da parte non solo dei consumatori, ma in primis delle aziende, vengono ben indirizzate: ciò permette allo Stato di avere allineamento tra progresso tecnologico e obiettivi di politica pubblica;
- **incentivi:** questa misura viene adottata anche lato domanda. Infatti, appare chiaro che il mercato debba essere sollecitato anche e soprattutto attraverso misure ad hoc per i consumatori, si pensi agli incentivi creati per l'acquisto di veicoli elettrici o per i produttori di energia pulita;
- **asset complementari:** è una misura che prevede la fornitura da parte degli enti pubblici di infrastrutture, servizi e risorse a supporto del processo innovativo. Gli Stati in questo caso non investono direttamente nella tecnologia, ma in qualcosa a essa complementare, che risulta fondamentale al suo sviluppo. I vantaggi principali sono sicuramente la riduzione delle barriere all'ingresso e dei rischi associati ai costi affondati per le aziende. Ovviamente questa misura richiede coordinamento e attenzione nella gestione degli investimenti per evitare di finanziare troppo. Esempio sono le infrastrutture di ricarica per le auto elettriche, solitamente finanziate dagli enti pubblici nazionali di diversi gradi;
- **non specifico:** non è una misura vera e propria. Lo stato migliora la “facilità di fare impresa” cercando di rendere più appetibili ad altri finanziatori gli investimenti più

rischiosi. Esempi sono l'istruzione, l'accesso alla giustizia, le leggi sulla bancarotta, la burocrazia.

2.2.2 Finanziamenti privati

Le forme di finanziamento privato utilizzabili nel processo di innovazione sono:

- **bootstrapping:** le aziende, ma specialmente le startup, utilizzano le risorse finanziarie interne, senza ricorso a investimenti esterni. Solitamente si utilizzano i margini operativi generati dalle attività già avviate commercialmente per finanziare l'innovazione. È un metodo che permette pieno controllo dei processi, diminuendo così l'indebitamento. I lati positivi sono sicuramente la spinta verso l'ottimizzazione del processo, il controllo dei costi, l'autonomia, e soprattutto la forte focalizzazione sui progetti fondamentali per raggiungere l'innovazione. Ovviamente è difficile da realizzare dato che utilizza una risorsa scarsa, ovvero il denaro, correndo inoltre il rischio di elevati carichi di lavoro per il personale;
- **debito:** equivale a chiedere prestiti alle banche oppure a emettere obbligazioni evitando la diluizione del capitale d'impresa e la cessione di quote, a differenza del capitale di rischio. Ciò ha senso se il ritorno economico atteso del progetto è particolarmente alto perché permette di ripagare il debito e gli interessi annessi. Il debito presenta una serie di vantaggi, tra cui la deducibilità degli interessi per ridurre il carico fiscale e una maggiore flessibilità strategica in quanto risorsa immediata. Ovviamente la contrazione del debito consiste in un obbligo finanziario fisso, cioè indipendente dal successo finale del prodotto, con rischio di insolvenza. Inoltre, in un contesto innovativo, la richiesta del debito difficilmente viene presa in carico dagli istituti di credito, che preferiscono investire i loro fondi in progetti maggiormente sicuri;
- **customer financing:** in questo caso sono i primi clienti, i cosiddetti innovators o early adopters. Questa misura assume connotazioni leggermente diverse a seconda del cliente: in un mercato B2B, un singolo cliente può decidere di finanziare un progetto pilota, in un mercato B2C, il meccanismo prende il nome di "reward crowdfunding". Ovviamente queste misure presuppongono un più profondo impegno nella risoluzione di bisogni emersi dal mercato, la cui analisi deve però rimanere critica per impedire che il futuro dell'azienda dipenda dal giudizio di un gruppo ristretto di clienti. Si tratta di una misura molto efficace perché vincola l'azienda a sviluppare qualcosa di

soddisfacente e ad avere una comunicazione forte per trasmettere fiducia, e allo stesso tempo facilita l'innovazione perché permette di validare anticipatamente la tecnologia attraverso feedbacks, abbassando così il rischio totale del progetto;

- **venture capital:** è un sistema in cui chi vuole investire in una determinata tecnologia, detto genericamente *venture capitalist*, affida il proprio denaro a un fondo, detto *venture capital fund*. Questo metodo si basa su un meccanismo di scambio: le imprese o le startup che ricevono finanziamenti devono cedere in cambio parte delle loro quote di partecipazione, solitamente una frazione minoritaria, ai *venture capitalists*, i quali diventano in parte “proprietari” dell’impresa, provocando dunque una diluizione del capitale. È una metodologia ampiamente sfruttata per realtà che godono di una redditività instabile o di una liquidità scarsa: dunque, è solitamente il caso delle startup. Lo scambio tra impresa e fondo, non solo permette di aumentare la liquidità aziendale, ma permette ai nuovi proprietari di agire attivamente nell’impresa portando con sé risorse strategiche come conoscenze, competenze e capacità di mentoring: il loro impegno alla riuscita del progetto aumenta le possibilità di riuscita. Ovviamente il *venture capital* presuppone uno scouting approfondito delle aziende ad alto tasso innovativo, e dunque alto rischio, e contemporaneamente con ritorni rapidi e significativi. Inoltre, ciò che ricercano i *venture capitalists* è sicuramente la possibilità di una *exit strategy*, ovvero una strategia che assicuri loro che l’impresa possa comunque in qualche modo fruttare denaro, anche attraverso la vendita tramite acquisizione o la quotazione in Borsa. Ovviamente il proprietario originale dell’impresa vede un’entrata di capitale e di risorse non monetarie, ma allo stesso tempo vede l’intervento di un altro soggetto nelle decisioni strategiche;
- **private equity:** è un metodo molto simile ai fondi di *venture capital*, ma opera con aziende meno rischiose e con un profilo di crescita maggiormente sicuro, che al tempo stesso vogliono espandersi. Gli investitori acquisiscono delle quote dell’impresa, ottenendo il controllo della stessa, in cambio di denaro, e dunque ricevono il beneficio di poter intervenire attivamente nelle scelte strategiche e decisionali dell’impresa. Solitamente lo scopo dei fondi di investimento è intervenire per ottimizzare la struttura operativa, in modo da ottenere efficienza e riduzione dei costi, cosicché il risparmio possa essere utilizzato per attività legate all’innovazione. Più che una *exit strategy*, ciò che interessa agli investitori è poter godere di dividendi consistenti;
- **IPO:** in questo caso i soldi non vengono più raccolti attraverso fondi di investimento, ma l’azienda decide di aprirsi al pubblico attraverso una quotazione in Borsa,

raccogliendo così le risorse finanziarie necessarie dal mercato. Si tratta di una strada solitamente intrapresa da aziende più mature e finanziariamente stabili. La quotazione implica maggiore controllo da parte delle autorità sorveglianti: l'azienda assume dei doveri di trasparenza maggiori, come la rendicontazione pubblica. I vantaggi della quotazione risiedono nella possibilità di accedere a grandi quantità di capitali a tassi di interesse assai più bassi e di ottenere visibilità pubblica, il che si traduce spesso in una maggiore attrattività da parte dei talenti più qualificati.

2.2.3 Modello lineare dell'innovazione

I concetti di scoperta, invenzione, innovazione e sviluppo prodotto possono essere collegati tra di loro facilmente, andando così a definire il modello dell'innovazione.

Nel costruire la storia del modello, appare difficile delineare correttamente le fonti originarie.

Si può comunque affermare con sicurezza che la sua origine sia datata circa all'inizio del ventesimo secolo, quando alcuni studiosi, in particolare di scienze naturali, iniziarono ad elaborare la possibile esistenza di un collegamento tra ricerca di base e ricerca applicata [22].

All'inizio, infatti, il modello si concentrò su quelle che oggi sono le sue prime due fasi.

Nel 1945, Bush Vannevar, ingegnere e tecnologo statunitense, pubblicò un primo scritto che analizzava in profondità il nesso tra la ricerca pura basata sulla scienza e il vantaggio socioeconomico da essa generato tramite la sua applicazione a situazioni specifiche [23]. Nel lavoro di Bush si vedeva per la prima volta una distinzione marcata tra ciò che è la ricerca di base senza scopi e la ricerca applicata, dotata di un fine. Per tutti questi motivi, oggi Bush può essere considerato il primo studioso a essersi occupato di questa tematica e dunque può essere considerato l'inventore del modello.

Il lavoro di Bush costituì la base di partenza per i successivi studi, avvenuti tra gli anni '30 e '60, dove un'ultima importante fase è stata integrata al modello: lo sviluppo. L'importanza di quest'ultimo emerse direttamente nelle imprese, dove apparve subito evidente come le attività di sviluppo giocavano un ruolo cruciale nella realizzazione del progresso tecnologico. Ciò che si comprese fu che lo sviluppo ricopriva il ruolo di intermediario tra la ricerca e la produzione dei prodotti e/o servizi. Dato l'intreccio tra queste attività, le aziende iniziarono a usare il termine "ricerca e sviluppo" per riferirsi a tutto ciò che era preliminare alla produzione.

Alcuni studiosi di economia iniziarono a definire dei modelli di innovazione che graficamente si sviluppavano in modo lineare come successione delle 3 fasi enunciate: ricerca di base, ricerca applicata e infine lo sviluppo applicativo.

Il primo vero modello dell'innovazione comprendeva otto fasi consecutive. Dopo il suo arricchimento, il modello fu riconosciuto dal mondo accademico nella seguente forma semplificata e costituita da: ricerca di base, ricerca applicata e sviluppo. L'ultimo tassello, ovvero la fase di diffusione, fu aggiunta al modello come fase di produzione e successiva commercializzazione. Con ciò gli studiosi intendevano la fase in cui l'innovazione viene accettata dalla società e si passa dunque al suo sfruttamento economico. Questi primi lavori rappresentano ancora oggi il primo tentativo di formalizzare il concetto di innovazione espresso da Schumpeter. Si dovette tuttavia aspettare il 1967 per vedere la formulazione più vicina a quella attuale. Il modello subì infatti ulteriori modifiche, mantenendo sempre uno schema lineare, motivo per cui anche più tardi fu mirino di numerose critiche.

Nonostante ciò, il modello rimase un punto di riferimento per le istituzioni pubbliche per la rilevazione di statistiche inerenti all'allocazione di risorse nelle diverse fasi. Esso infatti venne ampiamente utilizzato dagli istituti statistici nazionali per valutare l'impatto degli investimenti in ricerca e in sviluppo: ciò permise al modello lineare di affermarsi e diffondersi.

In concomitanza all'affermazione del modello, emerse anche l'esigenza di definire a livello internazionale il significato di ricerca e di sviluppo, al fine di poter comparare gli investimenti su scala globale. Uno dei più rilevanti accademici che si interessò al problema fu John Desmond Bernal, che nel 1938 espresse chiaramente la difficoltà di separare nettamente i concetti di ricerca pura e ricerca applicata [24]. Per lunghi anni, lo scetticismo prevalse: lo U.S National Resources Committee nel 1938 si rifiutò di categorizzare la ricerca secondo una opportuna tassonomia perché riteneva inutile marcare un confine ritenuto molto labile e inutile sul piano pratico di realizzazione dell'innovazione.

Una voce autorevole fu sicuramente quella di Thomas Huxley, il quale introdusse una nuova tassonomia del modello, comprendente quattro termini: i primi due, background and basic, facevano riferimento alla ricerca di base, gli altri due, ad hoc e development, riflettevano invece la ricerca applicata [25]. Nonostante Huxley non svolse alcuna rilevazione utilizzando il proprio metodo, quest'ultimo venne largamente accettato dall'accademia, e anche dall'OECD, l'organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico.

Nell'evoluzione del modello, dalla sua nascita a oggi, è stato di fondamentale importanza l'intervento del DRS, Canadian Department of Reconstruction and Supply, che sottolineò l'esigenza di distinguere ancora meglio i termini. Le attività di ricerca, suddivise in pura e applicata, vennero differenziate da quelle di sviluppo, che riguardavano e riguardano tuttora le strategie di implementazione delle innovazioni per facilitare la diffusione.

Nel 1963, l'OECD sviluppò un manuale metodologico, chiamato in seguito il Manuale di Frascati [26], al fine di legittimare in modo netto tale categorizzazione. In tale manuale sono contenute regole che ancora oggi rimangono valide per l'individuazione corretta di ciascuna fase. In particolare, il Manuale di Frascati afferma che:

- la ricerca di base ha lo scopo di far progredire la conoscenza tecnologica senza un particolare scopo commerciale e dunque applicazione specifica;
- la ricerca applicata ha come obiettivo l'ottenimento di nuovi traguardi tecnologici allo scopo di ottenere un bene pratico e commercializzabile;
- lo sviluppo riguarda attività operative per risolvere problemi nati dalla ricerca di base e dalla ricerca applicata al fine di ottenere un miglioramento.

Appare ovvio che le attività di rilevazione statistica degli istituti pubblici siano state fondamentali per cristallizzare il modello lineare. Secondo Benoît Godin, sociologo canadese, senza questa categorizzazione, a oggi sarebbe impossibile comprendere in modo corretto come la ricerca è strutturata, sia nelle organizzazioni pubbliche che private [27].

Pur nella sua semplicità, il modello lineare è apprezzabile, soprattutto come primo modello per approcciare la materia e spiegare il fenomeno.

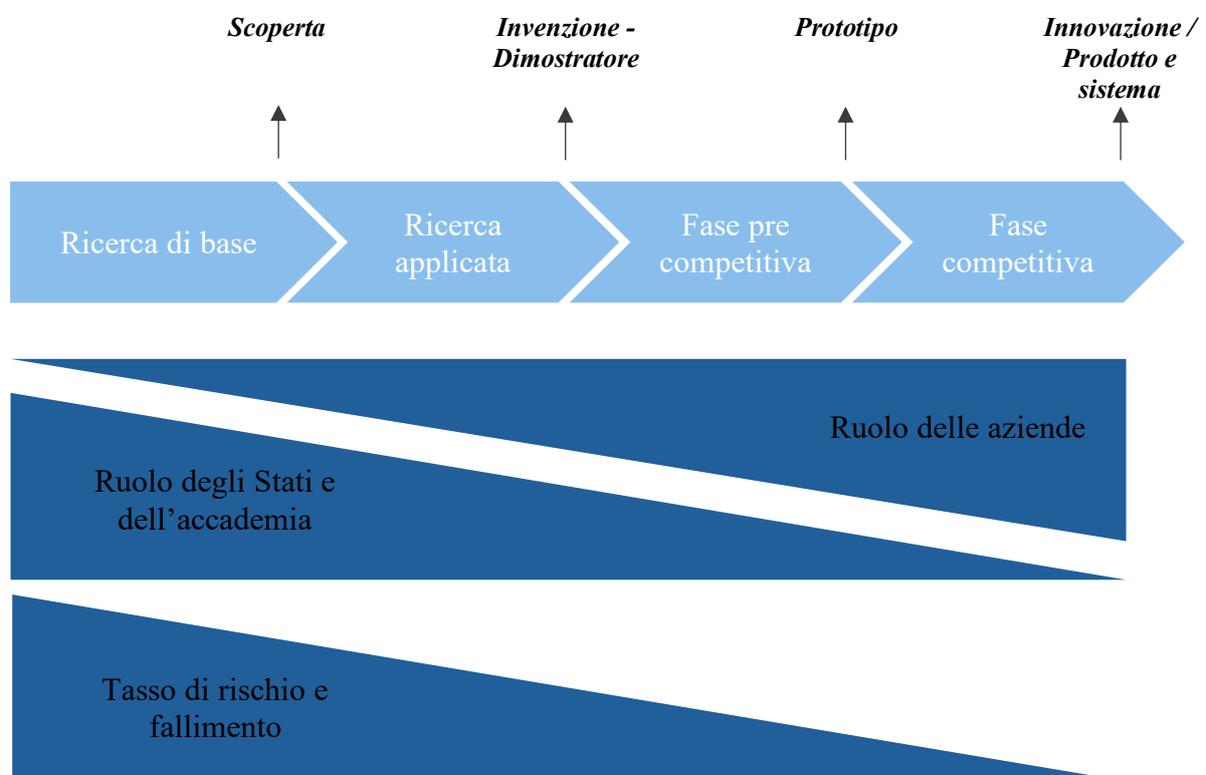


Figura 8 - Modello lineare dell'innovazione (fonte: *Management of Innovation and Product Development*, Francesca Montagna e Marco Cantamessa)

Come mostrato in Figura 8, il modello lineare è suddiviso in diverse fasi, il cui numero può variare leggermente a seconda dell'autore che lo propone. In questo caso è stato utilizzato il modello proposto da Montagna Francesca e Cantamessa Marco, nel manuale "Management of Innovation and Product Development" del 2023 [28].

Le fasi presentate in tale modello sono:

- la ricerca di base, priva di interesse verso le applicazioni reali, ma volta a produrre scoperte [29];
- la ricerca applicata, dove entra in gioco la risoluzione di un problema specifico tramite un'invenzione, in questo caso di natura tecnologica. In particolare, il risultato pratico di tale fase è detto dimostratore proprio perché deve dimostrare che la soluzione presentata è fattibile e valevole. Esso ha solamente valore tecnico e non commerciale, data la prematurità di qualsiasi discorso legato al mercato;
- lo sviluppo prodotto, che corrisponde alla fase in cui i risultati tecnologici ottenuti vengono portati al mercato tramite strategie legate all'attrattività e alla fattibilità economica del prodotto finale. In questo momento, tutte le attività aziendali di supporto diventano rilevanti: la logistica, le vendite, gli acquisti e non solo.

Solitamente lo sviluppo prodotto è suddiviso in altre due sottofasi:

- precompetitiva, il cui risultato sfocia nella realizzazione di un prototipo, ovvero un prodotto perfettamente funzionante che non ha però valore da un punto di vista commerciale, e dunque non può essere venduto. Il prototipo si distingue comunque dal dimostratore perché esso non si concentra più unicamente sulla tecnologia, ma cerca di adattarsi alle caratteristiche e alle scelte concordate per il prodotto finale;

competitiva, il cui risultato è costituito dal prodotto vero e proprio, così come verrà presentato al mercato. Per arrivare qui, le aziende devono pensare anche a un processo produttivo efficiente. Alla fine di questo flusso, la diffusione è ciò che l'azienda si aspetta che si realizzi, nel più breve tempo possibile.

2.2.4 Critica al modello

Il modello e la classificazione terminologica proposta rappresentano uno dei modelli economici maggiormente criticati a causa della sua ipersemplicificazione. Il modello mostra una visione semplicistica del fenomeno, utile a un primo approccio. Per questo motivo, il modello è stato fortemente criticato da più fronti. Di seguito verranno mostrate solamente le alternative più valide.

Uno dei principali modelli che si contrappone a quello originario è sicuramente il Chain Linked Model di Kline and e Rosenberg del 1986 [30]. Nel corso del tempo, esso ha riscontrato un notevole successo legato soprattutto all'inserimento di alcuni nuovi concetti: il più importante è sicuramente l'inserimento di feedbacks.

La tesi centrale di questo modello alternativo afferma che l'innovazione non è tanto guidata dalla ricerca scientifica, quanto piuttosto dai bisogni dei consumatori finali. Ciò emerge in concomitanza con l'introduzione sistematica del marketing nella routine aziendale: appare dunque evidente il contributo fondamentale fornito dal consumatore tramite l'espressione delle proprie preferenze.

All'interno delle dinamiche di mercato, il consumatore assume il ruolo di guida per la realizzazione dell'innovazione da parte delle imprese, e pertanto il modello deve integrare insieme il ruolo della ricerca e il ruolo del consumatore. Nasce qui il concetto di "demand pull" e "technology push", che sarà successivamente approfondito nel paragrafo del paradigma tecnologico.

La proposta di Kline e Rosenberg ha cercato di superare le problematiche evidenziate nei precedenti modelli, in primis abbandonando la struttura lineare. Essi inserirono un nuovo concetto, il "prior knowledge", definito come l'insieme delle conoscenze possedute dai lavoratori dell'impresa, che per sua natura genera innovazione. Aggiungendo ciò, essi vollero mostrare l'errore nell'immaginare il processo come una sequenza di passi, con il rischio di non comprendere la reale evoluzione della tecnologia nelle diverse fasi.

Nel modello originario, la centralità della ricerca scientifica veniva giustificata con la fiducia nel progresso tipica di quegli anni: era convinzione comune che la scienza avrebbe permesso di sviluppare grandi obiettivi tecnologici, senza però tenere conto dell'altro lato, ovvero della domanda. Kline e Rosenberg invece sostennero per la prima volta che in alcuni casi forse sono le esigenze dei consumatori a trainare l'emergere di nuova scienza, confutando così l'unidirezionalità del modello. Negando la concezione sequenziale, appare evidente che i due studiosi sostenevano la necessità di modello differente: ciò fu realizzato tramite l'inserimento di feedbacks tra una fase e l'altra del processo. In questo modo fu possibile, a valle di ciascun momento, validare il lavoro compiuto andando a verificare la consistenza tra l'avanzamento tecnologico e le richieste degli utenti finali, evitando così la non corrispondenza tra offerta e domanda. Il chain linked model, dunque, rispose alla principale problematica evidenziata dai suoi inventori: l'asimmetria informativa, ovvero la scorretta trasmissione delle informazioni tra individui e imprese.

L'altro aspetto negativo del modello originario, secondo Kline e Rosenberg, risiedeva nel ruolo centrale conferito alla scienza, piuttosto che al design. Quest'ultimo unito al re-design occupa gran parte delle attività di innovazione, specialmente in presenza di problemi di progettazione. L'innovazione è intesa come un processo molto complesso e ricco di sfaccettature, e dunque difficile da incasellare in una forma uniforme. Di conseguenza appare impossibile misurare l'innovazione in termini di grandezza o impatto sulla società. In particolare, gli inventori del chain linked model notarono come esistesse una tendenza diffusa a reputare vere tecnologie innovative solamente quelle maggiormente visibili, e cioè inglobate in grandi oggetti o servizi, come automobili, aerei o medicina. Nella realtà il progresso tecnologico avviene soprattutto in maniera impercettibile tramite piccoli mutamenti delle cose che sono più difficili da cogliere. Un processo industriale potrebbe migliorare sensibilmente alcuni aspetti finali del prodotto, rimanendo però un cambiamento tecnologico invisibile ai consumatori. I due studiosi si contrapposero quindi alla visione dell'innovazione come qualcosa di fortemente sbandierato che dall'oggi al domani veniva mostrato al mercato. Infatti, nella realtà il processo avviene in maniera molto più scandita e senza un cambiamento drastico. Spesso sono gli aggiornamenti del prodotto a essere apprezzati dal consumatore, rispetto alla prima versione offerta sul mercato.

Il modello di Kline and Rosenberg è presentato in Figura 9.

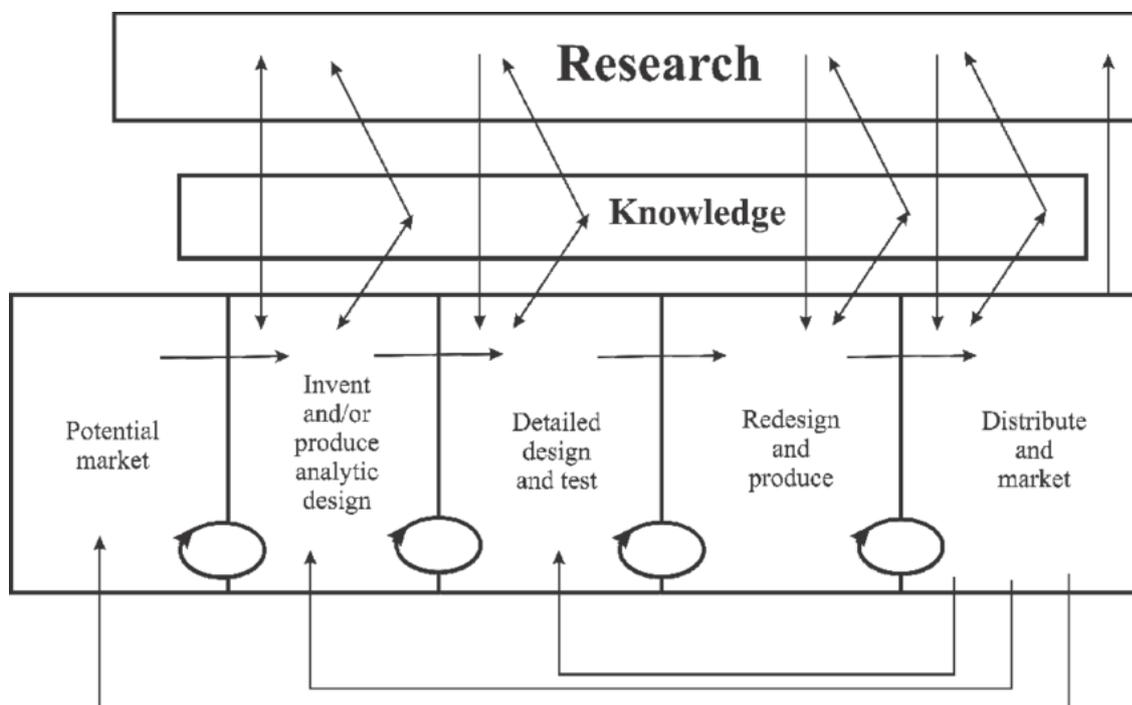


Figura 9. Chain link model of innovation (fonte: Kline, S, J, Rosenberg, N, 1986, p. 290)

In tale modello, la conoscenza scientifica, la conoscenza tecnologica e la pura ricerca sono distinte e separate. Inoltre, il modello presenta differenti percorsi:

- il “central chain of innovation”, ovvero il percorso che collega le attività principali;
- il sistema dei riscontri, che collega la tecnologia potenziale ai bisogni degli utenti;
- il terzo sistema, in cui il percorso della ricerca si contraddistingue dagli altri, intrecciandosi con tutte le fasi e non solo con l’inizio della catena. In tale modello, la ricerca non è rappresentata come una fase del processo, ma come una funzione a supporto di tutti gli altri campi;
- i percorsi che collegano rispettivamente il mercato alle fasi del processo vero e proprio e al percorso della ricerca, svolgono ruoli di supporto creando un ponte tra i tre macro-concetti del progresso tecnologico, ovvero la ricerca, il processo e il mercato.

Nel proporre tale modello, i due studiosi hanno ripreso un’idea fondante della teoria schumpeteriana: l’innovazione è un processo trasversale a più tematiche, che agisce in più aree aziendali. Ulteriore punto di contatto è la concezione dell’innovazione come di qualcosa di non obbligatoriamente gigantesco e rivoluzionario, ma piuttosto un processo evolutivo di tecnologie esistenti attraverso il rimescolamento delle loro caratteristiche, per offrire al mercato un bene più interessante del precedente.

A margine di tale modello, appare importante sottolineare alcuni sue criticità:

- l’innovazione generata viene vista come unicamente appartenente al settore in cui è stata generata, senza la possibilità di una riapplicazione in campi differenti;
- l’impossibilità di misurare l’innovazione è stata spesso messa in discussione perché delineerebbe una visione troppo semplicistica del processo, dove le conoscenze sono viste come black boxes, prive di contenuto quantificabile.

2.3 Il ruolo della conoscenza nell’innovazione tecnologica

L’innovazione è fortemente intrecciata al concetto di conoscenza. Senza conoscenza le aziende non sono in grado di evolvere, così come senza innovazione il bagaglio di conoscenza non accresce.

La conoscenza può essere definita in molti modi a seconda dell’ambito di studio: una definizione univoca non esiste.

Cosa assume importanza per questo elaborato è sicuramente il ruolo ricoperto dalla conoscenza all’interno del panorama della scienza e della tecnologia, con particolare attenzione all’accezione assunta nell’innovazione tecnologica.

Prima di addentrarsi nelle varie tipologie di conoscenza, si deve evidenziare lo stretto legame tra quest'ultima, le abilità e le competenze.

La conoscenza riguarda l'apprendimento e lo studio di nozioni, solitamente teoriche, su un determinato argomento [31]. L'abilità rappresenta la capacità di fare proprie tali conoscenze e di riuscire ad applicarle al fine di risolvere problemi. Il concetto di competenza, invece, risulta molto più ampio, soprattutto da un punto di vista educativo: riguarda la possibilità di unire conoscenze e abilità con doti personali di natura sociale e metodologica, allo scopo di utilizzarle per evolvere sia come essere umani che come impresa.

2.3.1 Le forme della conoscenza

La conoscenza può essere classificata secondo varie caratterizzazioni:

- conoscenza incorporata nelle persone o nel capitale: nel primo caso è tutta la conoscenza posseduta da una persona, nel secondo è la conoscenza racchiusa in una qualche forma materiale, e dunque capace di generare valore economico e pertanto capitale per impresa. Esempi sono ad esempio i libri, gli algoritmi e i brevetti;
- conoscenza esplicita o tacita: nel primo caso la conoscenza è esplicabile, cioè può essere spiegata a qualcuno, viceversa la seconda è solitamente incorporata in una persona e dunque non può essere raccontata perché in questo caso non bastano le parole per trasmettere i concetti, si pensi ad esempio alla ricetta per fare la pizza. Ciò indica che la conoscenza tacita necessita di un lungo processo di esperienza e di osservazione prima di diventare condivisa;
- conoscenza codificabile e non codificabile: la conoscenza esplicita è ovviamente codificabile, viceversa quella tacita risulta non codificabile. La codificabilità rende possibile il passaggio della conoscenza dall'essere umano al capitale: la conoscenza posseduta da una persona può essere codificata in un documento e diventare così una procedura. In un contesto aziendale, la possibilità di codificare la conoscenza impatta notevolmente la conoscenza organizzativa. La conoscenza tacita tende invece a rimanere incorporata nelle persone e richiede un lento processo di osservazione, anche se solitamente contiene un valore maggiore, soprattutto in un'organizzazione aziendale.
- conoscenza pubblica e conoscenza privata: tale distinzione riguarda l'accessibilità della risorsa in termini fisici e/o legali. Se l'accesso è libero per tutti, ad esempio un libro, e dunque non è soggetto a una forma di protezione, la conoscenza è considerata bene pubblico. Viceversa, accade con la conoscenza privata che è appunto proprietà esclusiva

di qualcuno. I brevetti sono un caso particolare: la conoscenza spiegata al loro interno è un bene pubblico, ma commercialmente solo gli assegnatari del diritto di brevetto possono sfruttarlo. Inoltre, per la differente natura delle due, solitamente la conoscenza pubblica, fondamentale per il progresso della società, rimane a capo delle istituzioni pubbliche come università e centri di ricerca. Al contrario, la conoscenza privata costituisce il vantaggio competitivo di un'azienda e pertanto appartiene solitamente alle aziende private. Questo appare ancora più evidente e sensato alla luce del modello lineare dell'innovazione.

La conoscenza, oltre a presentare molteplici caratteristiche, esiste in forme diverse la cui intensità cresce di grado in grado:

- conoscenza fattuale (“know what”): è la forma più semplice di conoscenza in termini concettuali e rappresentativi ed è semplicemente un insieme di dati facilmente racchiudibili in un database. Esempi sono il numero di failures osservate in fase di produzione di un determinato prodotto in un determinato periodo di tempo. Essendo semplice, tale conoscenza è di solito esplicita, e dunque codificabile e incorporabile nel capitale;
- conoscenza causale (“know why”): tale tipologia rappresenta un livello più alto di conoscenza. Riguarda la comprensione e dunque il tentativo di fare supposizioni per comprendere le motivazioni che stanno dietro ai fenomeni. La fonte principale per costruire la conoscenza causale è la scienza, tramite ragionamento induttivo: essa crea la teoria relativa a un fatto cercando di spiegarlo e dunque giustificarlo razionalmente tramite strumenti empirici o esperienza. Tale conoscenza può essere facilmente codificata, in quanto esplicita, e in questo modo può essere incorporata nel capitale aziendale e non solo. È importante distinguere nettamente la conoscenza empirica e teorica. La prima spiega la relazione tra i fatti osservati e l'esperienza, la seconda tenta di comprendere le ragioni sottostanti i fatti. Esse sono estremamente interconnesse.
- conoscenza procedurale (“know how”): essa è fondamentale per raggiungere il risultato desiderato, non solo in ambito aziendale. La procedura rappresenta uno strumento fondamentale per strutturare la risoluzione di un problema perché permette di ottenere metodo: essa è l'insieme di ragionamento deduttivo, scolarizzazione ed esperienza. Un esempio chiaro sono le procedure assunte in azienda per permettere di ottenere un processo lineare ed efficiente. Normalmente questa forma di conoscenza è tacita e quindi risulta improbabile riuscire a codificarla: per questi motivi rimane privata e pertanto

costituisce una parte importante del patrimonio aziendale, essendo costruita con molto sforzo.

- conoscenza posizionale (“know who”): tale tipologia risulta cruciale perché permette di sapere chi è il detentore della conoscenza, in particolare quella procedurale. Questo è importante in un’organizzazione perché permette che l’informazione sia spartita tra diverse entità, che al bisogno, possono trasmettere le informazioni. Infatti, il valore economico è generato dal collegamento tra le conoscenze possedute da ciascuno. Un esempio è fornito dal COVID-19: le persone comuni non avevano gli strumenti necessari per capire a fondo il fenomeno, ma sapevano di potersi affidare a persone competenti, ovvero virologi e medici. Quindi in questo caso, non è importante avere la conoscenza, ma piuttosto sapere chi la possiede.

2.3.2 Conoscenza scientifica e tecnologica

Conoscenza scientifica e conoscenza tecnologica sono complementari nel processo di innovazione: la prima impatta le fasi di ricerca di base e di ricerca applicata, mentre la seconda è relativa alla fase di sviluppo prodotto. È bene comprendere quindi come esse comunicano: la scienza, infatti, è indispensabile al progresso tecnologico anche se il suo intervento non è di tipo diretto, variando sensibilmente a seconda delle discipline analizzate. La prima questione da sottolineare è il differente obiettivo di tali conoscenze: quella scientifica mira a fornire spiegazioni all’avvenimento di fenomeni, quella tecnologica cerca soluzioni pratiche a problemi specifici. Nonostante scopi diversi, sono fortemente connesse. La differenza di scopo si vede soprattutto nella metodologia utilizzata: la conoscenza tecnologica avanza per ricerca locale, ovvero si muove nei dintorni di soluzioni già note, secondo un approccio trial and error. Il risultato finale è una conoscenza costruita progressivamente sull’esempio dell’esperienza. La conoscenza scientifica non parte da una soluzione precedentemente trovata, ma costruisce una visione con una prospettiva più ampia della materia studiata, senza per forza ricercare una soluzione pratica a un problema riscontrato. È bene tenere a mente che la scienza fornisce una mappa con cui affrontare la realtà, mentre invece la tecnologia offre la bussola per direzionarsi verso la scelta migliore e più opportuna. Nonostante l’ampia prospettiva fornita dalla conoscenza scientifica, essa risulta cruciale alla conoscenza tecnologica per avanzare a sua volta, in quanto la direziona verso la soluzione più efficiente. La conoscenza tecnologica, come afferma il suo nome, è sempre riferita a una particolare tecnologia o a un insieme di esse, e non a delle discipline. È

costituita da concetti base, formule matematiche, modelli, dati ed esperienza acquisita precedentemente.

2.3.3 Teoria evolutiva dell'impresa

La conoscenza organizzativa risulta essere uno dei principali determinanti dell'innovazione.

La sua concezione arrivò con Schumpeter, il quale scardinando la teoria neoclassica dell'economia, mise in discussione i suoi principi di base, come la simmetria informativa e la piena razionalità degli attori del modello economico. In un contesto innovativo, per sua natura instabile e turbolento, è infatti difficile che le aziende si comportino sempre secondo le medesime modalità e che il cambiamento si verifichi solo nel breve periodo per merito del fenomeno imitativo. Il verificarsi di un'innovazione è invece secondo Schumpeter proprio dovuto alla differenziazione che le imprese mettono in atto.

Nel 1985, Nelson e Winter, due economisti statunitensi, svilupparono a partire dalla teoria schumpeteriana un modello teorico che tenta di spiegare l'impresa e la sua evoluzione partendo dall'osservazione della struttura organizzativa [32].

Secondo tale modello, l'impresa può essere vista secondo due visioni:

- statica, cioè come un'associazione organizzata di risorse complementari che costituiscono insieme la conoscenza dell'azienda stessa. Le risorse sono qui intese come materiali, immateriali e umane, ovvero tutto ciò che crea valore economico. La complementarità funziona perché le risorse generano maggiore valore nell'attività svolta insieme piuttosto che separatamente secondo i meccanismi del mercato, ed è questa caratteristica che giustifica l'esistenza delle imprese. Inoltre, il valore generato è maggiore del costo necessario per generarlo, portando così all'imprenditore un ritorno economico tale da legittimare l'associazione in un'organizzazione economicamente efficiente. In questo caso ciascun membro dell'organizzazione riceve una serie di responsabilità e attività da svolgere: ciò è alla base della costruzione dell'organigramma aziendale.
- dinamica, la quale specifica quella statica in merito agli aspetti organizzativi. Infatti, le persone non sono semplici assegnatarie di compiti ma sono inserite in una realtà imprenditoriale costituita da processi che impattano loro stesse. Si passa dunque da un semplice organigramma a un insieme di routines organizzative, costituite da una conoscenza collettiva e da un linguaggio comune noto a tutta l'organizzazione anche se non ufficialmente formalizzato. Le routines si differenziano però dai processi

organizzativi, che sono routines diventate nel tempo altamente standardizzate e dunque formalizzate. La differenza sostanziale tra le due categorie risiede nel grado con cui esse sono esplicitate: le routines possono non essere esplicite e funzionare comunque bene in modo tacito, i processi sono inseriti in un modello standard e dunque esplicitati all'intera organizzazione. Questa differenziazione rende molto più semplice imparare i processi piuttosto che fare propria una routine aziendale. Le routines evolvono continuamente in quanto ciascun individuo apporta sempre nuovi elementi di conoscenza, che sono così trasferiti all'organizzazione, andando a costituire la cosiddetta conoscenza organizzativa.

Il ruolo che assumono le persone e le organizzazioni che assumono in condizioni differenti non è differente: le performance di un individuo sono istituzionalmente specifiche o idiosincratiche, cioè non sono sempre perfettamente uguali, ma dipendono dagli atteggiamenti dell'individuo da una parte e dall'azienda in questione dall'altra. Dunque, la conoscenza di un individuo all'interno di un'organizzazione potrebbe creare maggiore o minore valore a seconda dell'azienda in cui opera: questo spiega il vantaggio competitivo delle aziende, in particolare a causa alle conoscenze tacite, difficilmente imitabili da altri in tempi brevi. In sintesi, le realtà aziendali si differenziano perché la conoscenza incorporata in esse è in parte tacita e in parte esplicita, e perché le performance individuali di un dipendente variano a seconda dell'impresa.

Ottenuto il vantaggio competitivo, le aziende devono essere capaci di renderlo sostenibile, ovvero di mantenerlo nel lungo periodo tramite l'evoluzione della conoscenza e delle competenze apportate dagli individui. Tale fase può essere vissuta in maniera più o meno veloce a seconda della rapidità con cui l'azienda si adatta al cambiamento. Ciò è legato in particolare al concetto di inerzia organizzativa, che riguarda la difficoltà che le imprese in fase di evoluzione incontrano nel modificare routines, e dunque competenze. Un altro aspetto interessante della teoria evolutiva è il concetto di path dependency, letteralmente dipendenza dal percorso: l'azienda vista oggi è il frutto dell'azienda che era ieri, cioè della sua storia passata. Dunque, ciò che è stato e ciò che è cambiato influenza lo stato dell'azienda. Dipendendo fortemente da ciò, le aziende in caso di grandi evoluzioni faticano maggiormente e tentano quindi un'evoluzione step by step, per essere sempre in tempo a tornare indietro e dunque rimanendo vicini alle attuali competenze, molto meno costose da raggiungere.

2.3.4 Apprendimento organizzativo

Dal paragrafo precedente appare chiaro che il vantaggio competitivo, generato dal pool di risorse e routines, si mantiene sostenibile se le competenze generate evolvono in contemporanea ai cambiamenti dell'ambiente circostante all'impresa. L'apprendimento organizzativo, cioè il modo in cui le aziende formano la propria base di competenze, può assumere diverse forme:

- apprendimento innato, ovvero la parte costituente la conoscenza iniziale dell'impresa e si realizza appunto alla fondazione della stessa tramite il contributo dei suoi fondatori nella definizione della visione aziendale comune e del business model;
- apprendimento esperienziale, il cosiddetto “imparare facendo e sbagliando” o meccanismo “trial and error” andando così a cambiare le routines organizzative precedenti. Nel caso in cui si sviluppi conoscenza tecnologica questa tipologia di apprendimento si esplica nelle attività di ricerca e sviluppo.

Il learning esperienziale si realizza secondo due modalità: apprendimento per sfruttamento e apprendimento per esplorazione, approfonditi tra qualche riga;

- apprendimento vicario, utilizzata quando in azienda è presente un buco di competenze ed è colmata tramite una fonte esterna. Ciò esplica in alcune fasi come la ricezione della conoscenza e la diffusione interna a seconda del tasso di assorbimento delle risorse e dalla presenza di gatekeepers, persone che stanno ai confini dell'azienda allo scopo di diffondere internamente le competenze tramite canali informativi e comunicativi efficienti;
- apprendimento per innesto, simile a quello precedente, vi è una mancanza interna che viene colmata dall'esterno, ma in questo caso si passa all'assunzione di nuove risorse o all'acquisizione di aziende dotate di tali competenze per velocizzare il processo. Tutto ciò non è né banale né gratuito, dato che l'obiettivo finale rimane la modifica delle routines attuali.

L'apprendimento esperienziale, come detto sopra, può essere realizzato mediante l'apprendimento per sfruttamento e l'apprendimento per esplorazione in modo combinato, come rappresentato in Figura 10. Sull'asse delle ascisse vi è la capacità tecnologica, che rappresenta quanto si è vicini o lontani da ciò che già si conosce, allontanandosi dallo 0, sull'asse delle ordinate invece vi è il beneficio che si ottiene dall'apprendimento della capacità tecnologica.

Analizzando le curve si evince che:

- l'apprendimento per sfruttamento ha un andamento esponenziale e ciò segnala come da esso si ottiene un beneficio marginale sostanziale solamente allontanandosi adeguatamente da ciò che già si conosce, altrimenti la nuova conoscenza acquisita rimane bassa. Raggiunto un certo grado di lontananza dalle conoscenze vicine si raggiunge un asintoto verticale per cui il beneficio diventa nullo perché ci si spinge troppo lontano dal proprio campo di interesse;
- l'apprendimento per esplorazione ha un andamento che segue la forma di una campana rovesciata. I benefici ottenuti inizialmente sono già elevati perché si imparano fin da subito competenze nuove attraverso le nuove attività esplorate. Si raggiunge a un certo punto un picco, al di là del quale i benefici risultanti iniziano a diminuire sempre di più perché esplorando campi di conoscenza sempre più lontani dai propri si sostengono costi sempre più elevati, che da un certo punto in poi non riescono più a essere giustificati, in quanto il costo opportunità schizza in alto e non conviene continuare.

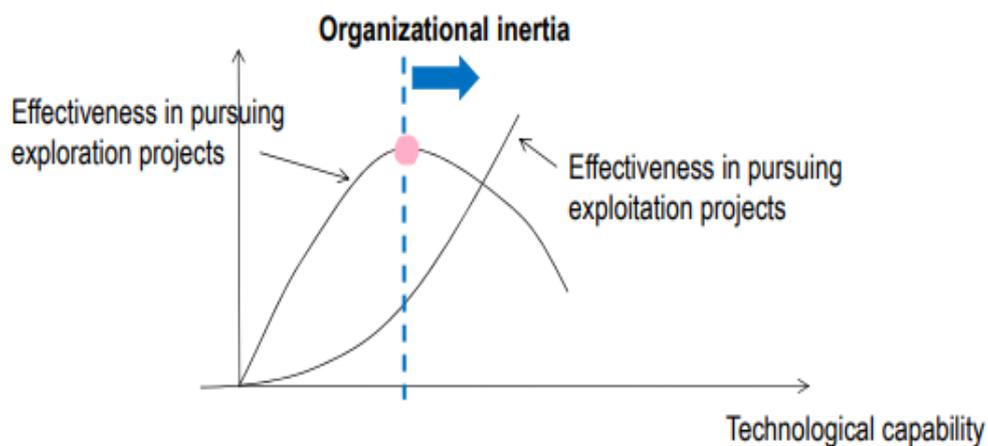


Figura 10. Apprendimento per esplorazione e apprendimento per sfruttamento (fonte: *Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna*)

2.4 Evoluzione e rivoluzione: come cambia una tecnologia

L'innovazione è dominata da due forze, o determinanti, chiamate "technology push" e "demand pull". I due termini stanno a indicare le prospettive alternative da cui si può osservare il fenomeno. Nel primo caso, l'innovazione è guidata da nuove invenzioni e tecnologie, mentre nel secondo è trainata dalle nuove esigenze che emergono nei consumatori, i quali generano lo stimolo verso nuove forme di tecnologia. Nella realtà, queste due forze non sono quasi mai completamente contrapposte, ma piuttosto complementari: un'innovazione condotta da un settore industriale deve infatti essere validata dal mercato, così

come i bisogni nascenti hanno necessità di trovare nella conoscenza la modalità con cui realizzarsi. Questa differenziazione è sorta nel secolo scorso in due momenti differenti:

- la componente *technology push* è nata negli anni '50-60 e vede il fenomeno innovativo come lineare e sequenziale, con un grosso contributo fornito dalle attività di ricerca e sviluppo, similmente al modello lineare [33]. Tale modello pecca nel momento in cui dimentica il punto di vista del consumatore, non interessandosi ai suoi bisogni e relegando gli aspetti qualitativi percepiti in secondo piano rispetto alla realizzazione di prodotti tecnicamente molto avanzati;
- la componente *demand pull* è parte di una visione dell'innovazione sorta successivamente, intorno agli anni '70, ed è caratterizzata dal ruolo centrale del cliente, i cui bisogni primari diventano la materia prima per formulare nuove tecnologie. Quest'ultime evolvono di pari passo con l'evoluzione delle esigenze del mercato. Questa visione ha permesso di ampliare lo spettro di ricerca delle aziende, le quali hanno compreso la centralità del consumatore come validatore ultimo del loro lavoro.

La classificazione netta tra le due componenti è oggi ormai superata e l'innovazione è definita come l'incontro di queste due forze. Tale modello, detto "coupling model", è sorto negli anni '80-90 come combinazione dello sviluppo tecnologico e delle esigenze emergenti dei clienti: da qui nasce il concetto di paradigma tecnologico.

2.4.1 La traiettoria tecnologica e il salto del paradigma

La fusione di elementi provenienti dal lato della domanda e dal lato dell'offerta si fondono e danno origine al paradigma tecnologico. Le evoluzioni del paradigma, ovvero delle performance della tecnologia e dei bisogni dei consumatori nel tempo, creano le cosiddette



Figura 11. Andamento del paradigma tecnologico (fonte: Economics Learning Community)

traiettorie tecnologiche. Quest'ultime, come mostrato in Figura 11, hanno tendenzialmente una forma a S.

Sull'asse X è rappresentato l'impegno, espresso in costi cumulati di ricerca e sviluppo dell'intero settore, oppure alternativamente in ricavi cumulati del settore o tempo. Queste ultime due metriche sono generalmente sconsigliate perché vi è il rischio di distorsioni: non è infatti sicuro che gli investimenti in ricerca e sviluppo siano costanti nel corso del tempo. Sull'asse Y sono rappresentate le performance della tecnologia, valutate dal consumatore. Il modello afferma che il tasso di miglioramento delle performance e il tasso di diffusione di una tecnologia tendono a seguire la forma di una curva a S, e in particolare:

- nella prima fase, le performance della tecnologia faticano a migliorare nonostante gli investimenti ingenti perché inizialmente l'apprendimento è più lento e sono necessari molto impegno e risorse;
- nella fase intermedia, le performance iniziano a migliorare in maniera esponenziale con pochi investimenti in quanto l'apprendimento diventa un esercizio semplice;
- nella fase finale, il miglioramento della tecnologia rallenta nuovamente perché si è raggiunto il suo limite tecnologico.

All'interno di un settore industriale, si trovano più traiettorie tecnologiche, tra loro consecutive e potenzialmente sovrapposte: ciascuna di esse non è dunque isolata ma è seguita dall'emergere di nuovi paradigmi che vanno a sostituirsi ai precedenti quando le loro performance sono migliori. Ciò avviene solitamente durante la fase finale di una t, quando essa non riesce a migliorarsi, e nuove tecnologie tentano di inserirsi. Nonostante queste inizialmente abbiano performance inferiori, possono provare a insediare il dominio della

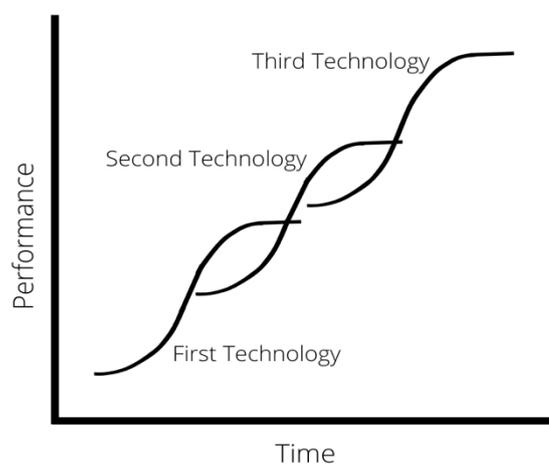


Figura 12. Andamento delle curve tecnologiche in un settore (fonte: [Shortform](#))

tecnologia dominante finché il loro miglioramento marginale non sarà superiore. Osservando la Figura 12, è possibile individuare due momenti differenti nel paradigma tecnologico:

- la fase di progresso evolutivo, che si verifica quando ci si muove all'interno della stessa traiettoria tecnologica, ed è tipica delle innovazioni incrementali, che portano ad incrementare progressivamente le performance della tecnologia. Tale fase è solitamente guidata dal mercato, e pertanto la R&S è accompagnata da intense attività di marketing al fine di definire precisamente le richieste del cliente e di comprendere le modalità più adatte per soddisfarle. Questa tipologia di innovazione è detta di tipo incrementale;
- la fase di progresso rivoluzionario, che avviene nel momento in cui si passa da una traiettoria tecnologica a quella successiva. Questo è tipico dei momenti in cui la tecnologia dominante raggiunge il suo limite tecnologico e nasce la possibilità di esplorare nuove tecnologie disponibili. Questa fase è solitamente dominata dalla componente technology push. Tali innovazioni prendono il nome di innovazioni radicali e avvengono con il cosiddetto salto del paradigma, ovvero un cambio di tecnologia.

Ciascuna curva è formata da infiniti punti di equilibrio tra le forze demand pull e technology push: il paradigma può essere pertanto visto come l'insieme dei legami che sussistono tra domanda e offerta. In quest'ottica il paradigma può essere rappresentato come in Figura 13, dove sono delineati i vari attori e contemporaneamente i legami che intercorrono tra ciascuno di essi. Le connessioni tra attori rimangono invariate all'interno della stessa traiettoria tecnologica, ma quando essa si spezza a causa di un salto tecnologico, anche i legami correlati si spezzano: a questo punto si creano nuove relazioni tra gli attori, i quali a loro volta possono anche variare in seguito a un periodo di progressiva rivoluzione.

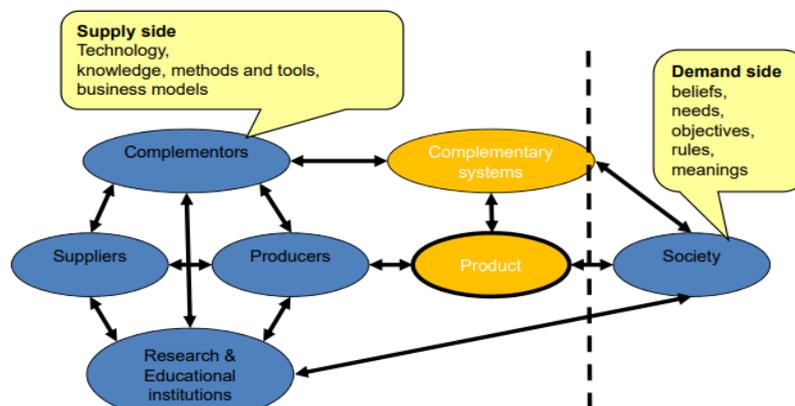


Figura 13. Rappresentazione di un paradigma tecnologico con baloons (fonte: fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna)

Tra i sistemi principali del paradigma vi sono il prodotto, realizzato dai produttori, i quali per la sua realizzazione si sono affidati ai componenti messi a disposizione dai fornitori.

Ovviamente il prodotto dipende fortemente dall'esistenza di beni complementari, e di conseguenza dai loro fornitori. Infine, il prodotto esiste perché soddisfa delle esigenze, degli obiettivi e delle credenze della società: per fare tutto ciò il prodotto si affida alla conoscenza e alle competenze, solitamente definite dalle università e dai centri di ricerca.

Lungo la traiettoria questi attori rimangono in queste relazioni di equilibrio: quando avviene il salto è perché qualche legame si è spezzato e sta sorgendo una nuova traiettoria. Tale modello spiega il perché una tecnologia possa non emergere anche se tutto funziona perfettamente: se ad esempio non incontra il favore dei consumatori, tale curva non riuscirà magari a entrare in pieno regime oppure arriverà in ritardo.

Esiste inoltre la possibilità che un paradigma tecnologico emerga anche se la tecnologia dominante e attuale non ha raggiunto il proprio limite perché la nuova tecnologia offre performance migliori oppure la sua combinazione di caratteristiche sono considerate superiori dal mercato. In questo caso si parla di tecnologia è detta discontinua. Ciò avviene sia perché la nuova tecnologia performa meglio negli aspetti tecnici sia perché la società avverte la necessità di un cambiamento radicale che abbraccia la nuova tecnologia in anticipo rispetto ai tempi di sviluppo della stessa.

Emerge quindi come per ottenere una tecnologia vincente non sono necessarie solamente competenze tecniche di prodotto, ma anche una profonda conoscenza del mercato di riferimento, così da interiorizzare i suoi problemi e capirne le esigenze: le attività di ricerca e sviluppo e di marketing devono creare il giusto binomio di conoscenze per far succedere l'innovazione.

2.4.2 Tipologie di innovazione

Esistono diverse tassonomie per classificare le innovazioni: finora esse sono state analizzate rispetto al paradigma tecnologico, scendendo nei dettagli delle relazioni tra fase rivoluzionaria ed evolutiva. Tuttavia, un'innovazione può essere classificata come:

- incrementale o radicale, a seconda della fase in cui avviene all'interno del paradigma. Infatti, l'innovazione può essere definita incrementale se si tratta di un'innovazione migliorativa, o radicale in caso di innovazione rivoluzionaria;
- di prodotto o di processo, a seconda che avvenga nel bene o servizio finale o nel suo processo di realizzazione. Esempi possono essere il miglioramento nutritivo di un

particolare alimento e il cambiamento del processo produttivo che permette il miglioramento. Spesso le due innovazioni sono abbinate;

- competence enhancing o competence destroying, ovvero capace di rafforzare o distruggere le competenze richiedendone di nuove e lontane dalle attuali alle aziende del settore, senza però danneggiarlo o modificarlo. Esempio di competence enhancing è l'introduzione di piattaforme di gestione dei progetti, per cui attraverso la digitalizzazione di metodi tradizionali si ottiene un beneficio per i lavoratori, mentre un esempio di competence destroying è l'introduzione di servizi di streaming e di distribuzione digitale di contenuti musicali, fenomeno che ha portato alla scomparsa di alcune competenze legate alla vendita di dischi e cd;
- centrale o periferica, a seconda che la funzionalità implementata abbia un impatto sull'intero prodotto o solo su una porzione di esso. Le biotecnologie usate nel settore farmaceutico sono un'innovazione core, così come l'arrivo del packaging sostenibile è un'innovazione periferica;
- sostenibile o dirompente, se l'impatto generato è così forte o meno da modificare l'intero settore industriale, ovvero se le aziende scompaiono in assenza di azioni concrete per adattarsi ai cambiamenti. Esempio di innovazione disruptive è il commercio online o la distribuzione di musica in forma digitale.

Ovviamente è molto complesso definire a priori e in modo univoco le caratteristiche di un'innovazione: a seconda dei cambiamenti che avvengono anche quotidianamente sul pianeta e che impattano i vari settori, una nuova tecnologia si può configurare in modo diverso da un mese all'altro.

Un aspetto rilevante per comprendere cosa è un'innovazione è il concetto di architettura di prodotto, definita come l'insieme dei componenti di un prodotto e delle loro relazioni di tipo fisico, funzionale o che genera influenze indesiderate. Immaginando il prodotto strutturato come un insieme di entità, ciascun componente sarà assegnato a una di esse in modo da rendere la loro comunicazione ottimale, così che si possa comprendere osservando l'albero dei componenti del prodotto.

Il modello di Henderson e Clarke [34], mostrato in Tabella 2, distingue quattro possibili tipologie di innovazione al variare di due fattori, il cambiamento tecnologico e il cambiamento nelle relazioni tra componenti. A seconda del verificarsi di queste condizioni, si può avere:

- un'innovazione modulare, dove cambia la tecnologia, ma la relazione tra componenti non cambia. Esempio è il cambiamento della batteria all'interno dei telefoni cellulari, prima al nichel-cadmio e ora agli ioni litio;
- un'innovazione architeturale, dove cambia la relazione dei componenti ma non la tecnologia. Il passaggio da una piattaforma veicolare all'altra nelle automobili ne è un esempio;
- un'innovazione incrementale, in cui né la tecnologia né la relazione tra componenti cambiano. Si tratta di un'innovazione semplice da gestire, ma tanto costosa in termini di sforzo richiesto. Il miglioramento apportato può essere poco visibile al consumatore, il quale dunque potrebbe non essere disposto a pagare per essa. Tutti i piccoli miglioramenti di una tecnologia sono esempi di innovazioni incrementali, si pensi al miglioramento dei pixel di una fotocamera volto ad aggiungere qualità al prodotto;
- un'innovazione radicale, in cui sia tecnologia che la relazione tra componenti variano. Si tratta dell'innovazione maggiormente difficile da ottenere. Le aziende provano ad affrontare tale cambiamento attraverso successive innovazioni modulari, andando di volta in volta ad aggiornare i sub componenti del prodotto finale. Nel perseguire tale scelta, le aziende incorrono nel rischio di venir tecnologicamente superate dall'impresa capaci di affrontare l'innovazione in maniera integrale. Tale rischio, come in seguito sottolineato, prende il nome di disruption.

Come detto sopra, il cambiamento architeturale è molto oneroso in termini di impegno da parte dell'organizzazione. Questo si spiega facilmente considerando che i cambiamenti di architettura si riflettono anche nei cambiamenti richiesti all'organizzazione. Così come esistono relazioni tra componenti, anche i gruppi di lavoro di tali componenti tengono delle relazioni tra di loro per svilupparli. Questo avviene ogni qualvolta che due componenti o sottocomponenti hanno un'interfaccia comune, e dunque che tra di loro passano informazioni. Conseguentemente, se cambia l'architettura di prodotto, cambia anche la struttura dell'organizzazione che realizza tale prodotto.

Nella realizzazione di una nuova tecnologia, entrano in gioco solamente i dipendenti delle aziende che guidano l'innovazione, ma anche la catena del valore annessa ovvero i fornitori dei componenti e dei beni complementari e così via: ciò significa che il cambio di architettura porta con sé anche una variazione del paradigma tecnologico perché si spezzano uno o più legami tra gli attori coinvolti generando così un'innovazione radicale. Da ciò si può dedurre

che qualunque innovazione radicale è per natura anche un'innovazione architeturale: quando il cambio di architettura prevale nell'intero settore industriale, quest'ultimo si modifica e con esso anche il paradigma tecnologico cambia.

Relazione tra componenti Tecnologia	NON CAMBIA	CAMBIA
CAMBIA	INNOVAZIONE MODULARE	INNOVAZIONE RADICALE
NON CAMBIA	INNOVAZIONE INCREMENTALE	INNOVAZIONE ARCHITETTURALE

Tabella 2. Modello di Henderson e Clark

2.4.3 Disruption: quando avviene e perchè

La disruption è un fenomeno che può colpire un settore industriale, andandolo a ridisegnare da capo e modificando completamente l'assetto competitivo. Avviene quando delle nuove aziende con posizioni marginali riescono a portare la propria tecnologia sul mercato con un buon grado di accettabilità, tale da azzerare le quote delle aziende già presenti e causandone la fuoriuscita in maniera anche potenzialmente brusca. Quando c'è disruption le competenze delle vecchie aziende perdono la loro importanza e la loro capacità di scalare la nuova curva tecnologica è pari a zero perché non si accorgono delle nuove aziende emergenti. Il rischio di disruption può anche solamente rimanere un rischio e non concretizzarsi: perché ciò accada è necessario che le aziende del settore siano abbastanza veloci da adeguarsi tecnologicamente alla nuova situazione.

La prima delle cause che portano all'emergere di innovazioni disruptive è l'incapacità di aderire a un paradigma che sta nascendo. Si tratta di un fattore oggettivo: la vecchia tecnologia non riesce a rispondere ai bisogni emergenti dei consumatori, e contemporaneamente nasce la possibilità di una tecnologia maggiormente performante. Tale aspetto tocca anche il tema delle competenze, in quanto il nuovo paradigma potrebbe richiedere conoscenze nettamente distanti dalle proprie, per le quali sono necessari investimenti e asset economicamente rilevanti di cui l'azienda al momento non dispone. Più

l'azienda ritarda ad abbracciare la nuova tecnologia, più le possibilità di salvarsi diminuiscono.

L'incapacità di aderire al nuovo paradigma può avere anche radici di natura soggettiva, da un lato legate all'inerzia cognitiva, causata dalla difficoltà di comprendere le nuove necessità del mercato, e dall'altro lato inerzia di azione, dovuta alla complessità di reagire a causa della propria storia aziendale. Quando processi e routines sono altamente fatti propri dalle risorse dell'azienda, svincolarsi da esse risulta essere una decisione molto sofferta.

Tra le principali trappole cognitive in cui le aziende incappano vi sono:

- l'idea che aver performato molto bene nel passato continui a rappresentare una fonte di vantaggio competitivo. L'idea di abbandonare la strategia che ha portato successo all'impresa è fortemente evitata nonostante essa molto probabilmente potrebbe non generare valore nel nuovo paradigma;
- l'idea di non abbandonare un progetto passato perché i costi affondati annessi non sono totalmente ammortizzati e dunque vengono visti ancora come un investimento attivo. Tuttavia, tali investimenti potrebbero non essere più funzionali alla nuova tecnologia, generando un costo marginale inferiore rispetto all'impegno in nuovi investimenti, ma al contempo un ritorno più basso se non nullo. Questo comportamento porta tendenzialmente a sottovalutare la necessità di investire in assets nuovi;
- lo status quo e l'idea che la propria tecnologia, fino ad allora molto performante, sia ancora la migliore sul mercato. Ciò può essere vero all'inizio del nuovo paradigma, ma probabilmente non lo sarà più man mano che la tecnologia verrà sviluppata, e alla fine le aziende del settore si troveranno spiazzate dall'avanzata dei nuovi entranti.

Un secondo aspetto rilevante in un'innovazione dirompente è l'incapacità delle aziende di ammettere l'esistenza di nuovi mercati sostitutivi: ciò prende il nome di effetto Christensen. Tale effetto è dovuto alla scelta delle aziende di tenere conto solamente delle proprie referenze di mercato, senza indagare ulteriormente. Il comportamento tipico di tali realtà è di prendersi cura esclusivamente del proprio bacino di utenti, cercando di offrire un prodotto le cui performance eccedano quelle richieste, senza interessarsi di eventuali mercati emergenti. Come si può vedere in Figura 14, all'inizio di un nuovo paradigma tecnologico le performance sono probabilmente inferiori a quelle della tecnologia dominante per un determinato mercato di consumatori.

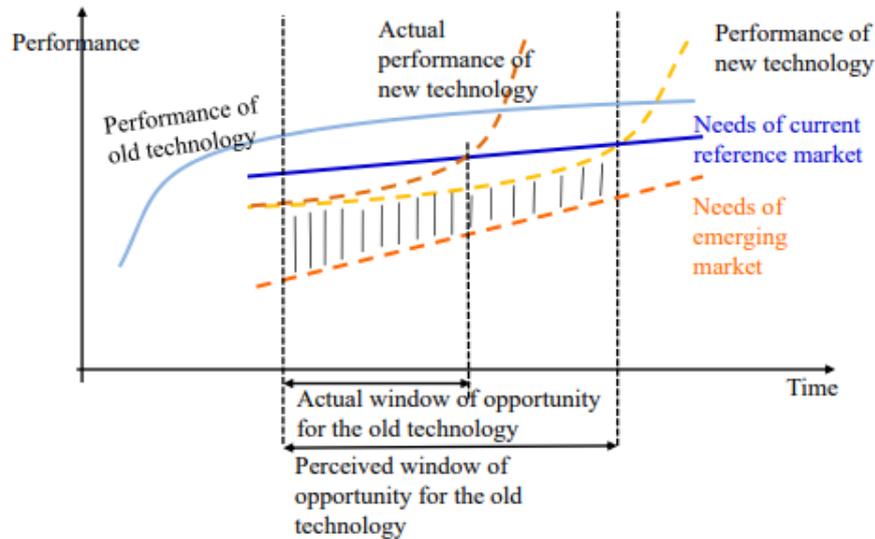


Figura 14. Effetto Christensen nell'innovazione disruptive (fonte: *Management of Innovation and Product Management*, Cantamessa & Montagna)

Le aziende incumbents sono coscienti che la nuova tecnologia emergerà e prenderà il posto dell'attuale e stimano che ciò avvenga con un certo ritmo di tempo tale da permettergli di sviluppare la nuova tecnologia e al contempo investire nel rafforzare quella attuale. Tuttavia, tali aziende non tengono conto che le basse performance della nuova tecnologia valutate dal proprio mercato, possono rivelarsi invece assai elevate per una nicchia di consumatori da loro non servita a causa di bisogni e disponibilità di spesa differenti. Attraverso il soddisfacimento di altri clienti, l'azienda entrante può utilizzare parte dei ricavi per investire ulteriore nella nuova tecnologia, e migliorare così più velocemente le sue performance. Accelerando lo sviluppo tecnologico, la competitività della nuova tecnologia può essere raggiunta anticipatamente spiazzando le aziende del mercato: il nuovo paradigma sorpassa quello attuale in tempi più brevi di quelli previsti, essendo capace di soddisfare le esigenze anche del mercato principale e causando la fuoriuscita delle imprese incumbents.

Il terzo determinante della disruption considera i comportamenti miopi delle aziende:

- il mantenimento di un comportamento conservativo rispetto alle nuove tecnologie. Le aziende affidano molta importanza al pensiero dei propri consumatori, essendo coloro che pagano. In tal modo esse tendono a sottovalutare possibili scenari futuri per diminuire i rischi tecnologici e di mercato dovuti a potenziali perdite di vendita. Può capitare che le imprese sviluppino la tecnologia internamente, ma rimangano poi restie a presentarla al mercato perché non è ciò che esso in quel momento vuole. Esse preferiscono aspettare finché non saranno i consumatori a evidenziarne la necessità, senza però considerare la possibilità che nel frattempo possa emergere un nuovo

gruppo di persone interessate. Inoltre, l'inserimento di nuovi prodotti per un'azienda si traduce anche nel rischio di una potenziale cannibalizzazione con altri propri prodotti;

- l'amministrazione della società, o meglio la governance è molto incline a soddisfare l'esigenza di alti profitti degli investitori dell'impresa, e molto poco favorevole a decisioni tecnologicamente brusche che potrebbero compromettere un'alta profittabilità. Il management di un'azienda può fare molto fatica ad accettare che senza assumere rischi tecnologici, la profittabilità verrà bruscamente abbassata in ogni caso. Tuttavia, il cosiddetto status quo nelle grandi realtà aziendali è difficile da superare: l'idea che il proprio business sia forte e che nulla lo possa scalfire è solitamente alla base di eventi dirompenti;
- la struttura organizzativa, la quale spesso per la sua forma gerarchica fatica a far emergere decisioni radicali per salvare l'impresa. Questo accade specialmente quando le azioni disruptive vengono proposte dal basso al top management. Solitamente le esigenze tecnologiche dovrebbero provenire contemporaneamente dai team di marketing e di R&D: essi sono coloro che stanno ai confini dell'organizzazione, in maniere differenti, e osservano cosa accade. Il marketing è aggiornato sulle tendenze di mercato, la ricerca e sviluppo deve avere informazioni su come si sta evolvendo la tecnologia del settore. Insieme devono portare la conoscenza al top management per evitare che l'azienda venga affossata dai competitors o dai nuovi entranti. Tuttavia, tale ruolo risulta particolarmente complesso: far emergere e approvare un'idea che proviene dai livelli bassi è molto difficile da accettare per chi siede all'apice di tale struttura e che dovrebbe compiere scelte strategiche. Questa miopia aziendale succede tanto più la struttura organizzativa è gerarchica, e il top e low management sono posizionati così lontani da non poter influenzare in modo concreto l'operato dell'altro.

Si può dunque affermare che prendere decisioni in ambito tecnologico per anticipare eventi dirompenti che potrebbero cancellare le imprese è assolutamente complicato da gestire. Il cambiamento, per sua definizione, è difficile da abbracciare: è rischioso per il business attuale. Significa infatti utilizzare all'inizio i proventi generati dall'attuale tecnologia per sviluppare la nuova tecnologia. Per fare ciò le aziende devono tenere un comportamento ambi-direzionale, ovvero devono essere capaci di mantenere l'efficienza nell'attuale tecnologia, e contemporaneamente adattarsi a quella emergente. Ciò non si ottiene semplicemente con una cultura aziendale specifica, ma soprattutto con strategie e azioni organizzative precise di coordinamento tra nuovo e vecchio paradigma.

Così come esistono dei determinanti della disruption, è possibile evidenziare alcune condizioni che suggeriscono l'impossibilità che essa si verifichi. Infatti, non sempre le innovazioni radicali sono anche disruptive, mentre invece è vero il contrario: se si verifica disruption vuol dire che si sta cambiando paradigma.

Tra le casistiche per cui è difficile l'avvenimento di fenomeni disruptive vi sono:

- l'esistenza di un mercato per la tecnologia. In questo caso, aziende leader e nuovi entranti cercano il compromesso unendosi, così da sfruttare i vantaggi competitivi delle prime e i guizzi tecnologici delle seconde. Ciò solitamente avviene tramite licenza: l'azienda entrante può utilizzare la tecnologia, oppure, nel caso di startups, tali realtà vengono acquisite dall'azienda incumbents, per recuperare gli svantaggi tecnologici più in fretta ed eliminare dal mercato un potenziale competitor futuro. Se ciò avviene in maniera preponderante per tutte le nuove aziende, la tecnologia radicale non avrà impatti distruttivi;
- l'esistenza di più curve tecnologiche innestate una sull'altra. Tale fenomeno, detto nested curves, è caratterizzato dalla sovrapposizione continua di più curve che insieme costituiscono il paradigma tecnologico totale. Si tratta di piccoli cambiamenti architetturali avvenuti tramite piccoli salti di paradigma, ciascuno dei quali non si configura come una vera e propria innovazione radicale, ma piuttosto come la generazione di un'unica grande tecnologia;
- il sailing ship effect, che si verifica quando il reale limite tecnologico non è stato raggiunto, ma, nonostante ciò, il settore si è attestato su determinati valori di performance reputando inutile migliorarla. La disruption può non avvenire all'emergere di un nuovo paradigma perché gli incumbents decidono di investire nuovamente in ricerca e sviluppo per migliorare l'attuale tecnologia che possiede ancora margini di avanzamento. Può capitare che il miglioramento marginale della vecchia tecnologia sia superiore a quello della nuova tecnologia per un certo periodo di tempo, fenomeno che può determinare il rallentamento dell'ingresso della nuova tecnologia sul mercato. In tal modo le aziende riescono a non uscire dal mercato perché hanno il tempo di allinearsi con le aziende emergenti, e al contempo continuare a generare ricavi con la vecchia tecnologia. In tal modo si verifica il salto del paradigma senza che ci sia disruption, perché i players principali rimangono gli stessi;
- la presenza di switching costs, ovvero i costi nascosti di cui tiene conto il consumatore quando decide di cambiare il fornitore del bene o servizio di cui usufruisce. Tali costi

impattano il percorso di adozione: di fronte a un nuovo prodotto, il potenziale cliente si interroga sulla possibilità di cambiare o meno. I fattori che maggiormente influenzano tale decisione sono il vantaggio relativo, ovvero l'utilità del nuovo bene rispetto al precedente, la compatibilità delle tecnologie allo scopo di sfruttare i beni complementari, la complessità di adozione della nuova tecnologia, il rischio di non essere soddisfatti a pieno nel cambiare e infine i vantaggi effettivamente osservabili che si otterrebbero con la nuova tecnologia. In particolare, come teorizzato da Antonelli nel modello del cambiamento localizzato, l'utente non è solo influenzato dalle performance delle tecnologie, ma anche dagli investimenti che egli ha compiuto in precedenza nei beni complementari alla tecnologia stessa. Conseguentemente, all'aumentare della specificità dei beni complementari, il consumatore preferisce non modificare la sua scelta: si parla cioè di effetto lock-in, ovvero il consumatore sceglie di mantenere la vecchia tecnologia.

2.4.4 Come avviene l'innovazione

Analizzati i fattori che concorrono alla realizzazione di un'innovazione, è tempo ora di vedere come avviene il fenomeno della diffusione. Come detto infatti, un'innovazione non è nient'altro che un'invenzione che è giunta a diffusione, ovvero per cui è iniziato il suo sfruttamento economico.

La curva a S delle performance, che descrive il progredire di un paradigma tecnologico, va di pari passo con la curva delle diffusione, o meglio delle vendite. In particolare, la metrica di maggiore interesse risulta essere quella delle vendite cumulate nel tempo: essa è preferita alla curva delle vendite perché essa va a indicare solamente le vendite effettuate in un preciso momento temporale, mentre ai fini dello studio dell'innovazione è bene sapere in ogni istante di tempo quante vendite sono state realizzate fino a quel momento. Le performance, le vendite cumulate e le vendite sono rappresentate in Figura 15: le prime due hanno una forma a S, l'ultima a campana rovesciata.

Nelle Figure delle vendite cumulate e delle vendite sono inoltre presenti delle linee tratteggiate: si tratta di curve alternative che tengono conto non solo delle nuove vendite, ma anche delle vendite addizionali e delle vendite sostitutive, che avvengono quando il bene si rompe o il servizio si esaurisce.

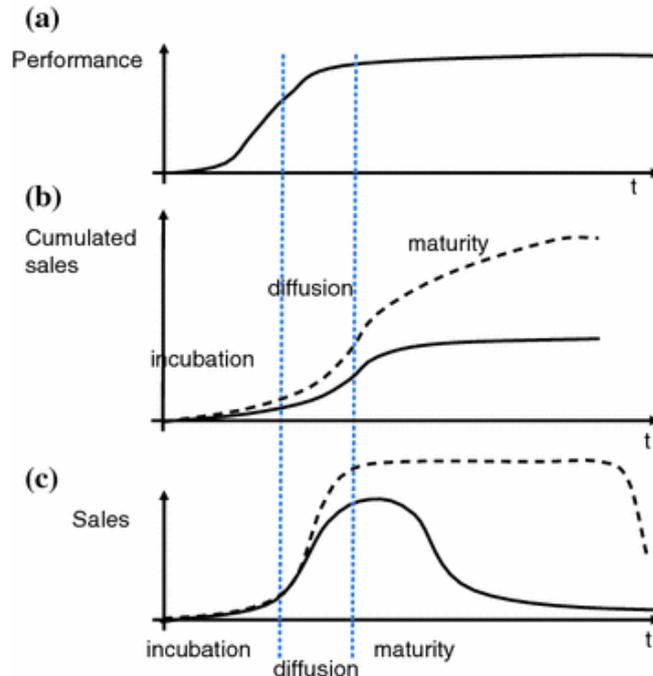


Figura 15. Curva delle performance (a), delle vendite cumulate (b) e delle vendite (c) - (fonte: *Management of Innovation and Product Management*, Cantamessa & Montagna)

In tutte e tre le curve possono essere riconosciuti tre momenti fondamentali:

- l'incubazione, ovvero il periodo in cui l'innovazione non è ancora sviluppata pienamente e presenta performance basse rispetto a quelle attese. In tale momento i clienti sono difficili da acquisire e pertanto le vendite vengono effettuate grazie ad alcune nicchie di consumatori molto attenti alle novità tecnologiche oppure con switching costs molto bassi;
- la diffusione, ovvero quando si raggiunge un buon risultato in termini tecnologici, tali da giustificare l'adozione da parte di un numero sempre più crescente di consumatori. In questa fase l'azienda deve dimostrare l'effettiva utilità del proprio bene affinché la scelta del consumatore non sia solo momentanea ma continui nel tempo, realizzando così le citate vendite sostitutive o addizionali;
- la maturità, in cui le performance si sono assestate e probabilmente hanno raggiunto il proprio limite. Rispettivamente, le vendite iniziano ad arrestarsi perché si fa sempre più fatica ad attrarre nuovi clienti. A questo punto diventa fondamentale il lavoro svolto fino a quel momento: maggiore sarà stata la capacità dell'impresa di adottare nuovi clienti, maggiori saranno le vendite addizionali e sostitutive che consentiranno

al business di continuare. Se è arrivata fin qui, la tecnologia si può dire da adesso dominante nel mercato, finché una nuova tecnologia non si affaccerà sul mercato generando una nuova fase rivoluzionaria.

Per le aziende è molto importante prima della fase di diffusione creare hype, ovvero amplificare l'aspettativa dei consumatori sulle performance del prodotto. Ciò avviene attraverso politiche di marketing al fine di ampliare la base di potenziali clienti. In seguito al picco, segue sempre una fase di disillusione in cui le performance non raggiungono il target che era stato promesso: si tratta di un momento critico per l'azienda, poiché se non riesce a migliorare le performance, perde la speranza di raggiungere la fase di diffusione. Se ciò invece avviene, succede che a poco a poco aspettative e realtà si avvicinano, e si raggiunge il cosiddetto plateau di produttività, una fase in cui domanda e offerta sono più o meno pari. In tal modo si raggiunge una quantità di volumi tali da abbassare i costi produttivi e conseguentemente i prezzi.

A ciò si aggiunge una fase molto delicata che precede e giustifica la diffusione: il chasm, ovvero il momento in cui si effettuano vendite nella categoria di consumatori definita early majority. Essi sono tutti i consumatori che prendono la loro decisione in merito all'adozione considerando costi e benefici in maniera pragmatica: tale classe di potenziali clienti è molto importante per le aziende, in quanto è quella numericamente maggiore e senza la quale la tecnologia muore perché non si raggiungono le vendite necessaria al successo del business. Il chasm avviene tra la fase di incubazione e la fase di diffusione: contemporaneamente avviene l'emergere del dominant design, a cui il modello di Abernathy-Utterback tenta di dare una spiegazione [35]. Il modello tiene conto di quattro curve, come si evince in Figura 16:

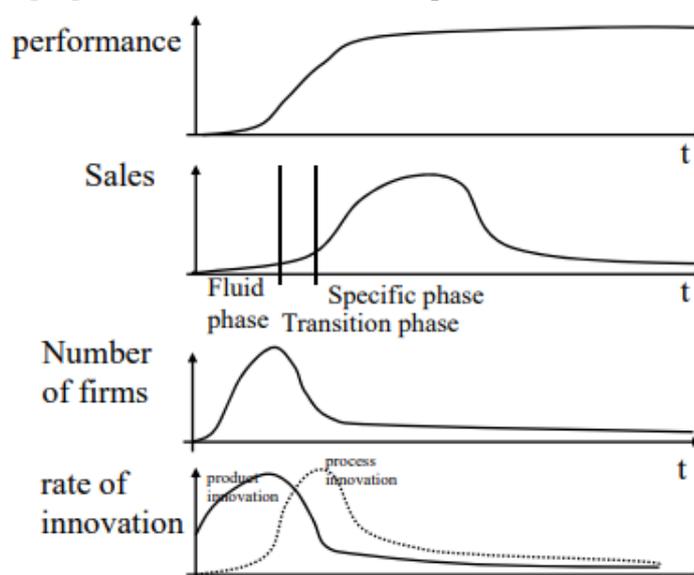


Figura 16. Modello di Abernathy-Utterback (fonte: *Management of Innovation and Product Management*, Cantamessa & Montagna)

performance, vendite cumulate, tasso di innovazione, ovvero numero di brevetti e infine numero di aziende nel settore.

Dal grafico delle vendite è possibile vedere che l'innovazione può essere suddivisa in tre fasi:

- la fase fluida, ovvero il momento di incubazione della tecnologia. In tale fase l'azienda deve far emergere tutto il potenziale possibile della tecnologia. Contemporaneamente il numero di imprese che si cimentano con le proprie competenze cresce in modo esponenziale, così come il numero di brevetti;
- la fase di transizione, ovvero la fase di diffusione in cui l'azienda fa una prima sessione di analisi sul lavoro compiuto. In tale fase le performance crescono molto, le vendite sono in rampa di lancio, mentre si assiste a un primo rallentamento del numero di aziende e brevetti. Ciò accade perché inevitabilmente il mercato apprezza qualche prodotto, mentre altri no. Di conseguenza solo alcuni, se non pochissimi prodotti, emergono e tante aziende muoiono. Qui si afferma il dominant design, ovvero l'architettura di prodotto che si è rivelata maggiormente vincente agli occhi dei consumatori e che causa la fuoriuscita delle altre aziende, che in alternativa possono decidere di convertirsi. L'architettura che emerge è quella che da quel momento in poi guiderà qualunque sviluppo progettuale di miglioramento delle performance;
- la fase specifica, in cui le aziende sopravvissute fino ad allora iniziano a competere tra di loro in termini di costi e qualità del prodotto, mentre la domanda del bene continua a crescere. Per competere in maniera efficace le aziende devono spostare il focus dal prodotto al processo. La produzione del bene diviene la chiave di successo dell'impresa, su cui fino a quel momento non ha potuto concentrarsi per questioni di priorità. Attraverso strategie mirate al miglioramento, le aziende raggiungono non solo una qualità effettiva e percepita maggiore, ma rendono possibile il raggiungimento di economie di scala fondamentali per abbassare i prezzi e conquistare quote di mercato.

Nonostante l'importanza conferita nel tempo al modello di Abernathy-Utterback, esso mostra oggi alcuni limiti dovuti anche ai molti anni passati dalla sua formulazione nel 1975. La prima grande critica mossa al modello risiede nell'assunzione base per cui una volta che il dominant design è emerso, l'azienda che vuole espandere il proprio successo deve passare a concentrarsi sui processi produttivi così da aumentare l'efficienza e fare economie di scala.

Tuttavia, il prodotto e la tecnologia annessa possono presentare difficoltà e gradi di lavorazione differenti dalle aspettative precedenti: il dominant design ha cioè possibilità di fallire anche successivamente al momento della sua emersione, poiché la sostenibilità del suo

vantaggio deve rivelarsi anche nel processo produttivo. In tal senso, un dominant design può fallire o richiedere molto tempo per assestare il processo di produzione più efficiente.

Inoltre, esiste la possibilità di aver scartato in fase di incubazione alcune alternative con processi produttivi maggiormente validi, generando così inefficienze di mercato.

Un secondo problema legato al modello risiede nella concezione dell'architettura di prodotto come di qualcosa di estremamente rigido, il quale, una volta definito, è difficile da rivedere.

Al giorno d'oggi invece, anche grazie alla digitalizzazione, è molto semplice immaginare un'architettura in modo modulare e flessibile, e dunque facilmente modificabile. Le aziende sono pertanto in grado di creare architetture di prodotto differenziate, costituite da componenti specifici che comunicano tramite interfacce, dando la possibilità di ottenere prodotti con limitate difficoltà di integrazione. Alla modularità del prodotto consegue il fatto che le economie di scala e l'apprendimento organizzativo non si svolgono più a livello di dominant design, e cioè di prodotto, ma a livello dei singoli componenti.

L'ultimo problema del modello è legato alla crescita di prodotti-servizi. Infatti, il modello distingue precisamente prodotti e servizi, sviluppando due modelli differenti. In anni più recenti, la ricerca in questo campo ha affermato che l'innovazione di servizio si configura come una specialità distinta, che segue l'innovazione di prodotto e di processo. In particolare, nel caso di un prodotto e di un servizio sviluppati e pensati insieme, si può immaginare che uno dei due guidi l'innovazione facendo emergere il dominant design, mentre l'altro si comporti come un asset complementare.

2.4.5 Modello delle cinque forze di Porter e critica

Il modello di Porter consente di effettuare un'analisi accurata dell'ambiente esterno che circonda un'azienda [36]. Nel condurre tale analisi, le forze esterne sono presumibilmente attribuibili a qualsiasi cosa possa avere un impatto, positivo o negativo, sulla competitività e sulla redditività a lungo termine, intesa come capacità di produrre profitto [37]. Comprendere quali aspetti hanno un impatto sulla competitività consente di prendere decisioni strategiche sensate. Per fare questo, è essenziale identificare chi sono gli attori esterni che influenzano la performance aziendale.

Micheal Porter, economista statunitense, sviluppò nel 1979 un modello per tentare di spiegare che un'azienda non è un'entità isolata, ma è inserita in un contesto economico, in cui appartiene a una parte specifica della catena del valore.

Ciò che emerge elaborando il modello è che:

- la redditività dell'azienda, intesa come la sua capacità di generare vantaggio e quindi profitto, dipende fortemente dal settore industriale in cui si trova l'azienda;
- l'impresa è obbligata a intrecciare relazioni economiche e commerciali con altre aziende, andando così a strutturare quelle che sono note in inglese come operations, una branca della gestione aziendale dedicata alla vera e propria generazione di valore: in un'azienda manifatturiera, questa coincide quasi sempre con la parte di realizzazione del prodotto. Nella sua strutturazione all'interno della catena del valore, l'azienda deve essere in grado di trattenere il più possibile valore economico, a spese degli altri stakeholders del sistema;
- il vantaggio competitivo deve essere sostenibile. Q si traduce nel fatto che il vantaggio competitivo raggiunto da un'azienda deve consentire una posizione unica di superiorità sui concorrenti, e questa condizione deve essere mantenuta nel tempo, anche se cambiano le strategie. Se il vantaggio è sostenibile, l'azienda sarà in grado di mantenere una posizione di leadership nel mercato. La sostenibilità è la chiave del successo a lungo termine.

Grazie all'analisi di tali fattori, le aziende sono in grado non solo di posizionarsi in modo competitivo nel loro mercato di riferimento, ma anche di valutare possibili decisioni strategiche e scegliere quali comportamenti adottare nei confronti di queste forze.

Una delle forze del modello sono i concorrenti [38], ovvero tutte le aziende in grado di fornire lo stesso tipo di prodotto sul mercato. La rivalità limita gravemente la redditività: solitamente si esprime attraverso guerre di prezzo, miglioramenti del servizio e altro. Ovviamente, la rivalità è più alta dove l'intensità della concorrenza è alta, dovuta ad esempio a un numero alto di aziende, condizioni della domanda, all'uscita, struttura dei costi e caratteristiche del prodotto. La rivalità è annullata quando diversi concorrenti decidono di concentrarsi su segmenti di consumatori differenti in modo da non scontrarsi.

I potenziali nuovi entranti sono invece le aziende che stanno per entrare nel settore e causano un freno al profitto potenziale. Ovviamente, più alte sono le barriere all'ingresso stabilite dagli operatori storici, minore è il rischio di perdere quote di mercato a favore dei nuovi entranti [39]. Le barriere all'ingresso possono essere:

- economiche, come elevati costi fissi o ingenti investimenti necessari in mercati concentrati al fine di raggiungere economie di scala e/o di scopo, costi di commutazione;
- tecnologiche, ovvero impedire lo sfruttamento della tecnologia attraverso brevetti o know-how;

- istituzionali, imposte da agenzie governative o altre autorità attraverso vincoli legali per proteggere un mercato attraverso la regolamentazione, allo scopo di garantire la soddisfazione del cliente;
- strategiche, dovute alle scelte delle singole aziende. Un esempio è un mercato monopolistico in cui l'unica azienda presente decide di stabilire un prezzo del prodotto così basso che è economicamente sconveniente per l'entrante tentare di entrare nel settore. Un altro è la forte reputazione del marchio o la profonda segmentazione del prodotto da parte degli operatori storici che rende difficile l'inclusione.

In generale, i nuovi entranti possono soppiantare gli operatori consolidati in un mercato particolare, ad esempio una nicchia di mercato, e in questo modo influenzare i vantaggi competitivi dell'intero settore.

La terza forza di Porter sono i produttori di beni sostituti, che portano nel settore un prodotto tecnicamente diverso da quello degli operatori storici, ma che attraverso le sue caratteristiche riesce a soddisfare le richieste e le esigenze dei consumatori. La presenza di prodotti o servizi sostitutivi genera una perturbazione della redditività del settore, ancor più se questa azione è accompagnata da una strategia di leadership di costo: ciò rende infatti la domanda elastica rispetto al prezzo. Ovviamente, la minaccia di beni sostitutivi dipende dalla loro disponibilità, dai costi di riconversione, o switching costs e dalla percezione del cliente del rapporto qualità-prezzo del sostituto.

La quarta forza del modello è rappresentata dai fornitori, cioè tutte aziende da cui si acquistano materie prime, semilavorati e servizi per realizzare il proprio prodotto finito. In questo caso, ciò che diventa rilevante è il potere contrattuale dei fornitori, cioè la loro capacità di riuscire a imporre le condizioni contrattuali a loro più favorevoli: in questo modo mantengono più valore economico addebitando costi più elevati ai propri clienti, cioè le aziende produttrici, facendo perdere qualità nei prodotti e/o nei servizi.

Questo rischio dipende ovviamente da diversi fattori come:

- concentrazione e dimensione dei fornitori: un numero inferiore di fornitori significa una maggiore probabilità di dover regolare l'equilibrio di potere. Ciò consente loro di decidere gli input economici dei prodotti come costi e prezzi.
- disponibilità di sostituti per i prodotti del fornitore: se il bene prodotto dal fornitore è indispensabile e unico, allora avrà ampio spazio di negoziazione per aumentare le sue entrate;

- rischio di integrazione del fornitore a valle: se possibile, il fornitore potrebbe decidere di integrarsi verticalmente a valle creando un canale di distribuzione e producendo esso stesso il prodotto finito, diventando così un concorrente.

Il quinto e ultimo tassello del modello di Porter è costituito dagli acquirenti, ovvero i destinatari del prodotto realizzato dall'impresa. In questo senso, il termine clienti include diverse categorie: altri utilizzatori industriali del settore, clienti intermedi come i canali di distribuzione e i clienti finali. Ciò che risulta importante è il potere contrattuale dei clienti: essi possono infatti catturare una quota maggiore di valore forzando i prezzi al ribasso, e al contempo richiedere una qualità superiore. In generale il potere contrattuale di tale categoria conduce a una forte competizione nel settore. Un acquirente è in una posizione di forza se riesce a influenzare le aziende del settore, specialmente se sono sensibili ai prezzi, allo scopo di ricevere una riduzione dei prezzi. Il potere contrattuale del cliente dipende da diversi fattori tra cui:

- volumi di acquisto: maggiore è il volume di acquisto di un dato cliente, maggiore è il suo potere contrattuale;
- concentrazione della clientela: un'azienda con pochi clienti avrà un potere contrattuale maggiore e viceversa;
- possibilità di integrazione verticale: se un cliente sceglie di produrre un prodotto da sé invece di acquistarlo da un'altra azienda, l'azienda ha perso un cliente.

Nel corso degli anni, il modello di Porter è stato criticato da alcuni ricercatori ed economisti. Uno dei principali vertè sull'assunto che la teoria sviluppata da Porter avrebbe avvantaggiato alcuni meccanismi tipici del capitalismo [40]: il predominio delle grandi imprese, la concentrazione del capitale e la creazione di sistemi gerarchici nel mercato sono solo alcuni. Un altro punto della critica riguarda la scarsa attenzione rivolta dal modello alle piccole organizzazioni e a tutto ciò che è correlato alla teoria dell'apprendimento organizzativo, che afferma la centralità del ruolo di tale apprendimento nell'evoluzione dell'organizzazione. Inoltre, è stato accertato che il modello esprime una prospettiva normativa per sviluppare strategie vincenti, e non invece una prospettiva descrittiva contenente consigli per raggiungere tali obiettivi.

Il nocciolo della critica risiede però principalmente nell'idea che il modello sia facilmente applicabile e valutabile solamente in contesti di mercato stabili e statici, il cosiddetto mercato perfetto, che contempla l'opportunità per le aziende di formare alleanze strategiche volte a rafforzare la competitività. Porter nella sua tesi considera solo il vantaggio che può essere generato da condizioni serene di cooperazione tra aziende, che possono garantire redditività a

lungo termine, in contrapposizione alla competitività a breve termine che deve continuamente reinventarsi per essere sostenibile. La pressione competitiva rivolta ad agenti esterni può però ritorcersi contro rovinando ciò che un'organizzazione ha duramente costruito.

Per tutte queste ragioni, data anche la situazione economica e tecnologica in continua evoluzione attuale, è necessario provare a ripensare il modello classico di Porter, che racchiude un'istantanea piuttosto che una serie di momenti scanditi nel tempo. Lo scopo è realizzare una prospettiva che contempra simultaneamente l'innovazione, i mercati in rapida evoluzione, i progressi tecnologici e le strutture organizzative sempre più complesse, tutti temi centrali per il successo aziendale.

Tutto ciò che è stato affermato nel modello rimane valido anche in contesti innovativi, pur cambiando leggermente forma in alcuni concetti. Il focus del modello rimane la comprensione per un'azienda della propria posizione competitiva nel settore, identificando l'intensità e l'importanza delle forze coinvolte considerando però nuove caratteristiche.

In suo articolo del 2016, Peter Fisk, studioso di economia e marketing, ha sviluppato cinque pilastri chiave per effettuare un upgrade del pensiero strategico [41]:

- l'implementazione della roadmap strategica è estremamente rilevante per garantire una migliore crescita futura. Quindi, prima del "come", è più importante per le aziende capire "dove" arriverebbero in termini di opportunità di mercato. In questo modo, le modalità di raggiungimento non si concentrano esclusivamente sull'obiettivo di apparire diversi, che è il focus della teoria di Porter, ma sullo sviluppo di uno scopo e di una direzione da perseguire;
- I competitor non hanno più la stessa importanza dei clienti, e questo si può vedere nella crescente rilevanza di comprendere, attraverso insight analitici e intuitivi, chi e come acquisire come clienti. La customer experience è sempre più centrale: tutto ciò che riguarda l'adozione e i comportamenti dei clienti diventano rilevanti;
- I mercati e i competitor sono solamente dinamici, e non anche statici. I mercati sono sempre più connessi grazie alla digitalizzazione e all'ICT. Pertanto, i confini non sono più così netti come un tempo: questo significa che un'azienda può attaccare un competitor non solo fisicamente, ma anche virtualmente in qualsiasi parte del mondo, anche cambiando settore. Allo stesso modo, un'azienda in difficoltà può ripartire allineandosi a nuovi valori attraverso l'ingresso in nuovi settori e aree geografiche. La competitività rimane cruciale ma assume forme diverse: non significa più solo essere diversi, ma attraverso la diversità essere in grado di superare l'avversario valutando nuovi modelli di business e le esperienze lavorative passate;

- gli ecosistemi estendono il concetto di catena del valore. Il modello classico che descrive la struttura della catena del valore come un percorso lineare composto da fornitori da una parte e clienti dall'altra sta lentamente scomparendo, a favore del concetto di ecosistema, ovvero un macro-gruppo di partnership finalizzate alla creazione continua di valore. La sfida principale sarà quella di integrare tutte le parti dell'ecosistema, a partire dalla struttura organizzativa delle aziende, che contiene le capacità e le competenze che creano valore aggiuntivo per il cliente;
- grandi organizzazioni vs piccole imprese. Attualmente, il ruolo delle grandi e piccole aziende è stato rivalutato. In passato, le grandi aziende erano considerate maggiormente di successo dal punto di vista della redditività, ma questo non si è sempre dimostrato vero. Diventare grandi, cioè corporate, in molti casi era ed è necessario per coprire alti costi legati all'azienda, come gli impianti di produzione, ma non sempre è legato alla crescita del business. Questo obiettivo viene perseguito attraverso l'introduzione di grandi volumi di prodotti e servizi indifferenziati generalmente a basso costo. Oggigiorno, le aziende si pongono obiettivi a volte molto diversi, anche quando cercano di espandersi: questo accade quando un'azienda rimane redditizia anche se piccola perché si concentra su una nicchia di mercato, rimanendo quindi agile e focalizzata sull'obiettivo finale pur mantenendo un buon reddito;
- l'innovazione è il cuore del vantaggio competitivo, soprattutto in quest'epoca di rapidi cambiamenti tecnologici. Questo probabilmente perché essere innovativi significa avere un vantaggio competitivo, e dunque stimolare la competizione. Il modello di Porter non è stato sviluppato specificamente per contesti di innovazione e quindi la sua interpretazione cambia: i nuovi entranti ora includono sia coloro che prima non erano nel mercato, sia organizzazioni che lavorano in un mercato esistente che decidono di dedicare parte del loro sforzo per entrare in un nuovo mercato o segmento. Due economisti, Downes e Larry, si sono particolarmente interessati ai settori high-tech, supponendo che ci siano altre quattro forze che dominano la competizione: la digitalizzazione, la globalizzazione, la deregolamentazione e infine il livello di innovazione. Quest'ultimo è ormai diventato un fattore critico per l'evoluzione delle aziende: più breve è il ciclo di vita del prodotto e/o del servizio, più alto è il livello di innovazione che l'azienda deve possedere per non essere cacciata dal mercato. L'economista Jalles, nel 2010 ha proposto due metodologie per identificare due proxy per misurare il livello di innovazione: il numero di brevetti registrati e l'Intellectual Property Index.

Il modello delle cinque forze di Porter consente alle organizzazioni di ricercare una nuova direzione strategica per il cambiamento, che a sua volta aiuta le organizzazioni a rispondere a una serie di sfide strategiche.

Come detto sopra, è possibile costruire un modello a cinque forze che contempla la possibilità che le aziende si trovino in contesti di innovazione medio-alta.

In un ambiente stabile, i concorrenti diretti già presenti sul mercato sono rivali. In un contesto innovativo, invece, in alcuni casi formano alleanze. Ciò è particolarmente vero quando l'investimento per la nuova tecnologia è molto costoso o è necessario raggiungere un accordo per definire standard comuni: è il caso delle innovazioni radicali, dove si preferisce che gli accordi di innovazione abbraccino congiuntamente il paradigma tecnologico e l'emergere il design dominante, generando una barriera all'ingresso. Invece, nel caso dell'innovazione incrementale, le aziende del settore possono ottenere vantaggio competitivo attraverso una bassa imitabilità, ottenuta mediante il miglioramento continuo delle loro competenze tacite. A differenza di un mercato stabile, dove l'azienda subisce potenzialmente solo la perdita di quote di mercato con l'ingresso di un nuovo concorrente, qui c'è un secondo rischio. Se l'entrante è portatore di un'innovazione incrementale, l'ingresso quasi sempre non avviene perché gli operatori storici sono facilmente in grado di creare una barriera all'ingresso, ad esempio con prezzi bassi, raggiunti con economie di scala. D'altra parte, se l'innovazione è radicale c'è la possibilità che la tecnologia sia anche dirompente e quindi possa cambiare completamente il settore, mettendo a rischio gli operatori storici.

In un ambiente stabile, i beni sostituiti minacciano gli operatori storici perché rischiano di perdere quote di mercato, che si spostano verso prodotti e/o servizi con una migliore qualità percepita o prezzi più bassi. In un contesto innovativo, invece, i beni sostitutivi svolgono un ruolo chiave perché possono anticipare e quindi soddisfare prematuramente nuove esigenze non ancora pienamente espresse dai consumatori. Se ciò comportasse una disruption, potrebbe affermarsi come prodotto primario.

In condizioni stabili, le innovazioni incrementali sono promosse dai fornitori, che possono cambiare i componenti e i materiali proposti. Tuttavia, la loro appropriabilità rimane bassa perché sono facilmente ingegnerizzabili a causa della necessità di integrazione con l'architettura del sistema: ciò non genera vantaggio competitivo per i fornitori. Situazione ancora peggiore in caso di innovazioni radicali: se cambia paradigma e si genera disruption, i fornitori rischiano di essere spinti fuori dal settore. Infatti, se la tecnologia del sistema cambia, è probabile che cambino anche tutti i suoi componenti. Pertanto, per salvarsi, i

fornitori devono avviare progetti di co-sviluppo con i loro clienti per rimanere aggiornati, non perdere competitività ed essere sostituiti a loro volta da nuovi entranti lato del fornitore. In contesti stabili, il prezzo guida il processo di acquisto di nuovi beni, mentre in contesti più turbolenti il concetto di adozione diventa importante. Soprattutto dove l'innovazione è radicale, è necessario costruire percorsi di adozione ad hoc per ogni categoria di clienti per garantire l'accettazione dell'innovazione. Anche in presenza di disruption, se non si è lavorato attentamente per creare un processo di diffusione, la tecnologia non verrà accolta positivamente dalla base clienti: si dice in questo caso che il progresso tecnologico è frenato dalla domanda.

In questo capitolo verranno presentate le analisi sugli investimenti pubblici e privati nel settore delle celle a combustibile, al fine di delineare come esso si sia mosso nel corso degli ultimi anni e come si stia configurando nei progetti futuri.

3. Investire nell'innovazione: l'esempio della cella a combustibile

3.1 Investimenti pubblici

Nel costruire il modello della cella a combustibile è stato necessario effettuare alcune semplificazioni del modello lineare teorico.

La metodologia utilizzata nell'analisi degli investimenti pubblici ha previsto una desk research dei dati disponibili su più fonti. Il punto di partenza è stato l'Energy Technology RD&D Budgets Data Explore dell'IEA, l'International Energy Agency [42]. Nel Data Explorer è possibile trovare i budget dei fondi pubblici destinati alla ricerca e sviluppo (R&S) nella tecnologia della cella a combustibile di molti Paesi che hanno aderito all'IEA.

La definizione di tutte le categorie tecnologiche presenti è contenuta nella IEA Guide [43].

La qualità delle statistiche dell'IEA dipende direttamente dalla qualità delle informazioni fornite dai Paesi aderenti. Le linee guida dell'IEA in materia di R&S si ispirano in larga misura all'edizione 2002 del Manuale di Frascati dell'OECD, "Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development" [44]. Il Manuale di Frascati, pubblicato per la prima volta nel 1962, è il principale libro di riferimento sulle modalità con cui condurre la misurazione della ricerca e dello sviluppo sperimentale.

Nel Manuale di Frascati, la R&S è suddivisa in tre tipologie:

- ricerca di base, cioè il lavoro sperimentale o teorico intrapreso principalmente per acquisire nuove conoscenze sulle basi dei fenomeni e dei fatti osservabili, senza alcuna applicazione o uso particolare in vista;
- ricerca applicata, l'indagine intrapresa per acquisire nuove conoscenze. È diretta principalmente verso uno scopo o un obiettivo pratico specifico;
- sviluppo sperimentale, ovvero il lavoro sistematico basato sulle conoscenze esistenti acquisite dalla ricerca e/o dall'esperienza pratica, che è diretto alla produzione di nuovi materiali, prodotti o dispositivi, all'installazione di nuovi processi, sistemi e servizi, o al miglioramento sostanziale di quelli già prodotti o installati.

Oltre al concetto di R&S sottolineato nel Manuale di Frascati, l'IEA prende in considerazione anche i finanziamenti ai progetti dimostrativi: l'Agenzia ha deciso di includere tali progetti nella raccolta dei dati di bilancio per la R&S perché molto spesso si tratta di una parte importante dello sviluppo di nuove tecnologie. L'esito del progetto dimostrativo può essere incerto e pertanto esiste un rischio a volte troppo grande perché il settore privato possa farlo proprio. Di conseguenza, il ruolo del pubblico nel sostenere ciò diventa centrale.

Le attività di ricerca e sviluppo nel settore dell'energia riportate nel Manuale includono tutte le tecnologie utilizzate per estrarre, convertire, generare, trasportare, distribuire, controllare e utilizzare l'energia.

I dati di R&S dell'IEA riguardano le seguenti tipologie di forme energetiche: l'efficienza energetica, i combustibili fossili, tra cui petrolio, gas e carbone, le fonti rinnovabili, la fissione e la fusione nucleare, l'idrogeno e le celle a combustibile, altre tecniche di alimentazione e stoccaggio e altre tecnologie o ricerche trasversali.

Nel Data Explorer dell'IEA, le spese di R&S sono calcolate identificando tutte le voci di finanziamento dichiarate dagli enti: spesso i dati di bilancio sono stanziati per periodi più lunghi di un anno e possono essere potenzialmente rivisti di anno in anno sulla base di nuovi stanziamenti. Pertanto, i bilanci stimati e le spese effettive dei governi spesso differiscono perché gli importi previsti per la R&S in fase di stanziamento sono diversi da quelli effettivamente misurati al termine dei progetti: ciò può portare a una lieve distorsione, in positivo o in negativo di tali valori.

Gli enti inclusi nell'IEA Database sono tutte le istituzioni governative, a livello centrale o federale. Più nello specifico, son compresi tutti gli organi e i dipartimenti di un governo, centrale, statale o provinciale, che svolgono una serie di attività legate all'ambito indagato. Tutte le istituzioni non commerciali senza scopo di lucro, come le associazioni no-profit, che ricevono fondi dai governi non sono incluse. Altri esempi di istituzioni pubbliche incluse sono i ministeri o i dipartimenti a livello di gabinetto, i consigli regionali, le agenzie pubbliche indipendenti, le organizzazioni di ricerca finanziate dal governo e gli istituti pubblici di istruzione superiore. I dati dell'IEA sulla R&S tengono conto anche del finanziamento pubblico dei partenariati pubblico-privati (PPP). Tra i fondi esclusi dall'IEA vi sono i contributi ricevuti da ciascun Paese derivanti da fondi ottenuti mediante enti comunitari, come l'Unione Europea, perché altrimenti duplicati. Altre voci non considerate sono le spese di R&S di enti semi-pubblici o privati, le spese di R&S di istituzioni pubbliche finanziate da fonti non governative, come le aziende private, i contributi privati ai PPP e i finanziamenti di R&S di enti pubblici locali, ONG e associazioni di beneficenza.

I bilanci di ricerca e sviluppo raccolti dall'IEA comprendono sia i costi correnti, costituiti dal costo del lavoro e da altri costi generali, sia le spese in conto capitale.

Nel database dell'IEA, le informazioni relative alla cella a combustibile sono contenute in un'unica categoria "idrogeno e celle a combustibile", all'interno della quale si trovano solitamente due sottocategorie, "idrogeno" e "celle a combustibile".

La definizione di “idrogeno” comprende la produzione, lo stoccaggio, il trasporto e la distribuzione, le infrastrutture e i sistemi, gli usi finali dell'idrogeno, come la combustione. La definizione di “celle a combustibile” comprende invece applicazioni stazionarie, applicazioni mobili e altre applicazioni.

Nell'analisi seguente, con il termine “idrogeno” ci si riferisce a tutte le tecnologie relative all'idrogeno, comprendendo quindi anche le celle a combustibile. Laddove invece è possibile, si utilizza la categoria “celle a combustibile” per una misura nettamente più accurata.

Nella documentazione del database [45], ogni categoria è caratterizzata da un codice univoco:

- “idrogeno e celle a combustibile” con codice “HGENCELL”;
- “celle a combustibile” con codice “52FUELCE”.

Il lavoro di raccolta dati è stato svolto per i tre continenti maggiormente coinvolti in tali tecnologie: Europa, America e Asia. Per ogni area è stato effettuato un approfondimento sui Paesi con una maggiore spesa nel settore dell'idrogeno e della cella a combustibile.

L'analisi non si basa solo sui dati dell'IEA, ma prende in considerazione anche altre fonti, specificate di volta in volta, laddove i dati dell'IEA sono insufficienti per un'indagine chiara.

Questo è stato fatto anche per tutti i Paesi rilevanti ma non aderenti all'IEA, come la Cina.

I risultati sono espressi in milioni di dollari USA. In particolare, il codice univoco nel database per questa unità di misura è “RDDUSD”. Comprende i dati relativi alla spesa pubblica totale per R&S, convertiti dai prezzi correnti delle valute nazionali in dollari USA a prezzi costanti del 2023, utilizzando i deflatori del PIL e i tassi di cambio del 2023.

Infine, è bene sottolineare che:

- i dati aggregati dell'IEA includono stime quando mancano i dati reali;
- il budget stanziato dall'Unione Europea si riferisce al bilancio dell'ente e non è pari alla somma delle spese dei singoli Paesi appartenenti;
- i dati per gli Stati Uniti sono stati stimati dal segretariato dell'IEA per il periodo dal 2016 in poi, poiché non sono più stati comunicati. Per questo motivo, per gli anni mancanti, la fonte primaria è il DOE's Budget Data (DOE, Department of Energy).

Dall'analisi, i Paesi che sono risultati più rilevanti in termini di investimenti nella tecnologia della cella a combustibile sono: Stati Uniti, Giappone e Corea del Sud. I paragrafi successivi sono singolarmente dedicati a una loro analisi più approfondita.

Canada

La spesa pubblica canadese in ricerca e sviluppo per la cella a combustibile, come mostrato in Figura 17, è sempre stata relativamente elevata: già nei primi anni 2000, la spesa totale nel settore dell'idrogeno era di circa 50 milioni di dollari.



Figura 17. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile in Canada (fonte: IEA)

Negli stessi anni, l'impegno per le celle a combustibile ha raggiunto percentuali elevate, superiori al 50%, fino a picchi dell'80%. Dopo un brusco calo nel 2008, continuato per 8 anni, nel 2016 la curva della spesa totale per l'idrogeno è tornata a salire, raggiungendo cifre significative superiori ai 100 milioni di dollari negli ultimi anni. Tuttavia, questa tendenza non ha riguardato allo stesso modo la spesa per le celle a combustibile che è diminuita notevolmente: nel 2023 era pari al solo 11,7% del totale.

Il Canadian Hydrogen and Fuel Cell Sector Profile [46] è un importante rapporto redatto dal Governo del Canada e dalla Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association (CHFCA) per diffondere informazioni sull'andamento del settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile nel Paese. Il rapporto è stato realizzato raccogliendo le interviste di aziende, istituzioni educative e agenzie governative, per un totale di circa 305 enti. Si noti che non tutti i partecipanti hanno fornito informazioni per ciascuna domanda richiesta e che il rapporto si riferisce al 2019, 2020 e 2021.

Il Canada è sempre stato uno dei Paesi leader a livello mondiale nel settore dell'idrogeno: a causa dell'aumento della domanda di energia pulita, il settore è cresciuto in modo significativo a livello nazionale, consentendo, a partire dagli anni 2000, importanti investimenti.

Le informazioni più importanti che si evincono dal rapporto sono le seguenti:

- oltre il 50% degli intervistati lavora nel settore da più di 5 anni. Ciò significa che il settore è sviluppato;
- il 26% degli intervistati lavora nel settore delle celle a combustibile (sviluppo, produzione, integrazione e fornitura), che rimane dunque una tecnologia indagata. Ciò si evince anche dalla presenza di numerose aziende private come Ballard, Toyota e Cellcentric che hanno sedi in Canada.
- lo studio sulle celle a combustibile a membrana a scambio protonico è il più promettente e quindi il più analizzato (il 41% degli intervistati ci lavora);
- i finanziamenti del governo canadese rappresentano solo il 13% del totale, a indicare che la ricerca è ora finanziata prettamente da istituzioni private, banche e organizzazioni;
- le attività di R&S si svolgono quasi interamente all'interno delle aziende: solo il 5% riguarda la ricerca negli enti statali.

Da questo report si può capire che gran parte del budget viene utilizzato ormai per finanziare iniziative private: questo significa che l'intervento pubblico è ancora necessario, ma il Governo e le altre organizzazioni pubbliche hanno compreso che la ricerca è in una fase abbastanza avanzata, per cui il rischio è leggermente mitigato.

Brasile

Le informazioni sulla spesa governativa brasiliana per la R&S sono carenti nel database dell'IEA, come si può vedere in Figura 18. Le poche presenti non sono molto esaustive, soprattutto per il settore delle celle a combustibile. C'è un vuoto informativo dal 2004 al 2012, e la suddivisione tra le tecnologie a idrogeno e le celle a combustibile è arrivata solo nel 2018. Dal 2019, esiste nel Paese l'Energy Big Push (EBP), un progetto di collaborazione che mira a sostenere la promozione dello sviluppo energetico sostenibile in Brasile. È guidato dal Centro brasiliano per gli studi strategici e la gestione (CGEE), dall'Ufficio brasiliano di ricerca sull'energia (EPE), dalla Commissione economica per l'America Latina e i Caraibi (ECLAC) e dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA).

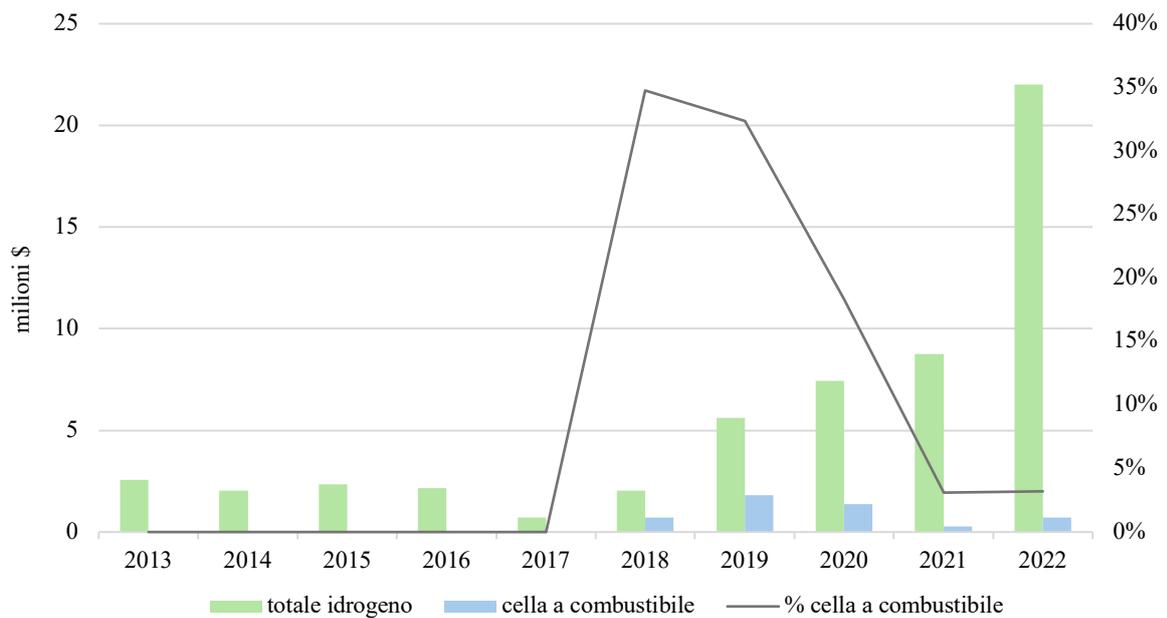


Figura 18. Spesa in R&S in idrogeno e cella a combustibile in Brasile (fonte: [IEA](#))

L'EBP ha sviluppato la piattaforma digitale Inova-e [47] per rendere accessibili i dati sugli investimenti brasiliani in ricerca, sviluppo e dimostrazione nel settore energetico.

In Figura 19 sono rappresentati i dati estrapolati dalla piattaforma sull'idrogeno e le celle a combustibile tra 2013 e 2023.

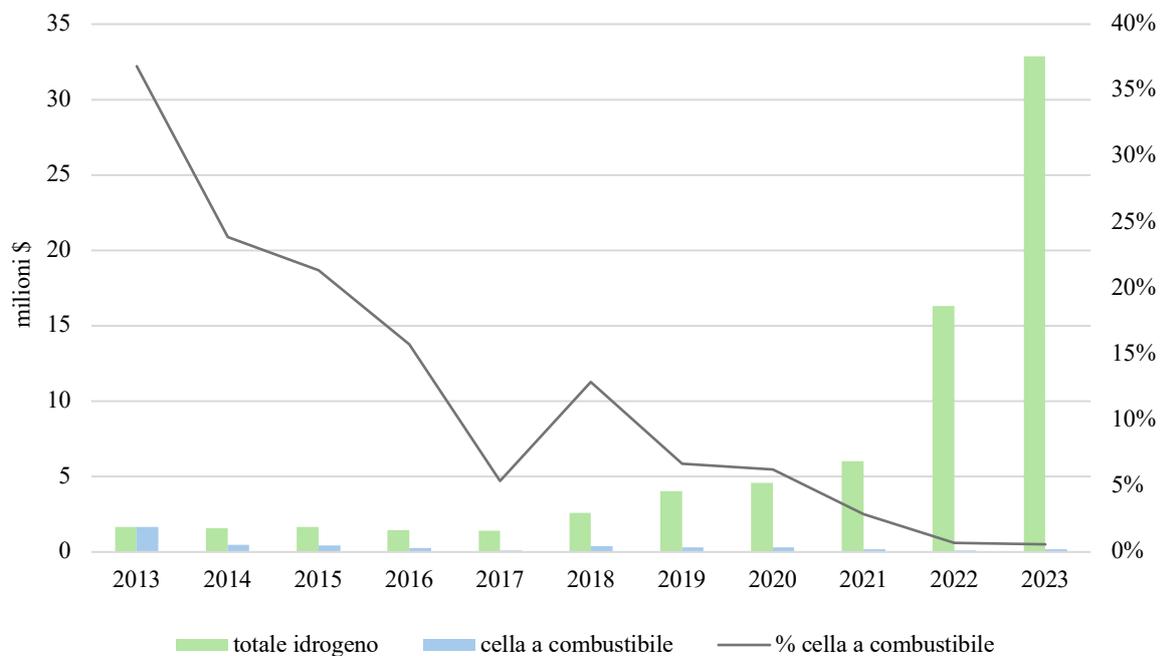


Figura 19. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile in Brasile (fonte: [Inova-e](#))

Nell'ultimo decennio, gli investimenti in idrogeno sono cresciuti, fino ad arrivare nel 2023 a circa 35 milioni di dollari, probabilmente grazie alle nuove iniziative governative per l'energia sostenibile e la decarbonizzazione. È importante notare come i fondi per le celle a combustibile siano diminuiti negli ultimi anni: dal 2022 sono meno dell'1% del totale.

Si noti che la piattaforma Inova-e utilizza come valuta il Real brasiliano: per questo motivo, è stato scelto un tasso di cambio standardizzato pari a 0,16 USD/Real brasiliano.

Il Brasile è stato a partire dal 2000 e lo è tuttora uno dei Paesi sudamericani maggiormente interessati al settore dell'idrogeno e, in misura minore, anche alle celle a combustibile. Il totale investito tra il 1999 e il 2018 è stimato in circa 36 milioni di dollari (circa 200 milioni di Real brasiliani). Nonostante, la cella a combustibile non rappresenti il focus principale, il Paese è molto impegnato nelle tematiche riguardanti l'idrogeno verde, allo scopo di decarbonizzare il settore dei trasporti [48]. Per questi motivi, per la prima volta nel 2020, il governo ha incluso nella sua strategia energetica l'idrogeno e le tecnologie annesse.

I dipartimenti governativi più coinvolti sono: il Ministero della Scienza, della Tecnologia e dell'Innovazione del Brasile (MCTI), l'Agenzia Nazionale per l'Energia Elettrica (ANEEL), l'Agenzia Nazionale per il Petrolio e il Fondo Nazionale per lo Sviluppo Scientifico e Tecnologico (FNDCT).

Attualmente, il governo vorrebbe aumentare la spesa in R&S per dare maggiore importanza al settore dell'idrogeno nel Paese, soprattutto per quanto riguarda i progetti dimostrativi e commerciali. Sempre in questa direzione, sono stati introdotti incentivi finanziari ed esenzioni fiscali lungo la catena dell'idrogeno verde [49].

Stati Uniti

Dal 2004 al 2014 i dati presenti in Figura 20 sono stati estrapolati dal Database dell'IEA, mentre dal 2015 a oggi il dataset è stato raccolto utilizzando le informazioni del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE), tramite i budget annuali [50]. Per questo motivo, i dati dal 2015 in poi mancano di completezza perché non tengono conto delle spese dei Dipartimenti dell'Agricoltura, della NASA e della Difesa degli Stati Uniti. Pertanto, in quel periodo, i numeri sono sottostimati, nonostante il DOE possa essere considerato il principale contribuente alla spesa energetica statunitense. È possibile notare una diminuzione importante delle spese in R&S in idrogeno già a partire dal 2012, con un dimezzamento netto.

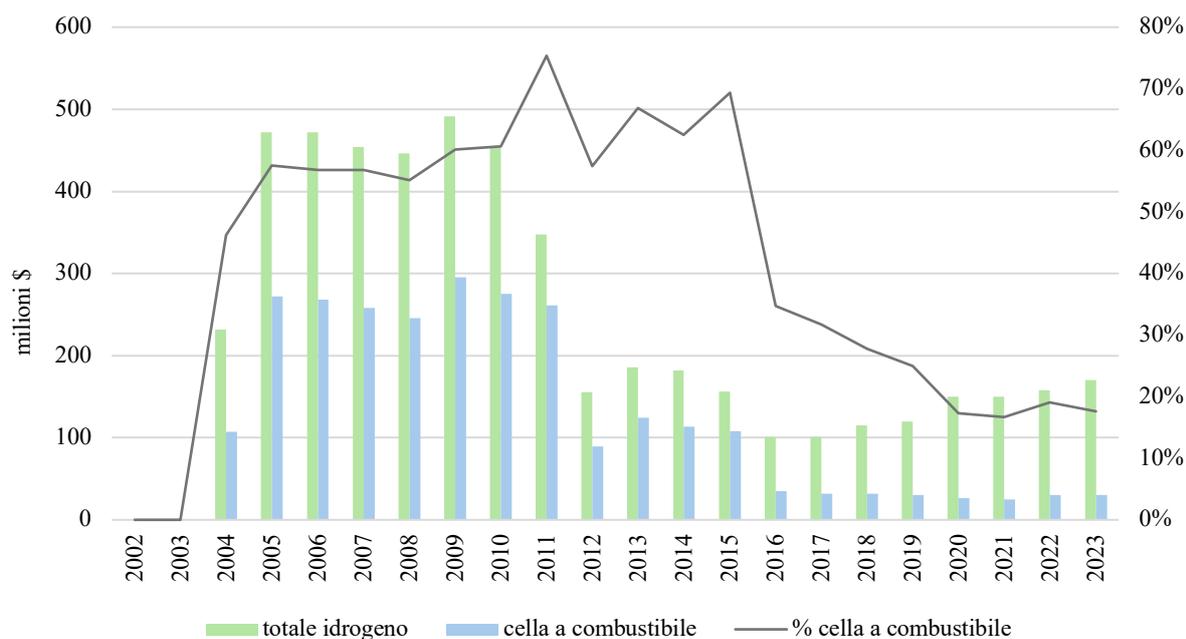


Figura 20. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile (fonte: [IEA](#) e [DOE](#))

Analizzando i dati disponibili, la prima cosa da notare è l'enorme cifra spesa nel primo decennio del 2000, con picchi di circa 500 milioni di dollari, con la fuel cell responsabile di circa la metà dell'importo. La situazione è cambiata pesantemente dal 2012 a oggi: le spese per la ricerca e lo sviluppo dell'idrogeno sono diminuite notevolmente, soprattutto per la tecnologia delle celle, tutto ciò tenendo anche conto della mancanza di dati precisi.

Sulla base delle informazioni ottenute dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, il sottoprogramma dedicato alla tecnologia delle celle a combustibile sostiene la ricerca e lo sviluppo per ridurre simultaneamente i costi, migliorare la durata, l'efficienza e le prestazioni delle celle a combustibile, tra cui la densità di potenza, il tempo di avviamento, la risposta transitoria e il funzionamento robusto. Le attività di ricerca e sviluppo si concentrano su materiali e componenti chiave che possono avere un impatto su una serie di applicazioni, tra cui l'alimentazione stazionaria, primaria e di riserva, le applicazioni on-road e off-road e l'accumulo di energia. Poiché le attuali celle a combustibile utilizzano come catalizzatori metalli costosi appartenenti al gruppo del platino (PGM), un obiettivo a lungo termine è quello di ridurre la quantità di essi, rispettando al contempo i requisiti di durata ed efficienza. I finanziamenti statunitensi per l'energia riguardano solitamente laboratori e università, oltre che aziende private. In molti casi i progetti finanziati sono condotti congiuntamente da organizzazioni pubbliche e private.

Un'analisi più dettagliata è possibile grazie al database AMR (Annual Merit Review) [51], contenente dati pubblici sui progetti finanziati dal governo USA.

La Figura 21 mostra i progetti finanziati dal 2012 al 2024. I dati contengono i progetti sull'idrogeno e sulle celle in corso in ciascun anno, condotti sia da enti pubblici che privati.

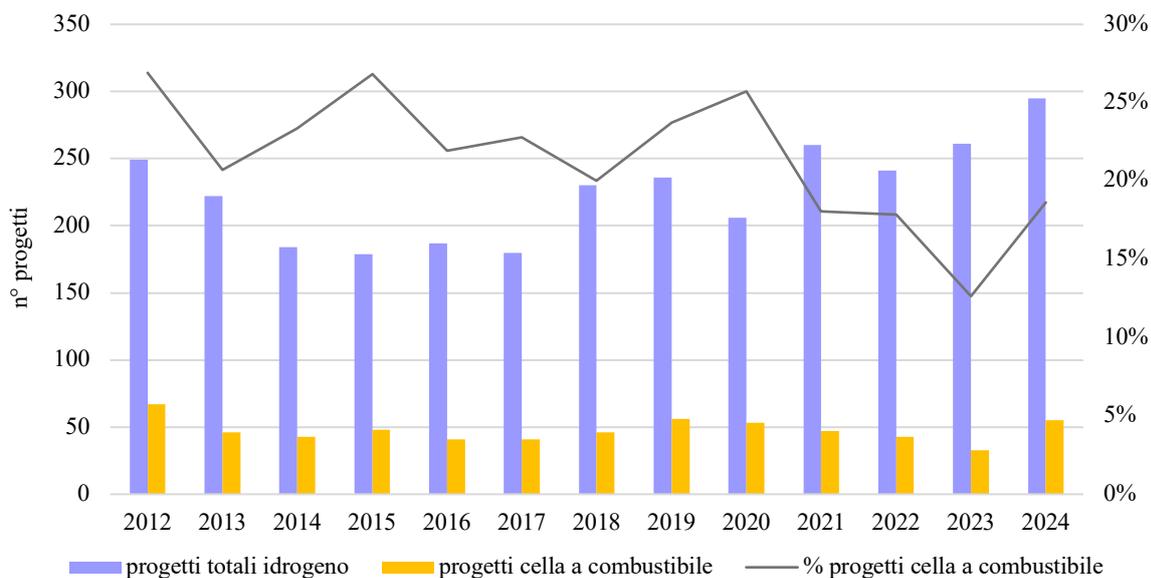


Figura 21. Progetti finanziati su idrogeno e cella a combustibile negli Stati Uniti (fonte: [AMR](#))

È possibile notare che dal 2012 a oggi la fuel cell è stata una tecnologia centrale nel programma statunitense sull'idrogeno. Già nel 2012, i progetti finanziati sulle celle rappresentavano circa il 27% del totale dei lavori commissionati a tema idrogeno. La percentuale di progetti in corso sulle celle a combustibile finanziati dal DOE ha sempre oscillato tra il 12% e il 28% nel corso degli anni considerati.

Un'altra analisi riguarda il numero dei progetti condotti da istituzioni pubbliche, includendo con tale termine laboratori nazionali, università e centri di ricerca. Dalla Figura 22 è possibile vedere la distribuzione dei progetti realizzati sia da enti privati che pubblici.

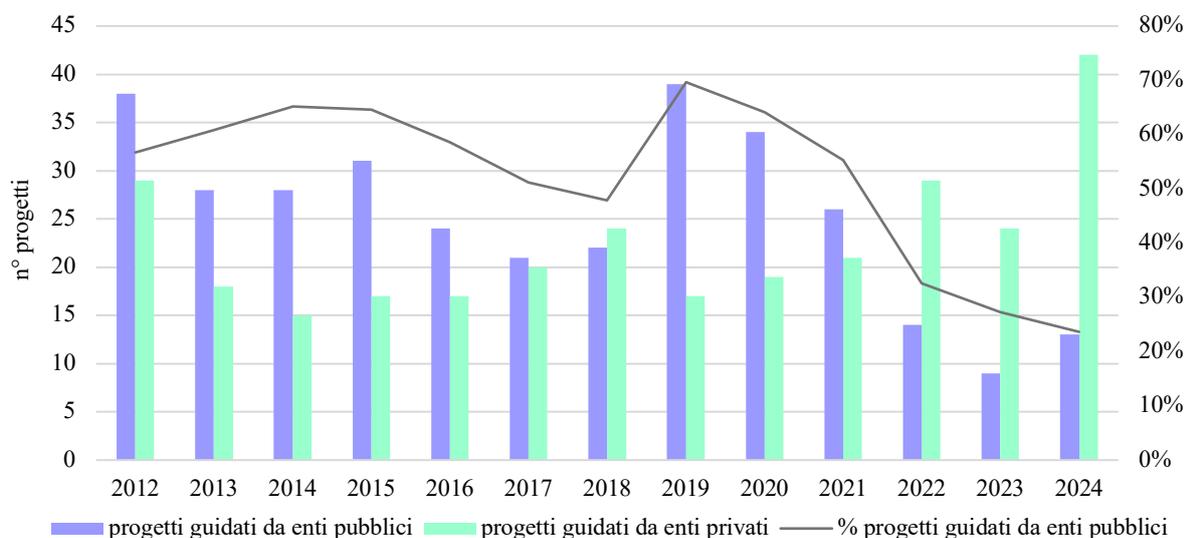


Figura 22. Progetti sulla cella a combustibile finanziati da enti pubblici e privati negli Stati Uniti (fonte: [AMR](#))

La linea indica invece la percentuale di organizzazioni pubbliche coinvolte nei progetti anno per anno rispetto al totale.

Nel grafico emerge chiaramente una tendenza: mentre i progetti condotti da enti pubblici diminuiscono nel corso degli anni, specialmente dal 2019 in poi, il numero di organizzazioni private coinvolte nei progetti finanziati cresce leggermente, con un grande picco nel 2024. La percentuale di organizzazioni pubbliche coinvolte passa dal 60% al 25% in 10 anni, con un ultimo picco nel 2020, arrivando al 60% di opere assegnate.

Ovviamente, la maggior parte di questi progetti ha avuto una doppia partecipazione, pubblica e privata. L'analisi ha preso in considerazione la natura dell'ente che ha richiesto i fondi, essendo essa quella responsabile della ripartizione degli stessi.

Danimarca

Dal 2004, il governo danese ha speso molti milioni in progetti per indagare e studiare il settore dell'idrogeno. Come si evince in Figura 23, è evidente come lo studio delle celle a combustibile sia stato cruciale in quegli anni: fino al 2010, le celle a combustibile hanno coperto il 90% del totale degli studi sull'idrogeno.

Da quel momento, la percentuale di investimenti in tale campo ha iniziato a scendere rapidamente, così come la spesa totale per l'idrogeno: i picchi più negativi sono stati toccati a partire dal 2019.



Figura 23. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Danimarca (fonte: IEA)

I principali contributori pubblici alla R&S in campo energetico sono l'Agenzia danese per l'energia, il Ministero dell'energia, dei servizi pubblici e del clima e il Ministero dell'istruzione superiore e della scienza. Soprattutto il primo, attraverso l'EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Program) [52], finanzia organizzazioni pubbliche e private, come università e centri di ricerca, per lo sviluppo e la dimostrazione di nuove tecnologie, compresi progetti sull'idrogeno e sulle celle a combustibile. Altri importanti fondi e programmi sono il Danish Innovation Fund e l'ELFORSK.

Analizzando la Galleria dei progetti dell'EUDP è stato ricavato la Figura 24, che mostra l'andamento del numero di fondi stanziati per le celle a combustibile da tale organizzazione tra 2014 e 2023. I lavori in corso sono finanziati per circa 6,80 milioni di dollari tramite sovvenzioni pubbliche nel periodo 2020-2024. Dal grafico è possibile notare che è avvenuta una forte diminuzione del numero di progetti relativi alle celle, dato confermato anche dal grafico precedente dell'IEA.

L'interesse si è spostato dalle celle a combustibile ad altri temi legati all'idrogeno, come la produzione, gli e-fuels e il miglioramento degli elettrolizzatori.

Si noti inoltre che c'è un salto temporale tra la ricezione dei fondi e la spesa effettiva: i fondi ottenuti in un anno saranno probabilmente distribuiti anche negli anni successivi.

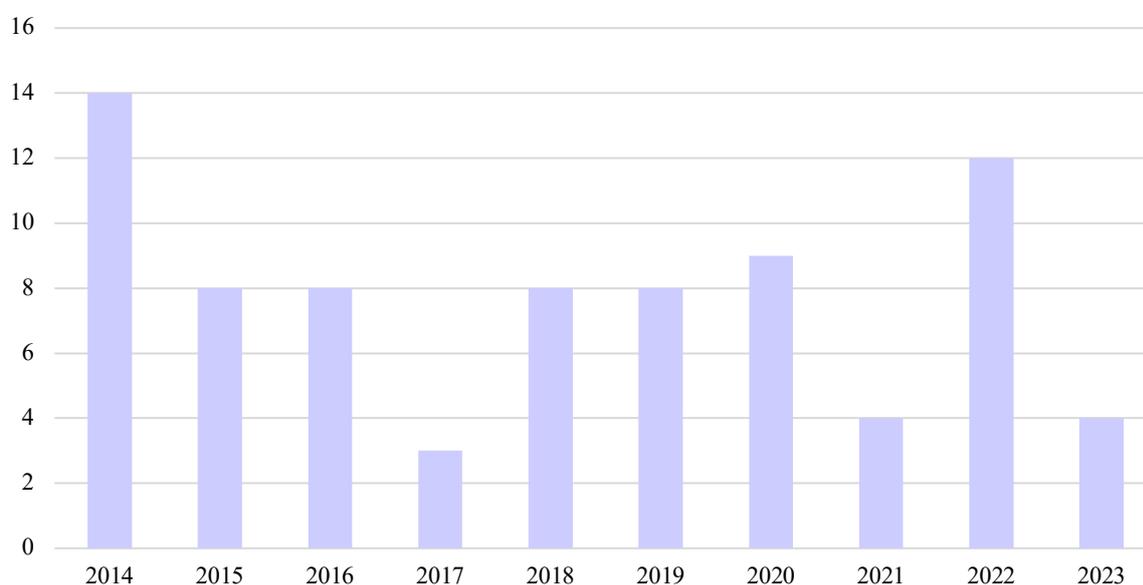


Figura 24. Numero di fondi stanziati per progetti relativi alle celle a combustibile in Danimarca dall'EUDP (fonte: [EUDP](#))

Francia

Dall'inizio del 2000 gli investimenti in R&S sull'idrogeno sono stati molto elevati in Francia: tra il 2005 e il 2008, come si vede nella Figura 25, i fondi per l'idrogeno hanno superato i 100 milioni di dollari all'anno, con un picco nel 2007. In particolare, in quel periodo il settore delle celle a combustibile ha coperto il 70% della spesa totale.

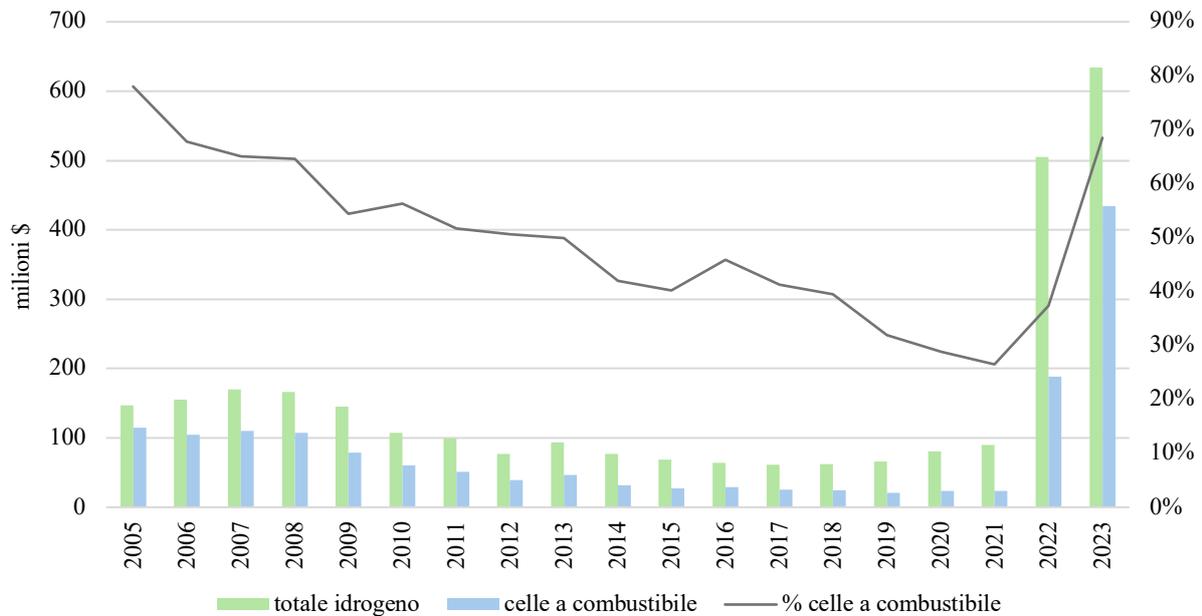


Figura 25. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Francia (fonte: IEA)

Tra il 2010 e il 2019 c'è stato un lento declino che si è concluso nel 2020, quando la spesa ha improvvisamente raggiunto un picco di oltre 500 milioni di dollari, anche se i fondi per le celle a combustibile hanno rappresentato solamente il 37% del totale. Nel 2023, quest'ultime sono tornate centrali nelle politiche energetiche francesi e il loro budget è arrivato a essere circa il 68% del totale. Si noti che i dipartimenti e territori d'oltremare di Guadalupa, Guyana, Martinica, Nuova Caledonia, Polinesia francese, Riunione e Saint-Pierre e Miquelon non sono stati inclusi.

La grande crescita dell'ultimo periodo è dovuta al piano energetico nazionale, che ha puntato molto sulle tecnologie dell'idrogeno. In linea con le sfide climatiche, la strategia nazionale per l'idrogeno fa parte del pacchetto speciale di stimolo economico da 100 miliardi di euro, di cui 30 miliardi per la transizione ecologica, presentato il 3 settembre 2020 dal governo francese [53].

I principali contributori alla R&S sull'energia in Francia sono 13 tra istituzioni scientifiche e tecniche, istituti industriali e commerciali, gruppi di interesse pubblico o programmi di finanziamento pubblico. Tra essi vi sono ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), ANR (Agence Nationale de la Recherche) e CNRS (Centre National de

la Recherche Scientifique). Data la numerosità di istituzioni coinvolte, è difficile comprendere tutti i progetti in corso dedicati a una specifica tecnologia in quanto essi sono finanziati da più agenzie governative. Nel periodo 2022-2023, l'ANR, National Research Agency, ha finanziato progetti sulle celle a combustibile con circa 8,9 milioni di dollari. Dal sito dell'ANR [54], è possibile ricavare informazioni sugli investimenti nella ricerca: la Figura 26 mostra quanti progetti relativi alla cella a combustibile sono stati finanziati negli ultimi dieci anni. Si noti che il grafico indica i progetti approvati in ciascun anno: ciò potrebbe significare che i fondi siano stati utilizzati anche negli anni seguenti allo stanziamento.

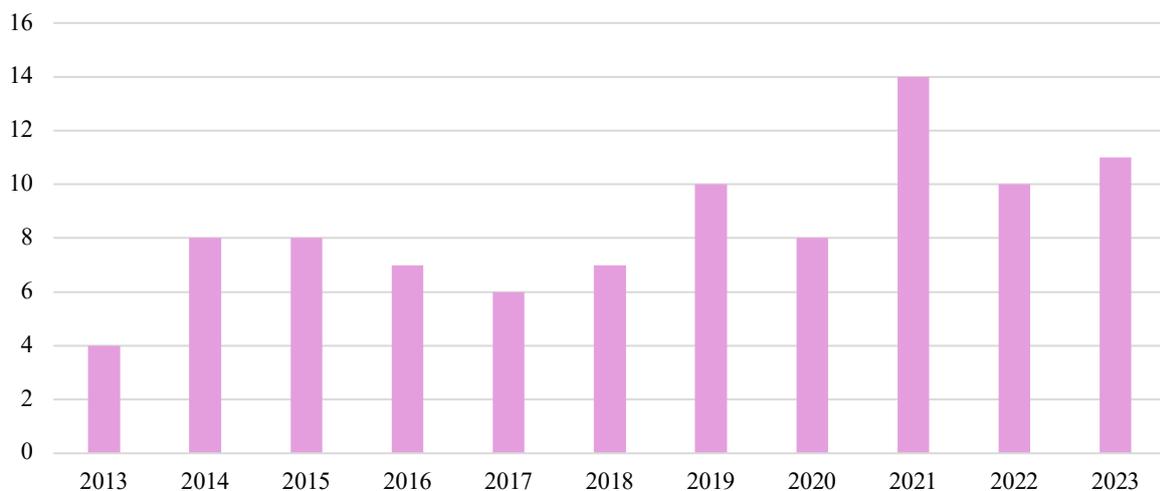


Figura 26. Numero di progetti finanziati relativi alle celle a combustibile dall'ANR in Francia (fonte: [ANR](#))

Italia

Purtroppo, le informazioni sulla spesa in R&S per l'idrogeno e le celle a combustibile in Italia presenti nel database dell'IEA sono frammentarie. Nella Figura 27 è possibile notare che nel primo decennio degli anni 2000 e fino al 2016, le spese in R&S sull'idrogeno sono state abbastanza rilevanti. La maggior parte di questi fondi è stata destinata alla tecnologia delle celle a combustibile, raggiungendo anche picchi vicini al 100% del totale. Successivamente, l'interesse nella ricerca in tale campo è improvvisamente diminuito e non si è più ripreso del tutto, con tassi di spesa significativamente più bassi rispetto al passato e nettamente inferiori al 50%. Negli ultimi cinque anni, nonostante la mancanza di informazioni dell'IEA, la spesa totale per l'idrogeno è aumentata di nuovo in modo esponenziale, anche se ciò non ha interessato le fuel cells.

Un'altra fonte di informazioni utilizzata è stato il sito del Dipartimento dell'Energia e il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica [55].

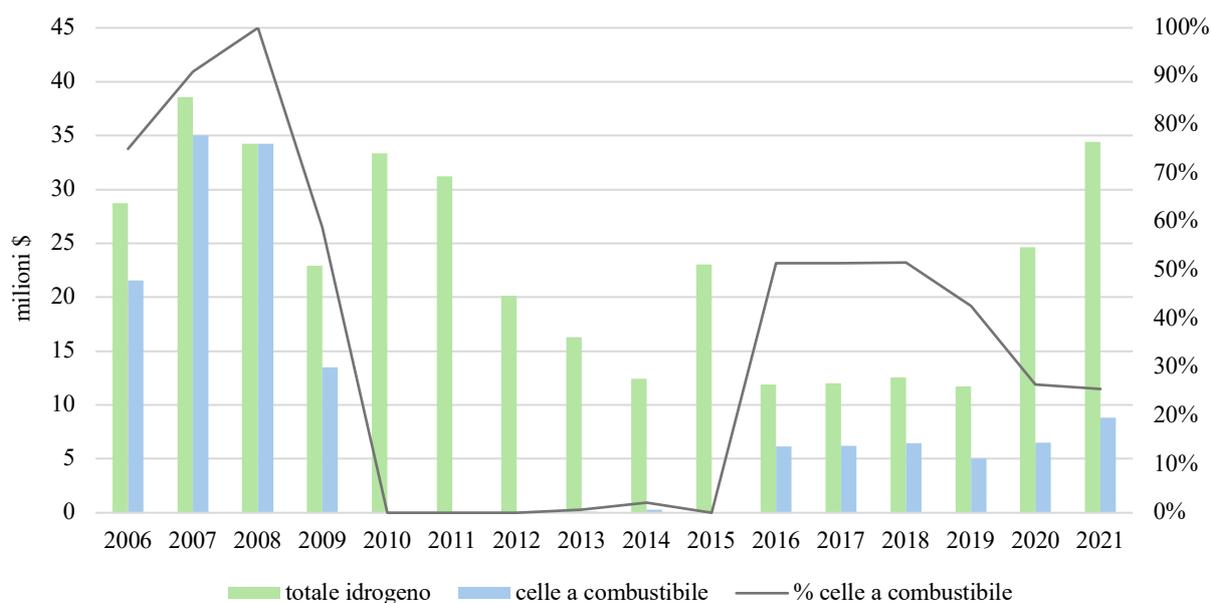


Figura 27. Spese di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Italia (fonte: [IEA](#))

Uno dei più importanti programmi è stato firmato nel 2022 con l'ENEA (Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile) [56], per attività di ricerca e sviluppo sull'idrogeno, anche con fondi del PNRR. Il programma prevede un fondo di circa centodieci milioni di euro e durerà fino alla fine 2025 [57]. L'accordo prevede quattro aree tematiche: produzione di idrogeno verde e pulito, tecnologie innovative per lo stoccaggio e il trasporto dell'idrogeno e la sua conversione in derivati e carburanti elettronici, celle a combustibile per applicazioni stazionarie e di mobilità e sistemi di gestione integrati intelligenti per migliorare l'affidabilità delle infrastrutture basate sull'idrogeno.

Un secondo intervento riguarda invece la pubblicazione di due bandi per la ricerca e lo sviluppo sull'idrogeno: uno da 20 milioni di euro per centri di ricerca e università, un altro da 30 milioni per soggetti privati.

L'ENEA, con 75 milioni di dollari stanziati, sta già lavorando su alcuni temi legati alle celle a combustibile: l'affinamento dei materiali degli elettrodi e la riduzione dei costi dei componenti delle celle, il processo di fabbricazione e la sperimentazione di monocelle e stack.

Svizzera

Il dataset estrapolato dall'IEA in Figura 28 mostra che la Svizzera dimostra il suo interesse per il settore dell'idrogeno da almeno due decenni. Il governo ha iniziato a spendere nelle tecnologie dell'idrogeno a partire dal 2004: soprattutto all'inizio, ha dedicato ingenti somme alle celle a combustibile. Infatti, dal 2004 al 2007, la percentuale di finanziamenti per le celle a combustibile è stata superiore al 70%. Negli anni successivi, l'importo totale della spesa è

cresciuto leggermente e contemporaneamente la spesa relativa alla tecnologia delle celle è leggermente diminuita.

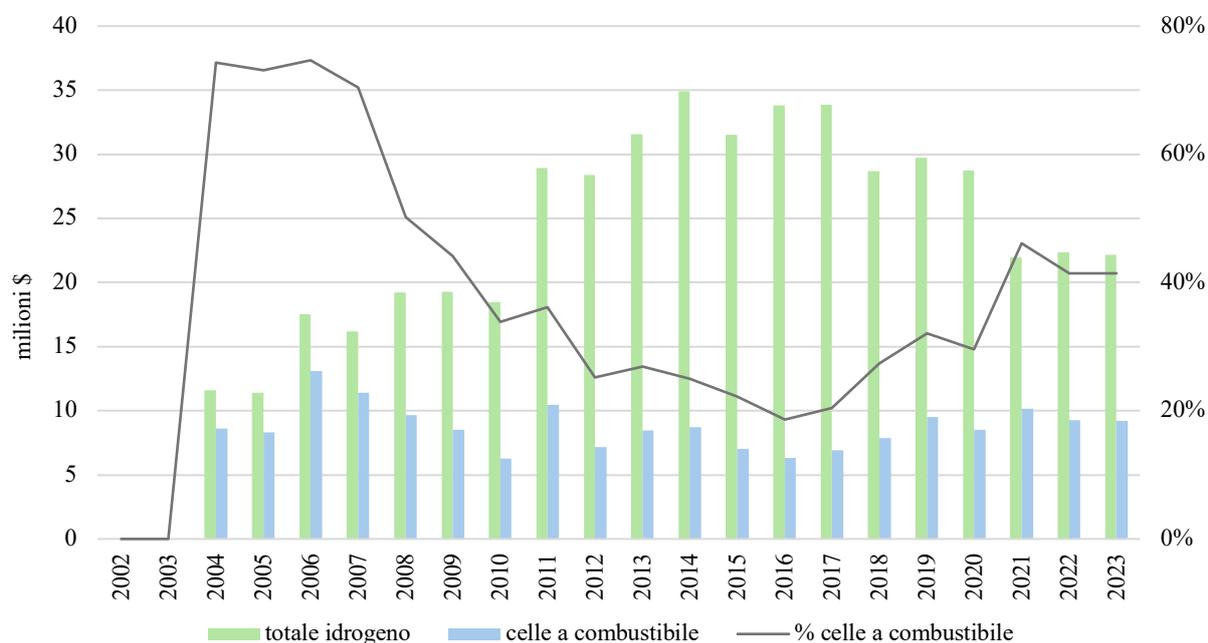


Figura 28. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile (fonte: IEA)

I principali contributori della Svizzera ai programmi di R&S sull'energia sono l'Ufficio Federale dell'Energia, l'Energy Research & Cleantech attraverso Innosuisse, l'Ufficio Federale dell'Energia UFE e il Fondo Nazionale Svizzero per la Ricerca Scientifica SNSF. Sul sito "Hydrogen and Fuel Cells in Switzerland" [58] è possibile ricavare maggiori informazioni. Attualmente, nel Paese sono in corso 83 progetti nel campo della ricerca sull'idrogeno e sulle celle a combustibile in diverse aree tecnologiche: 13 progetti, cioè il 16%, si riferiscono esclusivamente alla ricerca sulle celle a combustibile, in particolare sulle celle PEM e SOFC. La maggior parte dei fondi pubblici è utilizzata da quattro enti: l'Istituto Paul Scherrer PSI (parte dell'ETH), il Politecnico di Losanna EPFL, il Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca EMPA e il Politecnico di Zurigo ETHZ.

La Figura 29 mostra i progetti attivati nel corso degli anni. Il totale è di 240 progetti dal 2002 al 2024, di cui 206 riguardanti la ricerca e lo sviluppo, 19 le fasi pilota e dimostrative e 15 aree non specificate.

Si noti che il portale considera anche gli aiuti dell'Unione Europea (ad esempio il fondo Horizon).

Gli enti statali coinvolti nel settore delle celle a combustibile sono circa 15, mentre quelli privati sono 28. Questo sbilanciamento verso le imprese private segnala che il settore delle celle a combustibile si trova già in una fase avanzata.

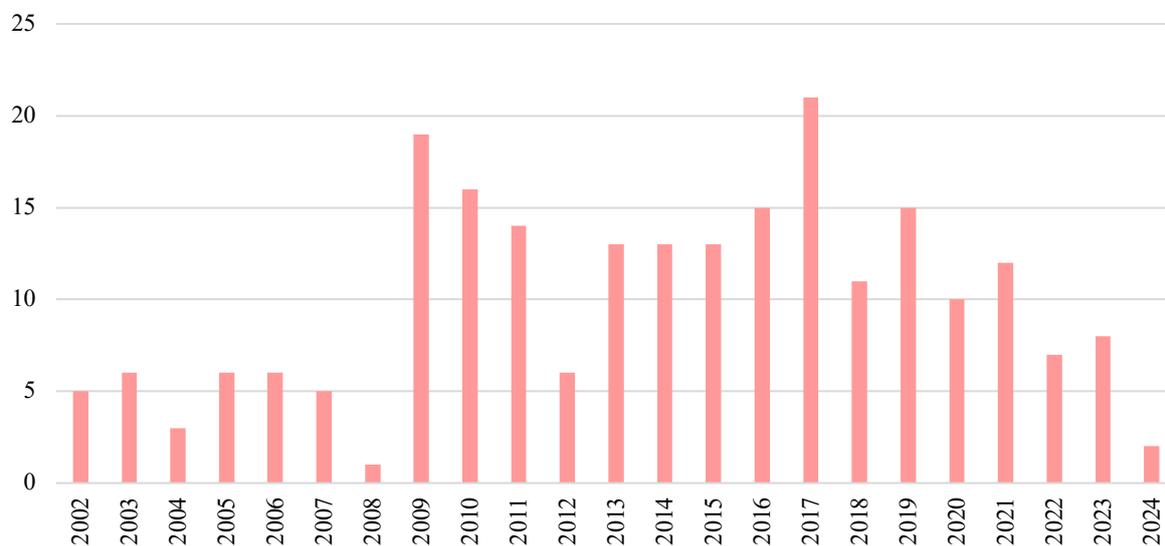


Figura 29. Numero di progetti sulla cella a combustibile finanziati in Svizzera (fonte: [Hydrogen and Fuel Cells in Switzerland](#))

Norvegia

La Figura 30 mostra come la Norvegia, negli ultimi due decenni, ha avuto una spesa in R&S sull'idrogeno abbastanza contenuta rispetto agli altri Paesi analizzati.

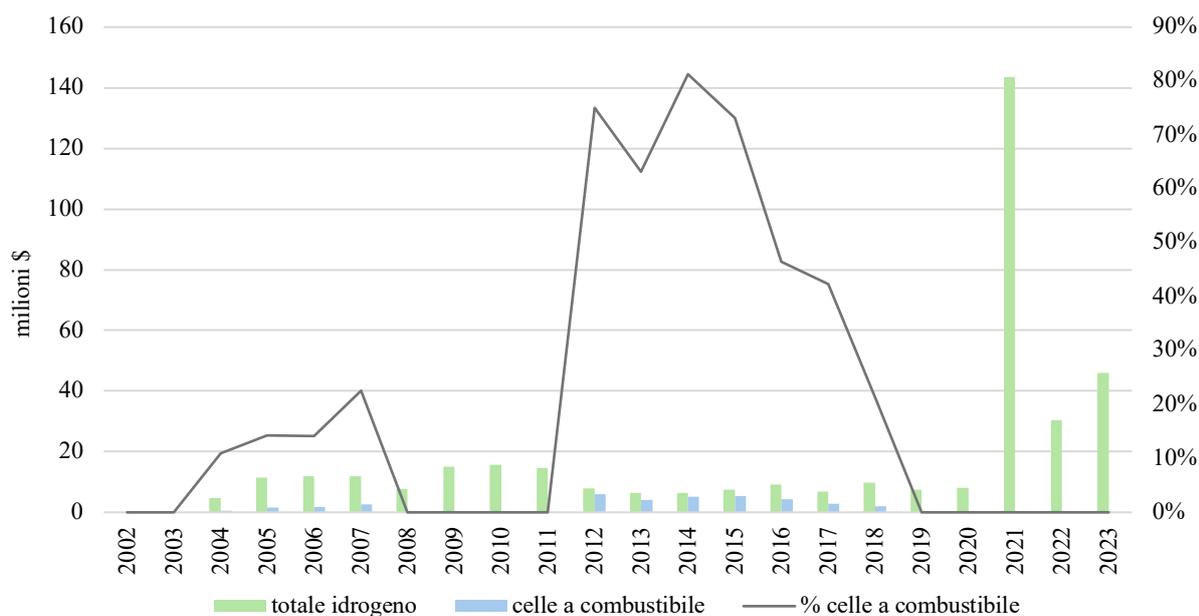


Figura 30. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Norvegia (fonte: [IEA](#))

Per numerosi anni, la spesa totale è stata inferiore ai 20 milioni di dollari, finché nel 2021 è stato raggiunto il picco nel 2021 con più di 140 milioni di dollari.

I principali istituti di ricerca norvegesi, solitamente legati al mondo universitario, sono esperti in celle a combustibile ad alta e bassa temperatura ed elettrolizzatori, con particolare attenzione alle ceramiche a conduzione protonica. Attraverso il Consiglio di Ricerca norvegese, uno dei principali finanziatori della R&S in ambito energia in Norvegia, le autorità hanno finanziato l'idrogeno, le celle a combustibile e il processo di elettrolisi dell'acqua per un valore di circa 550 milioni di corone norvegesi, circa 50,75 milioni di dollari tra il 2009 e il 2019 [59].

A partire dal 2019 l'ammontare di spesa dedicato alla fuel cell è diventato pari a 0, secondo l'IEA, nonostante nello stesso anno il Paese sia tornato fortemente a investire sull'idrogeno. In realtà, utilizzando altre fonti, come la banca dati dei progetti del Research Council of Norway [60], è stato possibile ricavare ulteriori informazioni sui progetti finanziati dal 2009 a oggi. Il totale è di 856 progetti, suddivisi in 15 anni. Si noti che il dataset analizza i progetti in corso, quindi in presenza di un progetto pluriennale, esso compare per ogni anno di attività fino alla conclusione dello stesso.

Dalla Figura 31 è possibile notare quanto il settore pubblico risulti ancora importante per l'avanzamento tecnologico sulle tecnologie dell'idrogeno. Infatti, più della metà dei progetti finanziati, sono condotti da istituzioni pubbliche, 312, e università, 311.

La ricerca accademica, condotta nelle università, è ancora significativa, riuscendo a catturare finanziamenti per circa 205 progetti dal 2009 al 2019.

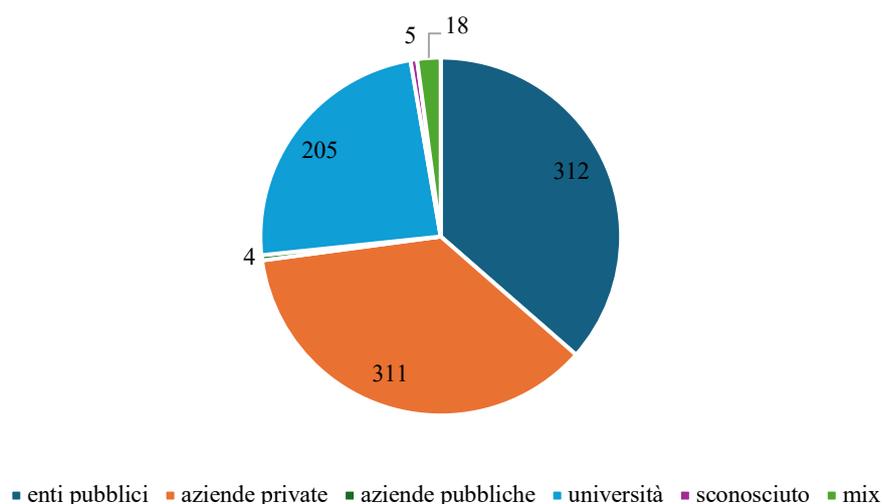


Figura 31. Partizione degli enti finanziatori dei progetti sulla cella a combustibile in Norvegia (fonte: [The Research Council of Norway](#))

Germania

I dati dell'IEA, in Figura 32, mostrano come a partire dagli anni 2000 il governo tedesco ha investito somme abbastanza significative nell'idrogeno e soprattutto nella tecnologia delle celle a combustibile. Nel periodo 2003-2015, la spesa totale è rimasta pressoché costante, nell'ordine di circa 30-40 milioni di dollari. Tale spesa ha riguardato per circa il 95% la ricerca e sviluppo nelle celle a combustibile.

Dopo questi anni, tuttavia, si è registrata una leggera diminuzione degli investimenti in questo campo di ricerca. Questa situazione è terminata nel 2019, quando le istituzioni governative tedesche sono tornate a finanziare in modo significativo il settore dell'idrogeno, fino a raggiungere un picco di 443 milioni nel 2023. Tuttavia, a questo non è seguito automaticamente un aumento della spesa per la tecnologia delle celle a combustibile, che negli ultimi anni si è attestata intorno al 5-15% della spesa totale.

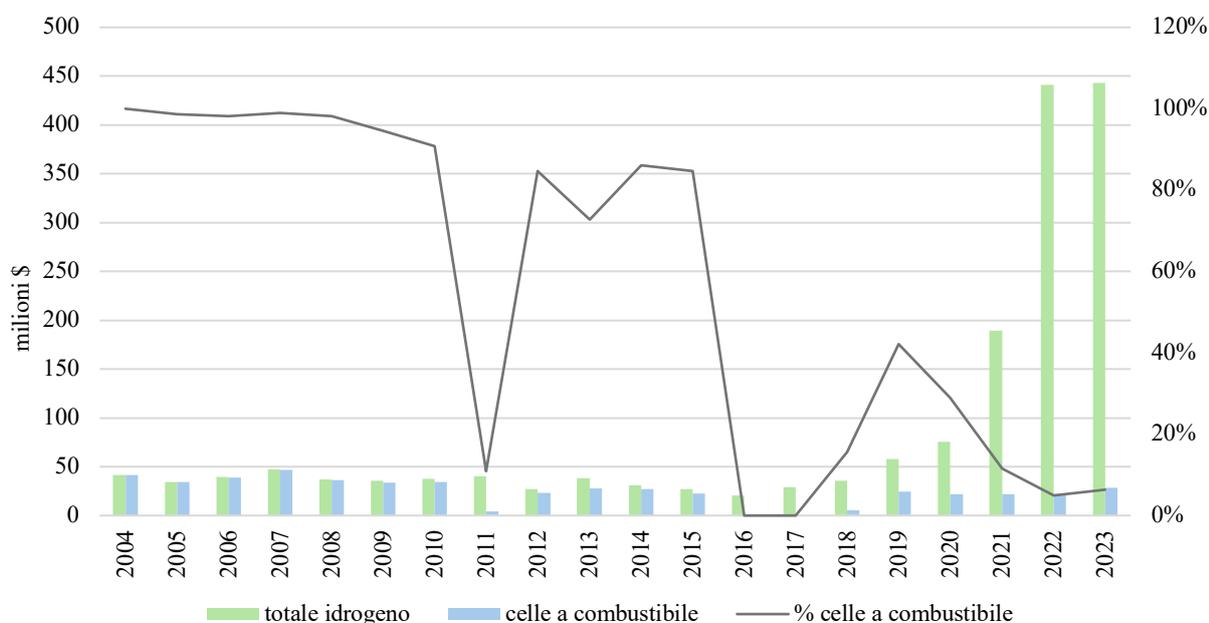


Figura 32. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Germania (fonte: [IEA](#))

In Germania, i principali finanziamenti pubblici ai progetti di R&S in campo energetico sono erogati dal Ministero Federale dell'Economia e dell'Energia, dal Ministero Federale dell'Istruzione e della Ricerca, dal Ministero Federale dell'Alimentazione e dell'Agricoltura e dal settimo Programma di Ricerca Energetica del Governo Federale.

Il governo federale tedesco ha sviluppato una strategia nazionale sull'idrogeno e le sue tecnologie negli scorsi anni [61]. La strategia contiene numerosi pilastri chiave allo scopo di rendere il Paese, fortemente energivoro a causa della prevalenza dell'industria metalmeccanica, a zero emissioni entro il 2045. Tra i punti principali di tale strategia ci sono lo sviluppo dell'idrogeno verde, anziché quello grigio, la creazione di un mercato interno e

una capacità produttiva adeguata, lo sviluppo di una normativa per permettere l'espansione delle infrastrutture e infine il rafforzamento della competitività delle aziende mediante finanziamenti mirati alla ricerca e allo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno.

Tra il 2020 e il 2023 sono stati spesi 310 milioni di euro nell'ambito del Fondo per l'Energia e il Clima, destinati per lo più alla ricerca di base orientata all'idrogeno verde e alle celle a combustibile, con promessa di rinnovare il pacchetto di fondi di altri 200 milioni di euro nei prossimi anni.

Attraverso il Programma nazionale di Innovazione sulle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile lo Stato tedesco ha promesso di investire circa 1,4 miliardi di euro come aiuto allo sviluppo delle tecnologie tra il 2016 e il 2026.

Dato lo stadio avanzato della tecnologia delle celle a combustibile, l'obiettivo del governo è quello di rafforzare la propria base di conoscenze in questo settore negli anni futuri attraverso alcune azioni: tra le principali aree di interesse della ricerca condotta negli scorsi spiccano il miglioramento dei costi e delle prestazioni dei componenti così da permettere il raggiungimento di economie di scala e di scopo che aiutino le tecnologie a scalare il mercato, reggendo la competizione delle altre alternative.

Unione Europea

Da diversi anni l'Unione Europea investe nel settore dell'idrogeno e delle celle combustibile. I programmi principali sono l'Horizon 2020, l'Horizon Europe e l'Innovation Fund [62].

L'ultimo rapporto dell'Hydrogen Europe [63] sottolinea che il settore delle celle a combustibile ha dominato in modo preponderante gli investimenti nell'ultimo decennio nell'Unione Europea. L'Horizon Europe, attivo dal 2021 e fino al 2027, è il principale programma di finanziamento settennale dell'UE per la ricerca e l'innovazione: la sua prima versione si chiamava Horizon 2020, terminato appunto nel 2020.

I temi dell'idrogeno pulito e delle celle a combustibile sono trattati specificamente nel cluster 5, riguardante il clima, l'energia e la mobilità. Come si evince dalla Figura 33, nel 2022 la spesa europea è aumentata in maniera esponenziale, raggiungendo un picco di 1297 milioni di dollari, di cui solo il 3.2%, pari a 41 milioni, è dichiarato disponibile per le celle a combustibile.

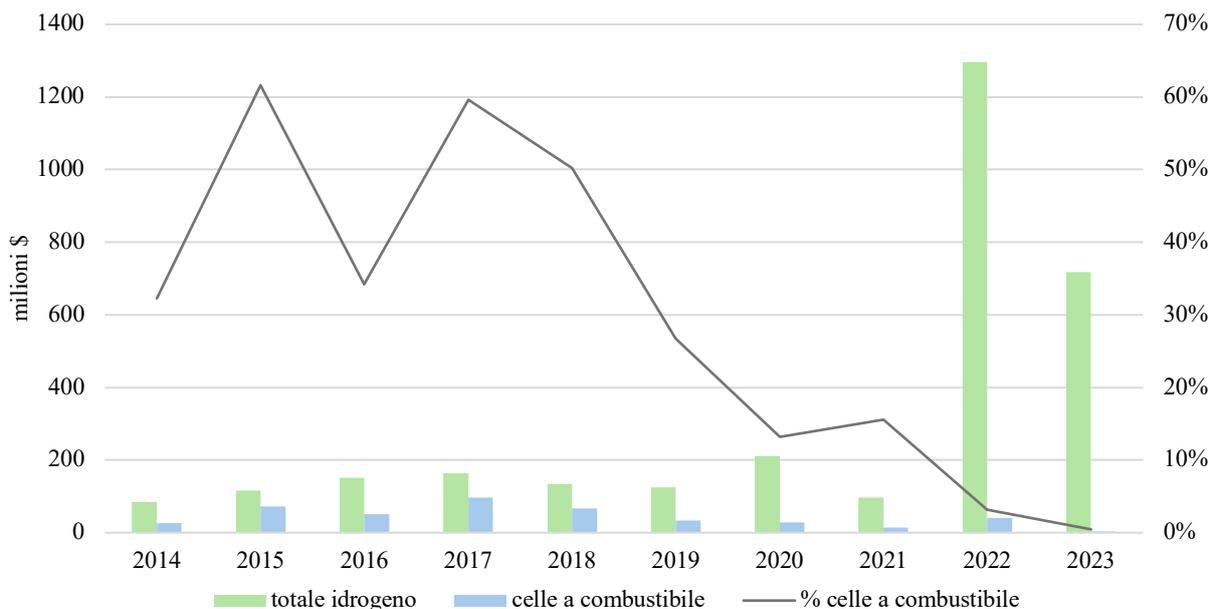


Figura 33. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Unione Europea (fonte: [IEA](#))

Utilizzando il Portale dei finanziamenti e degli appalti dell'UE [64], è possibile vedere i progetti finanziati dalla Commissione Europea in ambito energetico. I progetti finanziati sulle celle a combustibile dal 2014 a oggi sono 56: 39 durante il primo periodo Horizon (2014-2020) e 15 durante il secondo periodo Horizon (2021-2027) e 2 nell'ambito dell'Innovation Fund.

In Figura 34 è possibile vedere la distribuzione dei progetti finanziati dall'UE tra i diversi Stati relativi alle celle a combustibile. Si noti che il Paese nel grafico rappresenta il paese coordinatore del progetto, anche se molte volte più Paesi sono coinvolti nei progetti. È interessante notare quanti progetti sono stati assegnati a Spagna e Regno Unito.

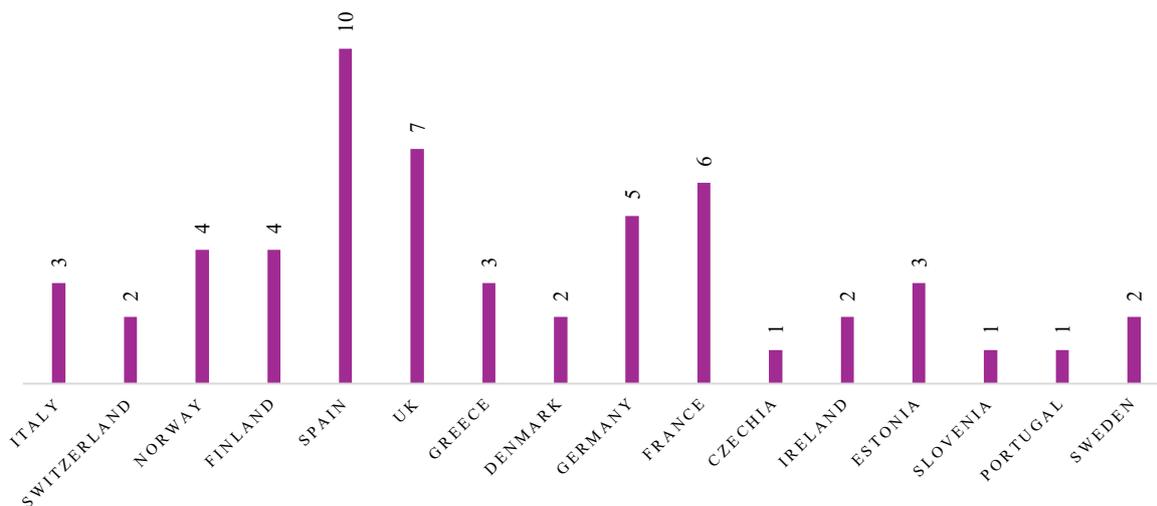


Figura 34. Distribuzione dei progetti finanziati tra i Paesi dell'UE sulle celle a combustibile (fonte: [EU Funding & Tenders Portal](#))

I programmi e i fondi UE presentati sopra fanno tutti parte dell'EU Hydrogen Strategy [65], parte di un più ampio piano energetico europeo sviluppato a partire dal 2020, in seguito allo scoppio della pandemia COVID 19. La maggior parte dei programmi UE è finanziata da REPowerEU, attraverso i programmi elencati precedentemente. Lo scopo dell'Unione è quello di porre fine alla sua dipendenza dai combustibili fossili russi diversificando le forniture e accelerando la transizione verso l'energia pulita.

I cinque punti chiave della strategia UE sull'idrogeno sono: il sostegno agli investimenti, il sostegno alla produzione e alla domanda, la creazione di un mercato e di un'infrastruttura per l'idrogeno, la ricerca e la cooperazione internazionale.

Giappone

Il governo giapponese è un importante contributore dello studio dell'idrogeno e delle celle a combustibile da parecchi decenni. Appare infatti chiaro che il Giappone ha investito in questi temi già molto prima degli anni 2000, anche se i dati sono disponibili solamente dal 2004.

La Figura 35 può essere suddivisa in tre parti:

- 2004 – 2009: gli investimenti medi annuali nel settore erano superiori a 100 milioni di USD. La percentuale di fondi per i progetti sulle celle a combustibile è aumentata, dal 40% nel 2004 a oltre il 70% nel 2009;
- 2010 – 2015: gli investimenti medi annuali nel settore dell'idrogeno ha iniziato a scendere, pur rimanendo vicina ai 100 milioni di USD. La percentuale di spesa dedicata alla tecnologia delle celle a combustibile ha iniziato a diminuire lentamente, dal 70% nel 2010 al 43% nel 2015;
- 2015 – 2023: gli investimenti medi annuali per l'idrogeno hanno ripreso a crescere, raggiungendo il picco di 242 milioni nel 2020. Allo stesso tempo, la spesa per le celle a combustibile ha continuato la sua lenta discesa fino all'0,2% del 2022.

I principali contributori ai programmi di ricerca e sviluppo energetico in Giappone sono il Ministero dell'economia, del commercio e dell'industria (METI), il Ministero dell'ambiente (MOE) e il Ministero dell'istruzione, della cultura, dello sport, della scienza e della tecnologia (MEXT).



Figura 35. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Giappone (fonte: IEA)

Il Giappone è un paese con una lunga storia legata al mondo dell'idrogeno e delle celle a combustibile: nel corso degli anni ha implementato diversi programmi energetici.

Per recuperare il distacco con gli USA, negli anni '70 il governo giapponese ha iniziato a lanciare molte politiche energetiche per cercare di ridurre la dipendenza dalle fonti fossili.

Fondamentale è stata la Legge sulla Scienza e la Tecnologia [66], che incoraggiava la collaborazione tra industria e mondo accademico nella ricerca e sviluppo. In tal modo, negli anni sono stati avviati parecchi lavori sulle celle a combustibile, come il Sunshine Project nel 1972, che è durato circa 30 anni. Le stime giapponesi prevedevano l'introduzione della tecnologia sul mercato nel periodo 2005-2010, seguita da una massiccia commercializzazione nel periodo 2010-2020. Ciò solamente in parte è avvenuto: è evidente al giorno d'oggi che la tecnologia è arrivata sul mercato, ma la sua diffusione non è ancora iniziata.

Nel 2017, il Giappone ha creato la prima strategia nazionale sull'idrogeno al mondo, chiamata Basic Hydrogen Strategy, mirata a creare una "società a idrogeno". Il governo ha elevato l'idrogeno e le tecnologie annesse a uno dei perni del proprio piano energetico, permettendo così la realizzazione di una filiera industriale matura.

Il Giappone ha pianificato e sviluppato la tecnologia per molto tempo e ha raggiunto numerosi traguardi, e questi progressi possono essere attribuiti ai suoi continui investimenti. Ciò è testimoniato dal fatto che le prime case automobilistiche a introdurre sul mercato le FCEV sono state due aziende giapponesi, la Toyota, con la Toyota Mirai, e la Honda, con la Honda Clarity Fuel Cell, rispettivamente nel 2015 e 2016 [67].

Sud Corea

La Corea del Sud è stata ed è tuttora insieme al Giappone, la nazione che negli ultimi due decenni ha mostrato maggiore interesse per le tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile.

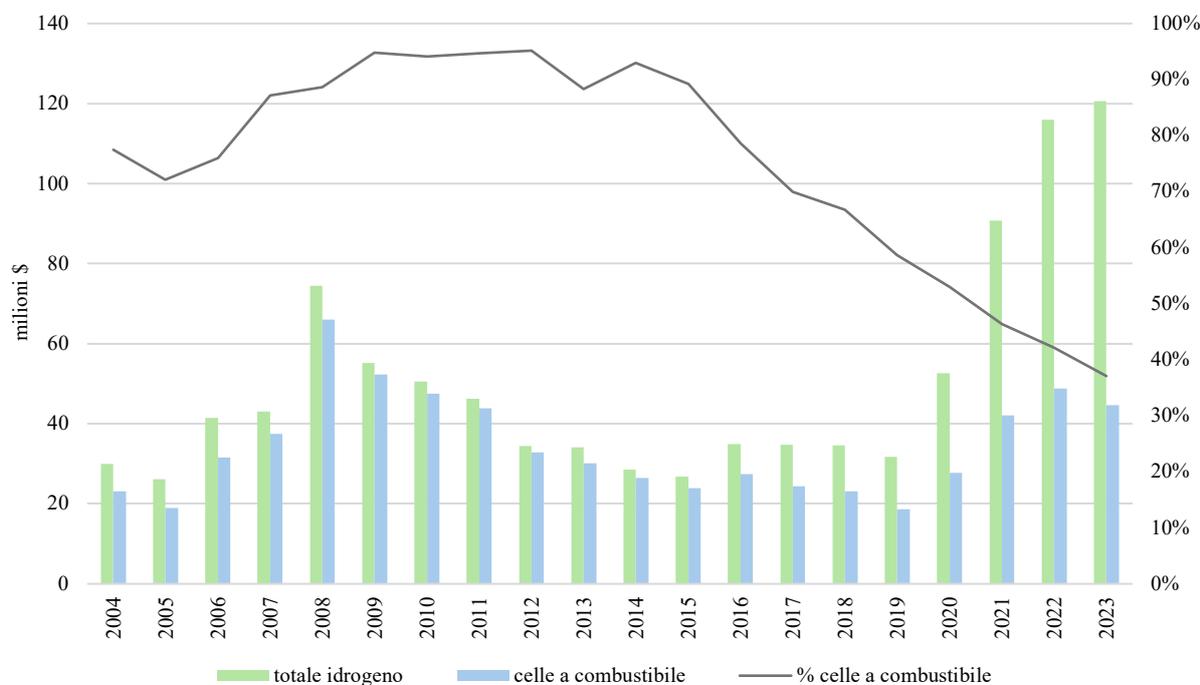


Figura 36. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Sud Corea (fonte: IEA)

Osservando la Figura 36, è possibile notare come la spesa per l'idrogeno fosse già elevata 20 anni fa: quasi tutti i fondi dal 2003 al 2015 sono stati destinati alla tecnologia delle celle a combustibile, al punto che per molti anni la percentuale di investimenti ha superato il 90%. Dal 2015 in poi, si può notare come il totale speso per i progetti sulle celle a combustibile abbia iniziato a diminuire. Allo stesso tempo, il governo coreano ha continuato a investire ingenti somme nelle tecnologie a idrogeno, arrivando a 120 milioni di dollari nel 2023. Tuttavia, la percentuale di denaro dedicata alla R&S sulle celle a combustibile ha continuato a calare fino a raggiungere nel 2023 un valore pari al 35% del totale.

I più importanti contributori ai programmi di R&S sull'energia in Corea del Sud sono stati e sono tuttora il Ministero del Commercio, dell'Industria e dell'Energia (MOTIE) e il Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP).

Da tre decenni, il governo coreano ha condotto programmi di ricerca e sviluppo sulle celle a combustibile, allo scopo di creare infrastrutture, legislazioni e sovvenzioni per la produzione di massa delle cell, in particolare per il settore automobilistico.

Il National R&D Program, o NRDP, è stata ed è ancora una politica scientifica e tecnologica per sostenere la ricerca collaborativa sui FCEVs tra grandi aziende, piccole e medie imprese (PMI), istituti di ricerca e università, con l'obiettivo concreto di migliorare le fuel cells dal punto di vista prestazionale e dei costi. Dal 1988, la spesa totale per il sostegno delle tecnologie a idrogeno è approssimabile a circa 743 milioni di dollari, includendo il budget programmato fino al 2026 [68].

La Corea ha puntato molto su questa tecnologia soprattutto per l'implementazione nel settore automobilistico, piuttosto che per gli usi stazionari.

Cina

Nel database dell'IEA, la Cina non compare in quanto non è un membro dell'organizzazione. Per questo motivo, non è possibile costruire la sequenza puntuale dei finanziamenti pubblici per l'idrogeno e le celle a combustibile. A ciò si aggiunge la difficoltà di reperire informazioni dai canali ufficiali del governo cinese.

Attraverso l'analisi del report "Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China" [69], è stato possibile comprendere la strategia energetica cinese in merito all'idrogeno, la cui spesa è stata rappresentata in Figura 37.

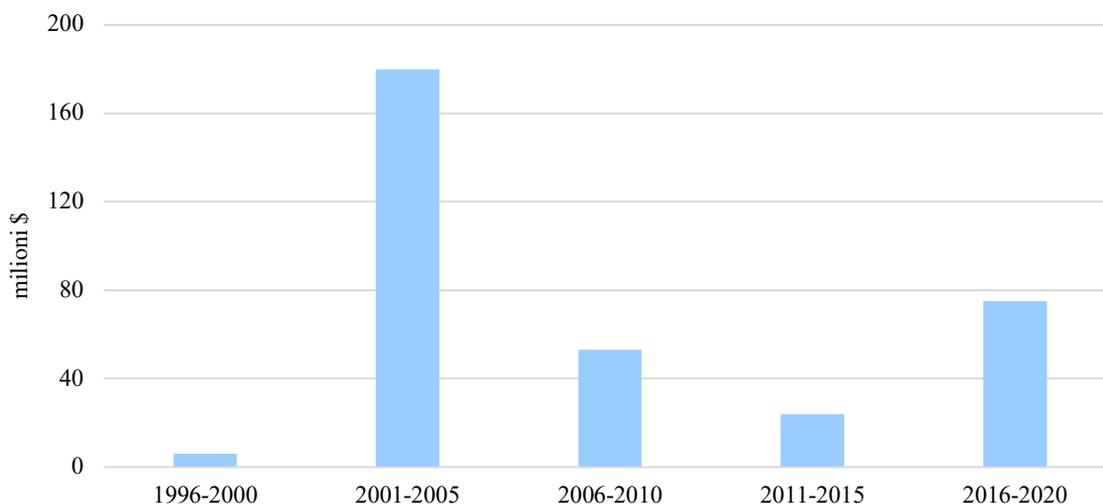


Figura 37. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Cina (fonte: IEA)

Nel 1990, alcuni istituti cinesi, come l'Istituto di Chimica di Changchun e l'Università di Tsinghua, hanno cominciato a lavorare allo sviluppo delle celle a combustibile con gli aiuti economici del governo di Pechino. Le prime informazioni disponibili sugli stanziamenti di fondi risalgono al 1991, anche se i primi dati certi risalgono al 1996, quando il governo ha stanziato un fondo di 40 milioni di yuan, pari a 6 milioni di dollari per la ricerca sulle PEMFC

e sui sistemi di celle a combustibile. Il primo programma ufficiale dedicato all'energia è stato avviato nel 2001 con il nome “863 Program”, con cui sono stati stanziati 1.200 milioni di yuan, circa 180 milioni di dollari, per il settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile. Questo programma è proseguito nel periodo 2006-2010 con l'integrazione di un ulteriore programma, detto “973 Program” per la ricerca sulla produzione di idrogeno, sullo stoccaggio dell'idrogeno e sui materiali dei moduli per celle a combustibile, con un budget di 350 milioni di CNY, circa 53 milioni di dollari.

Tutti questi lavori sono proseguiti nel periodo 2011-2015 e 2016-2020, con un'importante attenzione alla tecnologia fuel cell per sviluppare i primi veicoli e applicazioni stazionarie. Ciò che emerge da questi dati è il ruolo cruciale che il Paese asiatico ha conferito all'idrogeno e alle tecnologie annesse nel corso degli scorsi tre decenni.

Nel marzo 2022, la Commissione nazionale per lo sviluppo ha pubblicato un piano a lungo termine per l'industria energetica per il periodo 2021-2035. Si tratta dunque di un proseguimento della propria strategia energetica, attraverso un nuovo programma della durata quindicennale: le due principali aree di interesse in ambito idrogeno sono la produzione di idrogeno verde fino a 200000 tonnellate l'anno e le celle a combustibile destinate alle applicazioni veicolari allo scopo di raggiungere le 50000 unità circolanti.

Si tratta di una strategia basata sulla creazione di cluster industriali nelle differenti regioni del Paese. Il governo ha inoltre iniziato a porre attenzione a tutto ciò che è di supporto alla diffusione di tali tecnologie, come gli elettrolizzatori per la produzione di idrogeno, e le infrastrutture di distribuzione per il rifornimento dei veicoli.

Il governo mantiene per ora come focus la mobilità, ma reputa necessario che la tecnologia ad idrogeno diventi rilevante anche nelle applicazioni industriali a partire dal 2025, in modo da permettere una più semplice decarbonizzazione dei settori maggiormente impattanti.

Grazie a queste politiche e a un ambiente economico favorevole, la Cina è ad oggi uno dei maggiori produttori di celle a combustibile, nonché il Paese con il maggior numero di FCEVs circolanti sul proprio territorio. Tutto ciò riflette l'impegno della Cina nel diventare un leader mondiale nell'adozione dell'idrogeno come vettore energetico sostenibile.

3.2 Investimenti privati

Gli strumenti principali per la raccolta di informazioni sulla spesa in ricerca e sviluppo delle celle a combustibile nel settore privato sono stati i cosiddetti “annual reports”, cioè i bilanci aziendali annuali delle singole imprese. La fonte da cui sono stati attinti sono indicati in una sezione apposita, X, al fondo dell’elaborato.

All'interno dei documenti, la misura considerata per valutare gli investimenti è la voce solitamente denominata “spesa per la ricerca e lo sviluppo”: si trova solitamente tra i costi operativi del conto economico. Le spese di ricerca sono sempre indicate nel conto economico, mentre le spese di sviluppo seguono regole diverse, a seconda dei Paesi e delle leggi di rendicontazione.

Gli standard contabili più utilizzati sono gli IFRS e i GAAP, che differiscono leggermente su alcuni aspetti. Naturalmente esistono anche metodi nazionali che molte aziende possono applicare.

La differenza principale tra gli IFRS e i GAAP è la maggiore facilità con cui il primo metodo consente di capitalizzare le spese di sviluppo quando sono soddisfatti alcuni criteri rigorosi come la fattibilità tecnica e i presunti benefici economici futuri. Al contrario, i GAAP sono molto più severi e conservativi in materia, richiedendo alle società di contabilizzare immediatamente nel conto economico tutte le spese per la ricerca e lo sviluppo. Le eccezioni alla capitalizzazione sono limitate a casi specifici, come lo sviluppo di software o l'acquisto di attrezzature con usi futuri alternativi.

È importante, pertanto, distinguere in modo appropriato le spese di ricerca da quelle di sviluppo secondo le regole standard per redigere il bilancio [70]:

- le spese di ricerca riguardano attività esplorative e investigative che mirano a ottenere nuove conoscenze o a sviluppare una comprensione più approfondita di fenomeni scientifici e tecnici, senza che si abbia in mente un'applicazione specifica o immediata. Non hanno certezza di risultati utili o commercializzabili e non sono ancora orientate alla creazione di un prodotto o servizio definito;
- le spese di sviluppo si riferiscono ad attività sistematiche finalizzate all'applicazione delle conoscenze e dei risultati ottenuti durante la fase di ricerca, con l'obiettivo di creare nuovi prodotti, processi o servizi, o di migliorare quelli esistenti. Sono più mirate, con l'obiettivo di creare qualcosa di concreto e potenzialmente commercializzabile e comportano un'alta probabilità che il risultato sia utilizzabile.

Come misura di base per valutare la spesa privata in R&S di ogni azienda viene utilizzato il totale dei costi di R&S nel conto economico, che considera anche l'ammortamento delle spese di sviluppo degli investimenti sostenuti negli anni precedenti.

Per questa sezione, il lavoro viene presentato suddiviso per macroaree geografiche, ovvero i 3 continenti maggiormente rilevanti: America, Europa e Asia. Africa e Oceania non sono state prese in considerazione a causa della mancanza di aziende che conducono attivamente ricerche sulla tecnologia delle celle a combustibile.

In linea generale, le aziende individuate sono state incluse nell'area geografica in cui si trova la sede centrale: ad esempio, Ballard Power Systems ha diverse sedi in tutto il mondo, ma in questo studio è stata considerata la sede centrale in Canada.

Sono state considerate le aziende più rilevanti nella tecnologia delle celle a combustibile, in particolare per il periodo compreso tra il 2013 e il 2023, laddove i dati sono disponibili.

È importante sottolineare che non sempre è stato possibile identificare la spesa in ricerca e sviluppo in modo preciso e rigoroso. Infatti, molte volte le aziende prese in considerazione si occupano di diverse tecnologie, non solo inerenti alle celle a combustibile e all'idrogeno.

Pertanto, è necessario definire due diverse metodologie di raccolta dei dati:

- per le aziende con focus esclusivo sulla tecnologia delle celle a combustibile, è semplice identificare i costi di R&S perché il valore indicato è tutto rivolto alla tecnologia studiata. Dunque, il valore considerato è il totale dei costi di R&S presenti nel conto economico;
- per le aziende con focus su diversi tipi di tecnologie, poiché qualsiasi misurazione sarebbe imprecisa, la metodologia adottata è quella di considerare la spesa in R&S per le celle a combustibile in modo proporzionale. Ciò significa che, date X aree tecnologiche in cui l'azienda lavora, la ricerca sulle celle a combustibile rappresenta $1/X$ del totale. In tal modo i dati possono avere una certa probabilità di errore. È ovvio che la ripartizione delle attività di R&S non è proporzionale nella realtà, ma per procedere con questo studio è stato necessario fare questa assunzione. Lo scopo dello studio è quello di essere il più conservativo possibile per non commettere gravi errori di valutazione. Le aziende per le quali è stato applicato questo metodo sono indicate con un “*” accanto al nome.

Per mantenere la coerenza con la spesa pubblica in R&S, ogni valore è stato convertito dalla valuta nazionale alla valuta statunitense. Per effettuare questa operazione è stato utilizzato il Portale dei tassi di cambio della Banca d'Italia [71]. Per ogni anno è stato considerato il tasso di cambio medio del mese di gennaio.

America

I due grafici 38 e 39, presentati di seguito, riguardanti le aziende private del continente americano, variano solamente per la presenza nel primo di un'azienda in più, la General Motors (US). Si è deciso di inserire un secondo grafico senza essa, per avere una visione delle altre più chiara, dato il grande ammontare di spesa in R&S che General Motors possiede rispetto alle altre. Infatti, data la grande differenza di valori tra GM e le altre aziende, ha senso vedere sia l'impatto di GM già nei primi anni '70, sia come la differenza appaia enorme rispetto ad altre aziende emerse molto più recentemente.

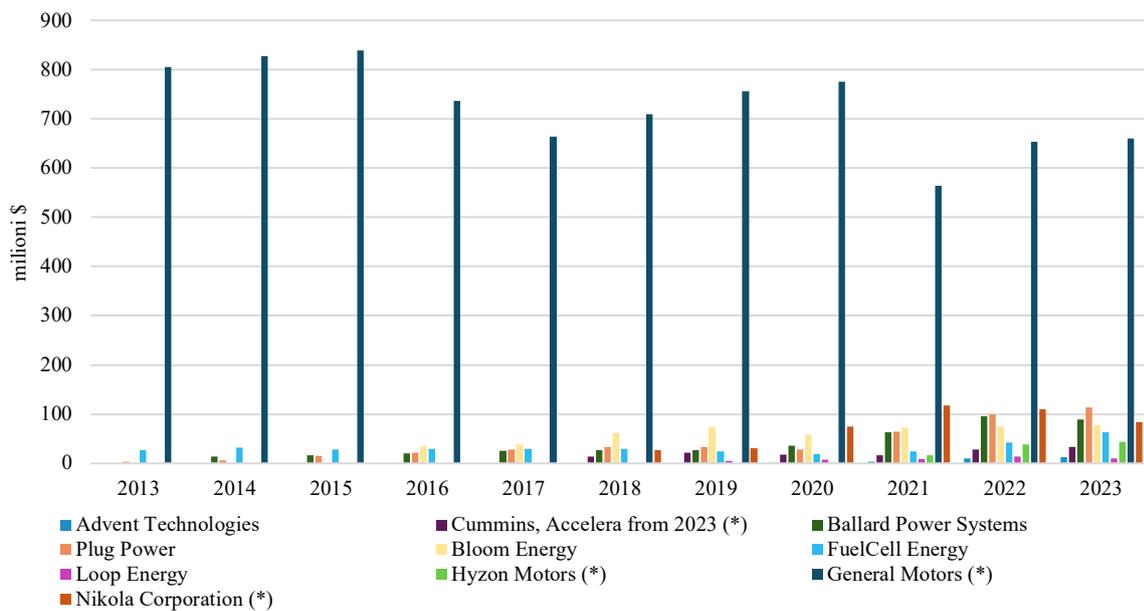


Figura 38. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente americano (fonte: bilanci aziendali)

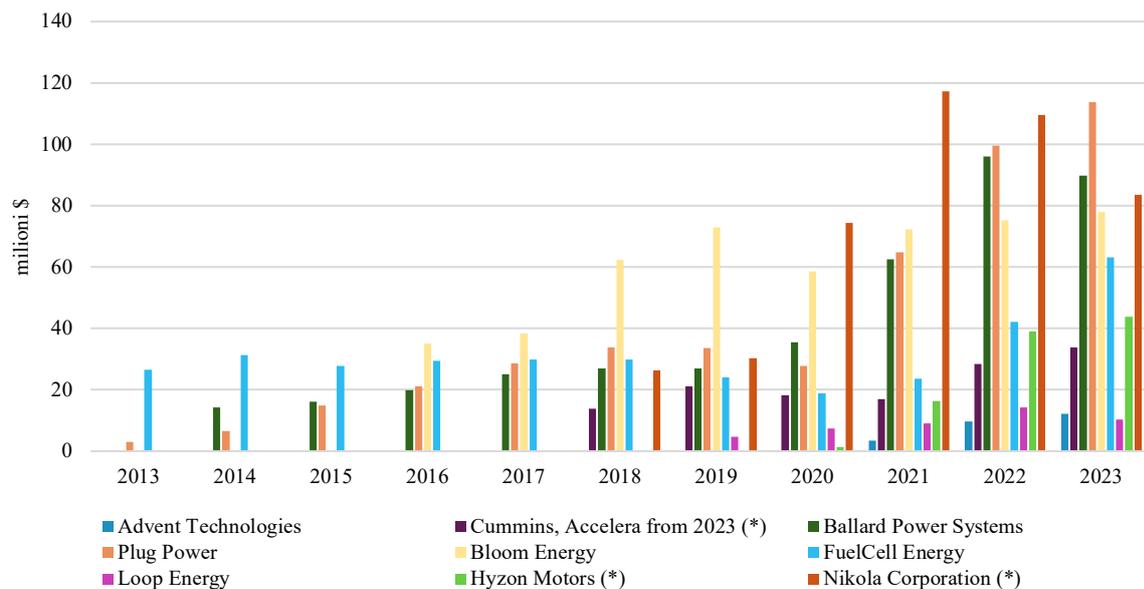


Figura 39. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente americano, escludendo General Motors (fonte: bilanci aziendali)

Di seguito la Tabella 3 riassuntiva delle spese in R&S mostrate nei grafici precedenti.

Azienda	Sede principale	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Totale
Cummins, Accelera from 2023 (*)	US						13,8 M\$	21,2 M\$	18,2 M\$	17,0 M\$	28,5 M\$	33,8 M\$	132,5 M\$
Advent Technologies	US								0,1 M\$	3,5 M\$	9,8 M\$	12,1 M\$	25,6 M\$
Ballard Power Systems	Canada		14,3 M\$	16,2 M\$	19,8 M\$	25,0 M\$	27,0 M\$	26,9 M\$	35,5 M\$	62,6 M\$	96,0 M\$	89,7 M\$	413,1 M\$
Plug Power	US	3,1 M\$	6,5 M\$	14,9 M\$	21,2 M\$	28,7 M\$	33,9 M\$	33,7 M\$	27,8 M\$	64,8 M\$	99,6 M\$	113,7 M\$	447,9 M\$
Bloom Energy	US				35,1 M\$	38,4 M\$	62,4 M\$	72,9 M\$	58,5 M\$	72,4 M\$	75,3 M\$	77,9 M\$	492,9 M\$
FuelCell Energy	US	26,6 M\$	31,4 M\$	27,8 M\$	29,5 M\$	29,8 M\$	29,9 M\$	24,0 M\$	18,9 M\$	23,6 M\$	42,3 M\$	63,1 M\$	346,9 M\$
Loop Energy	Canada							4,7 M\$	7,3 M\$	9,1 M\$	14,3 M\$	10,3 M\$	45,8 M\$
Hyzon Motors (*)	US								1,4 M\$	16,4 M\$	39,1 M\$	43,7 M\$	100,8 M\$
General Motors (*)	US	805,6 M\$	827,8 M\$	838,9 M\$	736,4 M\$	663,6 M\$	709,1 M\$	755,6 M\$	775,0 M\$	564,3 M\$	653,3 M\$	660,0 M\$	7989,5 M\$
Nikola Corporation (*)	US						26,2 M\$	30,4 M\$	74,4 M\$	117,2 M\$	109,6 M\$	83,6 M\$	558,6 M\$

Tabella 3. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente americano (fonte: bilanci aziendali)

È interessante notare come anche aziende molto rilevanti nel settore abbiano avuto budget di spesa molto più bassi di General Motors: un esempio è Ballard Power Systems, un'azienda canadese che rappresenta “la storia” delle celle a combustibile. Nel 2023 ha speso per la ricerca circa 90 milioni di dollari, rispetto ai più di 600 milioni stimati di General Motors. Quest’ultima verrà presentata in maniera più ricca nel capitolo “Conoscenze e competenze”. Ballard ha come obiettivo tecnologico lo sviluppo delle celle a combustibile a scambio protonico [72]. Negli ultimi 10 anni, l’azienda ha aumentato fortemente il suo impegno: nel 2014 ha investito 20 milioni di dollari, mentre l'anno scorso i costi di ricerca e sviluppo sono stati quasi quintuplicati. Il grande vantaggio di Ballard deriva dall’aver iniziato a investire in questa tecnologia nei primi anni Ottanta. L'importanza dell’azienda nel settore delle celle a combustibile era già emersa nel 1991, quando l'azienda firmò un accordo con General Motors e il DOE per sviluppare un veicolo a celle a combustibile [73]. Un altro accordo arrivò due anni dopo con Daimler Benz. Negli ultimi dieci anni sono state avviate numerose collaborazioni e partnership con aziende cinesi, come Zhongshan Broad-Ocean Motor e Weichai Power. Ballard si concentra principalmente sul settore della mobilità, ma sviluppa anche soluzioni stazionarie.

Altre importanti aziende americane sono Plug Power, Bloom Energy e Nikola Corporation. Tutte hanno sede negli Stati Uniti e sono state fondate all'inizio del 2000. Plug Power e Bloom Energy non lavorano solo sulla tecnologia delle celle a combustibile, ma più in generale sullo sviluppo di tecnologie legate all'idrogeno verde e alle applicazioni correlate.

Recentemente, Bloom Energy sta espandendo la propria attività in Europa, in particolare in Italia, collaborando con Cefla e Ferrari a diversi progetti di decarbonizzazione per guidare le aziende verso la transizione ecologica [74].

Europa

Per l'Europa, come per l'America, vengono mostrate due possibilità: la prima, in Figura 40, con il Gruppo Bosch incluso e l'altra senza, in Figura 41. Questo perché il Gruppo Bosch sostiene generalmente costi di R&S molto più elevati rispetto alle altre aziende europee. Si noti inoltre che le spese di R&S di Bosch sono calcolate con il secondo metodo illustrato, quindi sono da considerarsi approssimazioni.

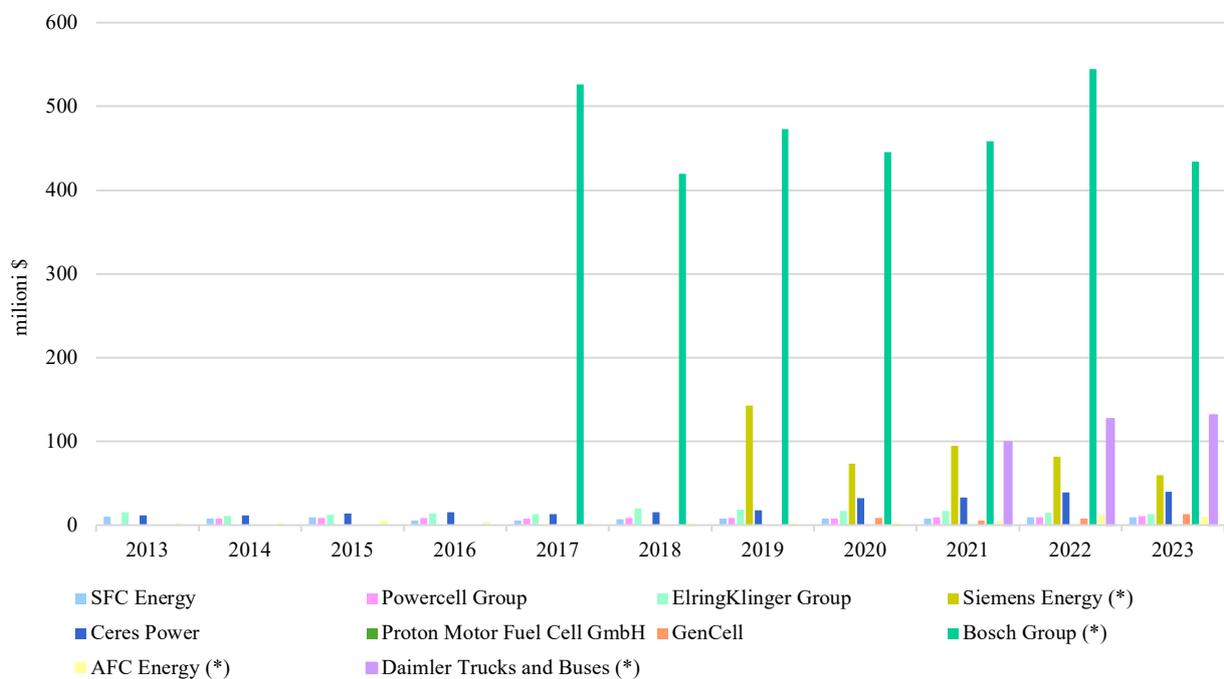


Figura 40. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente europeo (fonte: bilanci aziendali)

È interessante notare in Figura 39 quanto il gruppo Bosch abbia investito negli anni sulla tecnologia delle celle a combustibile e come in Europa sia una delle poche aziende in grado di competere con le grandi aziende americane e asiatiche.

Osservando la Figura 40, che esclude il gruppo Bosch, appare subito chiaro che le altre aziende considerate nell'analisi hanno budget di R&S notevolmente inferiori. Questa è un'indicazione importante di come il mercato europeo sia ancora molto indietro rispetto agli altri: è necessario che alcuni grandi operatori inizino a sviluppare tecnologie anche in Europa, per evitare che il continente resti indietro.

Bosch è uno dei principali produttori europei di cella a combustibile, tecnologia sviluppata già a partire dagli anni '60: l'azienda mostrò infatti il suo primo prototipo nel 1968. All'epoca come oggi, i ricercatori dovettero constatare la bassa fattibilità economica della cella, motivo che spinse l'azienda tedesca ad accantonare i progetti correlati per diversi anni.

Comparando i grafici di America ed Europa è l'assenza quasi totale di aziende automobilistiche: soprattutto in Europa, manca un grande player nel settore dei trasporti.

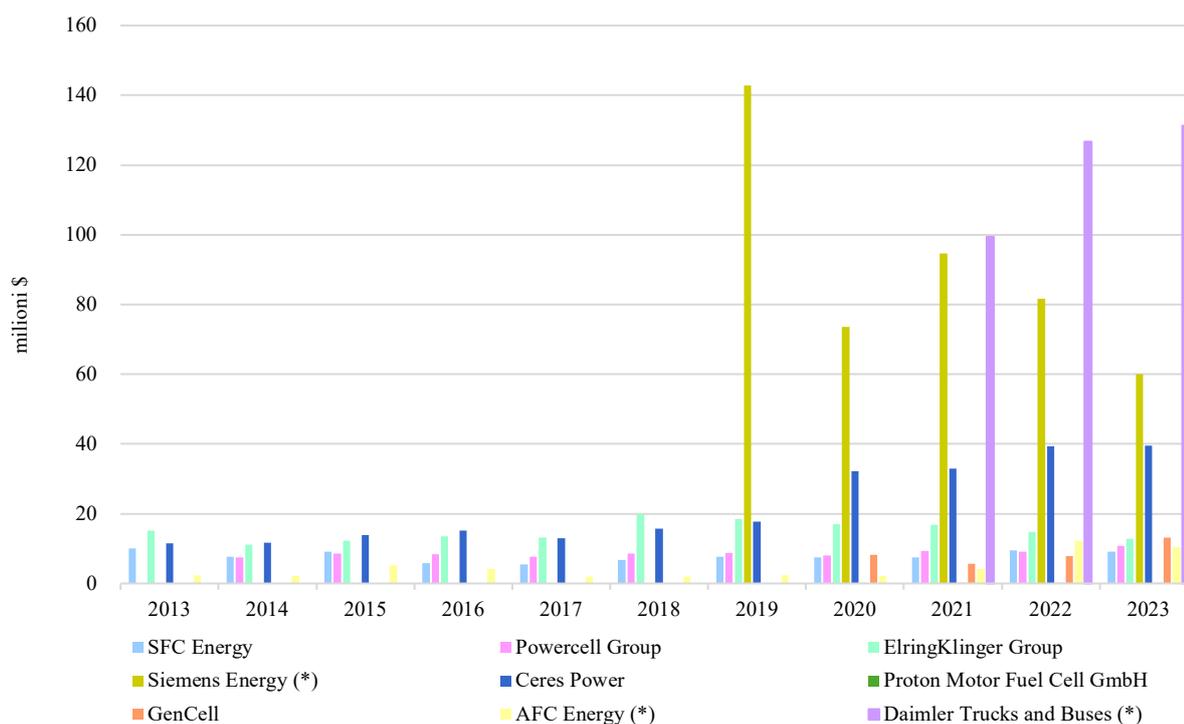


Figura 41. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente europeo, escludendo Bosch Group (fonte: bilanci aziendali)

L'unico degno di nota è Daimler Trucks and Buses, parte del gruppo Mercedes Benz. Nel cluster americano, le aziende automobilistiche presenti sono GM e Hyzon Motors, che inoltre rappresentano le aziende con la maggiore spesa in R&S nel continente.

Inoltre, confrontando i due continenti, appare subito chiaro come le aziende europee abbiano generalmente investito meno negli ultimi dieci anni rispetto a quelle americane. Molte di queste ultime stanno tentando di offrire le loro celle a combustibile al settore dei trasporti europeo, si pensi a Ballard o Bloom Energy.

Da notare l'assenza in questo elenco europeo di Symbio, la joint venture equamente divisa tra Michelin, Forvia e Stellantis [75]. Per la sua natura, non è stato possibile ottenere informazioni sulle sue spese di R&S, perché sono incluse nei bilanci delle singole aziende e quindi annegate nei rispettivi rendiconti finanziari. Tuttavia, è importante sottolineare il ruolo

centrale di questa azienda nel panorama europeo, soprattutto come futuro supporto per le varie case automobilistiche appartenenti al Gruppo Stellantis.

Tra le aziende europee, le nazioni più rappresentate sono Germania e Regno Unito, con qualche apparizione dei Paesi nordici, in primis la Svezia.

Di seguito la Tabella 4, riassuntiva dei costi rappresentati nei grafici precedenti.

Azienda	Sede principale	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Totale
SFC Energy	Germany	10,0 M\$	7,7 M\$	9,2 M\$	5,7 M\$	5,5 M\$	6,8 M\$	7,7 M\$	7,5 M\$	7,5 M\$	9,4 M\$	9,2 M\$	86,5 M\$
Powercell Group	Sweden	0,0 M\$	7,5 M\$	8,7 M\$	8,4 M\$	7,7 M\$	8,5 M\$	8,8 M\$	7,9 M\$	9,3 M\$	9,1 M\$	10,8 M\$	86,8 M\$
ElringKlinger Group (*)	Germany	15,1 M\$	11,2 M\$	12,3 M\$	13,6 M\$	13,2 M\$	20,0 M\$	18,4 M\$	17,0 M\$	16,8 M\$	14,9 M\$	12,8 M\$	165,4 M\$
Siemens Energy (*)	Germany							142,8 M\$	73,5 M\$	94,7 M\$	81,6 M\$	60,0 M\$	452,6 M\$
Ceres Power	UK	11,5 M\$	11,8 M\$	13,9 M\$	15,2 M\$	13,0 M\$	15,8 M\$	17,8 M\$	32,3 M\$	33,0 M\$	39,4 M\$	39,6 M\$	243,1 M\$
Proton Motor Fuel Cell GmbH	Germany								0,1 M\$	0,0 M\$	0,1 M\$	0,0 M\$	0,3 M\$
GenCell	Israel								8,3 M\$	5,7 M\$	7,9 M\$	13,2 M\$	35,1 M\$
Bosch Group (*)	Germany					526,0 M\$	419,6 M\$	473,1 M\$	445,8 M\$	458,5 M\$	544,4 M\$	433,8 M\$	3301,2 M\$
AFC Energy	UK	2,3 M\$	2,1 M\$	5,3 M\$	4,2 M\$	2,0 M\$	2,1 M\$	2,3 M\$	2,1 M\$	4,2 M\$	12,3 M\$	10,4 M\$	49,3 M\$
Daimler Trucks and Buses (*)	Germany									99,4 M\$	126,7 M\$	131,2 M\$	357,3 M\$

Tabella 4. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente europeo (fonte: bilanci aziendali)

Asia

Per il continente asiatico viene mostrato un solo grafico perché tutte le aziende considerate hanno avuto circa la stessa spesa in R&S negli ultimi dieci anni. È importante sottolineare che la maggior parte delle aziende asiatiche analizzate sono grandi aziende del settore automotive, ed è dunque difficile capire quanto sia il reale budget dedicato alla tecnologia delle celle a combustibile in quanto le aree tecnologiche in cui investono sono parecchie. Pertanto, tutti i valori presentati nei grafici e nella tabella sono affetti da imprecisioni, poiché è stato utilizzato il secondo metodo di calcolo illustrato.

Osservando la Figura 42, è possibile affermare che in tale gruppo tutte le aziende sono imprese con importanti capacità di spesa in ricerca e sviluppo. Questo perché si tratta di aziende molto grandi, con molte aree di business. Di conseguenza, i ricavi ottenuti dai business più maturi possono essere reinvestiti in business ancora immaturi, come quello delle celle a combustibile.

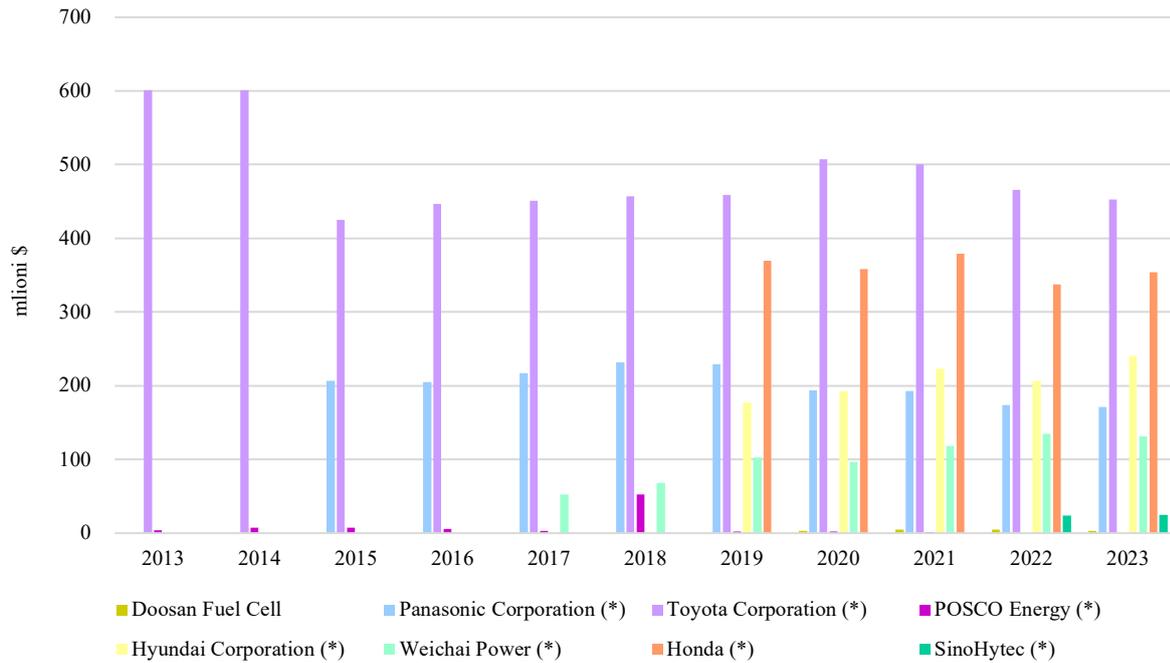


Figura 42. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente asiatico (fonte: bilanci aziendali)

Ovviamente le aziende più importanti dell'elenco sono Toyota, Honda e Hyundai, le prime a portare sul mercato i veicoli a celle a combustibile. Si tratta di una chiara indicazione di come tale tecnologia in Asia, soprattutto in Giappone e Corea del Sud, abbia iniziato a svilupparsi decenni fa.

Toyota Corporation ha lanciato nel 2015 il primo veicolo a celle a combustibile a idrogeno, la Toyota Mirai [76], così come Hyundai Motor Company ha portato sul mercato nel 2018 la Hyundai Nexa [77].

È interessante notare che anche aziende il cui business principale è di altra natura, come Panasonic, famosa per sviluppare soluzioni elettroniche, stanno lavorando sulle fuel cells.

Ciò che distingue le aziende del continente asiatico dalle altre sono:

- la forte presenza di case automobilistiche, che sviluppano in proprio la tecnologia senza affidarsi ad aziende esterne, cosa che non avviene nel continente europeo. Ciò potrebbe rappresentare a lungo termine uno svantaggio economico, causando maggiori costi di approvvigionamento, ma anche uno svantaggio di competenze. Questo potrebbe portare le aziende del vecchio continente ad essere ancora indietro rispetto all'America e all'Asia, situazione che avviene già oggi con altre tecnologie, si pensi allo strapotere cinese sul tema delle batterie.
- l'importanza attribuita alla tecnologia parecchi anni prima, a partire dal 1970 circa, rispetto agli altri Paesi. Ciò si è certamente riflesso nella maggiore spesa delle aziende

asiatiche nel tempo e, di conseguenza, nel loro vantaggio tecnologico. Questo comportamento altrove si riscontra solo negli USA con General Motors, anch'essa azienda pioniera nelle celle a combustibile. Si noti che anche la Cina, tramite il governo, ha avviato fin dagli anni '90 numerosi cluster industriali focalizzati su particolari tematiche legate all'idrogeno.

In conclusione, si può affermare che le aziende asiatiche hanno avuto storicamente una spesa in R&S molto più elevata rispetto alle aziende americane ed europee, e di conseguenza hanno sviluppato una maggiore capacità di convertire il loro vantaggio tecnologico in opportunità economiche e commerciali prima degli altri, si pensi alle auto Toyota, da circa un decennio sul mercato. Qui sotto la Tabella 5 con i valori calcolati di ciascuna azienda.

Azienda	Sede principale	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Totale
Doosan Fuel Cell	South Korea								3,3 M\$	4,7 M\$	4,8 M\$	2,9 M\$	15,7 M\$
Panasonic Corporation (*)	Japan			206,3 M\$	205,1 M\$	216,7 M\$	232,0 M\$	229,6 M\$	193,7 M\$	192,6 M\$	174,0 M\$	171,4 M\$	1821,3 M\$
Toyota Corporation (*)	Japan	601,0 M\$	601,0 M\$	425,2 M\$	446,6 M\$	450,8 M\$	457,0 M\$	458,6 M\$	507,6 M\$	500,3 M\$	465,8 M\$	452,8 M\$	5366,7 M\$
POSCO Energy (*)	South Korea	4,3 M\$	7,4 M\$	7,6 M\$	5,6 M\$	3,5 M\$	52,1 M\$	2,0 M\$	2,4 M\$	1,1 M\$	0,0 M\$		85,8 M\$
Hyundai Corporation (*)	South Korea							177,6 M\$	193,1 M\$	223,2 M\$	206,6 M\$	240,8 M\$	1041,3 M\$
Weichai Power (*)	China					52,3 M\$	67,8 M\$	102,7 M\$	96,5 M\$	118,3 M\$	135,1 M\$	131,5 M\$	704,1 M\$
Honda (*)	Japan							369,2 M\$	357,9 M\$	379,2 M\$	337,5 M\$	353,8 M\$	1797,6 M\$
SinoHytec (*)	China										23,5 M\$	25,1 M\$	48,6 M\$

Tabella 5. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente asiatico (fonte: bilanci aziendali)

3.3 Modello lineare dell'innovazione della cella a combustibile

L'analisi degli investimenti pubblici e privati ha permesso di comprendere come il settore, a livello regionale e globale si stia muovendo nella ricerca e sviluppo della cella a combustibile in termini di finanziamenti stanziati e utilizzati.

Nella Tabella 6 sono state delineate le varie fasi del modello, come enunciate nel Capitolo 2, ciascuna accompagnata dal risultato che ne consegue. Sempre nella Tabella sono poi stati evidenziati:

- gli enti pubblici, che comprendono tutti coloro che con fondi statali hanno finanziato progetti e lavori di ricerca e sviluppo sulle celle. Gli enti pubblici rappresentati sono tutti Stati, con i rispettivi governi nazionali, i quali poi a differenti livelli, ad esempio regionali o federali, ripartiscono i fondi attivati. Un aspetto rilevante è che gli Stati nazionali sono stati inclusi solo fino alla fase pre-competitiva, perché dopo essi scompaiono per lasciare il posto agli enti privati, responsabili del trasferimento tecnologico alla società. Tra i principali Paesi in fase pre-competitiva spiccano Giappone e Sud Corea, oltre a Stati Uniti, Cina, Canada, Germania e Unione Europea. Tecnologicamente più indietro si trovano invece Italia, Brasile, Australia e Francia, che negli ultimi anni, con importantissime spese in R&S stanno cercando di recuperare lo svantaggio. I Paesi che compaiono in più fasi sono quei Paesi che continuano a lavorare su più ambiti, spaziando tra la ricerca e lo sviluppo prodotto: la prima in questo caso ha lo scopo di migliorare la tecnologia di per sé, in particolare in quegli aspetti che minano la presa sul mercato;
- gli enti privati, che sono responsabili della realizzazione dell'innovazione. In fase competitiva si trovano oggi le principali aziende del settore automotive, come General Motors e Toyota, e le aziende specializzate sulla fuel cell, come Ballard o Plug Power. Le prime sono presenti in questa fase perché hanno attualmente sviluppato la tecnologia nel suo complesso, spingendo anche il prodotto verso la fase di diffusione, si pensi a Toyota. Alcune aziende compaiono nella fase pre-competitiva perché stanno ancora lavorando su aspetti tecnologici applicativi rilevanti e non sono ancora pienamente pronte a lanciare un prodotto commercializzabile ad oggi, ma a breve lo saranno. È bene ricordare che la fase competitiva non coincide con la fase di diffusione, che qui non è presente: le due sono l'una la successiva dell'altra. La fase competitiva riguarda la realizzazione di un prodotto o servizio finito, ovvero capace di essere immesso sul mercato. La diffusione riguarda invece il successo del processo di vendita: il prodotto deve diffondersi tramite un processo di adozione da parte dei

consumatori. Ad esempio, ad oggi, la fuel cell è una tecnologia che si può definire in fase competitiva, perché è pronta ed è commercializzabile, ma il processo economico che innesca la diffusione non è ancora avvenuto per una serie di ragioni che verranno approfondite nei capitoli successivi;

- le aree di interesse, ovvero le tematiche affrontate in ciascuna fase del modello di ricerca e sviluppo. Nella ricerca applicata il focus rimangono gli elementi primari delle celle, cioè i componenti che le costituiscono come i catalizzatori e gli elettrodi, e conseguentemente le materie prime di cui essi sono composti, essendo responsabili di caratteristiche chiave come la temperatura e la durabilità. Nella fase pre-competitiva invece i principali temi affrontati riguardano il miglioramento di alcuni aspetti cruciali per lo sviluppo come densità, durata, efficienza e resistenza. Questi fattori incidono in maniera preponderante sul raggiungimento di un buon livello di diffusione, specialmente quando la nuova tecnologia sfida tecnologie tradizionali molto difficili da superare tecnologicamente. Nella fase competitiva, infine, lo scopo ultimo che si vuole raggiungere è rendere il prodotto pronto e dunque appetibile per il mercato di riferimento. Per fare ciò l'innovazione deve tenere d'occhio tutti gli aspetti secondari fino a questo momento non considerati, come ad esempio l'integrazione dei vari moduli della cella, i cosiddetti stacks, l'integrazione con il sistema veicolo, la possibilità di utilizzare una maggiore varietà di carburanti e così via.

In conclusione, ciò che si può dedurre osservando il modello è che la tecnologia è stata sviluppata e si trova oggi in uno stato di maturità avanzato. Nonostante ciò, essa non si può ancora considerare diffusa sul mercato, nonostante le aziende abbiano prodotti già disponibili. Basti pensare che è molto difficile vedere circolare auto a celle a combustibile in Europa, più semplice in Paesi come Giappone e Corea del Sud.

Dove c'è ancora un intervento pubblico, tuttavia, è per risolvere gli attuali problemi tecnologici a livello di ricerca di base. Ad esempio, la ricerca attuale di membrane porose come il Nafion dovrebbe consentire un facile trasferimento del carburante dall'anodo al catodo, così come la ricerca di materiali sostitutivi per i catalizzatori, come microbi ed enzimi, sta tentando di risolvere il problema dei costi elevati causati dall'utilizzo di metalli preziosi come il platino.

In modo opposto, gli investimenti dei privati sono aumentati nell'ultimo decennio in tutte le aree geografiche analizzate: risultano apripista Asia e America, seguiti poi dall'Europa leggermente in ritardo. Ovviamente l'implementazione della tecnologia sul mercato sta

aspettando l'intervento pubblico sulle regolamentazioni e sulle infrastrutture, due aspetti di primo piano per poter iniziare a vendere il prodotto in modo esponenziale.

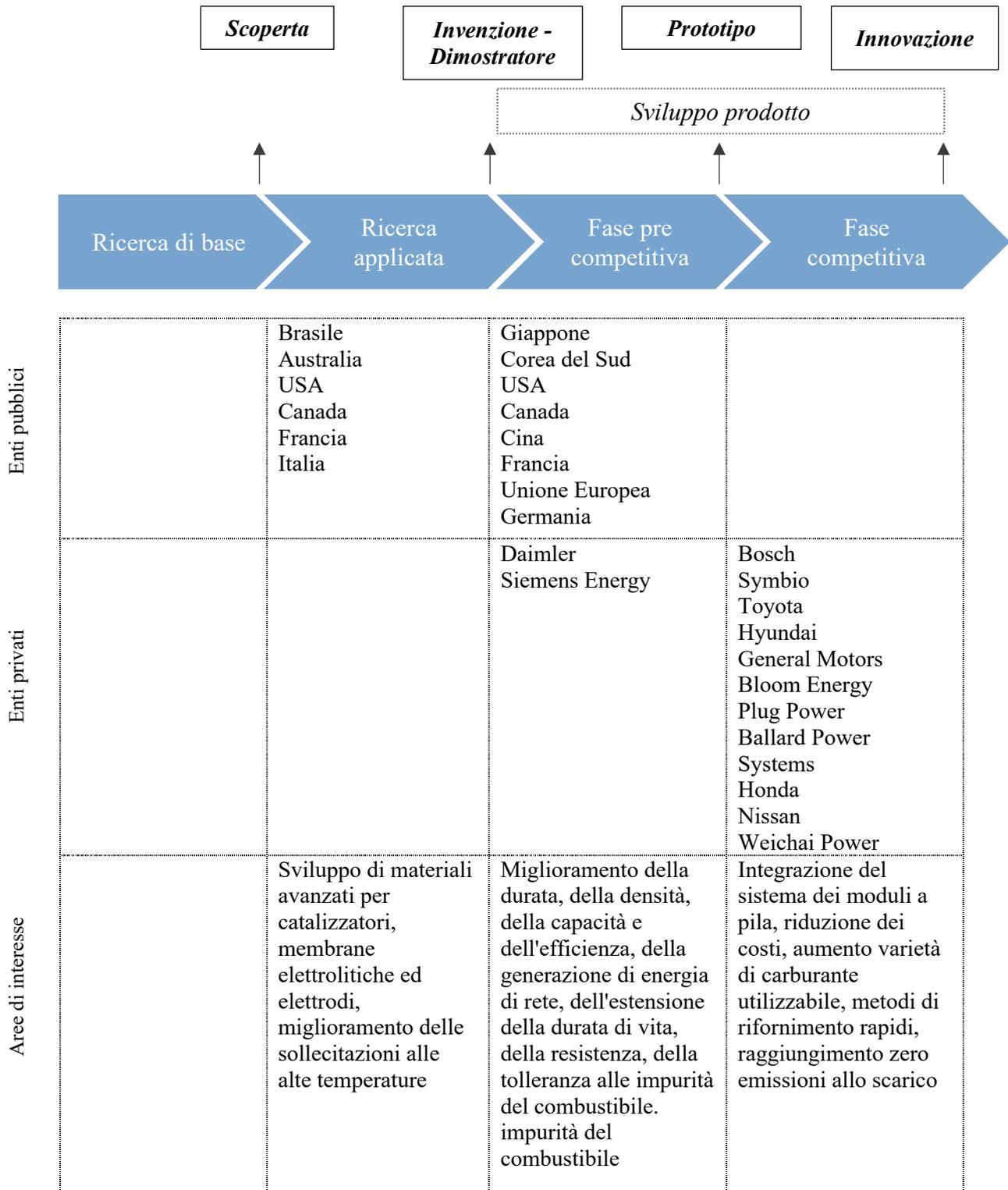


Tabella 6. Modello lineare dell'innovazione della cella a combustibile

4. Le nuove competenze per emergere nel settore automotive

In questo capitolo verranno presentati il sistema di propulsione tradizionale, il motore a combustione interna, e l'alternativa emergente, la batteria agli ioni litio. Tali tecnologie saranno poi approfondite insieme alla cella a combustibile in merito alle conoscenze e competenze necessarie per il loro sviluppo. Infine, saranno analizzate quattro aziende leader del settore automotive al fine di comprendere i diversi approcci che tali realtà aziendali stanno assumendo nel contesto attuale.

4.1 Tecnologie tradizionali ed emergenti

Nel contesto attuale della mobilità e della produzione energetica, il motore a combustione interna (ICE) e la batteria agli ioni di litio rappresentano due approcci tecnologici fondamentali, ma nettamente distinti. La loro classificazione come tecnologie tradizionali ed emergenti non è dovuta solamente alla loro evoluzione tecnica, ma anche dalla loro posizione all'interno del panorama industriale, economico e ambientale. In questo capitolo, si cerca di analizzare le ragioni per cui il motore a combustione interna è considerato una tecnologia tradizionale, mentre la batteria agli ioni di litio è vista come una tecnologia emergente. Nonostante i progressi tecnici, infatti, il motore a combustione interna si configura come una tecnologia tradizionale in quanto il principio di funzionamento di base non è cambiato sostanzialmente negli ultimi decenni. A ciò si aggiunge la crescente importanza degli impatti ambientali causati dalla mobilità: questo è il principale motivo che ha permesso l'emergere di tecnologie alternative, in primis le batterie, in continua evoluzione, che possiede la capacità di cambiare completamente i settori della mobilità, della produzione e dello stoccaggio di energia, risolvendo i problemi di sostenibilità e di efficienza energetica.

4.1.1 Motore a combustione interna

Il motore a combustione interna o ICE rappresenta la tecnologia tradizionale perché è oggi la tecnologia maggiormente utilizzata nelle applicazioni di mobilità come automobili, camion, aerei, navi e macchinari industriali

Un motore a combustione interna è un motore termico che utilizza la combustione di un combustibile, solitamente combustibili fossili come benzina o gasolio, per alimentare un veicolo o un macchinario [78]. Il motore è evoluto notevolmente nel corso di oltre un secolo e in questo momento è una delle fonti di energia più ampiamente utilizzate a livello globale.

L'origine del motore a combustione interna risale all'invenzione dei motori Diesel e a ciclo Otto XIX secolo. I primi motori erano semplici, ma nel 1860, Étienne Lenoir costruì il primo motore a gas e alla fine del XIX secolo, Nikolaus Otto aveva sviluppato il motore a quattro tempi, noto anche come motore a ciclo Otto [79]. Per risolvere i problemi di peso del prodotto e la bassa efficienza termica, Otto propose un motore funzionante in quattro tempi: una fase di aspirazione, una fase di compressione, una fase di combustione/espansione e una fase di scarico. Il suo progetto risultò fin da subito vincente e capace di superare le alternative precedenti, grazie a una forte riduzione di peso e volume del prodotto.

Altri aspetti fondamentali che interessarono il motore a combustione furono le differenti tipologie di combustibile utilizzabile: si partì con la benzina e il diesel per poi arrivare oggi alla possibilità di usare il metano e l'idrogeno.

Come detto in precedenza, il motore a combustione interna converte il carburante, contenente energia chimica, in energia meccanica. Ciò avviene tramite una serie di esplosioni controllate che spingono i pistoni. Un motore a quattro tempi attraversa le seguenti fasi:

- una fase di aspirazione per richiamare l'aria dall'esterno dei cilindri attraverso la valvola di aspirazione e vincolare così il pistone ad abbassarsi;
- una fase di compressione dell'aria stessa per generare un aumento di temperatura e pressione ed iniettare combustibile per creare la miscela;
- una fase di combustione o espansione, per far esplodere la miscela aria-combustibile e generare energia tramite il movimento violento del pistone verso il basso;
- una fase di scarico, per far uscire i gas combusti dalla camera di combustione.
- Il funzionamento del motore a quattro tempi è mostrato nella Figura 43.

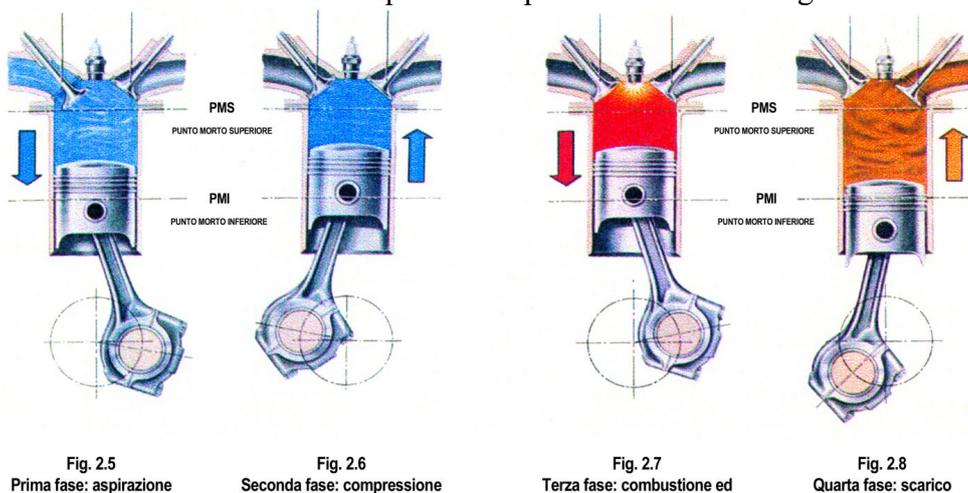


Figura 43. Funzionamento del motore a quattro tempi (fonte: Autotecnica)

La maggior parte dei motori ripete questo ciclo più volte al secondo, con più cilindri che lavorano insieme per produrre potenza. In un motore a due tempi invece, le funzioni di

aspirazione e scarico avvengono simultaneamente, consentendo una progettazione più semplice ma spesso a scapito dell'efficienza e del controllo delle emissioni.

Esistono cicli di lavoro dei motori a combustione interna differenti: I più comuni sono:

- Motori ad accensione comandata (ciclo Otto): utilizzano una candela per accendere la miscela aria-carburante all'interno del cilindro. Sono utilizzati in automobili, motociclette e piccoli aerei. Tra questi rientrano i motori a benzina a quattro e due tempi.
- Motori ad accensione per compressione (ciclo Diesel): invece di una candela, i motori diesel comprimono l'aria nel cilindro per accendere il carburante diesel. I motori diesel sono efficienti nei consumi e potenti, il che li rende ideali per camion, autobus e macchinari pesanti. I motori diesel di solito funzionano con un ciclo a quattro tempi, ma alcuni sono a due tempi.
- Motori rotativi Wankel: questo motore utilizza un rotore triangolare o Triangolo di Reuleaux al posto dei pistoni per creare il movimento e la conseguente combustione. È più piccolo, più semplice e più leggero perché con un giro di rotazione si generano tre cicli. Tuttavia, esso è meno efficiente in termini di carburante e lubrificazione, con conseguente aumento delle emissioni [80];
- Motori a turbina a gas: sono utilizzati negli aerei e in alcune applicazioni industriali per la produzione di energia. Generano potenza tramite la combustione continua di carburante, azionando una turbina invece di pistoni. I motori a turbina a gas non sono utilizzati nei veicoli perché sono complessi e costosi.
- Motori a due tempi: completano un ciclo di potenza con due tempi per movimento del pistone. L'aspirazione e lo scarico avvengono contemporaneamente, semplificando la progettazione. I motori a due tempi sono utilizzati in veicoli più piccoli come motociclette, tosaerba e motoseghe. Sono meno efficienti nei consumi e producono più emissioni rispetto ai motori a quattro tempi.

L'uso di motori a combustione interna è stato oggetto di crescente attenzione negli ultimi anni, a causa del loro contributo all'inquinamento atmosferico e al cambiamento climatico [81]. La combustione di combustibili fossili rilascia infatti nell'atmosfera differenti inquinanti, ciascuno con un differente rischio di salute. Uno dei contaminanti più pericolosi è sicuramente il particolato, abbreviato in PM, un sottoprodotto della combustione conosciuto convenzionalmente come fuliggine. A seconda della dimensione delle particelle costituenti, si distinguono differenti categorie di pericolosità: più sono piccole più il rischio per gli esseri umani aumenta in quanto più difficili da schermare. Ad oggi il particolato PM_{2,5} risulta essere

quello maggiormente tenuto d'occhio in quanto è molto rischioso per la salute umana perché è in grado di penetrare senza difficoltà nelle vie respiratorie oltre alla provocazione del danno ambientale. Un altro inquinante è la famiglia degli ossidi di azoto NO_x , generato per circa un quarto a livello mondiale dalle vetture su strada. Oltre la sua pericolosità intrinseca, l'ossido di azoto è un precursore del particolato e dell'ozono. Il terzo inquinante chiave è il biossido di zolfo SO_2 , che tramite il rilascio di acidi può danneggiare la salute degli esseri viventi oltre a impattare le colture alimentari come soia e mais.

Gli ultimi sono il monossido di carbonio CO e l'anidride carbonica CO_2 . Il primo deriva dalla combustione incompleta ed è l'inquinante prodotto in misura maggiore rispetto a tutti gli altri. La seconda invece è il normale prodotto di scarto della reazione di combustione ed è parte dei gas serra rilasciati in atmosfera.

In seguito alla presa di coscienza delle disastrose conseguenze su più fronti derivanti dell'impiego del motore a combustione, si è verificato un notevole spostamento verso l'adozione di altre tipologie di sistemi di propulsione, come le batterie e le celle a combustibile, allo scopo di ridurre le emissioni. Tuttavia, i motori a combustione interna offrono ancora oggi alcuni vantaggi pratici come un'elevata densità energetica, non ancora raggiungibile da batterie e celle a combustibile, oltre alla capacità di erogare elevati livelli di potenza e coppia, rendendoli ideali per applicazioni pesanti e viaggi di lunga distanza. Non meno importante è lo stato della tecnologia matura, con una buona distribuzione del carburante e un'infrastruttura di manutenzione ormai capillare.

Mentre le auto elettriche e a celle a combustibile stanno diventando lentamente più popolari in alcune aree del mondo, la maggior parte delle automobili circolanti utilizza ancora motori a combustione interna a causa dell'infrastruttura esistente e della varietà di modelli ancora disponibile. Tuttavia, nuovi tipi di veicoli come gli ibridi e i miglioramenti nell'efficienza del carburante e nei controlli delle emissioni stanno aiutando gli ICE a rimanere competitivi nel breve termine.

Nei prossimi anni il motore a combustione interna probabilmente inizierà a essere meno adottato nelle aree geografiche in cui sussistono le condizioni necessarie, ma continuerà a essere utilizzato nell'industria pesante, nel trasporto a lungo raggio e nei paesi in via di sviluppo. Questa possibilità è sorta dopo molti anni: il corretto posizionamento di mercato di questa nuova tecnologia sta forse iniziando a intravedersi, data la difficoltà di sostituire la tecnologia matura nel segmento delle auto o degli autobus.

In tutte le altre situazioni, in primis le automobili, la batteria agli ioni litio si configurerà come una delle potenziali alternative al motore.

4.1.2 Batteria agli ioni litio

Le batterie sono un dispositivo elettrochimico che immagazzina e fornisce energia elettrica convertendo l'energia da sostanze chimiche in elettricità [82]. Sono utilizzate in molti dispositivi, come smartphone, veicoli e sistemi di accumulo di energia su larga scala. La tecnologia delle batterie è migliorata molto negli ultimi cento anni e oggi le batterie sono cruciali per gli sviluppi futuri dei settori dell'energia e dei trasporti.

Il concetto di batteria nacque nel XVIII secolo, quando Alessandro Volta inventò la prima batteria [83]: aggiunse dischi di zinco e rame in contenitori di acqua salata così da generare corrente. Questo fu il punto di partenza di un lungo periodo di studi sulle batterie che portarono a ulteriori sviluppi. Tuttavia, il cambiamento più importante nella tecnologia delle batterie avvenne negli anni '90 con lo sviluppo delle batterie agli ioni di litio in quanto resistenti, durature e leggere.

Le batterie funzionano spostando gli elettroni tra due elettrodi tramite un circuito esterno [84]. Allo stesso tempo, gli ioni si muovono attraverso un elettrolita tra gli elettrodi.

La batteria è generalmente costituita dai seguenti componenti, come mostrato in Figura 44:

- gli elettrodi, uno positivo detto catodo e uno negativo detto anodo. L'anodo è il polo negativo della batteria e il punto da cui partono gli ioni durante il processo di scarica. In una batteria al litio, l'anodo è generalmente realizzato in grafite e il catodo è spesso composto da ossidi di metallo, come l'ossido di litio-cobalto (LiCoO_2);
- l'elettrolita, una sostanza chimica che permette il movimento degli ioni tra l'anodo e il catodo. È generalmente una soluzione liquida o un gel che contiene sali dissociati o un materiale solido che consente il flusso di ioni. Il suo ruolo è cruciale perché permette il trasferimento degli ioni tra i due elettrodi;
- i separatori, materiali sottili e porosi che impediscono il contatto diretto tra l'anodo e il catodo, evitando cortocircuiti mentre consentono il passaggio degli ioni. Sono di solito realizzati in materiali come polietilene o polipropilene, che sono buoni conduttori di ioni ma non di elettricità;

- le celle, le singole unità che contengono anodo, catodo, elettrolita e separatore. Quando le celle sono collegate in serie o in parallelo, si ottengono le **batterie** più grandi, che forniscono più tensione (collegamento in serie) o più capacità (collegamento in parallelo).

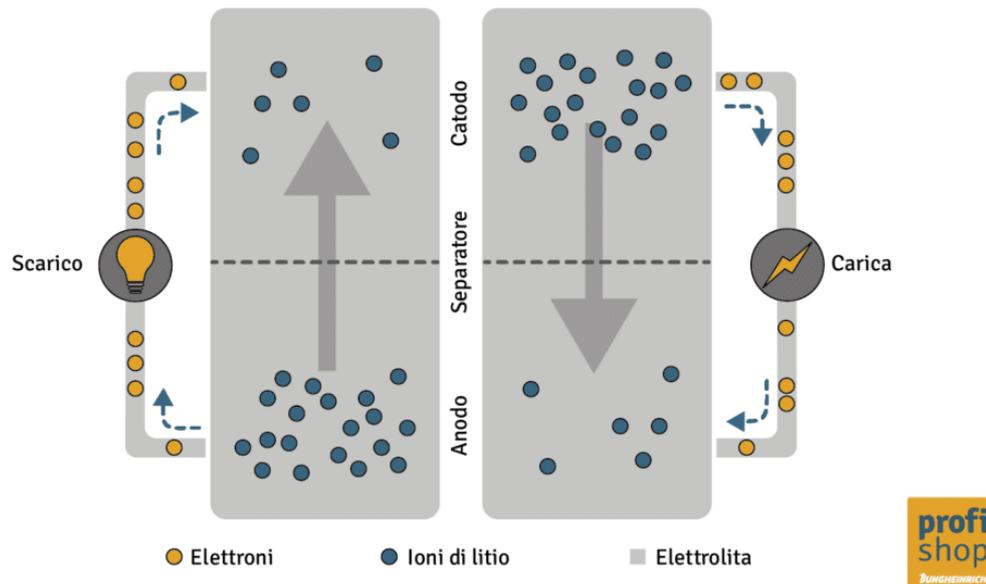


Figura 44. Struttura di una batteria agli ioni litio (fonte: Jungheinrich Profi-Guide)

Il processo principale che avviene in una batteria può essere semplificato in due fasi:

- fase di scarica: gli elettroni fluiscono dall'anodo al catodo attraverso un circuito esterno mentre gli ioni si muovono attraverso l'elettrolita tra gli elettrodi. Fluendo verso l'esterno gli elettroni forniscono energia al dispositivo collegato.
- fase di carica: significa semplicemente immettere più carica. Questo processo include le reazioni chimiche agli elettrodi, che vengono invertite da una fonte di energia esterna, solitamente un caricabatterie elettrico. Ciò consente agli elettroni di fluire di nuovo dal catodo all'anodo, il che ripristina la capacità della batteria di immagazzinare energia.

Le batterie possono essere classificate in categorie, ciascuna diversa per un'applicazione specifica. Le più ampiamente utilizzate sono:

- le batterie primarie, non ricaricabili e progettate per un solo utilizzo, che non possono essere ricaricate una volta esaurita la loro energia. Le batterie alcaline sono un esempio comune di questa tipologia e vengono utilizzate in numerosi dispositivi, tra cui torce elettriche, telecomandi e giocattoli. Sono ideali per i dispositivi a basso consumo perché sono convenienti, ma generano rifiuti perché non durano molto a lungo.
- le batterie secondarie, ovvero delle batterie ricaricabili, che possono essere ricaricate e utilizzate più volte invertendo le reazioni chimiche che si verificano durante il processo di

carica. Queste batterie sono ampiamente utilizzate in una varietà di applicazioni, tra cui l'elettronica, i veicoli elettrici e i sistemi di accumulo di energia.

Le batterie secondarie più comuni sono:

- le batterie al piombo-acido, che sono tra le più vecchie batterie ricaricabili, e vengono utilizzate nelle automobili e come alimentazione di riserva. Sono economiche e affidabili, ma pesanti e meno dense di energia rispetto alle tecnologie più recenti;
- le batterie al nichel-cadmio, che sono durevoli e potenti, ma perdono capacità se non vengono scaricate completamente e sono tossiche;
- le batterie al nichel-metallo idruro, che producono più energia, quindi sono adatte ai veicoli ibridi e ai dispositivi elettronici portatili;
- le batterie agli ioni di litio, che sono la tipologia di batteria ricaricabile più comune nei dispositivi moderni, dagli smartphone ai veicoli elettrici. Offrono alta energia e un lungo ciclo di vita, ma sono più costose e possono essere instabili.
- le batterie ai polimeri di litio (Li-Po), che sono un tipo di batteria agli ioni di litio che sfrutta un elettrolita polimerico anziché liquido. Ciò consente forme flessibili e design compatti. Comune in dispositivi sottili come smartphone e laptop;
- le batterie allo stato solido, di nuova generazione, che utilizzano un materiale solido anziché un elettrolita liquido o in gel. Ciò potrebbe offrire più energia, renderle più sicure e durature nel tempo. Sono viste come il prossimo grande cambiamento nella tecnologia delle batterie, specialmente per i veicoli elettrici.

4.2 Confronto delle competenze: somiglianze e differenze

Nelle Tabelle 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 sono mostrate le conoscenze necessarie per lo sviluppo delle tre tecnologie analizzate.

CHIMICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reazioni di ossido-riduzione, elettrochimica e cinetica 2. Idrogeno e ossigeno 3. Catalizzatori 4. Membrane polimeriche, miscele di carbonati, ceramiche (ad es. zirconio stabilizzato con ittrio), soluzioni e composti alcalini 5. Analisi chimiche (spettroscopia, diffrazione, microscopia) 6. Compatibilità chimica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reazioni di ossido-riduzione, elettrochimica e cinetica 2. Materiali polimerici, additivi, rivestimenti attivi 3. Stabilità e processi di degradazione 4. Analisi chimica (spettroscopia, diffrazione, microscopia elettronica e cromatografia). 5. Ingegneria delle superfici 6. Struttura cristallina e morfologia 7. Compatibilità chimica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reazione di combustione; 2. Carburanti (benzina, diesel); 3. Catalisi; 3. Leghe metalliche (alluminio, acciaio e nichel); 4. Additivi chimici; 5. Prove di resistenza alla fatica e di carico ciclico per pistoni, bielle e alberi a gomito. 6. Chimica e controllo delle emissioni;
Conoscenza causale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Trasferimento di elettroni tra catodo e anodo; 2. I reagenti coinvolti nel redox rilasciano energia in forma chimica. 3. Accelerano e facilitano le reazioni redox 4. Garantire conducibilità ionica aumentando l'efficienza e riducendo la perdita di energia. Garantire la stabilità chimica e termica. 5. Analizzare le reazioni chimiche durante il ciclo di vita della batteria. 6. Evitare reazioni indesiderate 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Trasferimento di elettroni tra le specie chimiche coinvolte 2. Comporre l'elettrolita e/o rivestire gli elettrodi, 3. Evitare dendriti, corrosione e degradazione. 4. Analizzare le reazioni chimiche che si verificano durante il ciclo di vita della batteria. 5. Processi che avvengono sulla superficie degli elettrodi 6. Influenza sulla diffusione degli ioni e sull'accumulo di energia 7. Evitare le reazioni indesiderate 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ossidazione di un combustibile da parte di un ossidante con generazione di calore; 2. I combustibili utilizzati; 3. per il post-trattamento dei gas di scarico; 4. Garantire la resistenza alle alte temperature, migliorare le proprietà del combustibile; 5. Analisi del comportamento del materiale dopo sollecitazioni ripetute; 6. Comprendere la formazione di sostanze inquinanti

Tabella 7. Conoscenze di chimica

TERMODINAMICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemi di raffreddamento (liquido, ad aria) 2. Sistemi di dissipazione del calore (gestione del calore) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemi di raffreddamento e/o riscaldamento 2. Prevenzione del surriscaldamento 3. Gestione dei cicli di carica e scarica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemi di raffreddamento (liquido, ad aria) 2. Sistemi di dissipazione del calore (gestione del calore) 3. Sistema di isolamento termico 4. Gestione termica del sistema di scarico
Conoscenza causale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mantenere la temperatura di esercizio ideale e dissipare il calore generato dalla reazione di ossidoriduzione. 2. Evitare la possibilità di picchi di calore e quindi diminuire il deterioramento dei materiali (aumentare la durata). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ottimizzare la temperatura e dissipare il calore generato dalla reazione. 2. Distribuzione corretta del calore, evitando i picchi 3. Ridurre al minimo il surriscaldamento e avere una carica più veloce 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rimuovere il calore in eccesso, mantenere la temperatura ottimale; 2. Bilanciare il trasferimento di calore tra le parti del motore, evitando sbalzi termici e quindi deformazioni e danni; 3. Ridurre le perdite di calore dalle superfici del motore, migliorare la concentrazione di calore nella camera di combustione; 4. Ridurre le emissioni di NOx;

Tabella 8. Conoscenze di termodinamica

FLUIDODINAMICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Progettazione della distribuzione del combustibile e dell'ossigeno 2. Fluidodinamica della refrigerazione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Distribuzione dell'elettrolita e interfaccia elettrolita/elettrodi 2. Fluidodinamica della refrigerazione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Progettazione del collettore di aspirazione 2. Modellazione della turbolenza 3. Gestione del sistema di scarico dei gas e gestione del fenomeno delle Onde di Pressione
Conoscenza causale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Far interagire correttamente i reagenti con le superfici reattive degli elettrodi, rimuovere i prodotti di scarto, rendere uniforme il flusso dei reagenti, disperdere il calore, controllare la pressione. 2. Massimizzare l'efficienza energetica, dissipare uniformemente il calore e aumentare la durata della cella 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Consentire il contatto tra la superficie degli elettrodi e l'elettrolita evitando zone morte e favorendo il trasferimento degli ioni. 2. Massimizzare l'efficienza energetica, dissipare uniformemente il calore e aumentare la durata della cella 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ottimizzare il flusso d'aria (efficienza volumetrica del motore); 2. Ottenere una buona miscelazione di aria e carburante in camera di combustione per diminuire il moto turbolento; 3. Evacuare i gas e ridurre le emissioni

Tabella 9. Conoscenze di fluidodinamica

INGEGNERIA ELETTRICA ed ELETTRONICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemi di alimentazione 2. Sistemi di controllo e monitoraggio 3. Sensori e attuatori; 4. Sistemi di sicurezza elettrica 5. Generazione e gestione dell'elettricità 6. Integrazione con altri sistemi elettrici 7. Protezione elettrica (sensori, fusibili, interruttori e scaricatori di sovratensione) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Progettazione del pacco batterie e interconnessioni 2. Sistema di gestione della batteria (BMS) 3. Controllo di carica e scarica 4. Convertitori e inverter 5. Integrazione con i sistemi elettrici 6. Protezione elettrica (sensori, fusibili, interruttori e scaricatori di sovratensione) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Progettazione e gestione del sistema di accensione; 2. Gestione dell'alimentazione e del sistema di ricarica; 3. Sistemi di iniezione elettronica del carburante (EFI); 4. Unità di controllo elettronico (ECU); 5. Sensori e attuatori; 6. Controllo delle emissioni
Conoscenza causale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corretta distribuzione dell'energia per evitare sovraccarichi 2. Gestione del flusso di gas e corretta conversione dell'energia 3. Monitoraggio dei parametri 4. Evitare archi elettrici e surriscaldamenti a causa dell'idrogeno presente. 5. Garantire una tensione e una corrente stabili 6. Gestire il flusso di energia verso i veicoli o i sistemi di stoccaggio 7. Evitare danni alla cella in caso di problemi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Creare la configurazione della batteria ed evitare squilibri di carica 2. Monitorare e gestire i parametri critici (tensione, corrente, temperatura, stato di carica). 3. Ottimizzare il flusso di energia in uscita e in entrata dalla batteria 4. Trasformare l'energia in un formato utilizzabile 5. Gestire il flusso di energia verso i veicoli o i sistemi di accumulo 6. Evitare danni alla batteria in caso di problemi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Assicurare la fasatura dell'accensione 2. Funzionamento corretto dei componenti elettronici ed elettrici 3. Assicurare l'accuratezza dell'iniezione di carburante 4. Gestione di tutti gli aspetti del funzionamento del motore 5. Monitorare i parametri e regolare le condizioni operative del motore 6. Conformità alle normative su NOx, CO2 e particolato

Tabella 10. Conoscenze di ingegneria elettrica ed elettronica

SIMULAZIONE MULTIFISICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione elettrochimica 2. Simulazione del trasporto di massa 3. Simulazione termica e gestione del calore 4. Fluidodinamica computazionale 5. Accoppiamento elettrotermico-fluido-dinamico. 6. Simulazione strutturale e affidabilità meccanica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione elettrochimica 2. Simulazione termica 3. Simulazione meccanica e strutturale 4. Simulazione di fenomeni di trasporto 5. Simulazione del comportamento ciclico e della durata 6. Simulazione elettrotermica integrata 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione della combustione 2. Fluidodinamica computazionale (CFD). 3. Simulazione termica e gestione del calore 4. Simulazione strutturale e analisi delle sollecitazioni 5. Interazione fluido-struttura (FSI). 6. Simulazione acustica e delle vibrazioni 7. Ottimizzazione della progettazione
Conoscenza causale	<p>1-6. Ottimizzare i vari fenomeni fisici interconnessi che influenzano le prestazioni del sistema. ad esempio, modellando le reazioni redox, ottimizzare il flusso di gas e calore e prevenire il degrado meccanico, migliorare l'efficienza e le prestazioni complessive</p>	<p>1-6. Analizzare e ottimizzare i vari fenomeni fisici interconnessi che influenzano le prestazioni del sistema. Ad esempio, il degrado dei materiali, la distribuzione della temperatura, le sollecitazioni meccaniche e le deformazioni, la distribuzione delle cariche, migliorare l'efficienza e le prestazioni complessive</p>	<p>1-7. Analisi di tutti i fenomeni complessi e interconnessi, migliorando l'intero sistema in termini di efficienza, emissioni, durata, rumorosità, design e tutte le altre aree.</p>
Conoscenza ambientale	<p>verde ed evitare l'inquinamento da materiali chimici</p> <p>5. Conformità alle normative ambientali locali e internazionali</p>	<p>materiali chimici</p> <p>5. Conformità alle normative ambientali locali e internazionali</p>	<p>e agli standard di emissione</p> <p>6. Esplorazione di fonti alternative rinnovabili</p> <p>7. Riduzione del rumore nelle aree urbane</p>

Tabella 11. Conoscenze di ingegneria ambientale

SIMULAZIONE MULTIFISICA			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione elettrochimica 2. Simulazione del trasporto di massa 3. Simulazione termica e gestione del calore 4. Fluidodinamica computazionale 5. Accoppiamento elettrotermico-fluido-dinamico. 6. Simulazione strutturale e affidabilità meccanica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione elettrochimica 2. Simulazione termica 3. Simulazione meccanica e strutturale 4. Simulazione di fenomeni di trasporto 5. Simulazione del comportamento ciclico e della durata 6. Simulazione elettrotermica integrata 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione della combustione 2. Fluidodinamica computazionale (CFD). 3. Simulazione termica e gestione del calore 4. Simulazione strutturale e analisi delle sollecitazioni 5. Interazione fluido-struttura (FSI). 6. Simulazione acustica e delle vibrazioni 7. Ottimizzazione della progettazione
Conoscenza causale	<p>1-6. Ottimizzare i vari fenomeni fisici interconnessi che influenzano le prestazioni del sistema. ad esempio, modellando le reazioni redox, ottimizzare il flusso di gas e calore e prevenire il degrado meccanico, migliorare l'efficienza e le prestazioni complessive</p>	<p>1-6. Analizzare e ottimizzare i vari fenomeni fisici interconnessi che influenzano le prestazioni del sistema. Ad esempio, il degrado dei materiali, la distribuzione della temperatura, le sollecitazioni meccaniche e le deformazioni, la distribuzione delle cariche, migliorare l'efficienza e le prestazioni complessive</p>	<p>1-7. Analisi di tutti i fenomeni complessi e interconnessi, migliorando l'intero sistema in termini di efficienza, emissioni, durata, rumorosità, design e tutte le altre aree.</p>

Tabella 12. Conoscenze di simulazione multifisica

CONTROLLO QUALITÀ			
	CELLA A COMBUSTIBILE	BATTERIA	MOTORE A COMBUSTIONE
Conoscenza fattuale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test del materiale (spettroscopia XPS o FTI); 2. Test di prestazione elettrochimica (OCV - Tensione a circuito aperto, curva di polarizzazione e di prestazione, efficienza faradica); 3. Test di durata e ciclo di vita (stress ambientale); 4. Test di permeabilità e integrità (perdita di gas, permeabilità della membrana); 5. Analisi termica, conducibilità elettrica e resistenza ohmica. 6. Test di contaminazione (analisi delle impurità e contaminazione dei materiali). 7. Test di esplosione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test di prestazione elettrochimica (curva di polarizzazione) 2. Test di durata e ciclicità 3. Test termico 4. Test di sicurezza 5. Test di invecchiamento accelerato 6. Test di resistenza meccanica 7. Test di tenuta e integrità strutturale 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test delle prestazioni del motore (test del dinamometro e test del consumo specifico di carburante in frenata (BSFC)). 2. Test delle emissioni 3. Test di durata e affidabilità 4. Test sul consumo di carburante 5. Test di vibrazione e rumorosità (NVH - Noise, Vibration, Harshness) per esempio: Analisi dei gas di scarico e test di diagnostica di bordo (OBD) 6. Test delle temperature e delle termocoppie 7. Test di tenuta e compressione 8. Test di lubrificazione (test di pressione dell'olio e analisi dell'olio) <ol style="list-style-type: none"> 1. Simulazione della combustione 2. Fluidodinamica computazionale (CFD). 3. Simulazione termica e gestione del calore 4. Simulazione strutturale e analisi delle sollecitazioni 5. Interazione fluido-struttura (FSI). 6. Simulazione acustica e delle vibrazioni 7. Ottimizzazione della progettazione
Conoscenza causale	<p>Verificare</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Composizione chimica e possibili contaminanti (miglioramento dell'efficienza); 2. Perdite interne e difetti del materiale, efficienza della cella in diverse condizioni operative ed efficacia; 3. Stress termico, condizioni estreme e umidità, e quindi la risposta alle condizioni critiche. 4. Integrità del sistema 5. Distribuzione del calore per evitare aree di surriscaldamento e la presenza di contatti non ottimali tra i componenti. 6. Possibile avvelenamento del catalizzatore con monossido di carbonio o solfuri. 7. Sicurezza nell'uso dell'idrogeno (in caso di perdita di gas). 	<p>Verificare:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. l'efficienza con cui la batteria converte l'energia chimica (ad es., idrogeno e ossigeno) in energia elettrica 2. Verificare il numero di cicli di carica e scarica disponibili 3. La resistenza alle alte e basse temperature e al surriscaldamento. 4. Cortocircuito, perforazione, sovraccarico e sovrascarico 5. Stabilità elettrolitica 6. Conseguenze dell'uso estremo e del degrado 7. Resistenza agli urti e alle pressioni meccaniche 	<p>Verifica:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Verifica dell'alimentazione 2. Conformità alle normative ambientali (produzione di NOx) 3. Verifica dell'affidabilità per lunghi periodi in condizioni variabili 4. Verifica del consumo di carburante in varie condizioni 5. Riduzione delle vibrazioni e del rumore generati dal motore per migliorare il comfort e prevenire l'usura prematura dei componenti. 6. Controllo dei carichi termici reali 7. Misura ottimale della pressione 8. Riduzione dell'attrito e dell'usura

Tabella 13. Conoscenze di controllo qualità

Nelle Tabelle precedenti sono mostrate le aree di conoscenze maggiormente impattanti per lo sviluppo e il progresso della cella a combustibile, della batteria e del motore a combustione interna.

Le grandi aziende del settore automotive possiedono in larga parte le competenze citate, in quanto necessarie da un lato per far evolvere ulteriormente il motore, e dall'altro per rendere commercializzabile batteria e cella a combustibile. Si può notare che le aree di competenza rimangono le stesse per tutte e tre: questo è comprensibile in quanto tutti sono sistemi di propulsione, che nati in modi differenti, hanno lo scopo di far muovere un veicolo.

ciò è dovuto principalmente alla loro storia tecnologica come leader in vari settori, in primis Le competenze richieste per la tecnologia delle celle a combustibile sono molto simili, se non in alcuni casi identiche, a quelle per le batterie e in alcuni casi anche a quelle per il motore a combustione. Ovviamente, ci sono delle eccezioni, ma ci sono più che altro molti punti di contatto tra queste tecnologie.

Di seguito alcune osservazioni per ciascuna area di interesse:

- chimica: è una scienza di importanza fondamentale per tutte e tre le tecnologie. Batterie e celle a combustibile si concentrano sulle reazioni di ossidoriduzione perché convertono l'energia chimica in elettricità. Le batterie immagazzinano energia in forma chimica e la rilasciano quando necessario tramite cicli di carica e scarica. Le celle a combustibile non immagazzinano energia: usano il carburante come l'idrogeno per produrre elettricità. Le reazioni e le competenze necessarie sono simili, anche se cambia lo scopo finale del prodotto, che in un caso è di semplice stoccaggio di energia. In un motore a combustione, carburante e ossigeno vengono combinati in una reazione di ossidazione esotermica. Ciò rilascia energia chimica che viene convertita in energia meccanica e trasferita alle ruote dell'auto. Le conoscenze chimiche necessarie rimangono senza dubbio simili alle precedenti. Pertanto, celle a combustibile e batterie richiedono maggiore attenzione all'elettrochimica, ai cicli di carica e scarica (batterie) e al funzionamento della cella, mentre invece la chimica di un motore a combustione riguarda maggiormente la conoscenza della combustione. Per questo motivo, l'elettrochimica non è molto rilevante in un ICE, perché la combustione e le forze meccaniche solitamente dominano.

Nelle competenze di chimica rientrano anche i materiali da utilizzare che possono essere considerati simili per tutte e tre le tecnologie. Ad esempio, gli elettrodi costituiscono una parte importante delle celle a combustibile, ma anche delle batterie, anche se i materiali richiesti sono diversi: platino e nichel per le celle a combustibile, litio e silicio per le batterie. Allo stesso modo, i catalizzatori svolgono un ruolo importante sia nelle celle a

combustibile che nei motori a combustione interna, andando a sfruttare le proprietà di elementi come il platino. Inoltre, il funzionamento e la longevità di tutte e tre le tecnologie dipendono fortemente dalla resistenza alla corrosione e alla degradazione dei materiali. Allo stesso modo, anche le caratteristiche meccaniche diventano cruciali: i materiali devono garantire un elevato livello di prestazioni anche in presenza di fatica e condizioni critiche;

- **termodinamica:** questa area di interesse è centrale in tutte le tecnologie che coinvolgono energia e calore, come in questo caso. La funzione primaria è sicuramente la necessità di calcolare bilanci e perdite di energia rendendo efficienti i sistemi. Anche la gestione termica acquisisce un ruolo importante: soprattutto negli ICE e nelle celle a combustibile, che producono calore, la comprensione delle modalità di trasferimento del calore, così come dei sistemi di raffreddamento diventano molto rilevanti per ottimizzare temperatura e resistenza. Ovviamente, la conoscenza della termodinamica cambia leggermente tra celle a combustibile, batterie e ICE. Infatti, i primi due necessitano di uno studio più approfondito della termodinamica elettrochimica come equazioni di Gibbs, potenziali degli elettrodi e stato delle cariche. In un motore, l'attenzione è sulla termodinamica della combustione, e dunque sui concetti di entalpia ed efficienza di Carnot. Ciò significa che nel primo caso, gli sviluppatori si concentreranno maggiormente sulla riduzione delle perdite elettrochimiche, nel secondo sulla minimizzazione delle perdite di calore. L'ultima differenza è il tipo di processo: le celle a combustibile considerano la reversibilità come una condizione ideale da un punto di vista elettrochimico, così come le batterie. Al contrario, la combustione è un processo irreversibile, quindi gli ingegneri qui devono cercare di minimizzare tale impatto sulle prestazioni finali del veicolo;
- **fluidodinamica:** quest'area è necessaria per avere una conoscenza di base del flusso dei fluidi, sia per le celle a combustibile che per gli ICE, dove scorre un combustibile al loro interno, sia per le batterie, dove è necessario un fluido per mantenere temperature ottimali. Allo stesso tempo, è fondamentale avere diverse modalità di raffreddamento attraverso diverse sostanze come flussi di aria o refrigeranti liquidi: questo assicura che il calore eccessivo possa essere dissipato. Invece, una differenza risiede nel tipo di flusso: nelle celle a combustibile è fondamentale conoscere la diffusione del gas in stato stazionario, negli ICE la fluidodinamica correlata alla combustione, inclusi i flussi comprimibili e il controllo della turbolenza. Infine, un'ulteriore distinzione risiede nella forma dei combustibili utilizzati: nelle celle a combustibile passa un gas reagente, l'idrogeno, mentre nei motori avviene l'iniezione di carburante come diesel o benzina in forma

liquida. Si può dedurre che la fluidodinamica ha un impatto notevole sulle celle a combustibile e sugli ICE, ma non così tanto sulle batterie;

- ingegneria elettrica ed elettronica: sono due elementi di conoscenza essenziali di tali tecnologie. Ci sono alcuni punti di contatto tra le tecnologie, come l'elettronica di potenza, la regolazione della tensione e i sistemi di conversione dell'energia per passare da corrente continua a corrente alternata. Inoltre, le unità di controllo elettroniche, dette ECU, sono diventate sempre più importanti per gestire differenti aspetti dei veicoli. Allo stesso tempo, è essenziale che ogni sistema di generazione di energia, come batterie e celle a combustibile, abbiano un sistema di gestione dell'energia (EMS), ciascuno con obiettivi di controllo diversi ma con lo stesso scopo di consentire un migliore funzionamento del sistema. I sensori e i sistemi di monitoraggio rappresentano un aspetto chiave in tutte e tre le tecnologie in quanto ogni metodo di controllo supervisiona aspetti diversi, come tensione, fasatura dell'accensione, portate d'aria e altro, ma l'obiettivo è sempre ottenere feedback e valutazioni quantitative delle prestazioni. I sistemi di diagnostica sono un altro punto centrale per consentire la sicurezza e le corrette operazioni: tali strumenti vengono quindi declinati specificamente per ciascuna tecnologia. Inoltre, i sistemi a celle a combustibile hanno spesso una batteria per gestire le fluttuazioni di potenza e migliorare l'efficienza. In presenza di motore, invece, l'attenzione deve essere rivolta all'integrazione di esso con motori elettrici e batterie, gestendo la commutazione tra fonti di potenza meccanica ed elettrica;
- simulazione multifisica: la simulazione multifisica svolge un ruolo chiave nell'integrazione di più fenomeni fisici come interazioni elettriche, termiche, fluidiche, meccaniche e chimiche in un modello unificato. Le capacità di simulazione multifisica richieste per queste tecnologie sono simili e servono a simulare interazioni complesse tra domini fisici, ma differiscono nei fenomeni specifici e negli strumenti richiesti per modellare ciascun sistema. Alcuni punti comuni sono sicuramente gli strumenti utilizzati per simulare interazioni tra fenomeni elettrici, termici e fluidodinamici come i software COMSOL e ANSYS. Tuttavia, sembra ovvio che l'attenzione principale nel caso di batterie e celle a combustibile sia sulle simulazioni elettrochimiche-elettriche, proprio come per il motore sia sulle simulazioni meccanico-elettriche;
- ingegneria ambientale: questo tema include aree tematiche cruciali che presentano sfide e opportunità per la gestione degli impatti ambientali. Ciò che rimane invariato tra le tre tecnologie è sicuramente l'approccio: ad esempio, la valutazione del ciclo di vita (LCA) è fondamentale in ciascuna ma assume contorni diversi perché analizza materiali, processi e

sistemi diversi. Infatti, nelle celle a combustibile e nelle batterie l'attenzione rimane sui materiali preziosi, come platino e cobalto, litio e nichel. Negli ICE il principale impatto ambientale è causato dal processo di estrazione del carburante (ad esempio, la raffinazione del petrolio) e dalle emissioni allo scarico. Quindi, appare chiaro che il metodo è invariato, ma l'analisi riguarda caratteristiche diverse. Tutte e tre le tecnologie richiedono attenzione poi sulla gestione dei rifiuti, nel controllo dell'efficienza energetica, nella riduzione delle emissioni e nel riciclaggio di materiali rari e tossici. Inoltre, tutto ciò che riguarda la conformità normativa e gli standard è abbastanza diverso: le principali considerazioni nelle celle a combustibile riguardano la sicurezza dell'idrogeno. La conformità agli standard emissivi ha sicuramente un impatto principalmente sul motore a combustione: in questo caso, gli standard dei veicoli sono più restrittivi, si pensi alla normativa Euro 7 o EPA. Al contrario, l'estrazione delle materie prime, la catena di fornitura e lo stato di fine vita sono aspetti cruciali da considerare nelle batterie e, in misura minore, nelle celle a combustibile. Un motore a combustione interna utilizza quasi sempre materiali comuni facilmente reperibili. Quindi, in questo specifico campo, la sostenibilità è messa in discussione molto meno;

- controllo qualità: alcune caratteristiche relative al controllo qualità rimangono concettualmente le stesse per ogni tecnologia, anche se cambiano nei contenuti. Durata, sicurezza, gestione termica, rilevamento dei difetti, integrità dei materiali sono tutti test svolti per verificare l'efficacia delle stesse condizioni operative, ma questo viene fatto in modi diversi e per diversi obiettivi specifici. Le differenze sono marcate in alcuni aspetti tecnici: il controllo della purezza e la consistenza del carburante è centrale nelle celle a combustibile, non nelle batterie e nei motori a combustione interna. La combustione nei motori richiede attenzione sulle emissioni, cosa che non accade nelle altre tecnologie. Infine, per il bilanciamento delle celle e della densità di energia nelle celle a combustibile e nelle batterie test è essenziale per efficienza energetica.

4.3 Le grandi aziende

Nell'analisi delle aziende maggiormente coinvolte negli sviluppi tecnologici odierni sono state scelte Toyota, GM e Bosch. Tale scelta è ricaduta su esse in quanto pioniere della tecnologia delle celle a combustibile nelle rispettive regioni geografiche, indipendentemente dalle applicazioni specifiche in esame. Si può infatti affermare che sono state determinanti nel progresso di questa tecnologia, dato il loro lungo impegno.

4.3.1 Toyota

La prima per importanza è sicuramente Toyota Motor Corporation [85], la più grande casa automobilistica al mondo, diventando un attore automobilistico globale capace di produrre circa tredici milioni di veicoli nel 2024 [86]. Fondata nel 1936, Toyota è emersa dopo la Seconda guerra mondiale come un leader significativo nell'industria automobilistica mondiale, sfruttando la coalizione strategica del Giappone con gli Stati Uniti per modernizzare i suoi processi di produzione e le sue competenze tecnologiche.

La supremazia di Toyota è profondamente legata alle sue filosofie di gestione innovative: il Toyota Way e il Lean Manufacturing, che hanno avuto un impatto significativo sul mondo automobilistico e non solo.

Il Toyota Way, formulato nel 2001, costituisce una raccolta di metodi e valori che ogni dipendente Toyota dovrebbe adottare per raggiungere l'obiettivo aziendale comune.

Questa filosofia si basa su due pilastri fondamentali:

- Miglioramento continuo (Kaizen): questo approccio incoraggia tutti i lavoratori a impegnarsi costantemente per apportare miglioramenti incrementali in tutti gli aspetti, dalla produzione alla gestione.
- Rispetto per le persone: Toyota crede nella motivazione dei dipendenti a tutti i livelli, promuovendo una cultura di lavoro di squadra e rispetto per gli altri. Questo approccio non solo mira alla produttività, ma si concentra anche sullo sviluppo umano all'interno dell'organizzazione.

Questi approcci vengono continuamente aggiornati per seguire le mutevoli richieste del mercato e i cambiamenti tecnologici. Molte aziende in diversi settori hanno adottato metodi simili per migliorare le proprie operazioni.

Il Sistema di produzione Toyota (TPS), sviluppato negli anni '50, è incentrato sulla produzione efficiente e sul controllo di qualità. Mette in evidenza la riduzione degli sprechi, il miglioramento dei processi e l'efficienza dei costi, conservando al contempo un output di alta qualità. Una caratteristica fondamentale del TPS è la produzione Just-In-Time (JIT), che garantisce che i materiali siano disponibili solo quando necessario, riducendo al minimo l'eccesso di inventario e gli sprechi. Il TPS ha rivoluzionato la produzione a livello globale, influenzando diversi settori.

Molti produttori di automobili si sono concentrati sullo sviluppo di veicoli elettrici a batteria. Toyota invece ha deciso di concentrarsi sulle celle a combustibile: ha iniziato a investire nella tecnologia nei primi anni '90, credendo che l'idrogeno potesse essere una fonte di energia

alternativa pulita. Nel 1996 fu allestita la prima automobile Toyota con fuel cell, mostrata successivamente al Tokyo Motor Show [87]. Toyota vedeva l'idrogeno come una soluzione ad alcuni dei problemi che i veicoli elettrici devono affrontare, come i lunghi tempi di ricarica e l'autonomia di guida limitata.

Di recente, Toyota è stata criticata per non aver supportato completamente i veicoli elettrici e per essersi invece concentrata sui veicoli a celle a combustibile, vedendo in ciò una possibile debolezza nel mercato attuale.

Nel 2014, Toyota ha lanciato la Toyota Mirai, una delle prime auto a celle a combustibile commercializzata e disponibile per il pubblico. Questo è stato un passo importante, che ha reso Toyota leader nella tecnologia delle celle a combustibile a idrogeno. Nel 2015, Toyota ha reso disponibili gratuitamente al pubblico 5.680 brevetti relativi alle celle a combustibile [88]. L'obiettivo era incoraggiare lo sviluppo della tecnologia dell'idrogeno nell'industria automobilistica e in altri settori energetici, in modo che i veicoli a celle a combustibile diventassero più popolari in tutto il mondo. Così facendo, Toyota ha dimostrato di credere nell'idrogeno come futura fonte di energia e sperava che altre aziende avrebbero contribuito a migliorare la tecnologia delle celle a combustibile per un ambiente più pulito.

Nell'ultimo decennio, Toyota ha compiuto diversi importanti progressi nella tecnologia delle celle a combustibile, concentrandosi sull'aumento dell'efficienza, sulla riduzione dei costi e sul miglioramento della praticità dei veicoli a celle a combustibile, attraverso ad esempio la riduzione della dimensione dei serbatoi per l'idrogeno per andare incontro ai vincoli dimensionali dei veicoli. Questi miglioramenti sono particolarmente evidenti nella seconda generazione di MIRAI, lanciata come veicolo elettrico a celle a combustibile di punta di Toyota [89].

Nel febbraio 2025, Toyota ha rivelato l'introduzione della terza generazione di celle a combustibile, disponibile anche per i veicoli commerciali [90]. Tra le principali novità di tale versione vi sono un netto miglioramento del consumo di idrogeno, con un'efficienza fino al 20% migliore, e una durata raddoppiata rispetto alla versione precedente. Tutto ciò sarà accompagnato da una riduzione dei costi, grazie ai miglioramenti apportati al design della cella e a un processo di fabbricazione più snello. L'aspetto maggiormente rilevante di questa nuova generazione è sicuramente la possibilità offerta da Toyota di utilizzare le celle anche su applicazioni differenti dalle automobili, come i veicoli per i trasporti pesanti, e anche le applicazioni stazionarie per la generazione di energia. L'aumento di durata è sicuramente un aspetto a tutto vantaggio dei trasporti commerciali, così come il miglioramento dell'efficienza

è fondamentale per permettere la diffusione delle auto a fuel cell, con costi operativi ridotti per i consumatori.

Ciò che ha permesso a Toyota di diventare uno dei principali leader della tecnologia fuel cell è sicuramente il suo impegno decennale attraverso le attività di ricerca e sviluppo.

Relativamente alla tecnologia, Toyota ha realizzato una cella a combustibile sempre più compatta, allo scopo di facilitare il suo inserimento anche in veicoli di piccole dimensioni come le passenger cars. Per fare ciò Toyota ha ridotto al minimo i componenti necessari: la cella a combustibile prodotta dalla casa automobilistica giapponese non presenta un umidificatore, a differenza delle principali avversarie, come la cella realizzata da Hyundai. [91]. Questa caratterizzazione è dovuta a una gestione del calore ottimale, ottenuta con un sistema di raffreddamento studiato ad hoc con giri dell'acqua interni. Inoltre, la cella è costituita da un'unità chiusa in cui le piastre bipolari sono aderenti e rivestite da una copertura termoplastica, per facilitare il passaggio di calore. La capacità di rendere la cella compatta è tradotta anche attraverso un numero inferiore di singole unità rispetto alla media dei competitors, circa 330. La compattezza si accompagna poi a un minore peso, ottenuto utilizzando il titanio, vantaggioso anche in termini di conduttività elettrica e termica. Il drenaggio funzionale dell'acqua e la membrana più sottile si riflettono anche in una densità di potenza superiore alla media. Il ruolo di primo piano che Toyota oggi possiede è sicuramente dovuto alla decisione fin dall'inizio di sviluppare totalmente all'interno dell'azienda la cella a combustibile, e affidandosi a partnerships solo quando le competenze erano già formate. Ciò ha fornito un grande vantaggio competitivo, che unito a conoscenze di chimica delle reazioni e dei materiali, della termodinamica e alla capacità di integrare le varie parti, ha condotto l'azienda a diventare leader a livello globale. Già negli anni '90, Toyota era capace di sviluppare da sé stack, processore e sistema di integrazione cella-veicolo. Si tratta di un vantaggio costruito nel tempo, lentamente e internamente, in modo da evitare di dipendere da produttori esterni e che ha permesso allo stesso tempo diventare essa stessa fornitrice della tecnologia presso altri.

4.3.2 Ballard Power Systems

Ballard Power Systems è una delle aziende più importanti nel settore delle celle a combustibile a idrogeno. Fondata nel 1979 a Vancouver, da Geoff Ballard e un gruppo di ricercatori, l'azienda ha iniziato la sua attività con l'obiettivo di sviluppare soluzioni energetiche alternative, puntando in particolare sull'innovazione delle celle a combustibile

[92]. Geoff Ballard, infatti, è spesso considerato un pioniere nel campo delle tecnologie a idrogeno. Inizialmente, l'azienda si concentrava su applicazioni spaziali e militari, ma ben presto ha rivolto la sua attenzione ai veicoli a basse emissioni e alle applicazioni industriali, riconoscendo l'enorme potenziale delle celle a combustibile per una transizione energetica sostenibile.

La sua collaborazione con Daimler-Benz e Ford per sviluppare veicoli a idrogeno fu una delle tappe cruciali. Nel 1999, il Ford Focus Fuel Cell e la Mercedes-Benz Necar, equipaggiate con una cella a combustibile Ballard, furono tra i primi veicoli a idrogeno a essere presentati pubblicamente.

Nel corso del 2000, Ballard iniziò a diversificare le sue attività: l'azienda puntò a sviluppare soluzioni di celle a combustibile per applicazioni industriali e stazionarie, come la produzione di energia per edifici e impianti. L'adozione della tecnologia a idrogeno iniziò a crescere anche in altre aree, come i trasporti pubblici, con bus alimentati a celle a combustibile che iniziarono a circolare in città come Vancouver e Londra.

Le collaborazioni con Volkswagen, Honda e Toyota per lo sviluppo di veicoli a idrogeno hanno consolidato la posizione di Ballard come leader nel settore. Nel 2019, l'azienda ha annunciato la produzione di fuel cell ad alta efficienza destinate a essere utilizzate in treni e camion pesanti, contribuendo a portare la tecnologia oltre i veicoli leggeri.

Uno degli aspetti più significativi del successo di Ballard è stata la sua capacità di adattarsi e rispondere alle esigenze del mercato. L'azienda non si è limitata alla produzione di celle a combustibile per automobili, ma ha sviluppato anche soluzioni per autobus pubblici, sistemi di backup energetico e generazione di energia off-grid, guadagnandosi una reputazione di leader nell'innovazione energetica.

Ballard, che nel 2020 aveva una market share pari al 35% del mercato delle fuel cells, grazie a tre fattori chiave: tecnologia innovativa, portafoglio prodotti ampio con più di 3400 applicazioni sviluppate e partnership globali, che hanno permesso di migliorar continuamente i materiali utilizzati. Il vantaggio competitivo di Ballard deriva in primis dal suo posizionamento in più fasi della catena del valore: si è assicurata in primis accordi di medio lungo termine per la fornitura di materiali e componenti critici, come ad esempio le piastre bipolari, così come dell'idrogeno, elemento fondamentale per le celle.

A ciò si aggiungono le competenze centrali di Ballard, ovvero il design degli stack e i sistemi di integrazione, realizzati mediante a modelli e tools realizzati dall'azienda stessa. [93]. Tra i modelli più importanti sviluppati ci sono i CFD e FEA, utili per disegnare gli scarichi dei gas

reagenti per minimizzare problemi come le fluttuazioni della densità di corrente e i “punti caldi” incontrollati all'interno dello stack.

4.3.3 General Motors

La General Motors Company è stata fondata nel 1908 a Flint, Michigan, come holding per numerosi marchi automobilistici, tra cui Buick e Cadillac [94]. L'azienda è cresciuta rapidamente, diventando leader nell'innovazione automobilistica durante gli anni '20 e '30. GM ha sviluppato metodi di produzione di massa e ha iniziato a includere cambiamenti annuali di modello, per dominare il mercato statunitense ed entrare in altre aree geografiche. Tuttavia, ha incontrato alcune difficoltà alla fine del XX secolo: tra queste, problemi economici, concorrenza da parte di altri produttori di automobili e persone che desideravano auto più piccole e più efficienti nei consumi. In tali condizioni, General Motors dichiarò bancarotta nel 2009, con conseguente salvataggio governativo.

Dopo il fallimento, GM si è concentrata su due pilastri indispensabili per il futuro: sostenibilità e innovazione. Ciò ha portato all'impegno dell'azienda nei confronti dei veicoli elettrici, con un investimento di 35 miliardi di dollari entro il 2025, con l'obiettivo di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2040. GM ha anche iniziato a esplorare una fonte energetica alternativa: le celle a combustibile a idrogeno.

General Motors ha iniziato a lavorare sulle celle a combustibile negli anni '60, sviluppando il primo veicolo fuel cell, l'Electrovan, perché vedeva l'idrogeno come una soluzione energetica pulita. GM ha lavorato con Honda e altre aziende per utilizzare le celle a combustibile in diverse applicazioni. Queste collaborazioni hanno portato a importanti progressi negli anni sia nell'efficienza delle celle a combustibile che nella riduzione dei costi. Nel 1990, l'azienda ha avviato il progetto GM HydroGen, aspirando a creare un veicolo a celle a combustibile a idrogeno pratico per i consumatori.

Nel 2007, la General Motors ha annunciato la Chevrolet Equinox Fuel Cell [95], una versione a celle a combustibile a idrogeno del suo famoso SUV. Questo veicolo è stato prodotto in piccole quantità e testato in situazioni quotidiane, senza però mai raggiungere la produzione di massa.

Nel 2017, GM ha annunciato l'introduzione della nuova piattaforma HydroTec a celle a combustibile [96], una pietra miliare fondamentale nella sua strategia sull'idrogeno. Questa piattaforma può essere utilizzata in veicoli per passeggeri, camion commerciali e autobus: GM vuole utilizzare le celle a combustibile in molte tipologie differenti di trasporto. L'azienda

ha continuato a investire nella tecnologia delle celle a combustibile per diversificare il suo portafoglio energetico: la tecnologia delle celle a combustibile è stata sviluppata per essere un'opzione aggiuntiva accanto ai veicoli elettrici e per offrire opzioni di trasporto più sostenibili. Per fare ciò, il colosso statunitense ha stretto alcune partnership cruciali: la più importante è sicuramente la joint venture stabilita con Honda per avviare la produzione commerciale di celle a combustibile a idrogeno in Ohio, migliorando allo stesso tempo la durata e l'economicità e rendendole disponibili per una diversa gamma di veicoli, come camion pesanti e macchinari edili [97].

General Motors ha compiuto inoltre importanti progressi tecnici nella tecnologia delle celle a combustibile attraverso il programma HYDROTEC, con applicazioni focalizzate su veicoli medi e pesanti.

Questi progressi rappresentano una parte importante del piano di GM per utilizzare l'idrogeno nelle sue automobili, nei suoi camion e nelle partnership con altre aziende. Tra i miglioramenti principali vi sono:

- **durata:** GM e Celadyne stanno sviluppando celle a combustibile per camion pesanti [98]. La tecnologia Dura di Celadyne rende le membrane a scambio protonico più sottili ed efficienti, limitando il modo in cui i gas e gli ioni si incrociano. Ciò rende le celle a combustibile adatte all'industria e alla logistica, dove sono necessarie una maggiore durata e una maggiore resistenza per la decarbonizzazione. Le celle a combustibile a idrogeno devono essere cinque volte più durevoli per raggiungere questo obiettivo. Ciò viene fatto con un PEM a doppio strato a bassa permeabilità, che tiene fuori il gas lasciando passare l'elettricità. Ciò rende le membrane più sottili e meno resistenti. La tecnologia riduce l'incrocio dell'idrogeno, che causa radicali liberi, e rende anche gli elettrolizzatori più sicuri. Questa cella a combustibile ha dimostrato di funzionare quattro volte meglio nei test di stress.
- **Metalli preziosi:** GM sta compiendo seri sforzi per ridurre la dipendenza dai metalli preziosi nei suoi sistemi a celle a combustibile HYDROTEC. Un esempio è il platino, un fattore capace di rendere molto costose le celle a combustibile. Tuttavia, l'azienda si sta impegnando a ridurre la quantità richiesta di questi metalli attraverso miglioramenti tecnologici, in particolare nell'ottimizzazione del catalizzatore.
- **Applicabilità:** General Motors sta sfruttando l'attuale elevata maturità delle sue celle a combustibile per diversi metodi di trasporto, come navi, aerei, camion e autobus, data la difficoltà di lancio nel mercato automobilistico.

- Modularità e piattaforma di sistema: nel corso degli anni, GM ha dedicato molto tempo alla progettazione di una cella a combustibile compatta e modulare che migliora la facilità di confezionamento, in particolare per l'integrazione in vari tipi di veicoli e applicazioni industriali [99]. Il sistema è costruito per produrre la massima potenza nel più piccolo spazio.

4.3.4 Bosch Group

Robert Bosch fondò la Bosch nel 1886 a Stoccarda, in Germania [100]. Inizialmente si trattava di un'officina per meccanica di precisione ed ingegneria elettrica focalizzata su sistemi di accensione per autoveicoli ed elettrodomestici. Bosch crebbe fino a diventare un leader mondiale in soluzioni tecnologiche e ingegneristiche nel secolo precedente.

Nel corso dei decenni, la Bosch si diversificò in vari settori, tra cui l'automotive, l'elettronica, i beni di consumo e le tecnologie energetiche e edilizie [101]. La sua divisione automotive divenne influente nel dare forma alle moderne tecnologie di trasporto: con l'aumento delle preoccupazioni ambientali e della domanda di fonti di energia sostenibili alla fine del XX secolo, Bosch riconobbe il potenziale delle celle a combustibile come chiave per una mobilità a basse emissioni e per l'energia pulita.

Gli ambiti di ricerca di Bosch sono piuttosto allineati con le altre grandi aziende: digitalizzazione, connettività, automazione, sostenibilità e infine elettrificazione. Ovviamente, tutti questi ambiti di ricerca sono strettamente interconnessi: sostenibilità e digitalizzazione devono dialogare tra loro, proprio come accade con l'elettrificazione.

Gli ambiti di ricerca di Bosch sono piuttosto allineati con le altre grandi aziende: digitalizzazione, connettività, automazione, sostenibilità e infine elettrificazione. Ovviamente, tutti questi ambiti di ricerca sono strettamente interconnessi: sostenibilità e digitalizzazione devono dialogare tra loro, proprio come accade con l'elettrificazione.

Oltre alla fuel cell per la mobilità, Bosch sta ricercando e sviluppando altre tecnologie dell'idrogeno: la produzione di idrogeno tramite elettrolisi e le celle a combustibile a ossidi solidi per le centrali elettriche.

Bosch ha iniziato a lavorare sulle celle a combustibile perché c'era un crescente interesse per l'idrogeno come alternativa pulita ai combustibili fossili. L'azienda ha iniziato a considerare le celle a combustibile nel 1968. Si è principalmente concentrata sulle celle a combustibile a membrana a scambio protonico (PEM).

Bosch ha collaborato con produttori di automobili come Daimler e BMW e istituti di ricerca per installare le celle a combustibile nelle auto. Nel 2019, Bosch ha unito le forze con PowerCell Sweden per accelerare l'industrializzazione delle celle a combustibile PEM per veicoli pesanti [102]. Ora l'obiettivo principale è quello di abbassare i costi di produzione, che rallentano l'ingresso massiccio sul mercato.

Bosch sta sviluppando sistemi di celle a combustibile per camion e generazione di energia distribuita.

I principali traguardi tecnici raggiunti dal gruppo Bosch nel settore delle celle a combustibile sono:

- sistema di integrazione: Bosch può ora produrre celle a combustibile completamente integrate, ottenendo un sistema di ottimizzazione completo [103]. Ciò è possibile grazie all'ampia gamma di competenze di Bosch in molte aree. L'azienda può infatti produrre contemporaneamente stack, compressore d'aria e unità di controllo perché questi componenti sono stati sviluppati in precedenza per altre tecnologie;
- efficienza: Bosch sta lavorando per migliorare la tecnologia delle celle a combustibile studiando come rendere più efficiente lo strato del catalizzatore. Studiando come l'umidità e la temperatura influenzano le prestazioni delle celle a combustibile, Bosch punta a migliorare l'efficienza e la durata. Bosch utilizza strumenti come la spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) per monitorare in dettaglio il comportamento del sistema.
- materiali: Bosch sta studiando nuovi catalizzatori, membrane e piastre bipolari. Migliorando tali parti, le celle a combustibile possono migliorare il proprio funzionamento anche in termini economici.

Confrontando simultaneamente le competenze necessarie per lo sviluppo delle celle a combustibile e le competenze possedute dalle aziende analizzate, appare evidente che esiste già un matching abbastanza elevato tra le conoscenze richieste e le conoscenze possedute. Infatti, se così non fosse, le aziende menzionate non sarebbero in grado di produrre il prodotto.

Dopo l'analisi delle competenze e dei big players, si può affermare che le celle a combustibile possono essere considerate un prodotto con grado di maturità tecnologica abbastanza spiccato, sviluppato ormai molti anni fa. In questo momento, insieme alla batteria, la fuel cell rappresenta per il futuro una delle possibilità sostenibili più promettenti nelle applicazioni di mobilità e generazione di energia. Inoltre, si può chiaramente osservare che le celle a combustibile richiedono competenze precise, che sembrano in alcuni temi abbastanza distanti da quelle richieste per lo sviluppo di un motore a combustione. Esistono maggiori

somiglianze con le batterie: ciò significa che gli enti aziendali coinvolti nei processi di ricerca e sviluppo per il consolidamento della tecnologia al fine di lanciarla in produzione, avranno probabilmente bisogno di competenze diverse, che possono acquisire dall'esterno tramite assunzioni o tramite l'acquisizione di aziende competenti.

Questo perché la struttura della tecnologia cambia: di conseguenza, cambiano la modalità di funzionamento, la realizzazione del prodotto, così come i materiali richiesti e i test di conformità da effettuare. Tutte le questioni qui menzionate portano ad affermare che i grandi leader del motore a combustione interna hanno dovuto e stanno continuando ad effettuare un importante upgrade delle loro capacità tecnologiche: si pensi, ad esempio, alle partnership del Gruppo Bosch con Powercell Sweden, una start-up focalizzata sullo studio delle celle a combustibile. Analogamente, Honda e GM hanno stipulato accordi strategici per lo sviluppo della tecnologia, cercando di colmare le lacune di conoscenza di entrambi.

5. La nuova traiettoria tecnologica del settore automotive

5.1 Identificare l'innovazione del futuro

Nei prossimi anni, il settore automotive si troverà di fronte a un salto tecnologico importante, imposto dalle strette sulle emissioni: l'Unione Europea, come già detto, vieterà l'utilizzo di motori endotermici per trasporti su strada dal 2035. Tale notizia porta con sé delle conseguenze tecnologiche da affrontare: il motore a combustione cesserà per forza di essere la tecnologia utilizzata nella maggior parte dei trasporti stradali, aprendo così alla necessità di indagare altre tecnologie sostitutive. In termini di innovazione è cruciale indagare come potenzialmente si configurerà il passaggio da una tecnologia all'altra, ovvero è necessario studiare come si strutturerà il salto del paradigma. È pertanto fondamentale analizzare accuratamente le tassonomie con cui un'innovazione può essere definita: lo scopo ultimo non è incasellarla in una categoria definita e precisa, ma capire quali suoi fattori influenzano maggiormente il settore automotive, e di conseguenza provare a predire l'andamento tecnologico del prossimo futuro.

5.1.1. Tassonomie e modello di Henderson e Clark

L'innovazione può essere caratterizzata in modi differenti, a seconda dell'aspetto chiave che si vuole analizzare. Solitamente ciascuna caratterizzazione è presentata in coppia, l'una l'opposto dell'altra.

Di seguito le principali tassonomie esistenti applicate al settore dell'automotive rispetto alle nuove tecnologie, la cella a combustibile e la batteria agli ioni litio. Quest'ultime si configurano come innovazioni:

- di prodotto, perchè portano novità nel prodotto stesso e non nel loro processo produttivo. Quest'ultima seguirà la prima quando la diffusione del prodotto sarà tale da giustificare netti miglioramenti nella produzione;
- radicali, perchè necessitano del salto del paradigma tecnologico, in quanto si configurano come tecnologie nettamente distinte dal motore. Il miglioramento della stack della cella o della durata della batteria si configurerebbero invece come innovazioni incrementali, che prendono forma una volta che la nuova traiettoria è stata scelta;
- in parte competence destroying, in quanto le aziende del settore automotive devono essere capaci di rinnovare le proprie competenze per permettere lo sviluppo delle

nuove tecnologie, che richiedono competenze, in particolare di chimica e simulazione multifisica, lontane dal proprio portafoglio di conoscenze;

- core, in quanto si tratta del sistema di propulsione di un veicolo che può essere considerato il cuore del veicolo stesso. Le innovazioni core, infatti, impattano le funzionalità primarie e non quelle periferiche. Utilizzare una cella a combustibile o una batteria piuttosto che un motore vuol dire modificare profondamente il funzionamento complessivo del veicolo, considerando serbatoi, durata e così via;
- potenzialmente disruptive, in quanto hanno le capacità di provocare un forte sisma nel settore, con conseguente uscita dei principali produttori di automobili. Il rischio disruption verrà analizzato in maniera più approfondita più avanti.

Ovviamente non esiste un'unica visione univoca sul tema delle tassonomie, così come è difficile definire a priori se un'innovazione sarà destroying o disruptive o incrementale: ciò che è possibile è l'utilizzo di strumenti della teoria dell'innovazione per provare a fare una previsione a seconda di più variabili.

Un aspetto rilevante nell'analisi di un'innovazione è sicuramente l'architettura di prodotto, in quanto strettamente connessa con il concetto di tecnologia. Il Modello di Henderson e Clark mette in relazione questi due fattori, i cambiamenti tecnologici e i cambiamenti architetturali. La possibilità che quest'ultimi si realizzino o meno delinea quattro differenti tipologie di innovazione. In Tabella 14 un esempio del modello applicato al settore automotive.

Relazione tra componenti		
Cambiamento della tecnologia di riferimento	NON CAMBIA	CAMBIA
CAMBIA	INNOVAZIONE MODULARE: finestrino elettrico	INNOVAZIONE RADICALE: Sistema di propulsione
NON CAMBIA	INNOVAZIONE INCREMENTALE: upgrades emissivi	INNOVAZIONE ARCHITETTURALE cambio nella piattaforma

Tabella 14. Esempio di modello di Henderson e Clark

Il modello di Henderson e Clark non è univoco, ma permette alcune interpretazioni più o meno stringenti a seconda delle innovazioni considerate.

Nell'automobile il passaggio da finestrino manuale, cioè a manovella, a finestrino elettrico rappresenta un esempio di innovazione modulare: non cambia la relazione tra componenti, e dunque l'architettura, ma cambia la tecnologia di riferimento. Questo è vero se il sistema globale che si analizza è il veicolo, altrimenti se si analizzasse solamente il sistema finestrino si configurerebbe come innovazione radicale, a causa del doppio cambio tecnologico e architettonico.

Gli upgrade emissivi, ovvero i miglioramenti sulla quantità massima di inquinanti producibili dal veicolo in corsa, sono considerati parte di un'innovazione incrementale. Tali upgrades, solitamente richiesti dagli enti legislativi nazionali, non prevedono né un cambio di architettura né un cambio di tecnologia: essi sono realizzati a partire dalla stessa tecnologia di base, il motore, a cui nel corso del tempo è stato aggiunto e poi migliorato il sistema di post trattamento dei gas di scarico. A mano a mano che le norme sono diventate più stringenti, i costruttori di sistemi di propulsione hanno affinato la tecnologia, portando di volta in volta la macchina ad emettere una quantità di inquinante inferiore. Ciò è possibile grazie alle continue attività di ricerca e sviluppo sui sistemi di scarico attraverso combinazioni di sistemi di filtraggio, sostanze catalitiche e miglioramenti ingegneristici [104].

La piattaforma veicolare di un'automobile, in inglese *platform vehicle*, è una struttura composta da più moduli, come telai, sotto telai e pianale, che costituiscono lo scheletro del veicolo sul quale vengono realizzati gli allestimenti e la costruzione dell'intera struttura [105]. In tal modo, i costruttori standardizzano un'unica piattaforma per più modelli, così da abbassare i costi di produzione e i tempi di sviluppo e generare economie di scala, e allo stesso tempo aumentare il proprio portfolio prodotti così da attrarre più segmenti di mercato. Se si cambia un elemento nella piattaforma, ciò che si verifica è un cambio architettonico che non va a modificare la tecnologia, ma solamente come si relazionano i componenti.

Il sistema di propulsione, come detto precedentemente, rappresenta il centro di un'automobile, in primis perché solitamente guida i cambiamenti del settore e anche perché la maggior parte dei grandi cambiamenti lo riguardano. Se cambia la modalità con cui avviene la propulsione della potenza verso le ruote allora significa che è cambiata la tecnologia centrale del veicolo, e contemporaneamente sono stati ridisegnati i collegamenti tra componenti: è un'innovazione radicale. Il passaggio da motore a combustione interna alla futura tecnologia emergente impone dunque anche un cambio di architettura: ciò vuol dire che la batteria, la cella a combustibile o le altre alternative alla mobilità saranno innovazioni radicali, e di conseguenza anche architettoniche. Ciò è dovuto da un lato al cambiamento di tecnologia, e dunque di competenze necessarie, dall'altro al cambiamento delle relazioni tra componenti.

Ciò, infatti, si riflette sia sulla struttura organizzativa della singola azienda, che sull'intero settore industriale, coinvolgendo tutte le imprese. Cambiando le relazioni tra componenti, cambiano anche i rapporti lungo la catena del valore, specialmente laddove le conoscenze necessarie per superare il cambiamento non evolvono.

5.1.2 Paradigmi tecnologici a confronto: analisi della disruption

Nelle Figure 45, 46 e 47 sono mostrati i paradigmi di motore a combustione interna, cella a combustibile e batteria agli ioni litio rispettivamente. Essi sono rappresentati sottoforma di "balloons", in cui in ciascun ovale è rappresentato un attore o un sistema coinvolto nella tecnologia.

Tra motore e cella a combustibile così come tra motore e batteria si spezzano parecchi legami all'interno del paradigma. In particolare, nel caso della batteria cambiano i produttori della stessa, a differenza della fuel cell, dove essi rimangono all'incirca quelli dei motori, ad eccezione di alcuni ingressi. In ugual misura invece variano sia i fornitori di componenti e di beni complementari, così come i prodotti da loro messi a disposizione.

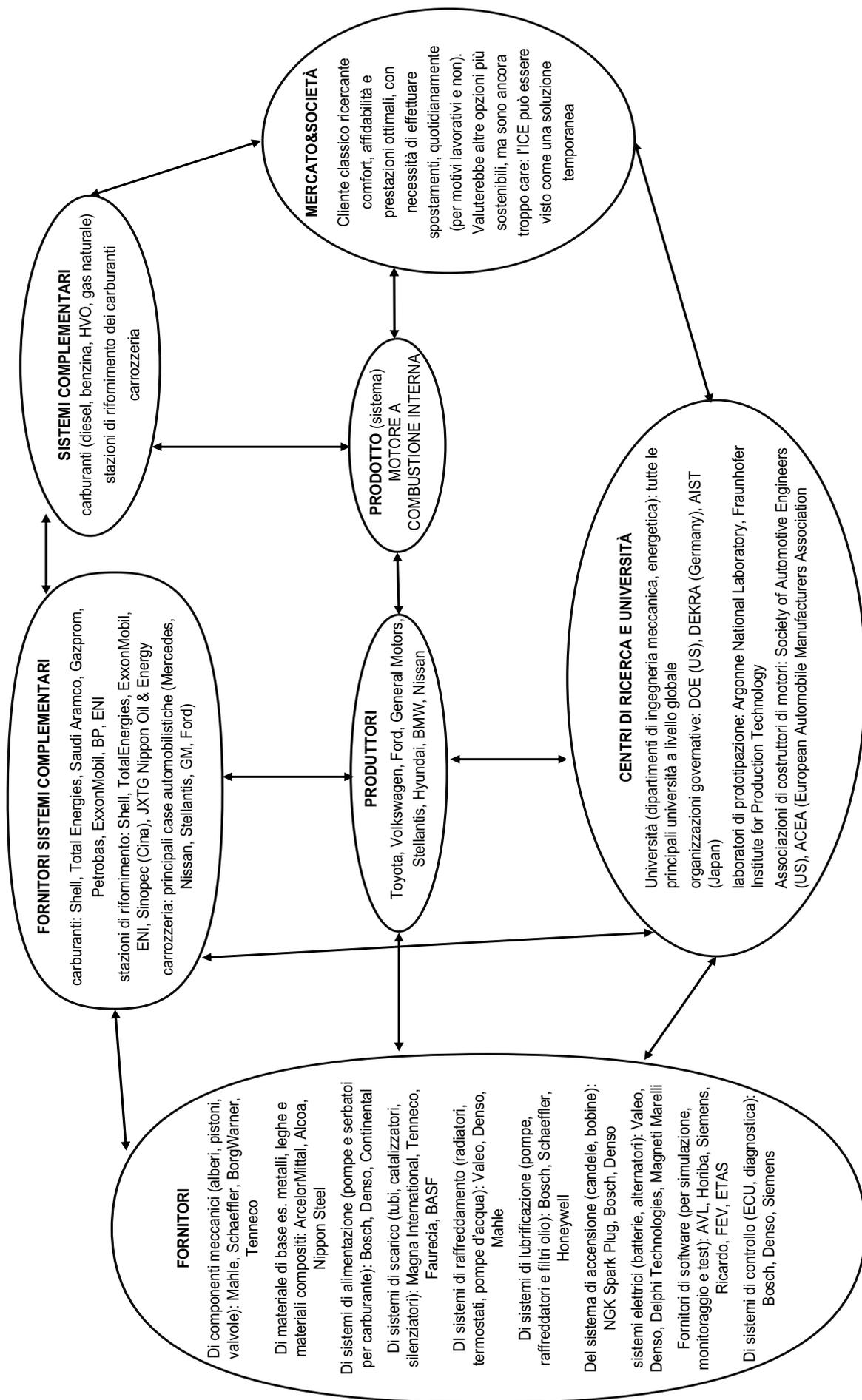


Figura 45. Paradigma tecnologico del motore a combustione interna

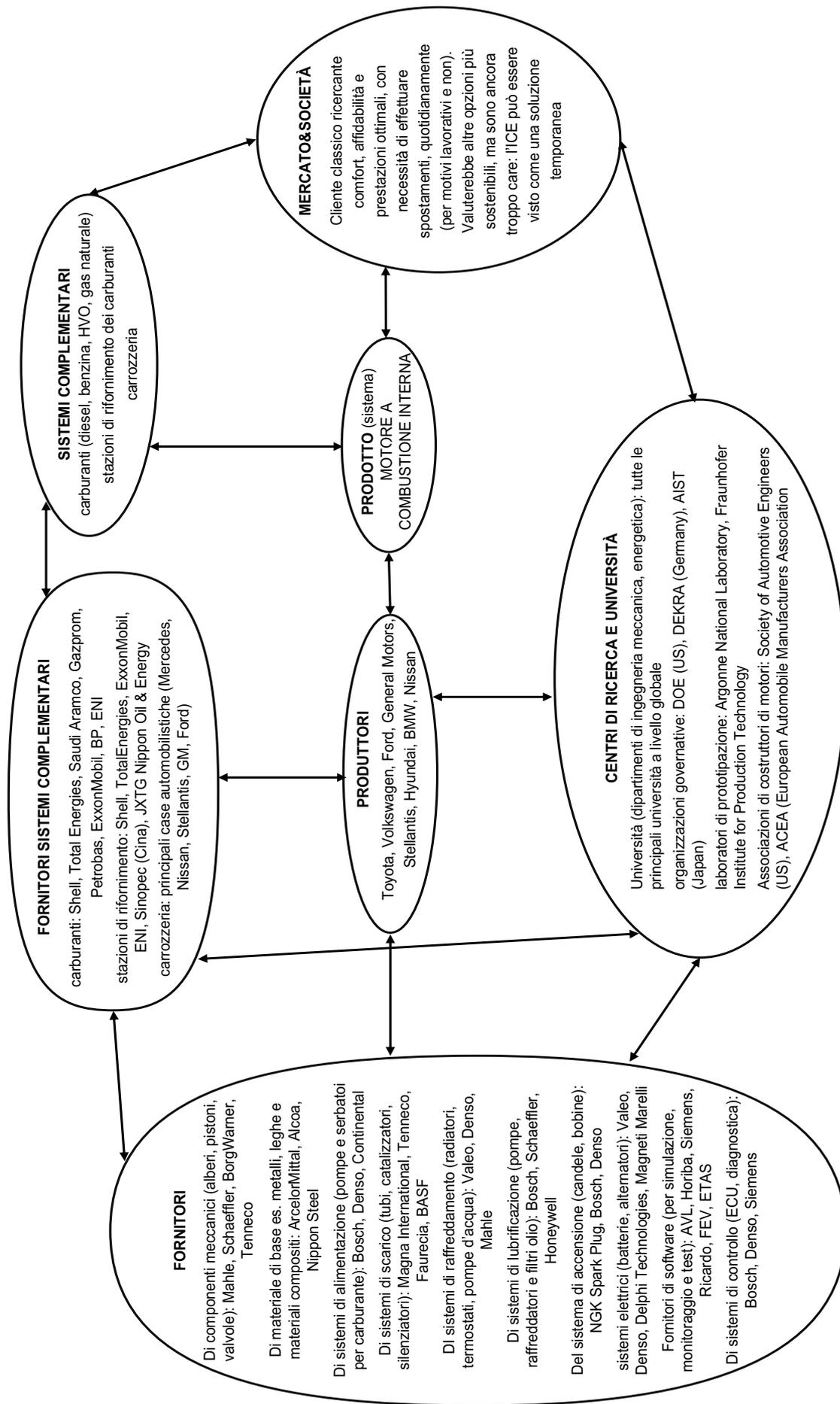


Figura 46. Paradigma tecnologico della cella a combustibile

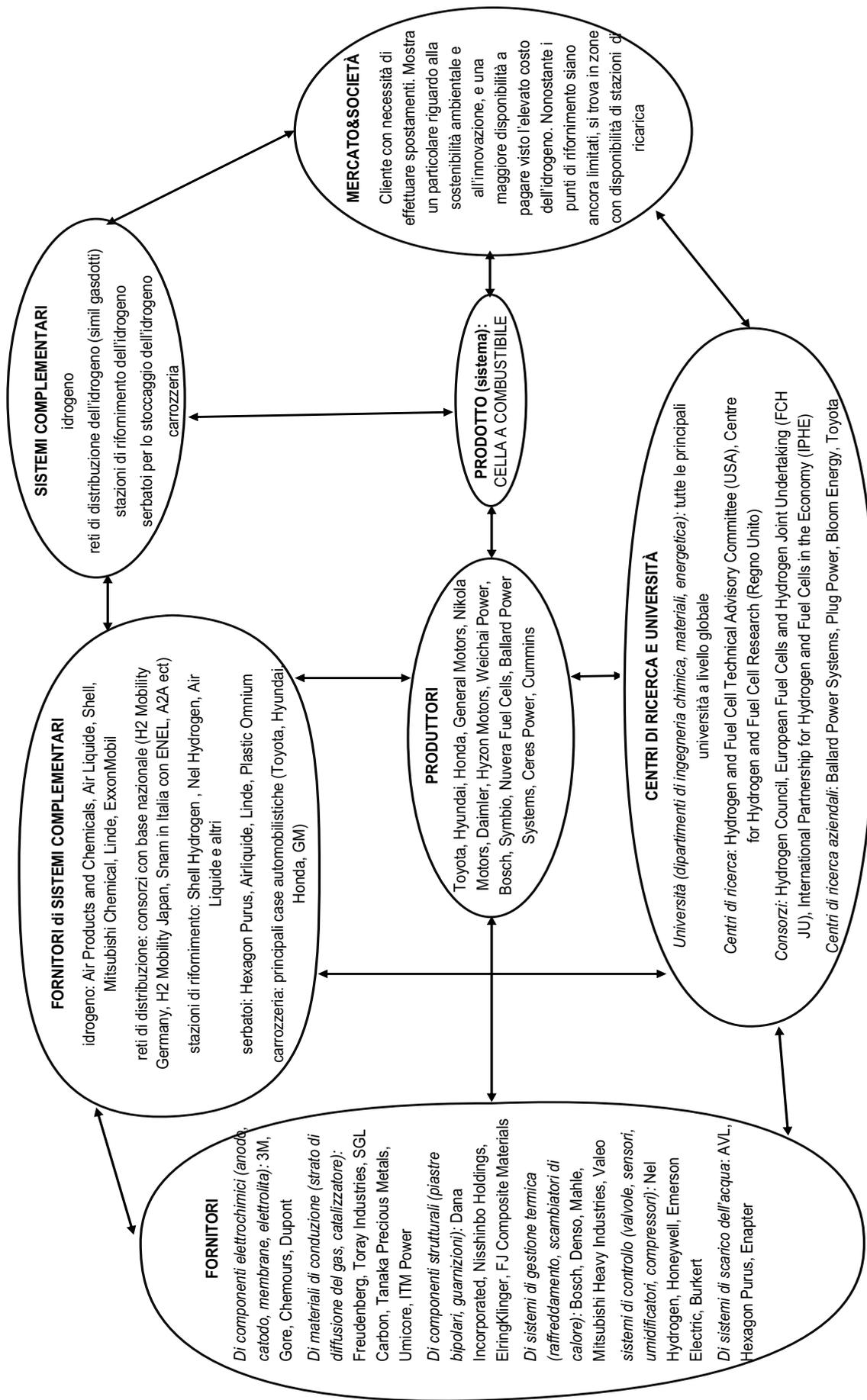


Figura 47. Paradigma tecnologico della batteria agli ioni litio

Osservando come cambiano i paradigmi, è possibile analizzare anche la possibilità che si verifichi disruption.

Come detto nel Capitolo 2, esistono alcuni fattori da monitorare per dire se un'innovazione potrebbe configurarsi come disruptive.

Nel caso della cella a combustibile e della batteria l'analisi degli aspetti chiave è la seguente:

- fattori oggettivi: la distanza oggettiva tra motore a combustione e batteria e cella a combustibile è elevata. Le due tecnologie emergenti sono strutturalmente molto differenti rispetto al motore in termini tecnologici e di competenze, soprattutto sui temi dell'elettrochimica, per cui vi potrebbe essere difficoltà per le imprese del settore automotive a unirsi al nuovo paradigma tecnologico. La vecchia tecnologia continua a soddisfare alcuni bisogni tradizionali fondamentali per il consumatore, tra cui spendere poco per muoversi e la comodità di utilizzo, ma non i bisogni emergenti come l'abbassamento degli impatti ambientali causati dalle emissioni. Nonostante le sempre più stringenti regolamentazioni emissive, un livello zero di emissioni è impossibile da raggiungere con il motore;
- fattori soggettivi: il cambiamento del sistema di competenze può pesare molto, così come il learning organizzativo. Tali fattori incidono però in misura minore rispetto ai fattori oggettivi. Il rischio è che le aziende del settore non vedano che una nuova tecnologia si stia affermando in maniera forte e che sia in grado di sostituirsi al motore, a causa dell'inerzia cognitiva. Dunque, l'azienda non fa nulla per impedire che ciò accada, a causa dell'inerzia d'azione, perché reputa che il motore abbia più «punti a favore» rispetto alle batterie o alle celle a combustibile come, ad esempio, la disponibilità di stazioni di rifornimento, il carburante a più basso costo, la diffidenza del consumatore e così via. Il ritardare gli investimenti e le attività di R&S è una conseguenza delle inerzie cognitive e d'azione delle aziende incumbents, che potrebbe portarle in una condizione sfavorevole sui mercati tradizionali ed emergenti;
- trappole cognitive: i costi affondati nelle nuove tecnologie generano molta riluttanza negli incumbents perché significa investire molto sia in impianti che in conoscenze nuove. Inoltre, tale trappola è peggiorata dagli investimenti in R&S nella tecnologia dominante e nei suoi upgrades, in particolare quelli emissivi richiesti dai legislatori. La path dependency rema fortemente contro le aziende automotive, che continuano a fare riferimento al loro predominio passato, screditando l'avanzata di nuovi colossi, specialmente cinesi, come BYD e Geely [106].

- comportamento miope: gli incumbents devono essere in grado di unirsi al paradigma, anche utilizzando modalità diverse da quelle predefinite. Ad esempio, le competenze possono essere acquisite mediante co-development, come stanno facendo alcune aziende come Toyota, Honda e GM sia sulle batterie che sulle fuel cells. Un'ulteriore possibilità di rimettersi in corsa è l'acquisizione di aziende focalizzate sulla tecnologia emergente. Rischioso invece potrebbe essere l'acquisto della tecnologia direttamente da aziende specializzate, come se si trattasse di un comune componente del veicolo: in tal modo il sistema di propulsione, fino ad oggi considerato il cuore tecnologico delle automobili, diventerebbe un mero oggetto di fornitura. Tuttavia, quest'ultima opzione acuirebbe il gap di conoscenza a lungo termine tra aziende incumbents e nuovi entranti, con il rischio molto certo di essere uscire dal mercato. Ciò sta accadendo in molti casi con le batterie, dove aziende automobilistiche europee, per colmare più velocemente il divario con i produttori cinesi, acquistano da loro gli stacks per il pacco batteria.

Tenendo conto di tutti i fattori qui analizzati si può affermare che la tecnologia della cella a combustibile si configura come potenzialmente disruptive, e dunque non solo in grado di ridisegnare la conoscenza alla base del settore, ma di modificarlo direttamente, cacciando dal mercato gli incumbents. La batteria agli ioni litio, data la sua maggiore penetrazione nel mercato, e gli effetti che sta causando agli incumbents negli ultimi anni, si sta configurando come effettivamente disruptive.

Il passaggio degli incumbents alla cella a combustibile potrebbe essere relativamente veloce grazie a investimenti mirati nel tempo, utilizzando le loro capacità produttive, le reti di fornitori e le concessionarie esistenti per contrastare la minaccia degli entranti. La disruption potrebbe in futuro arrivare se qualche nuovo player riuscisse a ottenere performance ancora migliori a costi ancora più bassi per i consumatori. Ad oggi non esistono nuove aziende entranti simil-Tesla nel settore delle celle a combustibile, ma piuttosto ci sono fornitori della tecnologia che riforniscono i principali players presenti che si stanno espandendo, come Ballard Power Systems. In alcuni casi, dunque, le aziende storiche sviluppano da sé la cella a combustibile cercando di evitare gap di competenze, ciò anche attraverso programmi di co-development con aziende produttrici specializzate. La storia dei FCEVs potrebbe configurarsi però in modo simile a quella dei BEVs nei prossimi anni in base alle evoluzioni del mercato, con la possibilità di diventare una tecnologia disruptive se arrivassero dei nuovi players capaci di far uscire dal mercato tutti i produttori attuali.

La batteria si sta lentamente configurando come tecnologica disruptive in quanto i nuovi entranti stanno acquisendo sempre maggiori quote di mercato anche nei territori dove le case automobilistiche locali sono sempre state forti, come l'Europa. Ciò ha impiegato parecchi anni, un decennio circa, ad avvenire in quanto gli incumbents hanno deciso inizialmente di sopperire al divario di competenze sull'elettrico acquisendo la batteria, cioè la tecnologia core, esternamente dai vari colossi asiatici. Ciò si sta rivelando poco favorevole perché costa di più, e dunque i veicoli hanno costi maggiori che si riflettono in prezzi di vendita ai consumatori finali più alti rispetto alle automobili cinesi. Infatti, ciò si accompagna a una generale diminuzione dei costi dei BEVs da parte dei nuovi entranti che, dopo parecchi anni di investimenti, riescono finalmente a sfruttare economie di scala e di apprendimento, mancanti ai players tradizionali. Tuttavia, finché la maggior parte dei players non verranno spazzati via, la tecnologia non è definibile in modo disruptive al 100%. In base alle future evoluzioni legislative e di mercato si vedrà se è disruptive o sustaining. Per la fuel cell vale un discorso simile, ma con uno salto di tempo di circa 10/20 anni: per questo motivo ad oggi il rischio disruption è più basso che per la batteria.

Più le aziende leader del settore decidono di colmare il divario tramite la catena di fornitura solamente, più dipenderanno da essa e rischieranno di perdere quote e uscire dal mercato. BYD, ad esempio, sta emergendo come nuovo entrante perché possiede le competenze e produce la tecnologia core, con vantaggi di costo e di performance importanti.

Nel 2013, i ricercatori Scott Hardman, Robert Steinberger-Wilckens e Dan Van der Horst hanno analizzato il fenomeno della disruption della cella a combustibile a idrogeno e della batteria agli ioni litio, in entrambi i casi considerando le applicazioni veicolari [107]. Nel loro articolo, sottolineando che la disruption fino ad allora era studiata solo mediante casi studio favorevoli, hanno provato a definire quali caratteristiche rendono le tecnologie potenzialmente disruptive. Tale studio è stato compiuto esaminandole prima che ciò accada, quando la penetrazione nel mercato è nulla o bassa. In particolare, Hardman e gli altri ricercatori hanno analizzato le caratteristiche chiave della batteria cercando di comprendere quali hanno impattato il suo essere disruptive. Dopodiché, definiti gli aspetti di interesse, hanno cercato di riconoscere gli stessi nella cella a combustibile. La comparazione tra batterie e fuel cells è molto sensata dal momento che l'aspettativa è che i FCEVs siano in grado di conquistare una quota di mercato del settore automobilistico come i BEVs stanno facendo oggi.

Come osservato nei paradigmi tecnologici, oggi la maggior parte dei produttori tradizionali del settore automobilistico è anche produttore di veicoli elettrici, ad eccezione di alcuni nuovi entranti. Tuttavia, i componenti della catena di fornitura provengono da una serie di fornitori

completamente diversi da prima: gli elementi centrali della batteria come gli stacks arrivano generalmente da nuovi produttori cinesi. Nello studio si evidenziano due principali metodologie di ingresso nel mercato per i BEVs: mass market e niche market, dunque, mercato per molti e mercato di nicchia. Nonostante ci si aspetti che la prima alternativa sia efficace, ciò non avviene: i prezzi più bassi, ottenuti a scapito di un valore aggiunto più basso, non giustificano i costi totali a carico di un consumatore early majority ben maggiori del costo di un'automobile con motore. Nel mercato di nicchia, in cui i veicoli di riferimento sono ad esempio le Tesla, la strategia vincente consiste nel non concentrarsi sull'abbassamento dei costi, ma piuttosto sul creare valore aggiunto per il consumatore. Quest'ultimo non è il classico cliente di fascia media poco interessato agli aspetti tecnologici, ma piuttosto un appassionato del settore, un cosiddetto early adopter. Durante la fase iniziale, la seconda tipologia di penetrazione si è rivelata vincente, nonostante il ragionamento logico porti a pensare che la prima strategia possa portare a maggior successo. È importante notare che l'introduzione dei BEVs si sta fino a oggi rivelando difficile. Si può infatti ricordare come numerose tecnologie disruptive di successo abbiano invece avuto un'introduzione sul mercato molto più lineare. Ciò è dovuto in particolare a tre fattori: l'effetto lock-in delle automobili con motore a combustione, la rilevante dimensione tecnica e sociale di tale innovazione, che modifica il modo di muoversi, e infine la percezione pubblica, i dubbi e le preferenze dei consumatori. Inoltre, è bene sottolineare che nonostante il successo in alcuni segmenti di mercato, il BEV si sta solamente ora affacciando alla produzione di massa.

L'aspetto più rilevante dello studio è l'identificazione delle tre caratterizzazioni che contraddistinguono la disruption: più una tecnologia possiede questi attributi più sarà disruptive. La disruption può avvenire a livello di:

- market leaders, ovvero gli incumbents del settore. Ciò si verifica se i principali produttori della tecnologia disruptive sono diversi dai players tradizionali. Nel caso dei BEVs questo non è direttamente vero per i produttori del veicolo, i cosiddetti OEMs, ma piuttosto per i produttori della nuova tecnologia, appunto la batteria e tutti gli altri componenti elettrici. Ciò è evidente nel segmento di veicoli non luxury, si pensi a Stellantis o Renault. Ovviamente, se si considera invece il prodotto di Tesla, il grado di disruption aumenta notevolmente;
- utilizzatori finali, quando le modalità con cui quest'ultimi si interfacciano con la tecnologia cambiano. Solitamente, per ottenere successo le tecnologie disruptive richiedono un cambio relazionale dei consumatori rispetto al prodotto offerto, a partire dall'interazione. Il BEV, ad esempio, prevede una modalità di rifornimento differente,

necessitando di elettricità per funzionare. Il consumatore, infatti, ricarica l'automobile presso la propria abitazione oppure presso un punto di ricarica, dotata delle cosiddette colonnine. Inoltre, l'auto elettrica mette a disposizione un maggior livello di servizio, in quanto è più silenziosa, non emette emissioni, ha costi operativi inferiori e gode di agevolazioni statali come meno tasse e parcheggi gratuiti in alcuni casi;

- infrastruttura, ovvero quando un qualunque sistema complementare necessario al funzionamento della tecnologia è differente rispetto a quelli offerti dalla tecnologia precedente. Questo aspetto è solitamente quello di maggior impatto, e si dimostra vero nel settore automotive. Con l'ascesa di tecnologie a zero emissioni, teoricamente dovrebbe prendere piede anche la disruption del settore petrolifero e dell'infrastruttura di rifornimento degli ICEs. Ciò significa che al contempo un settore scompare, mentre la nuova infrastruttura ha bisogno di essere costruita per permettere l'adozione della tecnologia emergente. L'infrastruttura rappresenta un investimento iniziale necessario, a cui si deve aggiungere il suo continuo efficientamento, per ottenere cariche sempre più veloci. Oggi è difficile trovare in qualunque parte del mondo una rete di ricarica ben sviluppata, motivo per cui i consumatori devono ricorrere alla ricarica casalinga, che però non offre il vantaggio di poter essere indipendenti dalla durata del veicolo. Questo è sicuramente uno dei fattori maggiormente limitanti della batteria.

La cella a combustibile invece si configura come tecnologia candidata alla disruption in quanto è prodotta sia da compagnie esterne al settore automobilistico che da alcune grandi aziende come Toyota e General Motors. Allo stesso modo della batteria, essa è potenzialmente capace di ridisegnare il settore della mobilità su strada: si pensi che l'approvvigionamento dell'energia necessaria passerebbe dalle grandi compagnie petrolifere ai produttori di idrogeno su larga scala. Secondo l'analisi dello studio precedente, anche i FCEVs, similmente ai BEVs, si configurano come disruptive su due dei tre livelli identificati: i servizi addizionali a disposizione del consumatore e l'infrastruttura. Rispetto ai market leaders, non si verifica disruption perché i produttori di veicoli a cella a combustibile sono per lo più i convenzionali produttori di veicoli a benzina o diesel, ad eccezione di pochi nuovi entranti.

I principali vantaggi dei FCEVs sono identici a quelli dei BEVs, con l'aggiunta di maggior autonomia, laddove l'infrastruttura esiste: tali veicoli potrebbero dunque in prima battuta iniziare ad aggredire un segmento di nicchia, nonostante i costi di produzione ancora molto elevati ribaltati poi su compratori. I produttori di FCEVs devono essere in grado di far percepire il valore aggiunto del prodotto: possono fare ciò sfruttando i punti di forza della

cella a combustibile rispetto al motore, come il taglio delle emissioni e l'autonomia prolungata.

5.2 Batteria o cella a combustibile in futuro?

Il passaggio dal motore a combustione è ormai dato per certo: esso verrà tecnologicamente superato da altri sistemi di propulsione. È importante cercare di comprendere quale tecnologia appare capace di posizionarsi competitivamente meglio tra tutte le possibilità. In questo caso si prendono in esame solamente le opzioni che prevedono un cambio radicale della tecnologia, come batteria e fuel cell. Le altre opzioni, migliorative rispetto al motore, come le versioni ibride, non vengono analizzate.

5.2.1 Modello di Abernathy Utterback

Per comprendere il modello è necessario innanzitutto costruire i quattro grafici che lo compongono ovvero curva delle performance, curva delle vendite, curva dei brevetti e curve delle aziende del settore, tutte rappresentate rispetto al tempo.

In Figura 48 è mostrato il grafico delle performance delle tre tecnologie.

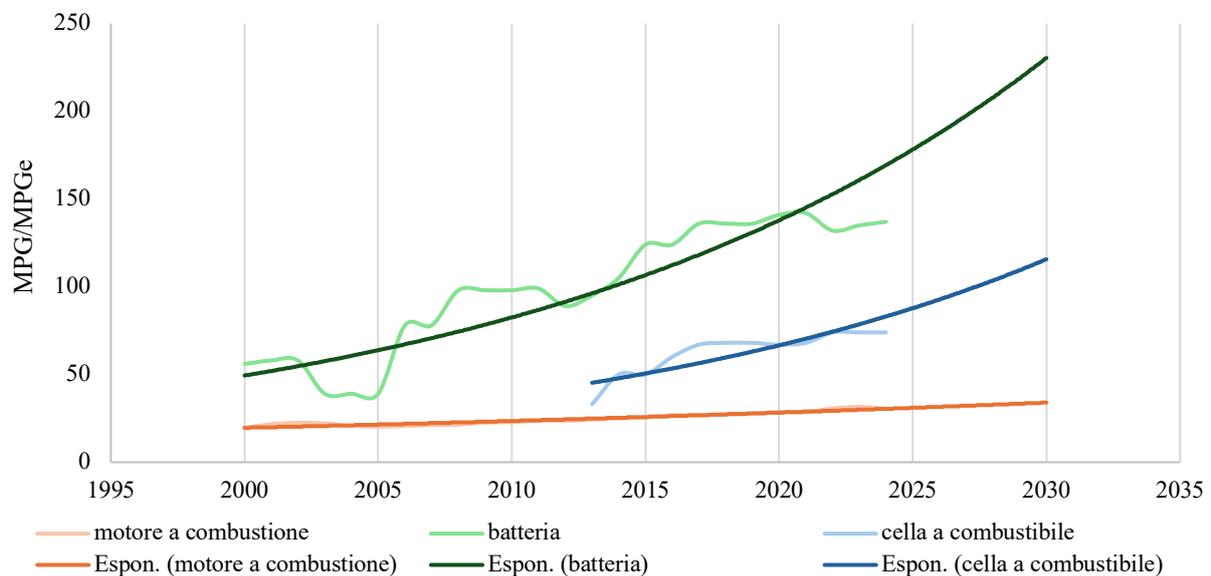


Figura 48. Curve delle performance (fonte: [Fuel Economy EPA](#))

Tale grafico può essere costruito in molti differenti modi, a seconda del criterio che si ritiene maggiormente d'impatto per le scelte del consumatore. In questo caso, l'indicatore selezionato è la fuel economy, misura che valuta l'utilizzo del carburante: data una certa quantità di gasolio o benzina, la fuel economy indica quanti chilometri è possibile percorrere. Solitamente si misura in chilometri per litro, oppure in galloni per litro, o MPG, negli Stati

Uniti e nel Regno Unito [108]. Più il valore di fuel economy è alto, più un'automobile è considerata economica nel consumo di carburante. I dati mostrati in Figura 48 sono stati estratti dal sito [Fuel Economy](#) dell'EPA, ovvero la United States Environmental Agency. Sul sito è possibile ricercare per differenti tipologie di veicoli e di sistema propulsivo, il valore di fuel economy in un determinato anno. Per coerenza, per ciascun anno considerato è stato preso il valore migliore tra quelli proposti, ovvero la migliore fuel economy.

Per poter valutare la fuel economy di batteria e cella a combustibile, che non utilizzano carburante, ma rispettivamente elettricità e idrogeno, si utilizza come unità di misura il MPGe⁴, ovvero la distanza media percorso per unità di energia consumata [109]. Si tratta di una misura ufficialmente adottata dall'EPA per comparare il consumo energetico di veicoli che utilizzano “carburanti” alternativi rispetto ai veicoli tradizionali. EPA suppone che un gallone di benzina sia pari a circa 33.7 kWh: ovviamente si tratta di una semplificazione; dunque, potrebbe non esserci perfetta equivalenza a seconda del preciso contenuto energetico di un carburante che varia impercettibilmente.

La fuel economy è dunque un indicatore di efficienze energetica che può essere utilizzata dal consumatore per capire quanti chilometri può percorrere con una certa quantità di energia a seconda del sistema di propulsione. La fuel economy è un fattore che impatta notevolmente i costi operativi totali che un consumatore deve sostenere durante la vita utile dell'automobile. Dalla Figura 48 emerge che:

- i veicoli con motore a combustione interna mostrano una crescita molto lieve della fuel economy, la quale è nettamente inferiore rispetto a quella di batteria e cella a combustibile;
- i veicoli a batteria mostrano valori di fuel economy in crescita molto spiccata, in particolare dal 2015 in poi. Vi è poi, ad oggi, un netto stacco rispetto al motore a combustione e in misura minore anche rispetto alla fuel cell;
- i veicoli a cella a combustibile mostrano una crescita di media portata, che si colloca tra motore e batteria, anche se con una crescita più simile a quest'ultima.

Ciò che emerge appare un risultato contro indicativo: il sistema propulsivo maggiormente utilizzato oggi è anche quello che si comporta peggio in termini di efficienza. Viceversa, batteria e cella a combustibile mostrano risultati in netto distacco anche come proiezioni future.

⁴ miglia per gallone equivalente

L'ancora attuale massiccia presenza di veicoli con motore a combustione rispetto a veicoli a batteria o a cella a combustibile si spiega considerando diversi fattori e non solamente tenendo conto dell'efficienza energetica:

- la spesa finale del consumatore in energia, che sia carburante, elettricità o idrogeno, è data dal prodotto di efficienza energetica e costo dell'energia. Dunque, la spesa è influenzata da entrambi i fattori in maniera più o meno importante a seconda delle condizioni di guida e dei costi della fonte energetica utilizzata. Il prezzo della ricarica nelle stazioni, domestiche e specialmente nei luoghi pubblici, è ancora elevata a causa dei costi addizionali per il servizio oltre all'aumento dei prezzi di elettricità negli ultimi anni. Il prezzo dell'idrogeno è ancora molto elevato, in quanto la sua produzione prevede l'utilizzo a sua volta di elettricità. Perché sia economicamente sostenibile produrre idrogeno deve esserci una sovrabbondanza tale di energia da rendere conveniente la sua conversione in idrogeno pur di non sprecarla. In generale il costo della fonte energetica è molto variabile da Paese a Paese ed è un fattore notevolmente impattante a livello di costi finali, nonostante l'efficienza energetica abbia buoni valori.
- la scarsa diffusione della rete di rifornimento per i BEVs, che per i FCEVs è praticamente inesistente, è un fattore ovviamente di grandissimo impatto, dato che guida l'adozione di una tecnologia o meno. Se non c'è l'infrastruttura difficilmente un consumatore medio deciderà di acquistare un veicolo di tale tipologia;
- il costo d'acquisto elevato, oltre che un investimento ad alto rischio dato il grado di svalutazione di questi veicoli;
- l'autonomia ancora limitata dei BEVs, che genera un effetto di indisponibilità per il consumatore;
- la resistenza al cambiamento, ovvero una forte diffidenza culturale verso nuove tecnologie in fase di lancio;
- la produzione ancora bassa, dovuta alle difficoltà della supply chain di reperire i materiali rari per batterie e celle;
- l'incentivazione delle istituzioni, inizialmente forte e poi rallentata in modo graduale quasi in ogni Paese;
- l'incertezza tecnologica, dovuta al continuo miglioramento delle tecnologie. Il consumatore tende quindi ad aspettare la «versione finale», immaginata come la più soddisfacente.

Questi fattori dunque rappresentano ulteriori misure di cui tengono conto i consumatori quando acquistano un veicolo, e che ad oggi, impattano negativamente la scelta di un veicolo con tecnologie alternative al motore.

In Figura 49 è rappresentato l'andamento delle vendite di motori, batterie e celle nel settore automotive.

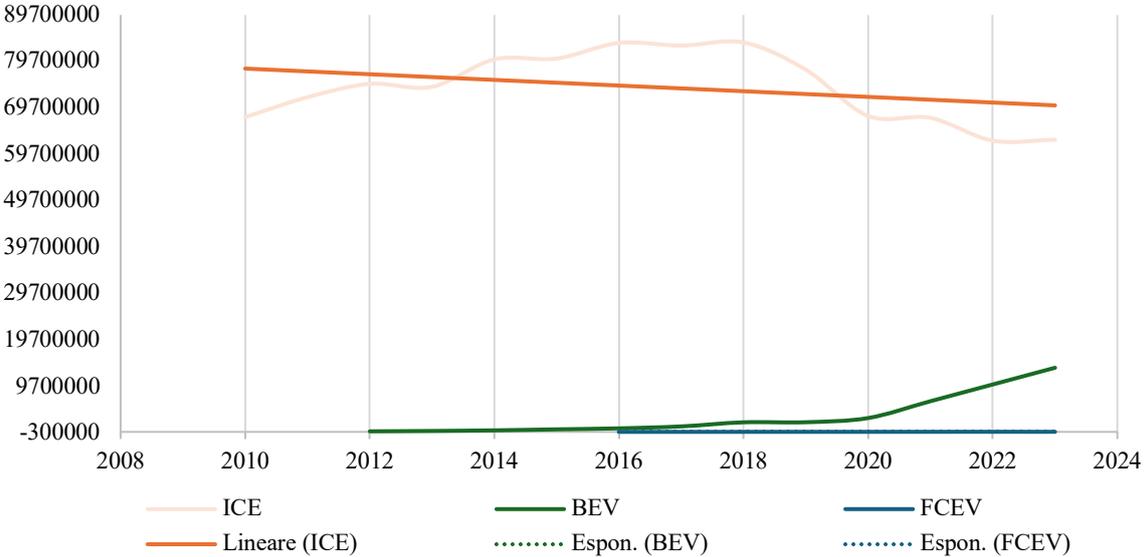


Figura 49. Curve delle vendite (fonti: [FCEV](#), [BEV](#), [ICE](#))

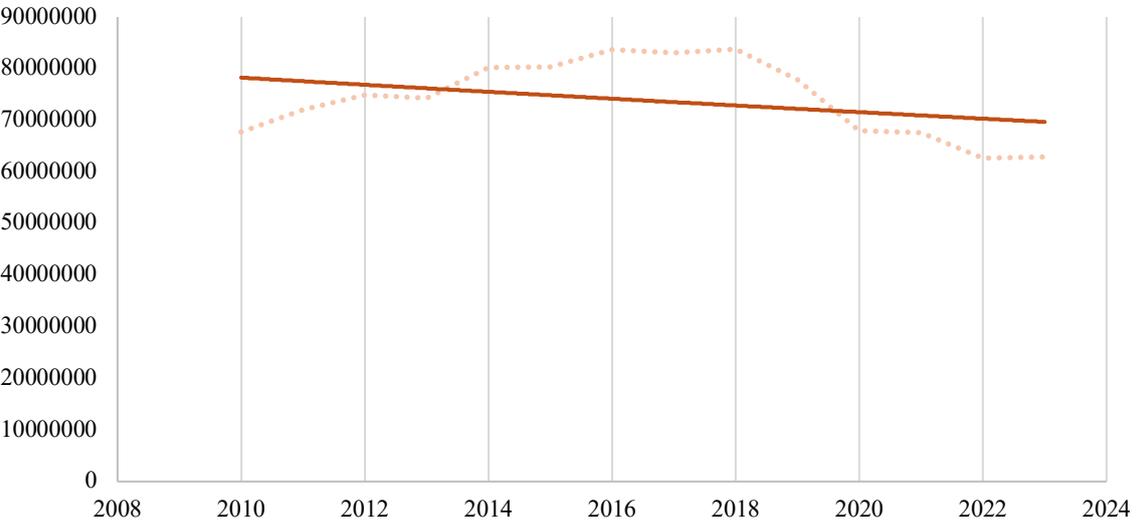


Figura 50. Curva delle vendite di motori

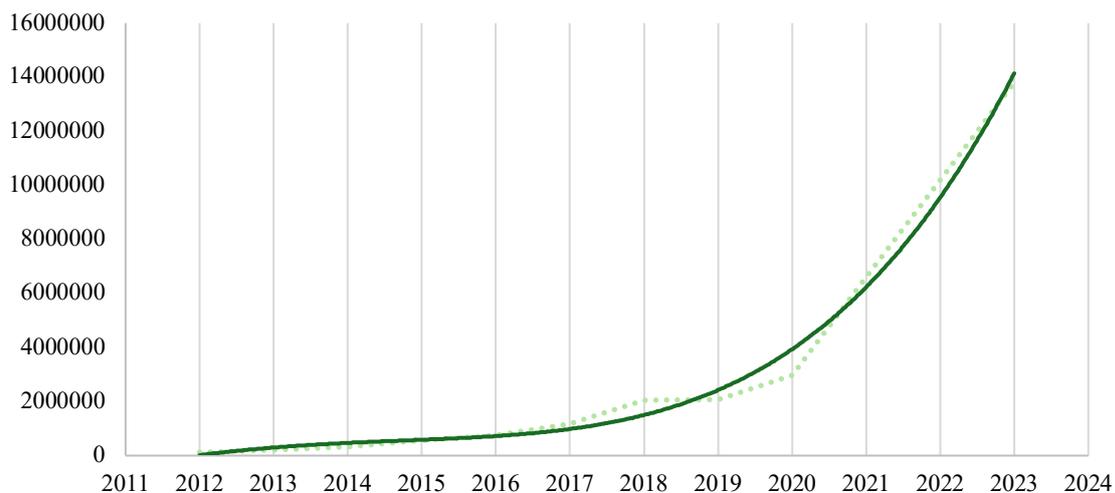


Figura 51. Curva delle vendite di batterie

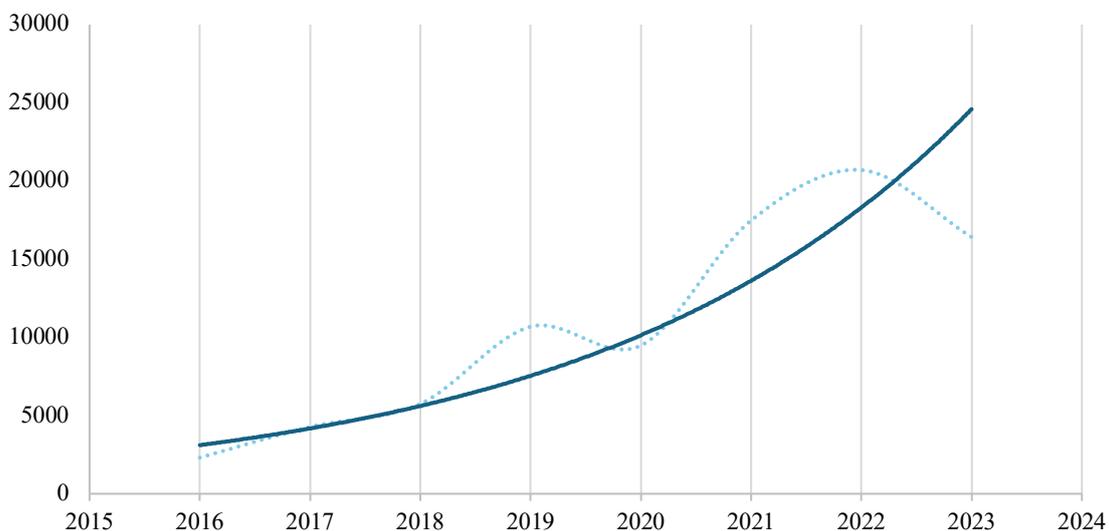


Figura 52. Curva delle vendite di celle a combustibile

Data la grande differenza di vendite tra motori da un lato e batterie e cella a combustibile dall'altro, le curve di quest'ultime sono ammassate e poco chiare. Per questo nelle Figure 50, 51 e 52, sono raffigurate le curve delle vendite separate per tecnologia.

Ciò che emerge dalle diverse figure è che:

- le vendite di batterie per BEVs sono in una fase di crescita esponenziale molto forte;
- le vendite di celle per FCEVs sono in una fase di crescita graduale, ma deboli in termini di quantità assolute, intorno alle 30000 unità nel 2023;
- le vendite di motori a combustione sono in calata e la fase di apice e assestamento è ormai superata. Sta iniziando la fase di lenta decrescita;

Si noti che in Figura 50 l'asse Y in negativo è stato inserito al solo scopo di rendere maggiormente visibile il posizionamento delle curve di batterie e celle a combustibile, in quanto molto vicine all'asse X.

Di seguito in Figura 53 le curve dell'andamento del numero di brevetti nel tempo, anche detto tasso di innovazione perché esprime il grado con cui le aziende di un settore decidono di innovare le proprie competenze.

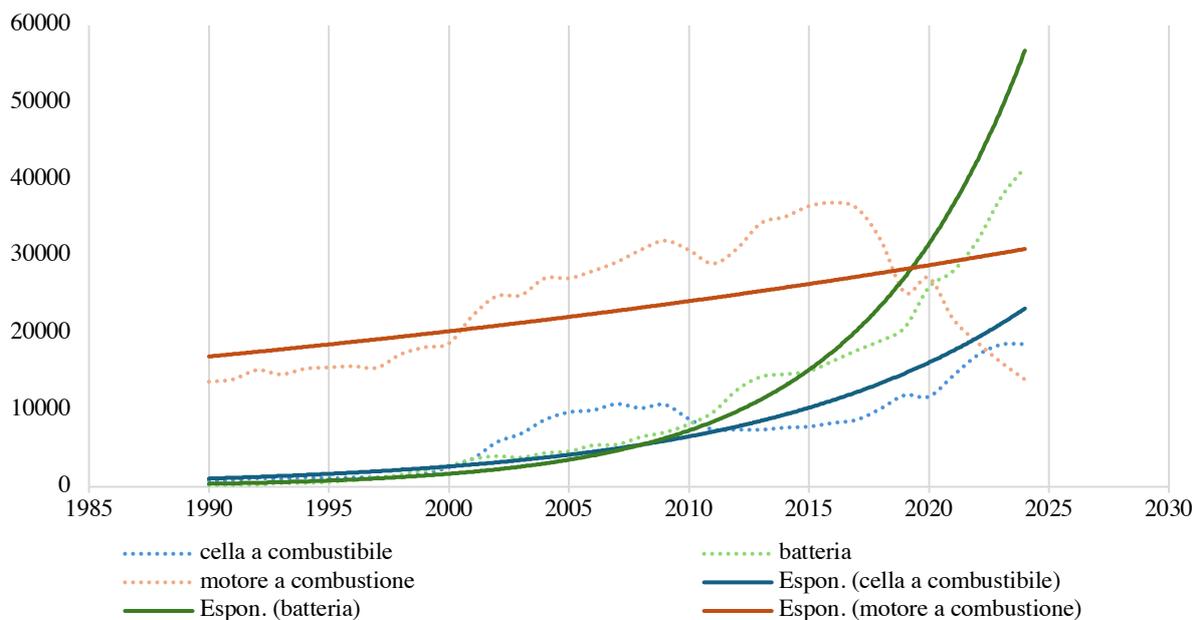


Figura 53. Curva del numero di brevetti (fonte: [Patent Inspiration](#))

Le curve mostrate sopra sono state ricavate mediante il database di [Patent Inspiration](#), filtrando secondi i codici CPC, IPC e nomenclature specifiche come «internal combustion engine» o «fuel cell». I codici IPC fanno parte di una classificazione internazionale dei brevetti definita con l'accordo di Strasburgo del 1971 [110], mentre i codici CPC sono un ampliamento dei precedenti, sorti dalla collaborazione tra l'Ufficio brevetti europeo e l'Ufficio statunitense dei brevetti e marchi [111].

Dalle curve si evince che:

- la curva dei brevetti del motore a combustione ha iniziato a calare a partire dal 2016, infatti il tasso di crescita è basso. Ciò è sintomo che le aziende continuano a evolvere le proprie competenze, ma la tecnologia si trova verso la fine della sua fase evolutiva incrementale, ovvero ci si avvicina al salto del paradigma;
- le curve dei brevetti della batteria e della cella a combustibile sono entrambe in crescita ormai dagli anni '90, ma con una netta differenza dato che le fuel cells hanno

avuto un rallentamento intorno al 2010. La curva della batteria ha una crescita superiore ad oggi.

In Figura 54 è rappresentata la curva dell'andamento del numero di imprese del settore della cella a combustibile.

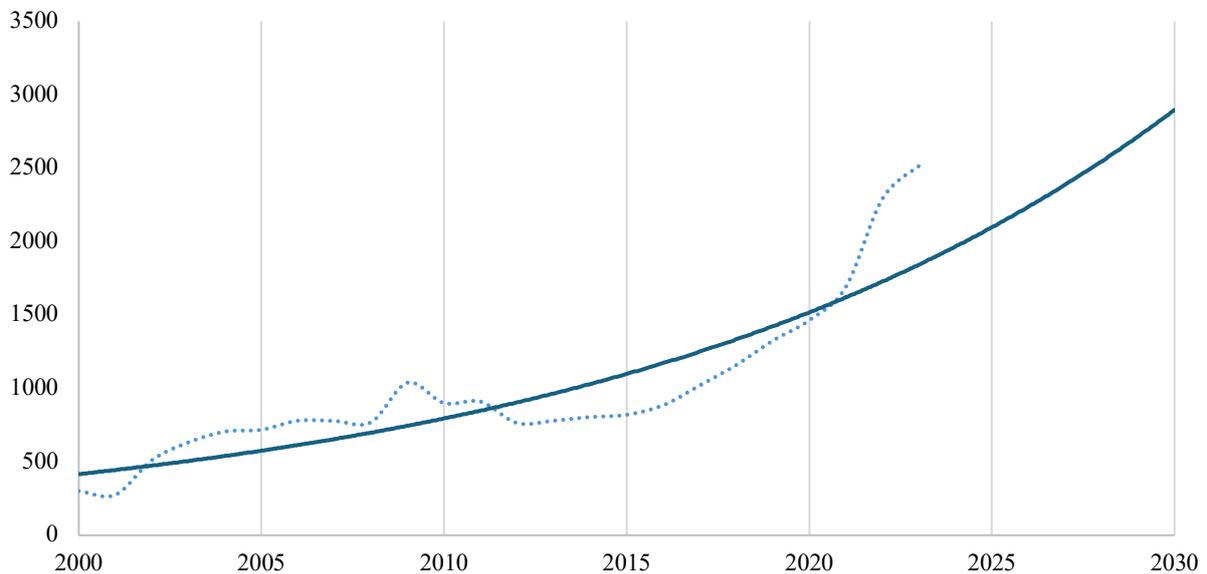


Figura 54. Curva delle aziende del settore della cella a combustibile (fonte: [Patent Inspiration](#))

La curva è stata ricavata mediante il database di [Patent Inspiration](#), partendo dai dati utilizzati per i brevetti delle tecnologie. Dopodiché per valutare il numero di imprese è stata usata come approssimazione il numero di aziende che comparivano nel dataset estrapolato, avendo cura di eliminare i duplicati, dato che un'azienda può presentare più brevetti in ciascun anno, e qualsiasi sussidiaria di un Gruppo, evitando così di considerare più volte la stessa azienda. Tale lavoro è stato svolto solamente per la cella a combustibile, data la grande mole di informazioni da sistemare e filtrare.

La curva offre un'approssimazione del numero di imprese che negli anni, a partire dal 2000, hanno lavorato attivamente nel campo della cella a combustibile. Il numero di aziende è in crescita a partire dagli ultimi 4-5 anni in maniera esponenziale, post COVID e crisi energetica. Prima del 2020 il numero di aziende è cresciuto lentamente con picchi in alto e in basso nel percorso: ciò suggerisce che la tecnologia si stia ancora evolvendo.

Mettendo insieme le varie curve risulta che:

- le performance in termini di efficienza energetica di batterie e fuel cell sono già molto alte rispetto a quella del motore. La situazione attuale è però lontana da una condizione in cui la curva delle performance ha raggiunto il suo limite superiore. Le performance del motore hanno nel tempo continuato a migliorare ma in maniera molto lieve; dunque, ha probabilmente raggiunto il suo limite tecnologico;

- le vendite di batterie e celle a combustibile sono in crescita ma hanno appena iniziato a «scalare» la curva;
- il numero di brevetti per batterie e celle a combustibile è anch'esso ancora nella fase di crescita esponenziale;
- il numero di aziende nel settore delle celle a combustibile sta negli ultimi anni continuando a crescere, segno che non è emerso ancora un *dominant design* e la competizione per la sua definizione è ancora alta;
- le vendite di motori a combustione iniziano lentamente a calare, così come il numero di brevetti, e similmente è immaginabile anche che il numero di aziende nel settore si stia mantenendo costante, se non pur contraendo.

Le analisi effettuate permettono di definire le fasi del modello di Abernathy Utterback in cui si trova ciascuna tecnologia attualmente. In particolare:

- il motore a combustione interna è nella fase specifica, caratterizzata da grandi imprese, con investimenti intensivi per rendere la tecnologia sempre più efficiente. I volumi di produzione sono elevati, il prodotto è standard, ovvero c'è un *dominant design*, e la competizione avviene per lo più sul prezzo, esclusi i segmenti luxury e sport, portando margini bassi per le imprese. Ciò spinge generalmente le imprese verso fenomeni di fusione e acquisizione, come sta accadendo negli ultimi anni. Ogni cambiamento comporta grande problematicità anche a livello di struttura organizzativa e dunque le innovazioni radicali faticano a emergere poiché scoraggiate;
- la batteria è nella fase intermedia, o di transizione, in quanto il *dominant design* della tecnologia è emerso ed è la batteria agli ioni litio per l'automobile elettrica. Questo è riscontrabile dal forte aumento della capacità produttiva delle batterie e di conseguenza delle auto elettriche. Tale fase è caratterizzata da importanti attività di sviluppo focalizzato al soddisfacimento dei bisogni del cliente, grazie alla minore incertezza di prodotto e di mercato. In questa fase gli investimenti legati al processo sono superiori a quelli di prodotto, si pensi all'attuale costruzione di fabbriche per la produzione di batterie, le cosiddette gigafactories. Ciò succede per cercare di ottenere economie di scala e di apprendimento che permettono così alle aziende di abbassare i costi operativi, ammortizzare quelli fissi e fare margini superiori, prima di entrare nella fase specifica;
- la cella a combustibile è nella fase fluida, in quanto prevalgono le incertezze tecnologiche e di mercato e dunque non esistono standard o *dominant design*. Infatti per l'automobile non esiste ancora una tipologia di cella a combustibile predominante.

La situazione di ciascuna azienda può variare molto a seconda del grado di accettazione della propria soluzione da parte dei consumatori: la lotta non è sul prezzo ma sulla differenziazione, cioè sul maggior valore aggiunto creato da una specifica soluzione. Inoltre, l'innovazione in questa fase si concentra sul miglioramento del prodotto e non del processo, dato che non si conosce ancora se esisterà la possibilità di produrre in massa la tecnologia.

5.2.2 Opportunità e minacce del settore automotive: il modello di Porter

Dalle analisi effettuate nello scorso paragrafo appare che, nonostante le discontinuità tecnologiche in corso nel settore automobilistico, le aziende siano rimaste sostanzialmente le stesse, con rarissime eccezioni di nuovi entranti permanenti.

Dato che le innovazioni emerse, come le batterie e le celle a combustibile, possono essere considerate innovazioni radicali, questa sezione cercherà di capire se i rapporti di potere con gli altri attori della catena del valore siano cambiati e dove si sia verificato il cambiamento. Di seguito sono presentate le cinque forze del modello di Porter in contesti innovativi per il settore automobilistico.

Concorrenti diretti

Il settore automobilistico presenta un'alta concentrazione di mercato: ci sono poche aziende multinazionali molto grandi, a causa delle sempre più presenti fusioni e acquisizioni, si pensi alla nascita del Gruppo Stellantis, sorto dalla fusione tra FCA e Peugeot nel 2021 [112]. Tali fenomeni sono tipici di settori fortemente maturi e con tassi di crescita ormai bassi, che per sopravvivere tendono a unirsi sotto un'unica società. Questo è ancora più vero nel settore automobilistico, dove i costi fissi degli impianti produttivi e della manodopera sono elevati e nasce la necessità di ammortizzarli tra più modelli e brands. Proprio a causa di costi elevati, sono importantissime le economie di scala e di apprendimento.

Un'altra caratteristica chiave di tale settore è la forte presenza di barriere all'ingresso, tra cui costi affondati, capacità produttiva e costi di R&S elevati, che tendono a lasciare fuori potenziali nuovi entranti. Tale effetto è poi potenziato dalla reputazione e dalla brand identity delle case automobilistiche come Fiat, BMW e Volkswagen, che optano solitamente per una differenziazione di prodotto medio alta, allo scopo di addentrarsi in una nicchia di mercato specifica.

In un contesto fortemente innovativo, come in questo caso in cui ci si avvicina a un cambio di paradigma tecnologico, può capitare che aziende concorrenti decidano di allearsi. È esattamente quanto accaduto negli ultimi anni con alcune aziende leader del settore: un caso eclatante è quello di General Motors e Honda, per la produzione congiunta di celle a combustibile e altri sistemi di propulsione [113]: lo scopo dichiarato nell'accordo sottoscritto è quello di accelerare l'innovazione mettendo in comune le rispettive competenze e sfruttando maggiormente le risorse messe a disposizione da entrambe. Allo stesso modo, BMW e Toyota hanno recentemente rinnovato la partnership per realizzare progetti pilota utili alla validazione della tecnologia a idrogeno, proponendola come alternativa ai propulsori 100% elettrici [114]. L'impegno assunto in questo caso riguarda anche il supporto allo sviluppo di un'infrastruttura di rifornimento in Europa, aspetto fondamentale per garantire la diffusione commerciale della tecnologia. Hyundai e Audi sullo stesso filone hanno avviato una collaborazione, già nel 2017, con l'obiettivo di guidare lo standard-setting della tecnologia e aiutarsi a vicenda nelle attività di ricerca e sviluppo [115].

Anche Renault e Plug Power, produttore statunitense di celle a combustibile, hanno costituito una joint venture nel 2022, denominata HYVIA, per arrivare il prima possibile alla produzione di sistemi a idrogeno [116].

Qui sono state evidenziate solo le alleanze riguardanti l'idrogeno, ma nel corso degli anni tali accordi hanno coinvolto anche tutte le altre tecnologie volte all'elettrificazione.

Analizzando sempre il settore automobilistico, è interessante notare che le aziende incumbents sono rimaste le stesse, nonostante l'avanzamento di una nuova tecnologia: questa condizione è sicuramente dovuta in parte all'elevata concentrazione del mercato, dove una decina di aziende e gruppi detengono quasi tutta le quote di mercato. Ciò genera una barriera all'ingresso senza che le aziende stesse debbano implementare alcuna strategia. Questa situazione è peggiorata per i nuovi entranti dall'impossibilità di raggiungere apprezzabili economie di scala: ciò è dovuto contemporaneamente all'accorciamento del ciclo di vita dei veicoli e all'aumento dei modelli e quindi delle opzioni a disposizione del consumatore. Pertanto, i costi di ricerca e sviluppo, che sono conteggiati come costi fissi, sono difficilmente recuperabili dalle case automobilistiche, che vendono ogni modello in numeri inferiori rispetto al passato. Ciò è in parte risolto cercando di utilizzare una stessa piattaforma veicolare, e dunque una stessa base di componenti.

Prodotti sostitutivi

Gli operatori storici del settore devono prestare particolare attenzione ai beni sostitutivi perché possono ridurre la loro redditività costringendoli a offrire un prezzo inferiore a quello ottimale. Questo avviene a causa dell'introduzione di beni che possono soddisfare le esigenze dei consumatori attraverso una qualità percepita maggiore. In effetti, i beni sostitutivi sono spesso in grado di soddisfare le richieste dei clienti che le aziende incumbents non sono più in grado di risolvere.

L'aggravarsi del cambiamento climatico, le crisi energetiche e la necessità di avviare rapidamente la transizione ecologica verso un'economia più sostenibile hanno generato preoccupazione tra la popolazione per l'attuale condizione del pianeta. Ciò a sua volta ha creato un'esigenza: cercare di salvare il più possibile l'ambiente affinché le generazioni future possano vivere dignitosamente. Questa esigenza ha toccato in modo particolare il settore dei trasporti, responsabile di parte delle emissioni.

I principali prodotti sostitutivi all'automobile sono autobus, treni e biciclette, anche se la sostituzione è valida per precise condizioni. Le automobili in un contesto urbano possono essere facilmente sostituite con i mezzi pubblici. Nelle città poi, le macchine sono i principali responsabili non solo dell'inquinamento atmosferico, ma anche dell'inquinamento acustico, degli ingorghi, dei blocchi stradali e delle lunghe code con un impatto su tutti i cittadini. Il trasporto pubblico urbano e suburbano potrebbe essere una possibile soluzione al traffico nelle grandi città: in alcune grandi metropoli, ad esempio Tokyo, il centro città è praticamente privo di veicoli.

Ovviamente, ciò è stato reso possibile da massicci interventi pubblici, sia economici che normativi, a favore di una mobilità maggiormente sostenibile: servono investimenti in metropolitane, ma anche in autobus e tram. In Italia, ad esempio in grandi città come Torino e Milano, è ancora fondamentale possedere un'auto per muoversi all'interno della città, proprio perché non esiste né un concreto disincentivo a non utilizzarle, né perché ad oggi ci sono alternative praticabili per la maggior parte della popolazione cittadina. Una soluzione potrebbe essere un forte incentivo all'uso delle biciclette nei centri urbani, ma a questo deve accompagnarsi una politica dei trasporti che investa nell'ampliamento delle piste ciclabili, così da garantire la sicurezza. Va notato che tutte le opzioni proposte per ridurre il traffico cittadino rispondono contemporaneamente anche alla questione ambientale: si tratta di sistemi in grado di ridurre drasticamente se non totalmente l'inquinamento generato dai motori endotermici.

C'è poi un'altra metrica da considerare: la distanza fisica da percorrere, che inevitabilmente si trasforma in tempo impiegato per raggiungere il luogo in considerazione. Rispetto a questo, l'automobile non soddisfa le esigenze di chi deve spostarsi per lunghe distanze, superiori alle 3 ore: in questo caso sembrerebbe più sensato utilizzare mezzi come aerei e treni. Il passaggio a quest'ultimi negli ultimi decenni è avvenuto in modo piuttosto massiccio. Sul versante ferroviario, le infrastrutture sono state notevolmente potenziate, con l'aggiunta di nuove linee e sistemi sempre più all'avanguardia: si pensi alle politiche realizzate con il PNRR in Europa [117]. Tuttavia, il treno è un buon sostituto dell'automobile con alcuni limiti: collega molto bene i grandi centri, ma è un'opzione abbastanza improbabile per collegare piccoli centri provinciali, per i quali poi sarebbe comunque necessario spostarsi in automobile.

Guardando all'Italia, il sistema ferroviario in continua espansione non riesce ancora a soddisfare le esigenze dei clienti perché non garantisce un servizio efficiente. Naturalmente, questo secondo problema è molto meno acuto in altri Paesi.

Per tutte queste ragioni, nel corso degli anni gli aerei sono diventati il mezzo preferito per percorrere lunghe distanze, ma hanno iniziato a essere utilizzati anche per rotte a corto raggio, come le rotte nazionali.

In sintesi, la tecnologia dominante, il motore a combustione, che non riesce a rispondere ai problemi della crisi climatica, rimane però centrale perché l'ecosistema in certe condizioni non ha a disposizione altre alternative. Pertanto, la sostituzione dei sistemi tradizionali è possibile solo in determinate circostanze. È quindi possibile affermare che la minaccia di beni sostitutivi è oggi molto bassa.

Potenziali nuovi entranti

Solitamente nel caso di innovazioni radicali i potenziali entranti rischiano di generare sconvolgimenti e cambiare completamente il settore, e quindi di estromettere gli operatori storici sottraendo loro quote di mercato.

Tuttavia, si può sostenere che una cosa simile non stia accadendo nel settore automobilistico, anche se le tecnologie emergenti sono in effetti radicali ma solamente rispetto ai servizi addizionali e all'infrastruttura. Pertanto, le case automobilistiche possono sfruttare le barriere all'ingresso e implementare reazioni strategiche. Infatti, bisogna tenere presente che il settore della mobilità è per sua stessa natura caratterizzato da elevate barriere all'ingresso: sono necessari grandi investimenti in macchinari, impianti e strutture. A ciò si aggiunge la necessità di mantenere costantemente attività di ricerca e sviluppo per migliorare la tecnologia

e renderla conforme. Di conseguenza, i costi fissi delle attività sono molto elevati, rendendo complicate le economie di scala e di scopo per i nuovi entranti, che difficilmente possono essere replicate nel breve periodo da piccole aziende e startup che lottano per emergere in un settore dove i costi guidano l'emergere della tecnologia. Recentemente alcuni colossi cinesi sono stati in grado, dopo alcuni anni, di sviluppare tecnologie sia elettriche che a idrogeno e stanno ora cercando di farsi strada in Europa: esempi sono Geely e BYD. L'avanzamento delle grandi imprese cinesi è un caso particolare: esse sfruttano i bassi costi delle materie prime e del personale, così da generare l'abbassamento dei costi. Grazie a ciò tali aziende hanno potuto iniziare a soddisfare la domanda interna: ciò ha consentito loro di presentarsi al mercato europeo e americano con prodotti dotati di un rapporto qualità-prezzo molto elevato rispetto ai produttori classici, motivo per cui l'Unione Europea, sta cercando di contrastare questo fenomeno imponendo dazi all'importazione di veicoli elettrici cinesi.

In sintesi, escludendo il caso cinese, le aziende dominanti nel settore automotive sono riuscite a impedire alle nuove aziende emergenti di entrare nel settore ottenendo due benefici: da un lato poter continuare a portare avanti la tecnologia tradizionale ancora indispensabile e dall'altro investire massicciamente, anche attraverso alleanze in tecnologie emergenti che generalmente comportano impatti finanziari molto elevati per le piccole realtà aziendali. Tali tecnologie, in un futuro non troppo lontano, dovranno per vari motivi essere implementate in modo efficace. In questo modo, tuttavia, i grandi attori si sono assicurati la loro stabilità nel settore nel presente e nel futuro, tagliando fuori gran parte dei potenziali concorrenti. Essi devono però prestare molta attenzione ai players cinesi emergenti, che di anno in anno continuano ad aumentare le proprie quote di mercato anche in mercati non locali come l'Europa [118].

Fornitori

Nel salto da un paradigma tecnologico all'altro, i fornitori rischiano molto, soprattutto in presenza di disruption. Devono infatti essere adeguatamente coinvolti nel processo di innovazione: il cambio dell'architettura di prodotto probabilmente porterà a modificare anche i componenti e la loro integrazione nel sistema. Di conseguenza, i fornitori rischiano di perdere potere contrattuale e di dover quindi uscire dal settore per l'intervento di nuove aziende capaci di catturare il cambiamento. L'industria automobilistica ha cercato nel corso dei decenni di alleggerire il processo produttivo per la fabbricazione di veicoli tramite l'outsourcing, con il risultato di una catena del valore mediamente frammentata. Tuttavia, le

dimensioni e il potere delle aziende automobilistiche hanno solitamente giocato a loro favore: poiché il mercato automobilistico è altamente concentrato le aziende fornitrici hanno sempre cercato di formare alleanze strategiche con gruppi specifici. Questo rappresenta un vantaggio anche per le aziende automobilistiche, che in questo modo riescono ad ottenere componenti in modo efficace e con vantaggi economici e operativi. I vantaggi per i produttori di veicoli di una catena del valore molto frammentata sono la concorrenza che si crea tra i fornitori per non soccombere e l'opportunità che l'azienda cliente ottiene dal potersi affidare a più fornitori in modo tale da incontrare pochissimi problemi tecnici e aumentando al contempo la pressione competitiva a monte della catena del valore.

È fondamentale che i fornitori intraprendano, non appena emerge una nuova tecnologia, percorsi di co-sviluppo con le aziende automobilistiche. Ciò accade già nel settore: esempio è la creazione della joint venture Symbio, nata come startup nel 2010 e rapidamente cresciuta fino ad essere acquisita prima da Michelin, e con il successivo ingresso di Forvia, conosciuta come Faurecia, e infine di Stellantis qualche anno fa [119]. In questo caso la collaborazione ha tre diverse tipologie di attori: l'azienda automobilistica, Stellantis, l'azienda di componenti per veicoli, Faurecia, e infine l'azienda fornitrice di pneumatici, Michelin.

Altre alleanze importanti sono state quelle tra ZF, fornitore di trasmissioni, e BMW [120], così come quella tra Bosch e Daimler [121], dove la prima è fornitore di celle a combustibile, in quanto specializzata in vari materiali per componenti, non solo per veicoli.

Lo stesso vale per Ballard Power Systems, fornitore di fuel cells per le case automobilistiche. L'azienda ha ovviamente avviato partnership commerciali e di sviluppo con le aziende clienti, per comprendere appieno le caratteristiche specifiche da integrare nella tecnologia per la realizzazione delle automobili [122].

Acquirenti

Trovandosi in presenza di un contesto instabile dal punto di vista tecnologico, il concetto di adozione diventa cruciale, in quanto i clienti risultano essere uno dei punti più critici nell'implementazione di una tecnologia radicale. Infatti, il percorso di adozione è essenziale per la diffusione dell'innovazione, che altrimenti farebbe fatica ad essere accettata dai consumatori e non si creerebbe una base clienti: la domanda finirebbe per frenare l'innovazione, in caso di disruption. Nel settore automotive, il principale cliente delle aziende manifatturiere sono le concessionarie, oltre che, conseguentemente, i clienti finali. Le concessionarie dipendono fortemente da chi le circonda nella catena del valore: da un lato, i

clienti orientano le loro scelte, soprattutto in termini di caratteristiche tecniche, prestazioni e design, dall'altro, le aziende produttrici hanno un elevato potere contrattuale dovuto alla loro elevata concentrazione, che consente di sottoscrivere accordi di esclusiva che vincolano i venditori. Di conseguenza, l'unica integrazione possibile potrebbe essere a valle, guidata dai produttori che potrebbero decidere di creare una propria rete di rivenditori, per ragioni di brand identity e comunicazione.

Un percorso di adozione sensato ha ovviamente dei prerequisiti. Ecco un elenco con riferimento al mondo automobilistico:

- un miglioramento tangibile delle automobili rispetto alle soluzioni esistenti. Ciò si esprime in una maggiore attenzione all'ambiente, con auto a impatto zero come i veicoli elettrici e a idrogeno;
- la nuova tecnologia deve essere in grado di integrarsi con ciò che già esiste. Nel settore automobilistico, la compatibilità sembra particolarmente difficile da raggiungere a causa della necessità di un cambiamento totale dell'attuale infrastruttura, come le stazioni di rifornimento di idrogeno e le stazioni di ricarica elettrica;
- un consumatore, in particolare un early majority, vuole sentirsi sicuro quando utilizza un'automobile. Per gli early adopters questa necessità emerge molto meno, poiché sono disposti ad affrontare qualsiasi rischio associato a una tecnologia immatura. Nel caso automobilistico è ancora socialmente difficile accettare la sicurezza dei veicoli contenenti idrogeno, in quanto è un gas esplosivo. La ricerca deve pertanto confermare che tale soluzione non sia pericolosa;
- un consumatore richiede che la nuova soluzione sia economicamente sostenibile nel lungo termine. Per raggiungere questo obiettivo, le aziende devono sviluppare economie di scala e di scopo. Nel caso di veicoli elettrici e a idrogeno stanno faticando a emergere: questo è esattamente il motivo per cui le aziende automobilistiche per abbassare i costi delle tecnologie emergenti sfruttano il vantaggio di costo costruito con la tecnologia dominante. Oggi è ancora necessario che i costi delle batterie e delle celle a combustibile scendano notevolmente per incontrare il favore del pubblico;
- le politiche di supporto e regolamentazione sono due aspetti chiave per facilitare l'adozione. Possono esserci una varietà di politiche messe in atto dai Paesi, che vanno da rigidi standard sulle emissioni per cercare di svantaggiare i motori endotermici, a trattati come quello dell'Unione Europea che vieta la vendita di auto diesel o benzina entro il 2035. Allo stesso modo, anche gli incentivi governativi possono aiutare, si

pensi ai sussidi negli scorsi anni per l'acquisto di veicoli elettrici [123], oltre che l'esclusione dal pagamento del bollo auto. Per le celle a combustibile le politiche sono generalmente molto indietro;

- l'accettazione sociale e culturale, punto molto difficile da raggiungere. Le istituzioni e le aziende coinvolte devono creare consapevolezza e fiducia nei consumatori finali attraverso percorsi educativi che mostrino i benefici della nuova tecnologia. Si pensi, ad esempio, alla difficoltà di accettazione sociale della guida autonoma negli anni passati, soprattutto in relazione alla paura degli incidenti;
- sostegno finanziario: proprio perché radicale, l'innovazione deve essere sostenuta finanziariamente in tutte le fasi. Come mostrato nel modello lineare dell'innovazione, l'intervento economico deve essere misto per funzionare: pubblico all'inizio, attraverso centri di ricerca e università e il supporto di agenzie governative, e privato verso la fine con startup, aziende, fondi di investimento e business angels. Nel settore automobilistico, entrambi gli interventi sono stati cruciali e oggi in particolare, il ruolo del settore privato appare ormai preminente dato lo stato della tecnologia. Tuttavia, sul lato delle infrastrutture e degli incentivi, soprattutto nel mondo dell'idrogeno, l'intervento governativo deve essere ancora preponderante per portare la tecnologia a un buon livello di diffusione.

Conclusione

Il settore automobilistico, data la sua complessità, ha bisogno di essere analizzato congiuntamente all'ecosistema e alla società. Da un lato ciò è necessario perché tale settore è denso di attori all'interno della sua catena del valore, che influenzano a loro volta altri settori; dall'altro lato perché la sua evoluzione incide profondamente sul modo in cui le persone si spostano. La difficoltà con cui sta avvenendo il cambio del paradigma tecnologico è in parte imputabile alla dipendenza del settore e più in generale della società dai combustibili fossili, e dunque dal settore petrolifero, che ha generato un effetto lock-in. Quest'ultimo subordina la mobilità veicolare all'utilizzo del motore endotermico: con l'avanzare del tempo, il cristallizzarsi di un sistema ben definito genera ovviamente economie di scala e di apprendimento, e quindi efficienza. Cambiare la tecnologia, e in questo caso anche l'infrastruttura, vuol dire ripartire da capo: l'efficienza è inizialmente più bassa, come anche la produttività. Questo vale per le case automobilistiche quanto per i consumatori. Il sistema ha bisogno di svilupparsi, tenendo conto delle difficoltà iniziali, finché non si arriva ai risultati desiderati. L'obiettivo è ora riuscire a superare questo sistema per ricrearlo su nuove tecnologie.

Coerentemente, le analisi svolte nel presente lavoro di tesi cercano di comprendere quale scenario competitivo pare il più probabile e quale sarà la tecnologia del futuro. Appare infatti ormai inevitabile il salto tecnologico verso un nuovo paradigma. Ciò emerge in prima battuta dall'analisi sugli investimenti nella cella a combustibile, dove si nota una tendenza di spesa crescente, specialmente dei privati. Le principali aree coinvolte nello studio della fuel cell risultano essere Giappone, Sud Corea e Stati Uniti, nonostante la Cina abbia dimostrato di stare sviluppando un sistema energetico incentrato sull'idrogeno.

In merito alle competenze, il lavoro svolto evidenzia come esse siano in parte cambiate rispetto alla vecchia tecnologia, con pochi punti di contatto in comune: le aziende corrono il rischio di disruption se non sviluppano la capacità di acquisire nuova conoscenza, con la possibilità di soccombere ed essere sostituiti.

L'emergere del nuovo paradigma, sia che si tratti di batteria che di cella a combustibile, è ben visibile nel modello di Abernathy Utterback: da un lato la batteria è giunta alla fase intermedia o di transizione, mentre la cella a combustibile si trova ancora nella fase fluida. Tutto ciò sta accadendo nonostante numerosi vincoli strutturali che stanno ritardando il passaggio, come la mancanza di infrastrutture e i costi elevati in primis. Le quattro curve evidenziano come le tecnologie in esame siano centrali nel panorama automobilistico futuro,

ciò in particolare visibile nei grafici delle performance, del tasso di innovazione e del numero di vendite in forte crescita.

A sua volta il modello di Porter ha permesso di identificare i principali attori del settore automotive, evidenziando eventuali minacce e opportunità. Nel contesto instabile in cui si trova il settore, gli attori che influenzano maggiormente le dinamiche interne sono i consumatori, in quanto è in capo a loro la decisione di acquistare o meno un prodotto, e i concorrenti diretti, che data la concentrazione elevata del mercato, possono spingere l'innovazione.

Insieme ai risultati dell'analisi naturalmente ci sono da considerare altri fattori che guidano la decisione di quale sarà la tecnologia vincente, tra cui l'efficienza: le batterie al litio sono attualmente più efficienti nel breve termine e più diffuse nei veicoli elettrici. Tuttavia, le celle a combustibile offrono maggiore autonomia e tempi di rifornimento più rapidi.

Inoltre, grazie ai processi di industrializzazione in atto, i costi di produzione sono in calo, mentre le celle a combustibile sono ancora molto costose da produrre, oltre il fatto che necessitano di infrastrutture di rifornimento apposite ancora poco sviluppate.

Tutto fa pensare che sia la batteria la tecnologia delle future automobili, cosa che oggi è vera in parte, dato il grande aumento di vendite. Ciò è avvenuto perché essa si trova in una fase intermedia di transizione, avendo ormai consolidato il suo standard tecnologico. Inoltre, la crescita delle capacità produttive e delle vendite di auto elettriche sta portando a economie di scala significative. Tuttavia, le celle a combustibile hanno il potenziale per diventare disruptive se nuove aziende riusciranno a ridurre i costi e migliorare le prestazioni. Il futuro dipenderà fortemente dagli sviluppi normativi dei principali Paesi in termine di sostenibilità ambientale, dalle politiche industriali per l'incentivazione a produrre veicoli a zero emissioni e dall'evoluzione dei costi di produzione.

Nel porsi quale sarà la tecnologia del futuro si esclude tuttavia una possibilità assai auspicata dai produttori automobilistici: un mercato misto, dove molteplici sistemi propulsivi convivono tra loro. Il cosiddetto powertrain mix porterebbe benefici a entrambe le parti: da un lato ai consumatori, maggiormente svincolati da una singola tecnologia, e dall'altro lato alle aziende, le quali avrebbero la possibilità di sviluppare in contemporanea o sequenzialmente differenti tecnologie. Ciò consentirebbe di offrire molteplici opzioni a livello di sistema propulsivo così che ciascuna azienda possa attrarre differenti tipologie di clienti, ciascuno soddisfatto in maniera differente a seconda delle proprie necessità. Tra le opzioni non citate nell'elaborato ma possibili vi sono le versioni ibride, parte di un percorso di innovazione

incrementale dell'attuale motore a combustione, e le cui quote di mercato stanno continuando ad aumentare.

In questo ampio portafoglio di possibili soluzioni, l'idea di un mercato di veicoli misto potrebbe portare vantaggi anche e soprattutto sul tema energetico. Ciò fornirebbe la possibilità di sfruttare un mix di energie diverse a seconda della disponibilità del momento: un tale sistema garantirebbe l'utilizzo di veicoli elettrici o a combustione in presenza di fonti energetiche in sovrabbondanza e di veicoli endotermici o ibridi in carenza di energia.

Il concetto di powertrain mix, che può essere ampliato a piacimento, rappresenta dunque un'alternativa sostenibile sul versante economico, garantendo stabilità al settore automobilistico, energetico, offrendo maggiori possibilità alle fonti rinnovabili e ambientale, avvicinando la società a una sostenibilità realmente costruita.

Bibliografia

- [1] European Parliament, «CO2 emissions from cars: facts and figures (infographics),» 6 12 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>.
- [2] World Commission on Environment and Development, «Our common future,» 1987.
- [3] European Parliament, «Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with,» 2023.
- [4] J. Osička e F. Černoč, «European energy politics after Ukraine: The road ahead,» *Energy Research & Social Science*, vol. 91, 2022.
- [5] S. Vengatesan, A. Jayakumar e K. K. Sadasivuni, «FCEV vs. BEV — A short overview on identifying the key contributors to affordable & clean energy (SDG-7),» *Energy Strategy Reviews*, 2024.
- [6] B. Schumm, «fuel cell,» 1 Febbraio 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>.
- [7] G. Hoogers, *Fuel Cell Technology Handbook* (1a ed.), CRC Press, 2002, p. 360.
- [8] A. Farooq e Ö. N. Cora, «urrent Status and Future Perspectives for Mobility Options Toward Sustainable Transportation With a Focus on Fuel Cells,» *WIREs Energy and Environment*, 2024.
- [9] O. Sharaf e M. Orhan, «An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [10] «Fuel Cell,» [Online]. Available: <https://www.energoclub.org/page/fuel-cell>.
- [11] M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E. T. Sayed e A. Olabi, «Environmental aspects of fuel cells: A review,» *Science of The Total Environment*, vol. 752, 2021.
- [12] F. Leccese e L. Giorgi, «Fuel Cells: Technologies and Applications,» *The Open Fuel Cells Journal*, vol. 6, 2013.
- [13] A. Pramuanjaroenkij e S. Kakaç, «The fuel cell electric vehicles: The highlight review,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.
- [14] F. Sabatini e V. Coletti, «Definizione di innovare,» 2018. [Online]. Available: https://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/I/innovazione.shtml.
- [15] D. Archibugi, A. Filippetti e M. Frenz, «Economic crisis and innovation: Is destruction prevailing over accumulation?,» *EconPapers*, 2013.
- [16] R. Solow, «A Contribution to the Theory of Economic Growth,» *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, 1956.
- [17] A. Bianchi, «Schumpeter, economia del lavoro e dell'innovazione,» [Online]. Available: https://www.unife.it/economia/lm.economia/insegnamenti/economia-del-lavoro-e-dellinnovazione/materiale-didattico-19_20/modulo-1/slide/2_schumpeter/2_Schumpeter.pdf.
- [18] J. Schumpeter, *The Theory of Economic Development*, Routledge.

- [19] S. Perri, «L'economia neoclassica, l'equilibrio statico e l'economia,» [Online]. Available: <https://docenti.unimc.it/stefano.perri/teaching/2023/28391/files/dispense-parte-prima/i-neoclassici-e-schumpeter>.
- [20] B. Poppiti, «Teoria dell'innovazione di Schumpeter: La distruzione creatrice,» *Businesstheory.it*, [Online]. Available: <https://www.businesstheory.it/teoria-innovazione-di-schumpeter/>.
- [21] G. Cavanna, *Appunti dal Corso di "Gestione dell'Innovazione e sviluppo prodotto" del Politecnico di Torino*, 2023.
- [22] C. Morandi, «Il modello lineare dell'innovazione, analisi storica e confronto con i principali modelli di innovazione,» 2017.
- [23] V. Bush, «Science the Endless Frontier,» [Online]. Available: <https://www.pi.infn.it/~giorgio/INFN/3M/SciencetheEndlessFrontier.pdf>.
- [24] J. D. Bernal, *The Social Function of Science*, 1938.
- [25] T. Huxley, *Science as Culture*, Cambridge University Press, 2009.
- [26] OECD, *rascati Manual 1963: Proposed Standard Practice for Surveys of Research and Development, The Measurement of Scientific and Technological Activities*, Paris: OECD Publishing, 1963.
- [27] B. Godin, *Measurement and Statistics on Science and Technology: 1920 to the Present (Routledge Studies in the History of Science, Technology, and Medicine)*, Routledge.
- [28] M. Cantamessa e F. Montagna, *Management of Innovation and Product Development: Integrating Business and Technological Perspectives*, Springer Nature.
- [29] M. Francesca e C. Marco, *Management of Innovation and Product Development*, 2023.
- [30] S. J. Kline e N. Roserberg, *An Overview of Innovation*.
- [31] G. Guardavilla, «Conoscenze, abilità e competenze,» 2019. [Online]. Available: <https://www.direfareinsegnare.education/didattica/conoscenze-abilita-e-competenze/>.
- [32] R. R. Nelson e S. G. Winter, *Evolutionary Theory of Economic Change*, Belknap Pr, 1985.
- [33] F. Nitti, «Technology Push vs Market Pull: quali sono le differenze?,» [Online]. Available: <https://www.minnovo.it/post/technology-push-vs-market-pull-quali-sono-le-differenze>.
- [34] B. Clarke e L. D. Henderson, *From Energy to Information: Representation in Science and Technology, Art, and Literature*, 2002.
- [35] J. M. Utterback e W. J. Abernathy, «A dynamic model of process and product innovation,» *Omega*, vol. 3, 1975.
- [36] i. Porter, *The Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*, 2004.
- [37] S. Barile e G. Sancetta, «Le 5 forze competitive di Porter,» [Online]. Available: https://management.web.uniroma1.it/sites/default/files/Le%205%20forze%20di%20Porter_Balanced%20Scorecard.pdf.
- [38] «Spinosi Marketing,» [Online]. Available: <https://www.spinolimarketing.com/it/consulente-societa-consulenza-marketing/strategie-di-vendita-tecniche/modello-5-forze-di-porter.html>.
- [39] «Barriere all'entrata: cosa sono e quali tipologie esistono sul mercato,» [Online]. Available: <https://strategiaebusiness.com/barriere-entrata-definizione-tipologia/>.

- [40] G. Bruijl, «The Relevance of Porter's Five Forces in Today's Innovative and Changing Business Environment».
- [41] P. Fisk, «Is Michael Porter still relevant in today's fast and connected markets?,» 2016. [Online]. Available: <https://www.peterfisk.com/2016/10/michael-porter-still-relevant-todays-dynamic-digital-markets/>.
- [42] International Energy Agency, «Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer,» [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer>.
- [43] International Energy Agency, «IEA Guide to Reporting Energy RD&D Budget/ Expenditure Statistics,» 2011. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a2f370cf-873e-486f-935d-c2a117e14ba6/IEAGuidetoReportingEnergyRDDBudget-ExpenditureStatistics.pdf>.
- [44] OECD Publishing, Frascati Manual 2002: Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific and Technological Activities, Paris, 2002.
- [45] International Energy Agency, «Database Documentation, Energy Technology RD&D Budgets,» Gennaio 2024. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/23edba08-7f56-485e-942c-b325a9f25a12/RDD_Documentation.pdf.
- [46] Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association (CHFCA), «Canadian Hydrogen and Fuel Cell Sector Profile,» Giugno 2022. [Online]. Available: <https://canadah2.ca/wp-content/uploads/2024/04/CHFCA-Sector-Profile-2022-Final-2.pdf>.
- [47] «Evolution of investments in Energy Innovation,» [Online]. Available: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/inova-e-eng/dashboard.html>.
- [48] L. Miraglia, «Idrogeno verde, il Piano ufficializzato dal Brasile per oltre 2 miliardi di euro,» 2024. [Online]. Available: <https://www.energiaitalia.news/news/idrogeno/idrogeno-verde-il-piano-ufficializzato-dal-brasile-per-oltre-2-miliardi-di-euro/38893/>.
- [49] C. Chantre, S. Andrade Eliziário, F. Pradelle, A. C. Católico, A. M. Branquinho Das Dores, E. Torres Serra, . R. Campello Tucunduva, V. Botelho Pimenta Cantarino e S. Brag, «Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception,» *Sustainable Production and Consumption*, 2022.
- [50] Department of Energy (DOE), «Budget (Justification & Supporting Documents),» [Online]. Available: <https://www.energy.gov/cfo/listings/budget-justification-supporting-documents>.
- [51] D. o. Energy, «Annual Merit Review Presentation Database,» [Online]. Available: <https://www.hydrogen.energy.gov/library/amr-presentation-database>.
- [52] Energy Technology Development and Demonstration Programme, «The Energy Technology Development and Demonstration Programme,» [Online]. Available: <https://eudp.dk/en>.
- [53] C. Pèlerin e R. Rallo, «France Relance e transizione ecologica,» [Online]. Available: <https://www.rivistaenergia.it/2020/11/france-relance-e-transizione-ecologica-la-leva-per-aumentare-competitivita-e-innovazione/>.
- [54] National Research Agency, «Search for a funded project,» [Online]. Available: <https://anr.fr/en/funded-projects-and-impact/funded-projects/>.
- [55] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, «Dipartimento energia (DiE),» [Online]. Available: <https://www.mase.gov.it/pagina/dipartimento-energia-die>.

- [56] Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, «Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile,» [Online]. Available: <https://www.enea.it/it/>.
- [57] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, «PNRR. MiTE: Accordo da 110 milioni con Enea per ricerche sull'idrogeno,» [Online]. Available: <https://www.mase.gov.it/comunicati/pnrr-mite-accordo-da-110-milioni-con-enea-ricerche-sull-idrogeno>.
- [58] «Hydrogen and Fuel Cells in Switzerland,» [Online]. Available: <https://hydrogen.energyresearch.ch/index.php?ID=0000&l=en>.
- [59] Norwegian Ministry of Petroleum and Energy e Norwegian Ministry of Climate and Environment, «The Norwegian Government's hydrogen strategy,» 2020. [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/the-norwegian-governments-hydrogen-strategy/id2704860/>.
- [60] T. R. C. o. Norway, «Project Bank,» [Online]. Available: <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/en/explore/projects>.
- [61] The Federal Government, «The National Hydrogen Strategy,» [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Hydrogen/Dossiers/national-hydrogen-strategy.html>.
- [62] European Commission, «Hydrogen,» [Online]. Available: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/energy/hydrogen_en.
- [63] Hydrogen Europe, «Clean Hydrogen Monitor,» 2024. [Online]. Available: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/Clean_Hydrogen_Monitor_11-2024_V2_DIGITAL_draft3-1.pdf.
- [64] European Commission, «EU Funding & Tenders Portal,» [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/>.
- [65] E. Commission, «Key actions of the EU Hydrogen Strategy,» [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en.
- [66] N. Behling, M. C. Williams e S. Managi , «Fuel cells and the hydrogen revolution: Analysis of a strategic plan in Japan,» *Economic Analysis and Policy*, vol. 48, 2015.
- [67] M. K. S. M. S. K. S. I. O. A. A. M. Manpreet Singh, «Advancements and challenges of fuel cell integration in electric vehicles: A comprehensive analysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 88, 2024.
- [68] Y. Sangwoon e P. Sangook, «South Korea's national pursuit for fuel cell electric vehicle development: The role of government R&D programs over 30 years (1989–2021),» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, 2023.
- [69] IEA, «Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China,» Parigi, 2022.
- [70] S. B. e. Associati, «Trattamento contabile su spese di Ricerca e Sviluppo, quali obblighi?,» 2023. [Online]. Available: <https://studiobottarieassociati.it/trattamento-contabile-su-spesse-di-ricerca-e-sviluppo-quali-obblighi/>.
- [71] B. d'Italia, «Tassi di Cambio,» [Online]. Available: <https://tassidicambio.bancaditalia.it/terzevalute-wf-ui-web/>.
- [72] contributori di Wikipedia, «Ballard Power Systems,» Wikipedia, The Free Encyclopedia, [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ballard&oldid=142818888](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ballard&oldid=142818888).

- [73] B. P. Systems, «OUR HISTORY,» [Online]. Available: <https://www.ballard.com/our-company/>.
- [74] Bloomenergy, «Bloom Energy, Cefla to Partner on Italian Fuel Cell Deployments,» 10 Novembre 2022. [Online]. Available: <https://www.bloomenergy.com/news/bloom-energy-cefla-to-partner-on-italian-fuel-cell-deployments/#:~:text=SAN%20JOSE%2C%20Calif.%2C%20and,to%20be%20deployed%20through%202025..>
- [75] Symbio, «Our history,» [Online]. Available: <https://www.symbio.one/en/who-we-are/our-history>.
- [76] contributori di Wikipedia, «Toyota Mirai,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Toyota_Mirai&oldid=136956632](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Toyota_Mirai&oldid=136956632).
- [77] c. d. Wikipedia, «Hyundai Nexo,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Hyundai_Nexo&oldid=141459323](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Hyundai_Nexo&oldid=141459323).
- [78] M. Brain e K. Hall-Geisler, «How Car Engines Work,» [Online]. Available: <https://auto.howstuffworks.com/engine.htm>.
- [79] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1988.
- [80] «Il motore rotativo Wankel: storia di un'illusione che non ha funzionato,» in Sella, 2025. [Online]. Available: <https://www.insella.it/da-sapere/tecnica/il-motore-rotativo-wankel-storia-di-unillusione-che-non-ha-funzionato-64715>.
- [81] A. Fayyazbakhsh, M. L. Bell, X. Zhu, X. Mei, M. Koutný, N. Hajinajaf e Y. Zhang, «Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 376, 2022.
- [82] contributori di Wikipedia, «Pila (elettrotecnica),» Wikipedia, l'enciclopedia libera, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_\(elettrotecnica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_(elettrotecnica)).
- [83] contributori di Wikipedia, «History of the battery,» Wikipedia, l'enciclopedia libera., [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery.
- [84] M. Brain, C. Bryant, C. Pumphrey e Y. Simón, «How batteries work,» [Online]. Available: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/battery.htm>.
- [85] contributori di Wikipedia, «Toyota,» Wikipedia, l'enciclopedia libera, [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Toyota>.
- [86] F. Gemelli, «Motor1.com,» 2025. [Online]. Available: <https://it.motor1.com/news/747953/auto-immatricolate-europa-2024/#:~:text=Il%20mercato%20europeo%20dell'auto,anche%20al%20risultato%20di%20dicembre..>
- [87] Toyota Global, «Hystory of Toyota's Fuel Cell Vehicles,» [Online]. Available: https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/intelligent_transport_systems/world_congress/2014detroit/pdf/History_of_Toyota_s_Fuel_Cell.pdf.
- [88] K. Kojima e K. Fukazawa, «Current Status and Future Outlook of Fuel Cell Vehicle Development in Toyota,» *ECS Transactions*, 2015.
- [89] Toyota, «Toyota Develops Packaged Fuel Cell System Module to Promote the Hydrogen Utilization toward the Achievement of Carbon Neutrality,» 2021. [Online]. Available: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/34799439.html>.
- [90] Toyota Global, «Toyota Develops New Fuel Cell System,» 2025. [Online]. Available: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/42218558.html>.

- [91] P. von Tettau, S. Sterlepper, P. Mauermann, M. Wick, S. Tinz, M. Jesser e M. Walters, «Laboratory assessments applied to mass-produced automotive fuel cells,» *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [92] Ballard Power Systems, «Pioneering Fuel Cell Technology,» [Online]. Available: <https://www.ballard.com/our-company/>.
- [93] J. Stumper e C. Stone, «Recent advances in fuel cell technology at Ballard,» *Journal of Power Sources*, 2007.
- [94] contributori di Wikipedia, «General Motors,» Wikipedia, l'enciclopedia libera, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors.
- [95] GM Service Technical College, «Chevrolet Equinox Fuel Cell,» [Online]. Available: <https://h2tools.org/sites/default/files/EqFuelCellRRResponseGuide.pdf>.
- [96] General Motors, «HYDROTEC,» [Online]. Available: <https://www.gm.com/innovation/hydrotec>.
- [97] Honda Global, «Honda Advances Hydrogen Strategy with Production Launch of Fuel Cell Electric Vehicle in Ohio,» [Online]. Available: <https://global.honda/en/newsroom/news/2024/4240606eng.html>.
- [98] Electrive, «Celadyne and GM are working on longer-lasting fuel cells for trucks,» [Online]. Available: <https://www.electrive.com/2024/08/17/celadyne-and-gm-are-working-on-longer-lasting-fuel-cells-for-trucks/>.
- [99] Q. Baterna, «WHY GM'S HYDROGEN FUEL CELL ENGINE HAS PROMISE (AND WHY IT COULD STILL FAIL ANYWAY) Read More:» <https://www.slashgear.com/1464698/gm-hydrogen-fuel-cell-engine-guide/>,» Slashgear, [Online]. Available: <https://www.slashgear.com/1464698/gm-hydrogen-fuel-cell-engine-guide/>.
- [100] Bosch Group, «The story of our success,» [Online]. Available: <https://www.bosch.com/company/our-history/>.
- [101] contributori di Wikipedia, «Robert Bosch (azienda),» Wikipedia, l'enciclopedia libera, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Robert_Bosch_\(azienda\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Robert_Bosch_(azienda)).
- [102] Bosch Group, «Fuel-cell stacks: the recipe for success in mass manufacturing,» 2022. [Online]. Available: <https://www.bosch.com/stories/fuel-cell-stack/>.
- [103] Bosch Group, «Solid oxide fuel cell systems,» [Online]. Available: <https://www.bosch.com/research/research-fields/electrification/research-on-hydrogen-technologies/high-temperature-fuel-cell-systems/>.
- [104] M. Pelosato, «Le emissioni dei motori a combustione interna e il loro abbattimento,» 2011.
- [105] «Piattaforme modulari: cosa sono e da chi vengono sviluppate,» 2021. [Online]. Available: <https://www.automobile.it/magazine/news/piattaforme-modulari-cosa-sono-e-da-chi-vengono-sviluppate-34431>.
- [106] «BYD e Geely, volano le vendite di auto elettriche,» 2024. [Online]. Available: <https://www.lojack.it/blog/blog/2024/12/byd-e-geely-volano-le-vendite-di-auto-elettriche/>.
- [107] S. Hardman, R. Steinberger-Wilckens e D. van der Horst, «Disruptive innovations: The case for hydrogen fuel cells and battery electric vehicles,» *International journal of hydrogen energy*, 2013.
- [108] contributori di Wikipedia, «Fuel economy in automobiles,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_economy_in_automobiles.

- [109] contributori di Wikipedia, «Miles per gallon gasoline equivalent,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Miles_per_gallon_gasoline_equivalent.
- [110] Ministero delle Imprese e del Made in Italy, «La classificazione internazionale dei brevetti IPC (International Patent Classification). Accordo Strasburgo,» [Online]. Available: <https://uibm.mise.gov.it/index.php/it/brevetti/brevetto-per-invenzione-industriale/la-classificazione-internazionale-dei-brevetti-ipc-international-patent-classification-accordo-di-strasburgo>.
- [111] Camera di Commercio, Industria, Artigianato, Turismo e Agricoltura di Bolzano, «Classifica brevetti,» [Online]. Available: <https://www.handelskammer.bz.it/it/servizi/sviluppo-dimpresa/brevetti-e-marchi/brevetti/classifica-brevetti>.
- [112] «La fusione tra FCA e Groupe PSA è stata completata,» [Online]. Available: <https://www.media.stellantis.com/it-it/fca-archivio/press/la-fusione-tra-fca-e-groupe-psa-stata-completata>.
- [113] Honda News, «GM-Honda Begin Commercial Production at Industry's First Hydrogen Fuel Cell System Manufacturing Joint Venture,» [Online]. Available: <https://hondanews.eu/it/it/corporate/media/pressreleases/472666/gm-honda-begin-commercial-production-at-industrys-first-hydrogen-fuel-cell-system-manufacturing-join>.
- [114] Il Sole 24 ore, «BMW e Toyota rilanciano sull'idrogeno e promettono nuove auto per il 2028,» [Online]. Available: <https://www.ilsole24ore.com/art/bmw-e-toyota-rilanciano-sull-idrogeno-e-promettono-nuove-auto-il-2028-AFjDEhID>.
- [115] H2IT, Associazione Italiana Idrogeno, «Partnership tra Audi e Hyundai per la tecnologia fuel cell,» [Online]. Available: <https://www.h2it.it/partnership-tra-audi-e-hyundai-per-la-tecnologia-fuel-cell/>.
- [116] Hydro News, «HYVIA, la joint-venture tra Renault e Plug Power, inaugura la sua fabbrica di fuel cell in Francia,» [Online]. Available: <https://hydronews.it/hyvia-la-joint-venture-tra-renault-e-plug-power-inaugura-la-sua-fabbrica-di-fuel-cell-in-francia/>.
- [117] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, «PNRR, Ferrovie: assegnate nuove risorse per il rinnovo delle flotte,» [Online]. Available: <https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/pnrr-ferrovie-assegnate-nuove-risorse-per-il-rinnovo-delle-flotte>.
- [118] F. Munoz, «A gennaio è boom di auto cinesi in Europa, elettriche e ibride,» 2025. [Online]. Available: <https://it.motor1.com/news/751710/mercato-euro-europa-gennaio-2025/>.
- [119] La Stampa, «Stellantis si unisce a Forvia e Michelin come azionista paritetico di Symbio,» 2023. [Online]. Available: <https://finanza.lastampa.it/News/2023/07/28/stellantis-si-unisce-a-forvia-e-michelin-come-azionista-paritetico-di-symbio/MjMzXzIwMjMtMDctMjhfvExC>.
- [120] M. Grassi, «BMW e il nuovo cambio automatico a prova di ibrido,» [Online]. Available: <https://it.motor1.com/news/337332/bmw-nuovo-cambio-automatico-zf/#:~:text=La%20collaborazione%20tra%20BMW%20e,produrre%20a%20partire%20da%202022..>
- [121] Bosch Mobility, «Bosch to supply fuel-cell components to cellcentric,» [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility.com/en/company/current-news/bosch-to-supply-fuel-cell-components/>.

- [122] Ballard Power Systems, «Ballard announces partnership with Ford Trucks for fuel cell powered heavy-duty trucks & initial order,» [Online]. Available: <https://www.ballard.com/press-release/ballard-announces-partnership-with-ford-trucks-for-fuel-cell-powered-heavy-duty-trucks-initial-order/>.
- [123] Quattroruote, «Il governo conferma: incentivi in arrivo,» 2018. [Online]. Available: https://www.quattroruote.it/news/ecologia/2018/11/07/auto_elettriche_il_governo_conferma_lavoriamo_sugli_incentivi.html.

Figure e Tabelle

Figura 1. - Well-to-Wheels Analyses (fonte: EU Science Hub).....	8
Figura 2 - Illustrazione dell'Electrovan di General Motors (fonte: Hydrogen Cars Now)	9
Figura 3 – Disegno di una fuel cell (fonte: Y. Chen, Journal of Applied Mechanical Engineering 5, no. 6: 6.).....	10
Figura 4 - Schema di funzionamento della fuel cell (fonte: Accelera)	11
Figura 5 - combinazioni di veicoli con cella a combustibile (fonte: Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies)	17
Figura 6. Processo innovativo (fonte: The Big Bang Partnership)	24
Figura 7. Processo di sviluppo prodotto (fonte: Maze).....	25
Figura 8 - Modello lineare dell'innovazione (fonte: Management of Innovation and Product Development, Francesca Montagna e Marco Cantamessa)	34
Figura 9. Chain link model of innovation (fonte: Kline, S, J, Rosenberg, N, 1986, p. 290) ...	37
Figura 10. Apprendimento per esplorazione e apprendimento per sfruttamento (fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna).....	45
Figura 11. Andamento del paradigma tecnologico (fonte: Economics Learning Community).....	46
Figura 12. Andamento delle curve tecnologiche in un settore (fonte: Shortform)	47
Figura 13. Rappresentazione di un paradigma tecnologico con balloons (fonte: fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna).....	48
Figura 14. Effetto Christensen nell'innovazione disruptive (fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna).....	54
Figura 15. Curva delle performance (a), delle vendite cumulate (b) e delle vendite (c) - (fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna).....	58
Figura 16. Modello di Abernathy-Utterback (fonte: Management of Innovation and Product Management, Cantamessa & Montagna)	59
Figura 17. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile in Canada (fonte: IEA).....	72
Figura 18. Spesa in R&S in idrogeno e cella a combustibile in Brasile (fonte: IEA)	74
Figura 19. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile in Brasile (fonte: Inova-e)	74
Figura 20. Spesa di R&S in idrogeno e cella a combustibile (fonte: IEA e DOE)	76
Figura 21. Progetti finanziati su idrogeno e cella a combustibile negli Stati Uniti (fonte: AMR).....	77
Figura 22. Progetti sulla cella a combustibile finanziati da enti pubblici e privati negli Stati Uniti (fonte: AMR)	77
Figura 23. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Danimarca (fonte: IEA).....	78
Figura 24. Numero di fondi stanziati per progetti relativi alle celle a combustibile in Danimarca dall'EUDP (fonte: EUDP)	79
Figura 25. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Francia (fonte: IEA).....	80

Figura 26. Numero di progetti finanziati relativi alle celle a combustibile dall'ANR in Francia (fonte: ANR)	81
Figura 27. Spese di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Italia (fonte: IEA)	82
Figura 28. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile (fonte: IEA).....	83
Figura 29. Numero di progetti sulla cella a combustibile finanziati in Svizzera (fonte: Hydrogen and Fuel Cells in Switzerland)	84
Figura 30. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Norvegia (fonte: IEA)	84
Figura 31. Partizione degli enti finanziatori dei progetti sulla cella a combustibile in Norvegia (fonte: The Research Council of Norway)	85
Figura 32. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Germania (fonte: IEA)	86
Figura 33. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Unione Europea (fonte: IEA).....	88
Figura 34. Distribuzione dei progetti finanziati tra i Paesi dell'UE sulle celle a combustibile (fonte: EU Funding & Tenders Portal)	88
Figura 35. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Giappone (fonte: IEA).....	90
Figura 36. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Sud Corea (fonte: IEA)	91
Figura 37. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile in Cina (fonte: IEA).....	92
Figura 38. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente americano (fonte: bilanci aziendali).....	96
Figura 39. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente americano, escludendo General Motors (fonte: bilanci aziendali)	96
Figura 40. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente europeo (fonte: bilanci aziendali).....	98
Figura 41. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente europeo, escludendo Bosch Group (fonte: bilanci aziendali).....	99
Figura 42. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile delle principali aziende del continente asiatico (fonte: bilanci aziendali)	101
Figura 43. Funzionamento del motore a quattro tempi (fonte: Autotecnica).....	107
Figura 44. Struttura di una batteria agli ioni litio (fonte: Jungheinrich Profi-Guide).....	111
Figura 45. Paradigma tecnologico del motore a combustione interna.....	134
Figura 46. Paradigma tecnologico della cella a combustibile.....	135
Figura 47. Paradigma tecnologico della batteria agli ioni litio	136
Figura 48. Curve delle performance (fonte: Fuel Economy EPA).....	142
Figura 49. Curva delle vendite di motori	145
Figura 50. Curve delle vendite (fonti: FCEV, BEV, ICE)	145
Figura 52. Curva delle vendite di batterie	146
Figura 51. Curva delle vendite di celle a combustibile.....	146
Figura 53. Curva del numero di brevetti (fonte: Patent Inspiration).....	147
Figura 54. Curva delle aziende del settore della cella a combustibile (fonte: Patent Inspiration)	148
Tabella 1. Categorie di fuel cell e relative caratteristiche	14
Tabella 2. Modello di Henderson e Clark	52
Tabella 3. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente americano (fonte: bilanci aziendali).....	97
Tabella 4. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente europeo (fonte: bilanci aziendali).....	100
Tabella 5. Spesa di R&S in idrogeno e celle a combustibile nel continente asiatico (fonte: bilanci aziendali).....	102

Tabella 6. Modello lineare dell'innovazione della cella a combustibile	105
Tabella 7. Conoscenze di chimica.....	113
Tabella 8. Conoscenze di termodinamica.....	113
Tabella 9. Conoscenze di fluidodinamica	114
Tabella 10. Conoscenze di ingegneria elettrica ed elettronica	114
Tabella 11. Conoscenze di ingegneria ambientale	115
Tabella 12. Conoscenze di simulazione multifisica	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 13. Conoscenze di simulazione multifisica	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 15. Esempio di modello di Henderson e Clark	131

Fonti dei bilanci aziendali

SFC Energy: <https://www.sfc.com/investors/financial-reports/>

Powercell Group: <https://powercellgroup.com/investor/reports-presentations/>

Ceres: <https://www.ceres.tech/investors/presentations/>

Accelera: <https://investor.cummins.com/sec-filings/annual-reports>

Ballard Power Systems: <https://www.ballard.com/investor-hub/>

Plug Power: <https://www.ir.plugpower.com/financials/annual-reports/default.aspx>

Bloom Energy: <https://investor.bloomenergy.com/financials-and-filings/sec-filings/default.aspx>

Fuel Cell Energy: <https://investor.fce.com/Financial-Information/sec-filings/default.aspx>

Doosan Fuel Cell: <https://www.doosanfuelcell.com/en/ir/inve-0301/>

Toshiba: <https://www.global.toshiba/ww/ir/corporate/pr/pr2023.html>

Panasonic Group: <https://holdings.panasonic/global/corporate/technology/outlook.html>

Toyota: <https://holdings.panasonic/global/corporate/technology/outlook.html>

POSCO Energy: <https://holdings.panasonic/global/corporate/technology/outlook.html>

GenCell Energy: <https://ir.gencellenergy.com/ir-financial-reports/>

Loop Energy: <https://www.loopenergy.com/lander>

Bosch Group: <https://www.bosch.com/company/facts-and-figures/#publications>

AFC Energy: <https://www.bosch.com/company/facts-and-figures/ - publications>

Hyzon Motors: <https://investors.hyzonfuelcell.com/financials/sec-filings/default.aspx>

Daimler: <https://www.daimlertruck.com/en/investors/reports/financial-reports>

General Motors: <https://investor.gm.com/>

Advent Technologies: <https://ir.advent.energy/financials/sec-filings/default.aspx>

Siemens Energy: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/company/sustainability.html>

ElringKlinger Group: <https://elringklinger.de/en>