



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA*

**TESI DI LAUREA**

in

Sistemi energetici per l'ambiente, ad Idrogeno e per P2G

**STUDIO DI UN CICLO TURBOGAS  
COMPLESSO BASATO SULLA COMBUSTIONE  
DELL'ALLUMINIO E LA PRODUZIONE DI  
IDROGENO**

CANDIDATA:  
Dott.ssa Sara Nanni

RELATORE:  
Prof. Ing. Andrea De Pascale

CORRELATRICE:  
Ing. Sofia Di Scipio

Anno accademico 2025/2026

Sessione V

# Abstract

Il presente lavoro di tesi è basato sullo studio di un sistema energetico complesso che permetta di sfruttare la reazione dell'alluminio con l'acqua al fine di produrre idrogeno ed energia elettrica. La particolarità del sistema è che nel reattore la reazione non avviene a pressione atmosferica ma a diversi valori di pressione più elevati. L'obiettivo principale della tesi è quello di individuare la combinazione più conveniente tra pressione massima e minima d'impianto e valutare l'effetto dell'eccesso d'acqua sulle prestazioni complessive. Come prima cosa è stata individuata una configurazione d'impianto che permettesse produzione di idrogeno e di energia elettrica sfruttando la reazione di combustione dell'alluminio pressurizzata. L'impianto è stato poi implementato su Aspen Plus dove sono state eseguite diverse simulazioni per valutare varie configurazioni di dati in input. Infine, sono state valutate alcune possibili configurazioni volte all'ottimizzazione energetica del sistema.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>1 Idrogeno e Alluminio</b>	<b>9</b>
1.1 Idrogeno: Un nuovo vettore energetico . . . . .	9
1.1.1 Metodi di produzione . . . . .	9
Idrogeno grigio . . . . .	9
Idrogeno marrone . . . . .	10
Idrogeno blu . . . . .	10
Idrogeno turchese . . . . .	10
Idrogeno giallo . . . . .	11
Idrogeno rosa . . . . .	11
Idrogeno verde . . . . .	11
1.2 Settori applicativi e potenzialità dell'idrogeno . . . . .	11
1.3 Metodi di stoccaggio . . . . .	12
1.4 Alluminio: interesse energetico e strategico dell'alluminio come combu- stibile . . . . .	13
1.4.1 Alluminio primario . . . . .	13
Processo di Bayer . . . . .	13
Processo di Hall-Hérault . . . . .	13
1.4.2 Svantaggi legati alla produzione di alluminio primario . . . . .	13
1.4.3 Alluminio secondario . . . . .	14
1.4.4 Economia circolare e vantaggi dell'alluminio secondario . . . . .	14
<b>2 Fondamenti teorici</b>	<b>15</b>
2.1 Proprietà energetiche dell'alluminio . . . . .	15
2.2 Strati di passivazione superficiale e metodi di rimozione . . . . .	15
2.2.1 Metodi di attivazione . . . . .	16
Fresatura a sfere . . . . .	16
Atomizzazione . . . . .	16
2.2.2 Metodi di conversione . . . . .	16
Soluzioni alcaline o acide . . . . .	16
Ossidazione a vapore . . . . .	17
2.3 Produzione di idrogeno da alluminio: reazione Al-H <sub>2</sub> O . . . . .	17
2.4 Fattore $\lambda$ . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Il sistema energetico oggetto di studio</b>	<b>21</b>
3.1	Architettura generale del sistema . . . . .	21
3.2	Sezione di combustione . . . . .	22
	Portata d'acqua . . . . .	22
	Temperatura di combustione . . . . .	23
	Analisi del tasso di conversione dell'alluminio in funzione del regime termico . . . . .	27
	Definizione dei parametri di pressione del ciclo . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Modellazione del sistema tramite il software Aspen Plus</b>	<b>30</b>
4.1	Software Aspen Plus e configurazione generale . . . . .	30
4.2	Presentazione dei componenti e definizione delle condizioni operative . .	30
	Reattore . . . . .	31
	Pompa . . . . .	32
	Turbina . . . . .	32
	Compressore . . . . .	33
	Separatori . . . . .	33
	Scambiatore . . . . .	34
	Riscaldatori . . . . .	35
4.3	Simulazioni . . . . .	36
	Dati di input . . . . .	36
	Dati di output . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Risultati e calcolo delle prestazioni</b>	<b>38</b>
5.1	Definizione degli indici di prestazione . . . . .	38
	Potenze termiche . . . . .	38
	Rendimento elettrico della turbina a vapore . . . . .	39
	Potenza netta . . . . .	39
	Rendimento totale di sistema . . . . .	39
	Rendimento di primo principio . . . . .	39
	Lavoro specifico netto . . . . .	39
5.2	Analisi delle simulazioni . . . . .	40
	Grafici Lavoro-Rendimento . . . . .	40
	Valore ottimale del parametro $\lambda$ . . . . .	44
5.3	Presentazione delle configurazioni con $\lambda$ ottimale e calcolo prestazionale	51
	Configurazione 1 . . . . .	52
	Configurazione 2 . . . . .	53
	Configurazione 3 . . . . .	54
	Configurazione 4 . . . . .	55
5.4	Analisi delle configurazioni e individuazione configurazione ottimale . . .	56
5.5	Confronto con impianto non pressurizzato . . . . .	57
	Analisi dei dati relativi al recuperatore di calore HX . . . . .	58
5.6	Ottimizzazione energetica . . . . .	60
	Recupero termico dalla corrente di alluminio incombusto . . . . .	61
	Recupero termico dalla corrente d'acqua in uscita . . . . .	62
	Sintesi dei risultati . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>64</b>





# Introduzione

Negli ultimi decenni, il sistema energetico globale sta attraversando una profonda trasformazione, guidata dalla crescente necessità di ridurre le emissioni di gas serra e di superare i limiti ambientali ed economici legati all'uso intensivo dei combustibili fossili. In questo scenario, la transizione energetica e la decarbonizzazione del sistema energetico rappresentano elementi centrali per garantire la sostenibilità ambientale e la sicurezza energetica nel lungo periodo [1].

Alla luce della sempre più evidente minaccia del riscaldamento globale, risulta imprescindibile il rispetto degli obiettivi stabiliti dall'Accordo di Parigi, che mira a limitare l'aumento della temperatura media globale a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali. Il raggiungimento di tale obiettivo richiede una riduzione delle emissioni globali di gas serra di circa il 50% entro il 2030 e il conseguimento della neutralità climatica entro il 2050, imponendo una trasformazione strutturale di tutti i settori economici lungo traiettorie di decarbonizzazione ben definite [2].

Il settore energetico, che comprende la produzione di elettricità e calore, i trasporti e l'industria, riveste un ruolo cruciale in questo processo, essendo responsabile di circa il 73% delle emissioni globali di gas serra. Tali emissioni derivano prevalentemente dalla combustione di combustibili fossili per la produzione di elettricità, calore e carburanti [2]. Di conseguenza, la riorganizzazione del sistema energetico rappresenta una leva fondamentale per la riduzione delle emissioni a livello globale.

Nel contesto dell'Unione Europea, gli obiettivi climatici risultano particolarmente ambiziosi: una riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 e il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, con l'obiettivo di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero. In tale quadro, l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile costituisce una delle strategie principali per il conseguimento degli obiettivi climatici europei e globali. La Direttiva sulle Energie Rinnovabili ha infatti innalzato l'obiettivo vincolante dell'UE per la quota di rinnovabili nel mix energetico al 42,5% entro il 2030, con l'aspirazione di raggiungere il 45% [3].

Negli ultimi anni sono stati registrati progressi significativi nello sviluppo delle fonti rinnovabili, a dimostrazione di come il processo di transizione energetica sia ormai ben avviato a livello globale, con incrementi di capacità che hanno raggiunto nuovi massimi storici [1]. In particolare, nel 2024 le fonti rinnovabili hanno rappresentato il 47,5% del consumo lordo di elettricità nell'Unione Europea, con un aumento di 2,1 punti percentuali rispetto al 2023 [4]. Tale tendenza è ulteriormente confermata dai dati del terzo trimestre del 2025, durante il quale il 49,3% dell'energia elettrica netta generata nell'UE è derivata da fonti rinnovabili, in crescita rispetto al 47,5% registrato nello stesso periodo del 2024 [5].

Per quanto riguarda il consumo di energia finale, nel 2024 il 25,4% dell'energia consumata nell'Unione Europea è stato coperto da fonti rinnovabili, con un incremento di circa un punto percentuale rispetto all'anno precedente. Tuttavia, per raggiungere l'o-

biiettivo minimo del 42,5% entro il 2030 sarà necessario raddoppiare i tassi di diffusione delle rinnovabili osservati nell'ultimo decennio e attuare una profonda trasformazione dell'intero sistema energetico europeo [6].

Un ruolo di primo piano è assunto dalle fonti eolica e solare, che nel 2025 hanno generato per la prima volta una quota di energia elettrica superiore a quella prodotta dai combustibili fossili nell'Unione Europea. In particolare, eolico e solare hanno contribuito complessivamente a circa il 30% della produzione elettrica, superando i combustibili fossili, fermi al 29% [7]. Questi risultati evidenziano il crescente ruolo delle tecnologie a basse emissioni di carbonio come pilastro della transizione energetica.

In tale contesto, l'idrogeno emerge come una componente strategica fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione, neutralità climatica e sviluppo sostenibile. Grazie alla sua versatilità e al potenziale di integrazione con le fonti rinnovabili, l'idrogeno è considerato un vettore energetico chiave per la decarbonizzazione dei settori difficilmente elettrificabili e per la realizzazione di un sistema energetico più flessibile e resiliente.

Pertanto, il presente lavoro di tesi si propone di studiare termodinamicamente un impianto basato sulla reazione di combustione dell'alluminio con l'acqua, finalizzato alla produzione di idrogeno, prevedendo anche una produzione elettrica integrata. In particolare, l'analisi si concentra sulla possibilità di pressurizzare il reattore, valutandone la convenienza e l'impatto sulle prestazioni complessive del sistema. Inoltre, è stata considerata l'introduzione di una fase di espansione sub-atmosferica della turbina, con l'obiettivo di aumentare la produzione elettrica, e sono stati calcolati i principali parametri prestazionali dell'impianto. Nel corso del lavoro sono state inoltre esplorate possibili modalità di ottimizzazione energetica delle configurazioni ottimali, al fine di migliorare l'efficienza complessiva ed identificare le strategie operative più vantaggiose. L'obiettivo della tesi consiste quindi nel comprendere come la pressurizzazione del reattore e l'espansione della turbina influenzino la produzione di idrogeno e le prestazioni energetiche complessive, individuando le configurazioni che massimizzano l'efficienza termodinamica all'interno del modello analizzato.

# Capitolo 1

## Idrogeno e Alluminio

### 1.1 Idrogeno: Un nuovo vettore energetico

L'idrogeno è l'elemento più presente nell'universo, ma sulla Terra non è disponibile in forma libera in quantità significative, per questo motivo deve essere prodotto a partire da altre fonti energetiche. L'idrogeno è quindi un vettore energetico che immagazzina energia, ne consente il trasporto, la distribuzione e l'uso, oltre ad essere leggero, reattivo e ad alto contenuto energetico per unità di massa.

Un ulteriore aspetto fondamentale è la possibilità di utilizzare tale elemento per la produzione di energia pulita, la sua combustione infatti ha come unico sottoprodotto l'acqua, non producendo emissioni dirette di gas climalteranti.

Queste caratteristiche lo rendono particolarmente interessante nel processo di decarbonizzazione di settori difficilmente elettrificabili come l'industria pesante, i trasporti su lunga distanza e lo stoccaggio di energia su larga scala.

L'idrogeno rappresenta quindi una componente chiave nella strategia per la transizione energetica, lo zero netto e lo sviluppo sostenibile. Tuttavia, la sostenibilità di tale vettore dipende interamente dal metodo utilizzato per la sua produzione. Attualmente l'idrogeno rinnovabile e a basse emissioni costituisce meno dell'1% della produzione globale, la restante parte viene prodotta a partire da combustibili fossili [8].

#### 1.1.1 Metodi di produzione

Ad oggi, l'idrogeno può essere ottenuto attraverso un'ampia varietà di processi, che differiscono significativamente in termini di materie prime impiegate, tecnologie utilizzate, efficienza energetica e impatto ambientale.

Per questo motivo, risulta fondamentale classificare i metodi di produzione dell'idrogeno sulla base del principio di funzionamento e delle emissioni di  $CO_2$  associate lungo l'intero ciclo di produzione.

Questa classificazione è seguita dall'assegnazione di vari "colori" all'idrogeno in base al processo produttivo e al relativo impatto ambientale.

#### Idrogeno grigio

La produzione di idrogeno *grigio* avviene principalmente attraverso il processo di *steam reforming* del metano in combinazione con la reazione di *water gas shift*.

In questo processo il metano, derivante da gas naturale, reagisce con vapor d'acqua a temperature elevate, tipicamente intorno ai 700 °C, in presenza di catalizzatori a

base di nichel che ne accelerano la cinetica. La reazione genera idrogeno e monossido di carbonio, che successivamente viene convertito in anidride carbonica e idrogeno tramite la *water gas shift*.

L'idrogeno *grigia* rappresenta attualmente la quantità preponderante di idrogeno prodotto a livello globale cui si stima corrisponda il consumo del 6% del gas naturale estratto nel mondo [9]. Questa tecnologia presenta il principale vantaggio di consentire la produzione di idrogeno a costi contenuti, rendendola economicamente conveniente per molte applicazioni industriali. Tuttavia, questo metodo comporta un elevato impatto ambientale dovuto al notevole quantitativo di emissioni di  $CO_2$  prodotte, pari a circa 9-10 kg per ogni chilogrammo di idrogeno generato.

### **Idrogeno marrone**

La produzione di idrogeno *marrone* avviene principalmente attraverso gassificazione del carbone, processo che prevede l'ossidazione parziale del carbone ad alte temperature, tipicamente intorno ai 1000°C.

Questo processo necessita di reagenti esterni come ossigeno o vapore acqueo, per convertire il carbone in una miscela gassosa di idrogeno, monossido di carbonio e anidride carbonica. È un processo altamente energivoro a causa delle temperature elevate che vanno mantenute costanti.

I costi rimangono contenuti soprattutto a causa della materia prima utilizzata, particolarmente economica.

Tuttavia, il limite principale di tale processo riguarda le emissioni di  $CO_2$  che risultano estremamente elevate, pari a circa 20 kg di anidride carbonica per chilogrammo di idrogeno prodotto. Di conseguenza l'idrogeno *marrone* è considerato una forma di idrogeno ad alta intensità carbonica e non compatibile con gli obiettivi di decarbonizzazione del sistema energetico.

### **Idrogeno blu**

L'idrogeno *blu* viene prodotto a partire da combustibili fossili attraverso uno dei metodi citati sopra; Tuttavia, la produzione di idrogeno blu prevede l'aggiunta di un processo di cattura e stoccaggio della  $CO_2$ , finalizzato a ridurre le emissioni di anidride carbonica generate durante la reazione.

Esistono diversi metodi per la cattura della  $CO_2$  tra cui la separazione mediante solventi, la cattura fisica con adsorbenti o membrane, e l'iniezione in formazioni geologiche profonde per lo stoccaggio permanente. In base all'efficienza di tali processi si può determinare il vero impatto ambientale di questo metodo di produzione, tipicamente le emissioni residue rimangono superiori a 5kg di  $CO_2$  per chilogrammo di idrogeno prodotto.

Grazie ai costi di produzione inferiori rispetto all'idrogeno *verde*, l'idrogeno *blu* è considerato una soluzione transitoria nella transizione verso sistemi energetici a zero emissioni.

### **Idrogeno turchese**

L'idrogeno *turchese* viene prodotto principalmente attraverso il processo di pirolisi del metano, questa tecnologia permette la separazione dell'idrogeno dal carbonio contenuto nel metano senza formazione di anidride carbonica come sottoprodotto

principale.

Questo processo porta alla produzione di carbonio solido, rappresentando un vantaggio significativo in quanto può essere facilmente riutilizzato in diversi settori industriali oppure immagazzinato con maggiore semplicità e sicurezza rispetto alla  $CO_2$  gassosa. Questo riduce l'impatto ambientale complessivo del processo rendendo l'idrogeno *turchese* una soluzione a basse emissioni, tuttavia, presenta criticità legate al consumo energetico dovuto alle elevate temperature di processo.

### **Idrogeno giallo**

L'idrogeno *giallo* viene prodotto tramite elettrolisi dell'acqua utilizzando l'energia elettrica fornita dalla rete.

L'impatto ambientale di questo processo dipende esclusivamente dalla composizione del mix energetico nazionale o regionale. Le emissioni correlate, quindi, variano nel tempo in funzione della percentuale di energia prodotta da fonti rinnovabili rispetto a quella generata da fonti fossili.

### **Idrogeno rosa**

L'idrogeno *rosa* viene prodotto tramite elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica proveniente da una centrale nucleare. A differenza dell'idrogeno *giallo*, in questo caso l'impatto ambientale non dipende dalla variabilità del mix energetico di rete, poiché l'energia elettrica prodotta deriva interamente da una fonte a basse emissioni dirette di  $CO_2$ .

### **Idrogeno verde**

L'idrogeno *verde* viene prodotto attraverso elettrolisi dell'acqua utilizzando esclusivamente energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, come fotovoltaico, solare, idroelettrico o geotermico.

Grazie all'impiego di energia rinnovabile questo processo non genera emissioni di  $CO_2$ , rendendo l'idrogeno *verde* il vettore energetico a più basso impatto ambientale tra tutte le tipologie esistenti.

L'idrogeno *verde* rappresenta quindi la soluzione più promettente verso una transizione energetica sostenibile. Nonostante questi vantaggi ambientali, il principale limite è dovuto all'elevato costo di produzione, che, ad oggi, risulta ancora superiore rispetto a tutte le altre tipologie esistenti.

## **1.2 Settori applicativi e potenzialità dell'idrogeno**

L'idrogeno può contribuire in modo significativo alla decarbonizzazione del sistema energetico grazie alla sua versatilità e alla possibilità di sostituire i combustibili fossili in applicazioni dove l'elettrificazione diretta risulta complessa o inefficiente.

Nel settore industriale, l'idrogeno può essere impiegato sia come combustibile sia come reagente chimico, ad esempio nella produzione di acciaio, ammoniaca e metanolo, consentendo la riduzione delle emissioni di  $CO_2$  rispetto ai processi basati su carbone e gas naturale.

Analogamente, nel settore dei trasporti pesanti, marittimi e ferroviari, l'idrogeno offre

un'alternativa a basse emissioni ai combustibili tradizionali, soprattutto nei casi in cui è richiesta elevata autonomia e ridotti tempi di rifornimento.

Un ulteriore ambito di interesse è rappresentato dall'integrazione dell'idrogeno nel sistema elettrico. Esso può infatti essere utilizzato come vettore di accumulo energetico di lungo periodo, consentendo di immagazzinare l'energia prodotta in eccesso da fonti rinnovabili non programmabili, come solare ed eolico, e di riconvertirla in elettricità o calore nei momenti di maggiore domanda. In questo modo, l'idrogeno contribuisce a migliorare la flessibilità del sistema energetico e a facilitare la presenza sempre maggiore delle fonti rinnovabili nel mix energetico.

Nel complesso, l'impiego dell'idrogeno come vettore energetico in diversi settori favorisce gli obiettivi di decarbonizzazione del sistema energetico.

### **1.3 Metodi di stoccaggio**

La densità energetica dell'idrogeno è molto elevata per unità di massa ma si mantiene bassa per unità di volume, questo aspetto genera problematiche riguardanti i sistemi di stoccaggio che vanno quindi attentamente valutati per verificarne la fattibilità in funzione dell'applicazione. I sistemi attualmente disponibili per lo stoccaggio possono essere di tipo fisico o chimico.

Tra i sistemi di stoccaggio che utilizzano un approccio fisico i più comunemente utilizzati sono quelli che sfruttano le alte pressioni, tipicamente comprese tra i 350 e i 700 bar. I contenitori utilizzati possono essere in acciaio, alluminio o materiali compositi avanzati. Le pressioni elevate possono portare a danneggiamenti o al potenziale cedimento strutturale dei serbatoi; perciò, dovranno essere previste un'attenta progettazione e manutenzione. Le eccessive pressioni possono generare criticità in ambito di sicurezza, infatti vengono inseriti sistemi di rilevamento delle perdite che consentano di identificare il problema tempestivamente prima di raggiungere il limite esplosivo. Dovranno inoltre essere previsti sistemi di ventilazione che permettano un'adeguata espulsione dell'idrogeno dall'ambiente in cui è stato disperso.

Per ovviare ai problemi legati alle alte pressioni un secondo approccio di tipo fisico è lo stoccaggio criogenico. L'idrogeno viene portato e mantenuto allo stato liquido in un ambiente a bassa temperatura. Questo metodo consente di ottenere una densità energetica più elevata e di mitigare i problemi legati alle perdite, d'altra parte, deve essere considerato il grande dispendio energetico che si porta dietro il processo. Infatti, per mantenere l'idrogeno in forma liquida è necessario tenersi a temperature inferiori a  $-253^{\circ}\text{C}$  altrimenti le perdite di calore compromettono l'efficienza dell'intero sistema [10]. Tra i metodi basati su un approccio chimico c'è lo stoccaggio di idrogeno all'interno di solidi mediante assorbimento o adsorbimento. Nel primo caso l'idrogeno viene immagazzinato in una struttura reticolare solida sotto forma di atomi, nel secondo caso in molecole sulla superficie del materiale. Questo metodo risulta più sicuro sebbene sarà necessaria energia extra per estrarre l'idrogeno utilizzabile [11].

## 1.4 Alluminio: interesse energetico e strategico dell'alluminio come combustibile

L'alluminio è l'elemento più abbondante della crosta terrestre costituendo il 7,6% della sua massa complessiva; tuttavia, non si trova mai nella forma elementare in natura a causa della sua elevata reattività chimica che lo porta a combinarsi facilmente con ossigeno e altri elementi [12]. In natura l'alluminio si trova principalmente sotto forma di bauxite, un minerale composto da ossidi e idrossidi di alluminio. L'alluminio può essere primario, quindi prodotto a partire dall'estrazione della bauxite, oppure secondario, quindi prodotto a partire da materiali di scarto mediante processi di riciclo.

### 1.4.1 Alluminio primario

L'estrazione di bauxite rappresenta il 99% della produzione di alluminio primario [12]. La bauxite contiene tipicamente il 40-60% in peso di allumina ( $Al_2O_3$ ), questa viene estratta attraverso un trattamento chimico chiamato processo di Bayer, seguito da una seconda fase in cui l'allumina viene ridotta elettroliticamente a metallo mediante il processo di Hall-Héroult.

#### Processo di Bayer

Il processo di Bayer è il processo industriale di riferimento per la purificazione dell'allumina, un passaggio fondamentale poiché la bauxite contiene, oltre all'alluminio, anche composti di silicio, ferro e titanio che devono essere rimossi [12]. Il processo si compone di tre fasi, la prima, detta digestione alcalina, in cui la bauxite viene trattata con una soluzione concentrata di idrossido di sodio, a cui segue la precipitazione dell'idrossido di alluminio. Infine, il solido viene scaldato a 1050°C, temperatura a cui inizia la fase di calcinazione con decomposizione chimica in allumina.

#### Processo di Hall-Héroult

Il processo di Hall-Héroult consiste nella riduzione elettrolitica dell'allumina disciolta in un bagno di criolite fusa ( $Na_3AlF_6$ ). La cella elettrolitica è formata da un catodo, fondo della cella, rivestito di carbonio e contiene alluminio fuso che funge da elettrodo. L'anodo è costituito principalmente da carbonio sospeso nel bagno elettrolitico. Durante la riduzione elettrolitica l'ossigeno reagisce con l'anodo con conseguente formazione di  $CO_2$  gassosa mentre l'alluminio si deposita allo stato fuso al catodo da cui viene periodicamente rimosso [13].

### 1.4.2 Svantaggi legati alla produzione di alluminio primario

Gli svantaggi legati al metodo di produzione dell'alluminio primario riguardano prevalentemente il grande consumo elettrico e la produzione di emissioni di  $CO_2$ . Il processo di estrazione comporta un notevole impatto ambientale, principalmente dovuto alla necessità di costruire infrastrutture e risorse aggiuntive di supporto. Inoltre, una volta esaurito il sito minerario, i terreni risultano inadatti alla coltivazione. Si osserva un'ulteriore impatto sugli ecosistemi che subiscono danni, e, talvolta, si assiste alla completa scomparsa di quest'ultimi [12].

### **1.4.3 Alluminio secondario**

L'alluminio ha la capacità di mantenere le sue proprietà in seguito a riciclaggio infinito, questo lo rende un pilastro dell'economia circolare. L'alluminio secondario è prodotto attraverso fusione e raffinazione di materiale di scarto e rottami, contenenti alluminio, derivanti da scarti di lavorazioni industriali o prodotti a fine vita. Il riciclaggio parte da una fase preliminare di separazione delle parti in alluminio da eventuali altri materiali presenti, si passa poi ad una fase di frantumazione per facilitare la successiva fusione che avviene a temperature comprese tra 660 e 750 °C. Segue un processo di raffinazione e rimozione delle impurità per procedere poi all'ultima fase di colatura in lingotti o di produzione diretta di semilavorati.

### **1.4.4 Economia circolare e vantaggi dell'alluminio secondario**

Producendo alluminio secondario si stima il consumo solo del 5% dell'energia richiesta per l'alluminio primario e l'emissione di oltre il 90% in meno di  $CO_2$  [14]. Queste caratteristiche consentono di avere un risparmio economico ed un minore impatto ambientale, contribuendo alle strategie di decarbonizzazione. Il riciclo dell'alluminio è un processo altamente sviluppato, ad oggi il 75% di tutto l'alluminio mai prodotto è ancora in uso. In questo contesto l'Europa presenta la più alta quantità di alluminio riciclato pro capite e in particolare in Italia il 100% della produzione di alluminio è di tipo secondario [15].

# Capitolo 2

## Fondamenti teorici

### 2.1 Proprietà energetiche dell'alluminio

L'alluminio come vettore energetico rappresenta un'opzione promettente data dalla sua alta densità energetica sia in massa che in volume, in termini di sicurezza e abbondanza. Al contatto con l'aria, sulla superficie dell'alluminio, si forma un sottile strato di ossido rendendo il materiale inerte all'acqua in condizioni ambientali e quindi intrinsecamente sicuro. Questa caratteristica consente inoltre di evitare dispersioni di energia nel tempo, impedendo all'alluminio di ossidare ulteriormente in condizioni ambientali. È possibile ossidare l'alluminio con l'acqua per generare calore e idrogeno, la reazione avviene ad alte temperature in modo spontaneo senza necessità di aggiungere catalizzatori [16]. L'alluminio quando si ossida completamente presenta un'elevata energia specifica gravimetrica che risulta pari a circa 31 MJ/kg, valore molto alto per un metallo solido, paragonabile e talvolta superiore a quella di alcuni combustibili fossili. L'alluminio ha un'elevata densità (2,7g/cm<sup>3</sup>) che genera un'altissima densità energetica volumetrica pari a circa 80-85 MJ/L, questo rende l'alluminio molto vantaggioso per stoccaggio e trasporto di energia e costituisce uno dei principali motivi per cui viene studiato come vettore energetico solido. L'alluminio viene prodotto utilizzando energia elettrica che viene poi immagazzinata sotto forma di energia chimica. Tale energia non viene dispersa finché l'alluminio non reagisce, ciò rende il metallo ottimo per l'accumulo stagionale. Inoltre, l'alluminio presenta una grande stabilità a temperatura ambiente e sicurezza nello stoccaggio, non essendo esplosivo, tossico, volatile e infiammabile se non attivato, questo lo rende particolarmente interessante in applicazioni remote o *off-grid*.

Un ultimo concetto è quello di recuperabilità energetica, infatti l'alluminio è prodotto attraverso un processo energivoro, ma a questo scopo può essere utilizzata energia rinnovabile ed infine l'allumina prodotta può nuovamente essere convertita in alluminio. I principali limiti sono rappresentati dall'energia richiesta per produrlo, piuttosto elevata, passivazione superficiale e gestione del residuo.

### 2.2 Strati di passivazione superficiale e metodi di rimozione

Lo strato passivante di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> che si forma al contatto dell'alluminio con l'aria, blocca le possibili reazioni successive. L'effetto combinato della temperatura e dell'area

superficiale non provoca reattività per le particelle di alluminio di dimensioni micro-metriche a temperatura ambiente. Per questo motivo sono stati studiati diversi metodi per danneggiare l'integrità dello strato di ossido e limitarne la formazione, in modo che la reazione possa continuare fino a quando l'alluminio non sarà completamente ossidato e la resa di idrogeno sarà massimizzata [17]. Lo strato passivante di  $Al_2O_3$  che si forma al contatto dell'alluminio con l'aria, blocca le possibili reazioni successive. Per avviare la reazione tra alluminio e acqua, è necessario rompere lo strato di ossido d'alluminio. La destabilizzazione dello strato di allumina, avente un punto di fusione di 2072 °C, richiede o un'azione chimica che comporti l'uso di sostanze corrosive, o un'azione meccanica, oppure l'applicazione di alte temperature e pressioni [18].

## **2.2.1 Metodi di attivazione**

### **Fresatura a sfere**

La fresatura a sfere condotta in atmosfera inerte consente di ridurre la dimensione delle particelle, aumentando significativamente la superficie specifica e inducendo la formazione di difetti strutturali in grado di interrompere lo strato di ossido passivante. Questi effetti migliorano la reattività dell'alluminio e provocano un aumento dei tassi di produzione dell'idrogeno. Durante il processo possono essere aggiunti additivi, sali o metalli, che aderiscono alla superficie delle particelle o penetrano al loro interno, aumentando ulteriormente l'attività attraverso la formazione di composti reattivi. Nel caso della fresatura a sfere con sali, quest'ultimi bloccano temporaneamente la riossidazione superficiale dell'alluminio; successivamente, dissolvendosi in acqua, consentono l'esposizione del nucleo di alluminio puro e la sua reazione con l'acqua stessa. La fresatura a sfere con metalli prevede invece l'inserimento di metalli a basso punto di fusione e delle loro leghe, che favoriscono l'attivazione dell'alluminio principalmente mediante dissoluzione o perturbazione dello strato di ossido, favorendo la frattura intergranulare e la formazione di composti intermetallici [18].

### **Atomizzazione**

Il processo inizia con la fusione del metallo di base che viene riscaldato in atmosfera inerte al fine di prevenire contaminazioni. Successivamente il metallo fuso viene trasferito in una camera di atomizzazione, dove un getto di gas ad alta pressione e temperatura lo frammenta in piccole gocce. Queste gocce solidificano rapidamente nella fase di raffreddamento dando vita a particelle che presentano grande omogeneità. Le polveri così ottenute vengono conservate in ambiente chiuso evitando il contatto con l'aria e mantenendo condizioni di bassa umidità, al fine di prevenire processi di ossidazione e degradazione e preservarne proprietà chimiche e fisiche. Il principale vantaggio di questo metodo risiede nella possibilità di produrre polveri con una distribuzione altamente uniforme di elementi di lega, aspetto fondamentale per mantenere alta la resa di produzione idrogeno [18].

## **2.2.2 Metodi di conversione**

### **Soluzioni alcaline o acide**

Lo stato di ossido che si forma sulla superficie dell'alluminio a seguito dell'esposizione all'aria, può essere dissolto mediante soluzioni sia acide che alcaline a temperatura

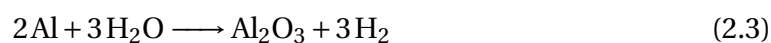
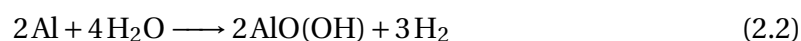
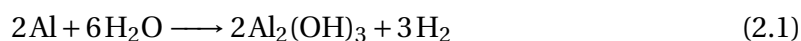
ambiente. La reazione tra alluminio e acqua dipende fortemente dal tipo e dalla concentrazione delle soluzioni utilizzate come catalizzatori. In generale, lo strato di ossido si dissolve più facilmente in ambiente alcalino rispetto a quello acido. Le soluzioni alcaline più comunemente utilizzate sono l'idrossido di sodio (NaOH) e l'idrossido di potassio (KOH), grazie alla loro efficacia nella dissoluzione dello strato di ossido, che consente di accelerare la produzione di idrogeno e di ridurre il tempo di induzione della reazione. Le soluzioni acide, come l'acido cloridrico (HCl), possono anch'esse innescare la reazione alluminio-acqua dissolvendo lo strato passivante e permettendo la produzione di idrogeno; tuttavia, il consumo progressivo degli ioni  $H^+$  riduce nel tempo la velocità di reazione. Per questo motivo, rispetto ai sistemi alcalini, le soluzioni acide risultano meno efficienti nelle reazioni prolungate [18].

### Ossidazione a vapore

Questo approccio è poco utilizzato principalmente a causa delle elevate temperature richieste che complicano il mantenimento di un bilancio energetico sostenibile. Utilizzando pressioni elevate, possono essere evitate temperature così estreme e il calore del vapore può essere recuperato con turbine a vapore. Tuttavia, la realizzazione di un sistema di produzione continua risulta complesso a causa di temperature e pressioni elevate e conseguenti sistemi di sicurezza necessari. Una possibile soluzione consiste nella fusione delle polveri di alluminio e nella reazione diretta dell'alluminio liquido con il vapore, ma questa opzione richiede un elevato apporto energetico a causa della presenza dello strato di ossido di alluminio, che agisce da barriera termica [18].

## 2.3 Produzione di idrogeno da alluminio: reazione Al- $H_2O$

Le reazioni metallo-acqua sono ossidoriduzioni, durante le quali il metallo si ossida cedendo elettroni e l'acqua si riduce a idrogeno. I prodotti di reazione dipendono dalla reattività del metallo, dalla temperatura e dallo stato fisico dell'acqua. L'alluminio è termodinamicamente molto reattivo verso l'acqua; tuttavia, a temperatura ambiente è protetto da uno strato compatto di allumina. Attraverso uno dei metodi precedentemente descritti è possibile rendere disponibile l'alluminio a reagire con l'acqua. La reazione tra alluminio e acqua può avvenire in tre forme differenti a seconda della temperatura d'esercizio e di conseguenza, l'idrossido di alluminio può evolvere in diverse fasi cristalline [18]. Le reazioni sono le seguenti: [19]



La reazione (2.1) avviene quando la temperatura si mantiene in un intervallo compreso tra 20 e 280 °C, in questo caso si osserva la produzione di bayerite che è la forma più sta-

bile a temperatura ambiente. Se ci si sposta in un intervallo di temperature intermedie, tipicamente tra 280 e 480 °C, si osserva una parziale deidratazione della bayerite che porta alla produzione di bohemite, secondo la reazione (2.2), questa presenta struttura più compatta e minore contenuto d'acqua. Infine, per temperature superiori a 480°C, la produzione di idrogeno è accompagnata da quella di allumina e il processo segue la reazione (2.3). L'allumina si forma tramite deidratazione completa di bohemite, è termodinamicamente molto stabile e funge da strato protettivo compatto. Come possiamo osservare in tutte le reazioni si ha la medesima produzione di idrogeno, questa infatti dipende esclusivamente dalla quantità di alluminio inserita che essendo pari a 2 moli determina sempre la produzione di 3 moli di idrogeno. Tutte e tre le reazioni sono fortemente esotermiche e termodinamicamente favorevoli, ma la velocità dipende dalla temperatura e dallo stato dell'ossido superficiale. Nel sistema studiato nel presente lavoro di tesi avviene la reazione (2.3), in cui l'alluminio, precedentemente portato allo stato liquido, reagisce con l'acqua per la produzione di allumina e idrogeno. Questa reazione presenta  $\Delta H$  e  $\Delta G$  molto minori di zero.

Composto	$\Delta H_f^\circ$ [kJ/mol]	$\Delta G_f^\circ$ [kJ/mol]
Al (s)	0	0
H <sub>2</sub> (g)	0	0
H <sub>2</sub> O (l)	-285,83	-237,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1675,7	-1582,3

Tabella 2.1: Valori standard di formazione

$$\begin{aligned}\Delta H^\circ &= \sum \Delta H_f^\circ(\text{prodotti}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{reagenti}) \\ \Delta H^\circ &= [(-1675.7) + 3 \cdot 0] - [2 \cdot 0 + 3 \cdot (-285.83)] \\ \Delta H^\circ &\approx -818,21 \text{ kJ}\end{aligned}\tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}\Delta G^\circ &= \sum \Delta G_f^\circ(\text{prodotti}) - \sum \Delta G_f^\circ(\text{reagenti}) \\ \Delta G^\circ &= [(-1582.3) + 3 \cdot 0] - [2 \cdot 0 + 3 \cdot (-237.13)] \\ \Delta G^\circ &\approx -870,91 \text{ kJ}\end{aligned}\tag{2.5}$$

Come possiamo osservare dal calcolo (2.4), l'entalpia di reazione risulta essere molto minore di zero, questo significa che la reazione è fortemente esotermica e rilascia molta energia sottoforma di calore, in particolare in reazione stechiometrica il sistema rilascia circa 818 KJ. Osservando il calcolo (2.5), l'energia libera di Gibbs risulta anch'essa molto minore di zero, questo significa che la reazione avviene spontaneamente senza aggiunta di energia dall'esterno, essendo quindi fortemente favorita termodinamicamente. L'ossidazione dell'alluminio è favorita anche a basse temperature, ma la cinetica è il fattore limitante, infatti in questo caso lo strato di ossido impedisce la reazione. A fronte di 1 kg di alluminio consumato, l'acqua necessaria per la combustione stechiometrica è 1002g e si ha la produzione di 1890g di allumina e 112g di idrogeno puro. La reazione è fortemente esotermica e il calore rilasciato nel caso di 1 kg di alluminio consumato è pari a 17,5 MJ. Inoltre, l'energia potenziale contenuta nei 112g di idrogeno prodotti è circa 13,5 MJ a causa dell'elevato potere calorifico inferiore dell'idrogeno, pari a circa 120 MJ/kg. L'idrogeno prodotto in questo modo può essere considerato verde, come

possiamo vedere dalla reazione (2.3) non si ha produzione di  $CO_2$  [20]. La reazione descritta è stata implementata nel software e a questo fine è fondamentale la conoscenza e l'utilizzo del fattore  $\lambda$  descritto nel paragrafo successivo.

## 2.4 Fattore $\lambda$

Il fattore  $\lambda$  è un parametro adimensionale che mette in relazione il rapporto reale tra acqua e alluminio ed il rapporto stechiometrico necessario alla reazione per ossidare completamente l'alluminio e produrre allumina e idrogeno. Questo rapporto viene utilizzato per definire le condizioni operative della nostra reazione.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{Al}} \bigg/ \left( \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{Al}} \right)_{\text{stoic}} \quad (2.6)$$

L'utilizzo di questo fattore  $\lambda$ , normalizzato rispetto al rapporto stechiometrico, consente di valutare quanto l'acqua inserita nel sistema sia maggiore, minore o uguale alla quantità stechiometrica e consente di correlare  $\lambda$  con la cinetica di reazione. Si delineano quindi tre casistiche:

- $\lambda = 1$  → Reagenti in perfetto rapporto stechiometrico: Questa rappresenta la condizione di massimo rendimento teorico di idrogeno. Ogni mole di Al trova esattamente le moli di  $H_2O$  necessarie, assistendo così alla produzione della massima quantità di idrogeno possibile secondo la reazione. In questo caso non vi sono né deficit né eccessi che limitino la reazione.
- $\lambda > 1$  → Eccesso d'acqua: anche se in questo caso l'acqua è abbondante, è la quantità di alluminio a determinare quanto idrogeno può essere prodotto, l'eccesso d'acqua non può portare ad un aumento della quantità di  $H_2$  generata oltre al limite teorico. La quantità di idrogeno prodotta è quindi la stessa del caso precedente ma la reazione può, in uno stato iniziale, avvenire più rapidamente; infatti, l'eccesso d'acqua può aiutare a ridurre la formazione di strati passivi esponendo più superficie di alluminio. Tuttavia, una parte del calore di reazione viene assorbito dall'acqua che si scalda e può vaporizzare, con conseguente riduzione della temperatura di combustione e limitazione di formazione di *hot spots*. Questo può comportare un rallentamento della reazione complessiva se la temperatura locale diminuisce troppo a causa della diluizione termica prodotta dall'acqua in eccesso. Il calore presente nell'acqua vaporizzata può essere poi recuperato per eventuale produzione elettrica.
- $\lambda < 1$  → Eccesso di combustibile: In questo caso la quantità di acqua inserita risulta minore della quantità stechiometrica. La reazione produce  $H_2$  solo fino a quando si ha disponibilità di acqua, una parte di alluminio rimane non reagita perchè non trova abbastanza  $H_2O$ . La quantità di idrogeno prodotta rimane quindi inferiore a quella teorica. La temperatura locale tende ad aumentare di più rispetto ai casi precedenti, questo porta ad una maggiore velocità di reazione

iniziale. Progressivamente l'acqua disponibile diminuisce e la reazione rallenta rapidamente, si ha formazione precoce di allumina compatta e questo genera l'arresto della reazione con una quantità di alluminio non reagito. Questa casistica provoca una riduzione della conversione energetica e temperature locali in camera di combustione piuttosto elevate [21].

Nei sistemi industriali spesso si sceglie di operare con eccesso d'acqua per assicurare la completa reazione dell'alluminio, anche nel sistema energetico studiato nel presente lavoro di tesi si opera questa scelta, soprattutto per evitare che in camera di combustione si raggiungano temperature troppo elevate, che risulterebbero incompatibili con la realtà. I valori di  $\lambda$  scelti per le simulazione eseguite sono tutti maggiori di uno, ci si aspetterebbe quindi a livello teorico la completa reazione dell'alluminio. Tuttavia, volendo simulare un sistema reale è stato scelto un rendimento di conversione dell'alluminio pari a 95% [21]. A reazione avvenuta avremo una parte di alluminio incombusto che dovrà successivamente essere separato dai restanti prodotti. Questo avviene perchè non tutta l'acqua sarà in grado di raggiungere le particelle di alluminio, alcune delle quali rimarranno intrappolate sotto lo strato passivo, perciò in condizioni reali è quasi impossibile raggiungere una conversione dell'alluminio del 100%. Nel caso in esame è stata mantenuta costante la quantità di alluminio inserita nel combustore pari a 1kg/s. Come noto dalla reazione (2.3), a fronte di 2 moli di alluminio inserite nel reattore sarà necessario inserire un minimo di 3 moli di acqua ma la quantità può aumentare in base al valore scelto di  $\lambda$ . Tale fattore è quindi un parametro chiave per controllare la temperatura del processo, l'efficienza di combustione, la produzione di idrogeno e la formazione di sottoprodotti.

# Capitolo 3

## Il sistema energetico oggetto di studio

### 3.1 Architettura generale del sistema

Il sistema energetico progettato si basa sulla reazione tra alluminio e acqua come processo primario per la produzione di energia e idrogeno. La reazione avviene all'interno di un combustore stechiometrico, nel quale vengono alimentati alluminio allo stato fuso e acqua ad alta pressione e temperatura.

I prodotti della reazione comprendono una miscela costituita da idrogeno, vapore acqueo, allumina e una frazione di alluminio non reagito. A valle del combustore, i prodotti di reazione attraversano due stadi di separazione consecutivi: nel primo viene rimossa l'allumina solida, mentre nel secondo viene separato l'alluminio incombusto. La miscela gassosa residua, costituita principalmente da idrogeno e vapore acqueo, viene quindi inviata a una turbina a vapore, nella quale l'espansione subatmosferica consente la produzione di energia meccanica, successivamente convertita in energia elettrica.

I fumi in uscita dalla turbina vengono mandati verso un compressore, previo passaggio attraverso uno scambiatore di calore, che consente il recupero dell'energia termica residua. Il calore recuperato viene impiegato per preriscaldare l'acqua in ingresso al combustore, migliorando l'efficienza complessiva del sistema.

Infine, a valle del compressore, un ulteriore stadio di separazione permette di separare l'idrogeno dall'acqua residua, rendendo l'idrogeno disponibile per un successivo utilizzo.

Nello studio sperimentale [22] è stata progettata una possibile camera di combustione per il sistema energetico descritto. Il combustore è realizzato esternamente in acciaio inossidabile e internamente rivestito di materiale refrattario, presenta cinque finestre ottiche per l'impiego di tecniche diagnostiche avanzate e l'analisi dei prodotti di combustione. L'alluminio viene fuso in un forno ad induzione in atmosfera inerte di elio, il vapore viene poi iniettato in camera di combustione perpendicolarmente al getto di alluminio fuso. Nel presente lavoro di tesi è stata svolta un'analisi puramente termodinamica di un sistema simile con l'aggiunta di pressurizzazione della camera di combustione al fine di verificare se questa modalità possa risultare conveniente.

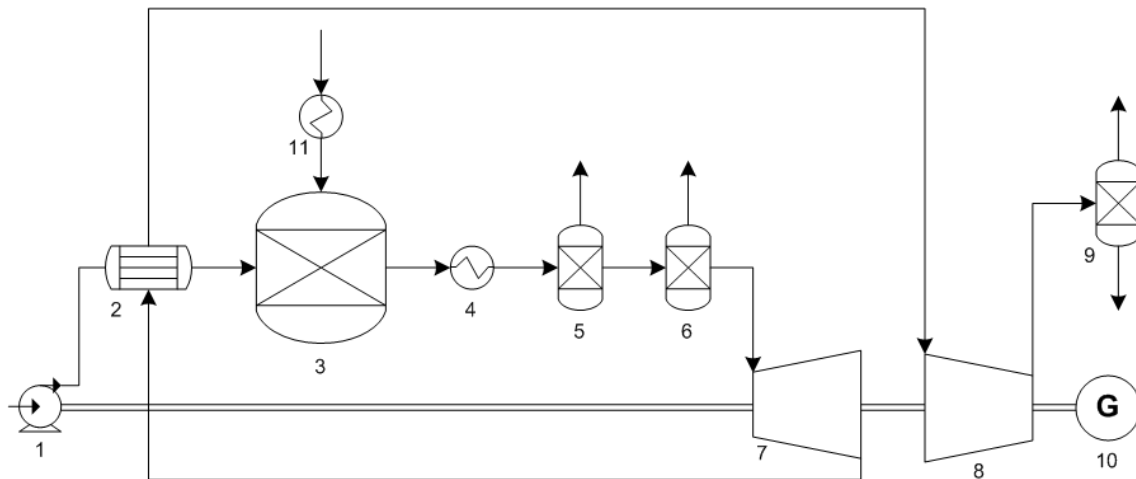


Figura 3.1: Schema impianto

Numero	Componente
1	Pompa
2	Recuperatore
3	Reattore
4	Riscaldatore
5	Separatore Alluminio
6	Separatore Allumina
7	Turbina
8	Compressore
9	Separatore Idrogeno
10	Generatore
11	Riscaldatore

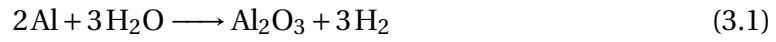
Tabella 3.1: Indice componenti dell'impianto

## 3.2 Sezione di combustione

L'unità principale del sistema è la camera di combustione, all'interno della quale il getto di alluminio liquido reagisce con il flusso di vapore acqueo. Il reattore dovrà assicurare condizioni controllate di temperatura, pressione e miscelazione tra reagenti, garantendo un'elevata efficienza di conversione energetica.

### Portata d'acqua

Come precedentemente descritto, in ingresso al reattore vi sono una corrente d'acqua ed una di alluminio fuso. Nell'ambito del presente studio è stata mantenuta la portata di alluminio in ingresso costante, pari a 1 kg/s, ad ogni simulazione svolta; inoltre, come discusso nel capitolo precedente, si è scelto di lavorare in condizione di eccesso d'acqua. Risulta quindi necessario procedere al calcolo della portata d'acqua richiesta per garantire il corretto svolgimento della reazione, nel rispetto delle ipotesi precedentemente definite. Il calcolo viene condotto facendo riferimento alla definizione del fattore  $\lambda$ , a tal fine si determinano separatamente il rapporto molare stechiometrico e il corrispondente rapporto in massa, a partire dalla reazione alluminio-acqua.



$$\lambda = \frac{\frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{Al}}}}{\left(\frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{Al}}}\right)_{\text{stoic}}} \quad (3.2)$$

$$\frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{Al}}} = \frac{3}{2} \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{Al}}}\right)_{\text{stoic}} = \frac{3 M_{\text{H}_2\text{O}}}{2 M_{\text{Al}}} = \frac{3 \cdot 18}{2 \cdot 27} = 1 \quad (3.4)$$

$$\lambda = \frac{\frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{Al}}}}{1} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{Al}}} \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \lambda \dot{m}_{\text{Al}} = \lambda \quad (3.6)$$

Sono stati analizzati valori del fattore  $\lambda$  maggiori di 1, compresi nell'intervallo tra 4 e 4,5 con incremento di 0,1. I corrispondenti dati di input per ciascuna simulazione sono riportati in Tabella 3.2.

$\lambda$	$\dot{m}_{\text{Al}}$ [kg/s]	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/s]
4	1	4
4,1	1	4,1
4,2	1	4,2
4,3	1	4,3
4,4	1	4,4
4,5	1	4,5

Tabella 3.2: Portate massiche di acqua ed alluminio

### Temperatura di combustione

La temperatura all'interno della camera di combustione dipende direttamente dal valore del fattore  $\lambda$ . In particolare essa è strettamente correlata alla quantità d'acqua alimentata al reattore. Se si opera con eccesso di combustibile o in condizioni stechiometriche si

raggiungono temperature troppo elevate per questo si è scelto di operare con eccesso d'acqua per garantire temperature di combustione accettabili e più vicine alla realtà. Al fine di determinare la temperatura corrispondente a ciascun valore del fattore  $\lambda$ , si fa riferimento al grafico sperimentale costruito nell'ambito dello studio [20], che viene riportato in Figura 3.2.

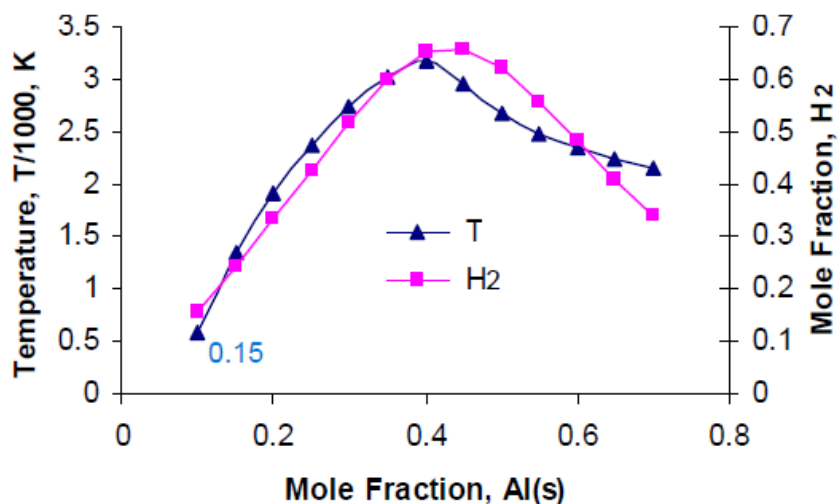


Figura 3.2: Temperatura in camera di combustione in funzione della frazione molare di alluminio

Questo grafico mette in relazione la temperatura in camera di combustione, a cui avviene la reazione alluminio-acqua, e la frazione molare di alluminio alimentata al combustore. È inoltre presente una seconda curva, che descrive l'andamento della frazione molare di idrogeno prodotto in funzione della frazione molare di alluminio in ingresso. Nelle simulazioni manteniamo costante la portata massica di alluminio introdotta nel reattore, pari a 1 kg/s, corrispondente ad una portata molare pari a 37,04 mol/s. I valori di  $\lambda$  sono assegnati; risulta tuttavia necessario determinare, per ciascuno di essi, il corrispondente valore della frazione molare di alluminio  $x_{Al}$ , così da poter sfruttare il grafico per la determinazione delle temperature. Di seguito vengono pertanto riportati i calcoli necessari a mettere in relazione la frazione molare di alluminio, rappresentata in ascissa nel grafico, con il valore del fattore  $\lambda$  corrispondente.

$$\dot{n}_{Al} = 37,04 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad (3.7)$$

$$x_{Al} = \frac{\dot{n}_{Al}}{\dot{n}_{\text{tot}}} \quad (3.8)$$

$$\dot{n}_{\text{tot}} = \frac{\dot{n}_{Al}}{x_{Al}} = \frac{37,04}{x_{Al}} \quad (3.9)$$

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{\text{tot}} x_{H_2O} \quad (3.10)$$

$$x_{H_2O} = 1 - x_{Al} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 0,018 \dot{n}_{H_2O} \quad (3.12)$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{Al}} \quad (3.13)$$

Una volta ottenuti i valori di  $\lambda$ , corrispondenti ai valori di frazione molare presenti in ascissa al grafico, si procede per interpolazione. Si ricavano quindi le temperature relative ai valori di  $\lambda$  di nostro interesse. In Tabella 3.3 vengono riportati i valori di temperatura ricavati; l'andamento di tali valori in funzione di  $\lambda$  è rappresentato in Figura 3.3.

$\lambda$	Tcc[°C]
4	909
4,1	863
4,2	818
4,3	774
4,4	732
4,5	691

Tabella 3.3: Temperatura in camera di combustione

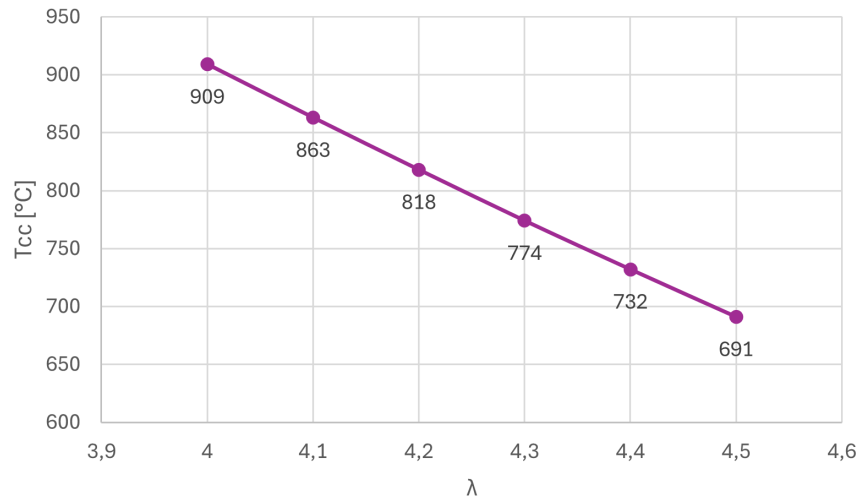


Figura 3.3: Temperatura di combustione in funzione di  $\lambda$

Dal grafico si osserva come la temperatura diminuisca all'aumentare di  $\lambda$ , a cui corrisponde un aumento dell'eccesso d'acqua. Tale andamento è dovuto al fatto che una frazione crescente del calore sviluppato dalla reazione viene assorbita dall'acqua presente nel reattore, la cui quantità aumenta con  $\lambda$ , favorendone la vaporizzazione. Nell'impianto progettato nel presente lavoro di tesi è stato inserito, a valle del combustore, un riscaldatore che simula le perdite di calore attraverso le pareti del reattore, pari al 10%, per rendere il sistema non adiabatico e più simile ad una situazione reale. La temperatura dei prodotti di combustione che continueranno a circolare nel sistema sarà quindi inferiore del 10% rispetto a quella di combustione e i valori sono riportati in Tabella 3.4.

$\lambda$	$T_{cc}$ [°C]
4	817,8
4,1	776,3
4,2	736,0
4,3	696,9
4,4	659,0
4,5	622,2

Tabella 3.4: Temperatura a valle della camera di combustione

### Analisi del tasso di conversione dell'alluminio in funzione del regime termico

Un ulteriore elemento fondamentale è stato analizzato nello studio [17] in cui si osserva come varia, al variare della temperatura a cui avviene la reazione, il tasso di conversione dell'alluminio %CR; quest'ultimo è definito come il rapporto tra massa di alluminio che ha reagito e massa di alluminio alimentata al combustore.

$$\%CR = \frac{m_{Al,R}}{m_{Al,L}} \quad (3.14)$$

Sono state realizzate tre campagne di test: la prima a temperature comprese tra 550 e 650 °C, mentre la seconda e la terza sono state eseguite a temperature superiori al punto di fusione dell'alluminio (circa 660 °C), rispettivamente nell'intervallo tra 750 e 850 °C e a 900 °C. I risultati evidenziano che le campagne di prova eseguite a temperature superiori al punto di fusione dell'alluminio comportano un incremento sia di %CR sia della produzione di idrogeno. Ciò indica che la fusione dell'alluminio ha un ruolo importante nella cinetica della reazione, favorendone l'avanzamento. L'effetto della temperatura può essere visualizzato in Figura 3.4, riportata nello studio [17], la quale si riferisce ad una prova della durata di un'ora. In particolare, si può osservare come, una volta superato il punto di fusione dell'alluminio, si abbia una correlazione esponenziale tra temperatura e tasso di conversione dell'alluminio. Inoltre, si osserva un aumento sia della produzione iniziale che di quella totale di idrogeno.

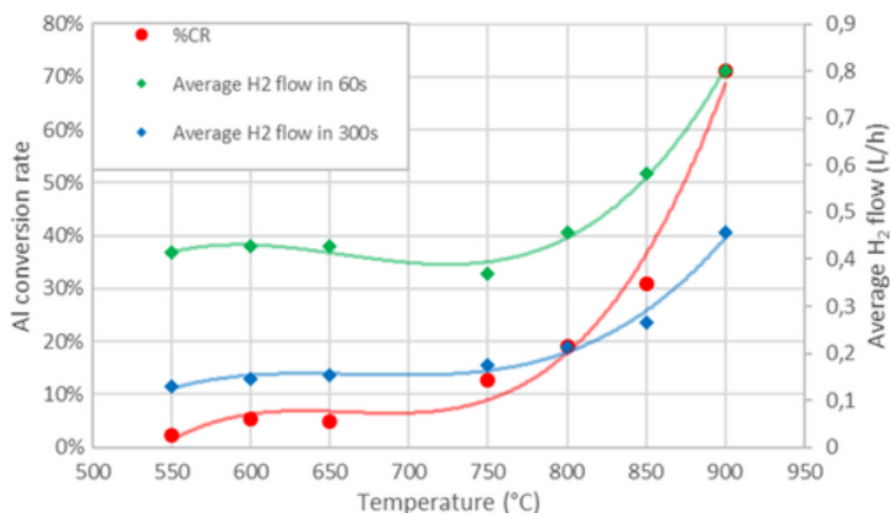


Figura 3.4: Effetto della temperatura di combustione

A fronte dei risultati osservati, nel sistema realizzato in questo lavoro di tesi è prevista la fusione dell'alluminio prima del suo ingresso nel combustore. A tal fine il metallo viene preriscaldato mediante un riscaldatore fino a una temperatura di 700°C. Di conseguenza, sono stati scelti valori di  $\lambda$ , tali da garantire, in camera di combustione, temperature superiori a tale valore, così da non vanificare gli sforzi fatti per la liquefazione. Lo scambiatore necessita di un'energia pari a circa 364 kJ che rimane invariata ad ogni simulazione, e viene pertanto considerata nel bilancio energetico complessivo e nella valutazione delle prestazioni finali del sistema.

## Definizione dei parametri di pressione del ciclo

Nell'ambito dello studio termodinamico condotto in questo lavoro di tesi è stata analizzata, a livello teorico, la pressurizzazione del combustore e i relativi effetti sulle prestazioni d'impianto. A tale scopo è stata introdotta una pompa per consentire la pressurizzazione dell'acqua in ingresso al combustore ed è stata impostata una pressione operativa del reattore superiore a quella atmosferica. Nel sistema energetico in esame si definiscono pertanto:

- Pressione massima: rappresenta il valore di pressione più elevato registrato nell'intero impianto e coincide con la pressione in camera di combustione. Essa è ottenuta attraverso il lavoro fornito dalla pompa all'acqua in ingresso al reattore, a partire dalla pressione ambiente.
- Pressione minima: rappresenta il valore di pressione più basso registrato nell'intero impianto e coincide con la pressione in uscita dalla turbina. Essa è conseguenza dell'espansione sub-atmosferica dei prodotti di combustione operata dalla turbina, a partire dalla pressione massima del ciclo.

Le pressioni così definite consentono di delineare un rapporto di pompaggio, un rapporto di espansione e un rapporto di compressione.

$$\beta_p = \frac{P_{\max}}{P_{\text{atm}}} \quad (3.15)$$

$$\beta_e = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (3.16)$$

$$\beta_c = \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\min}} \quad (3.17)$$

Si determina infine un rapporto di pressioni totale del sistema,  $\beta$ , che è definito come il rapporto tra pressione massima e minima registrate nell'impianto. Questo rapporto rappresenta il principale fattore che caratterizza ogni simulazione.

$$\beta = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (3.18)$$

Al fine di rendere le simulazioni il più possibile realistiche si opera un taglio sul dominio di  $\beta$ . Viene fissato come valore limite 50 che rappresenta un valore massimo tipico in sistemi energetici reali. Le pressioni minime indagate variano tra 0,1 e 1 bar con passo 0,1, mentre, quelle massime tra 10 e 40 bar con passo 10. Tra tutte le combinazioni possibili per generare il rapporto  $\beta$ , vengono quindi scelte solo quelle che consentano di ottenere un rapporto inferiore o al più uguale a 50. In Figura 3.5 la retta obliqua rappresenta la condizione di  $\beta$  costante pari a 50. Il dominio dei valori accettabili di  $\beta$  è pertanto rappresentato dall'area evidenziata.

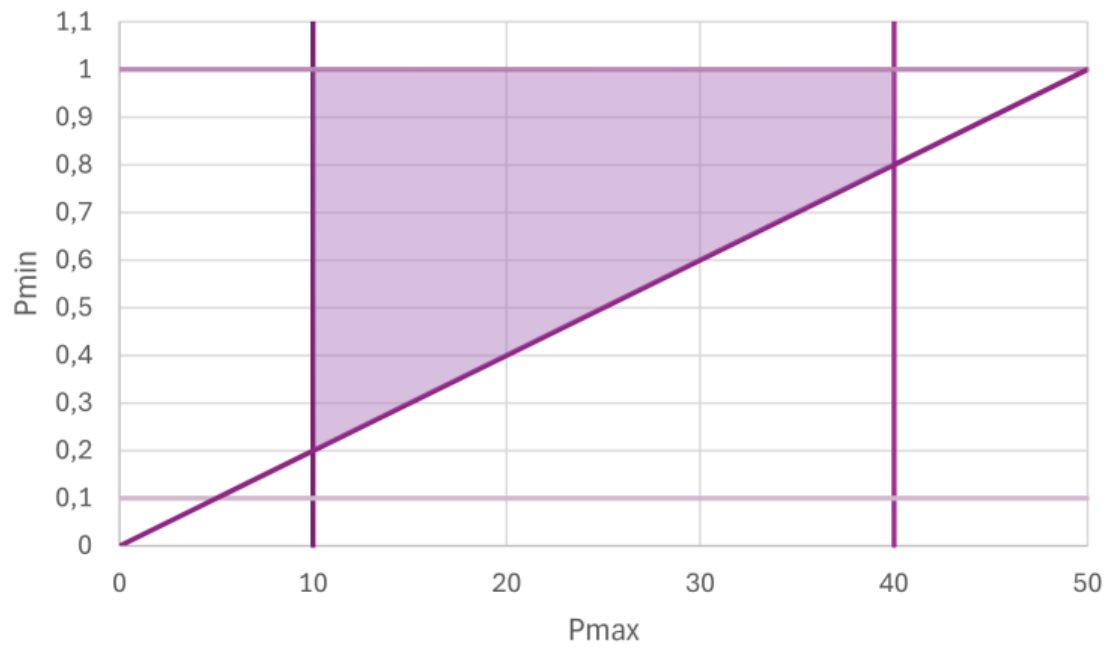


Figura 3.5: Dominio di  $\beta$

# Capitolo 4

## Modellazione del sistema tramite il software Aspen Plus

### 4.1 Software Aspen Plus e configurazione generale

Nel presente lavoro di tesi è stato impiegato il software Aspen Plus come strumento di simulazione per la modellazione termodinamica e di processo del sistema in esame. Aspen Plus è un software per simulazione a parametri concentrati che consente la valutazione dei flussi di materia ed energia e l'analisi delle condizioni operative oltre all'analisi e l'ottimizzazione di processi chimici e termo-chimici. Come modello termodinamico viene selezionato *Peng-Rob* che è un'equazione di stato cubica, scelta per la sua affidabilità nella descrizione del comportamento di fase e delle proprietà termodinamiche di sistemi gassosi, in particolare in condizioni di temperatura e pressione elevate. Questo modello consente una buona previsione degli equilibri liquido-vapore ed è comunemente utilizzato nella simulazione di processi energetici e chimici. Mentre, per il calcolo delle proprietà di acqua e vapore è stata utilizzata la *Petroleum Calculation Option IF97*, particolarmente adatta nella simulazione di sistemi a vapore. Infine, vengono definiti i vari componenti della nostra reazione, ovvero, acqua, idrogeno, alluminio, e allumina solida che vengono direttamente scelti all'interno della libreria presente nel software.

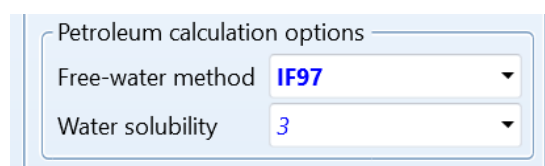


Figura 4.1: IF97

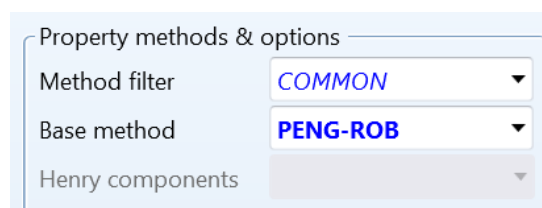


Figura 4.2: PENG-ROB

### 4.2 Presentazione dei componenti e definizione delle condizioni operative

In seguito alla configurazione generale di Aspen Plus descritta nel paragrafo precedente, è stato implementato il sistema energetico in esame nell'interfaccia del software stesso,

come mostrato in Figura 4.3. Successivamente si passa alla configurazione specifica di ognuno degli elementi che compongono l'impianto e all'esecuzione delle simulazioni.

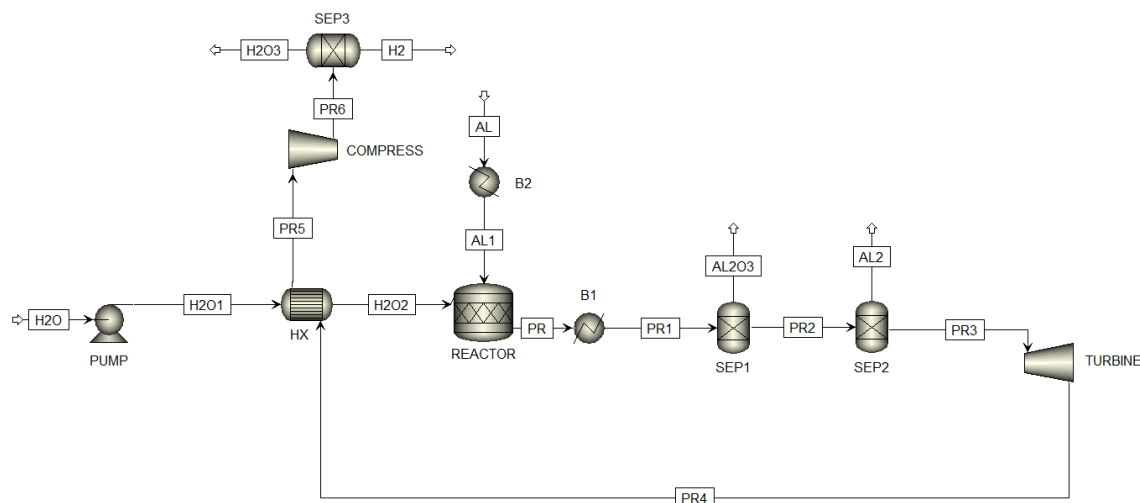


Figura 4.3: Schema d'impianto nell'interfaccia di Aspen Plus

## Reattore

L'elemento principale del sistema è il combustore, viene scelto un reattore stechiometrico *RStoic*, all'interno della libreria del software. La configurazione di questo elemento prevede di definire le *valid phases*, ovvero le fasi fisiche ammesse nella simulazione termodinamica, che influenzano il calcolo degli equilibri di fase e delle proprietà dei flussi di processo. In questo caso viene impostato liquido-vapore. Nella sezione *reaction* viene inserita la reazione tra alluminio e acqua utilizzando i componenti definiti precedentemente e viene impostato un rendimento di conversione dell'alluminio pari a 95%. In ingresso al combustore vi sono due flussi, uno composto da alluminio fuso e l'altro da acqua. Infine, vengono inserite temperatura e pressione operative, le quali cambiano in base alla simulazione in esecuzione.

Operating conditions

Flash Type Temperature Pressure

Temperature 732 C

Pressure 5 bar

Duty  kW

Vapor fraction

---

Valid phases

Vapor-Liquid

Figura 4.4: Configurazione reattore

Run No.	Specification type	Molar extent	Units	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	Stoichiometry
1	Frac conversion		kmol/sec	0.95	ALLUMINI	2 ALLUMINI + 3 WATER --> 3 HYDROGEN(MIXED) + ALLUMINA(MIXED)

New Edit Delete Copy Paste

Figura 4.5: Configurazione reazione

## Pompa

La pompa è l'elemento che consente di raggiungere la pressione massima di sistema. In ingresso vede il flusso di acqua liquida a temperatura e pressione ambiente. La configurazione di questo elemento prevede di impostare la pressione di uscita dalla pompa, che corrisponde alla pressione con cui l'acqua entrerà nel reattore. Il software fornisce, come output di simulazione, la potenza necessaria affinché la pompa possa operare l'aumento di pressione richiesto, che verrà considerato nel bilancio energetico totale d'impianto. La potenza fornita dal software corrisponde a *Calculated brake power* che è la potenza elettrica richiesta dal motore per far funzionare la pompa e tiene conto di tutte le perdite meccaniche, la quale, quindi, risulta sempre maggiore di *Fluid power* che invece è la potenza effettivamente trasferita al fluido. L'elemento che pone in relazione le due potenze è il rendimento della pompa, come si osserva nella Formula 4.1. Nel presente lavoro di tesi, tale rendimento non viene impostato manualmente, il software, utilizzando curve tipiche di efficienza, determina il rendimento per ogni pompa selezionata, in funzione della portata di fluido che attraversa la macchina. I dati di efficienza, relativi ai valori di portata d'acqua in ingresso alla pompa nelle simulazioni eseguite, sono riportati in Tabella 4.1.

$$P_{\text{brake}} = \frac{P_{\text{fluid}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (4.1)$$

$\lambda$	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{in}}$	$\eta_{\text{pump}}$
4	4	0,475
4.1	4.1	0,478
4.2	4.2	0,482
4.3	4.3	0,485
4.4	4.4	0,488
4.5	4.5	0,491

Tabella 4.1: Rendimenti pompa

## Turbina

La turbina viene inserita nell'impianto allo scopo di generare energia meccanica che verrà poi trasformata in energia elettrica, a tal fine questo elemento esegue un'espansione sub-atmosferica dei prodotti di combustione che, dalla pressione massima d'impianto, vengono portati alla pressione minima. La turbina selezionata è isoentropica e viene impostato un rendimento isoentropico pari a 0,8. La configurazione di tale elemento viene eseguita selezionando l'opzione *Discharge Pressure*, pressione di scarico, ovvero la pressione che la corrente avrà allo scarico dalla turbina. Questa viene impostata pari alla pressione minima d'impianto che varia in base alla simulazione in esecuzione.

Model and type

Model  Compressor  Turbine

Type **Isentropic**

---

Outlet specification

Discharge pressure  **bar**

Pressure decrease  bar

Pressure ratio

Power produced  kW

Use performance curves to determine discharge conditions

---

Efficiencies

Isentropic  Polytropic  Mechanical

Figura 4.6: Configurazione turbina

## Compressore

Il compressore viene inserito nell'impianto al fine di riportare i prodotti di combustione a pressione atmosferica in modo da rendere l'idrogeno utilizzabile per successive applicazioni. In ingresso a tale elemento i prodotti di combustione si trovano alla pressione minima d'impianto, raggiunta in seguito all'espansione in turbina. Il compressore selezionato è isoentropico e viene impostato un rendimento isoentropico pari a 0,8. La configurazione di tale elemento viene eseguita selezionando l'opzione *Discharge Pressure*, pressione di scarico, ovvero la pressione che la corrente avrà in uscita dal compressore, questa, viene impostata pari ad 1 bar.

Model and type

Model  Compressor  Turbine

Type **Isentropic**

---

Outlet specification

Discharge pressure  **bar**

Pressure increase  bar

Pressure ratio

Power required  kW

Use performance curves to determine discharge conditions

---

Efficiencies

Isentropic  Polytropic  Mechanical

Figura 4.7: Configurazione compressore

## Separatori

All'uscita del reattore sono previste due sezioni di separazione. Nei prodotti di combustione, oltre al vapore acqueo e all'idrogeno, sono infatti presenti alluminio incombusto e allumina solida, che devono essere rimossi dalla corrente. In particolare, il 5% dell'alluminio alimentato al combustore non prende parte alla reazione, avendo assunto un

rendimento di conversione pari al 95%. L'allumina solida costituisce invece un prodotto diretto della reazione. Entrambe le specie solide si trovano a temperature molto elevate, coincidenti con quelle riportate in Tabella 3.4, rendendo necessario l'impiego di separatori progettati per operare in condizioni termiche e di pressione particolarmente gravose. Infine, a valle del compressore è previsto un ulteriore stadio di separazione, necessario alla separazione dell'acqua dalla corrente di idrogeno.

### **Scambiatore**

Nel sistema è presente uno scambiatore di calore, finalizzato al recupero termico e attraversato da due correnti.

La corrente fredda è costituita dall'acqua alimentata al reattore, che assorbe calore dalla corrente calda, formata da vapore acqueo e idrogeno in uscita dalla turbina e diretta verso il compressore.

Lo scambiatore di calore è stato configurato in Aspen Plus utilizzando l'opzione *Model Fidelity: Shortcut*. Tale impostazione è un approccio semplificato e prevede il solo bilancio energetico. Per quanto riguarda la modalità di scorrimento dei fluidi, è stata selezionata l'opzione *countercurrent*. Tale configurazione prevede che i due flussi attraversino lo scambiatore in direzioni opposte. Questo scambiatore viene inserito al fine di incrementare la temperatura dell'acqua in ingresso al reattore, consentendo il recupero del calore residuo posseduto dai prodotti di combustione e ottenendo così un risparmio energetico.

La configurazione dello scambiatore è stata eseguita definendo la *Cold stream outlet temperature*, ovvero, la temperatura in uscita della corrente fredda, nel nostro caso rappresentata dall'acqua. Tale temperatura è stata definita per tentativi successivi, incrementandone il valore fino a raggiungere la massima temperatura compatibile con il bilancio energetico tra le due correnti e con i vincoli termodinamici del sistema. Questo metodo consente di massimizzare lo scambio termico e di raggiungere la condizione operativa che consenta di preriscaldare l'acqua al valore più elevato possibile.

Infine, Aspen plus consente di visualizzare il diagramma di scambio termico dello scambiatore nel quale, in ordinata è riportata la temperatura, mentre in ascissa è rappresentata la potenza termica scambiata. Nel grafico, riportato in Figura 4.9, compaiono due rette, una rossa e una blu, che descrivono l'andamento della temperatura rispettivamente della corrente calda e di quella fredda durante il processo di scambio. L'estensione orizzontale di tali rette corrisponde alla quantità di calore trasferita tra le due correnti, mentre la distanza verticale tra esse fornisce un'indicazione del gradiente termico locale.

Model fidelity	Hot fluid	Shortcut flow direction
<input checked="" type="radio"/> Shortcut	<input type="radio"/> Shell	<input checked="" type="radio"/> Countercurrent
<input type="radio"/> Detailed	<input type="radio"/> Tube	<input type="radio"/> Cocurrent
<input type="radio"/> Shell & Tube		<input type="radio"/> Multipass, calculate number of shells
<input type="radio"/> Kettle Reboiler		<input type="radio"/> Multipass, shells in series <input type="text" value="1"/>
<input type="radio"/> Thermosyphon		
<input type="radio"/> Air Cooled		
<input type="radio"/> Plate		

Calculation mode: **Design**

Exchanger specification

Specification: **Cold stream outlet temperature**

Value: **137 C**

Exchanger area:  sqm

Constant UA:  kJ/sec-K

Minimum temperature approach: **1 C**

Figura 4.8: Configurazione dello scambiatore di calore HX

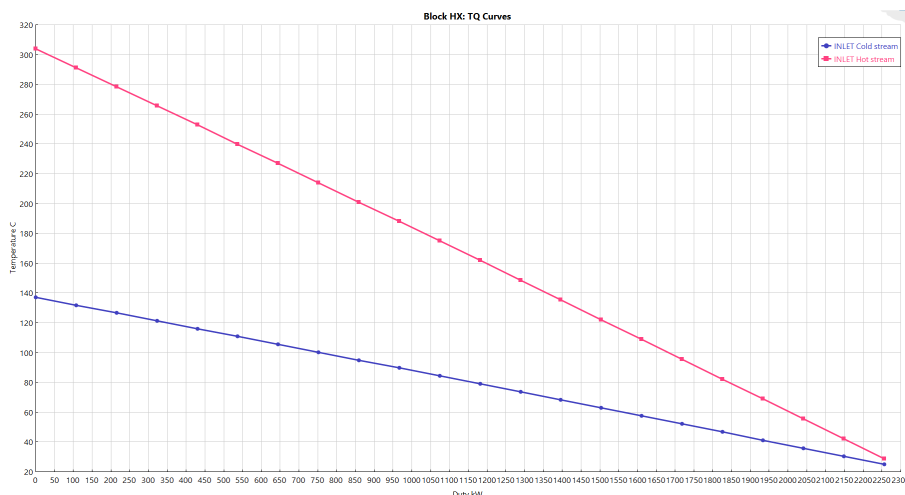


Figura 4.9: Diagramma di scambio termico T-Q

## Riscaldatori

Nel sistema sono presenti due riscaldatori che svolgono due funzioni differenti. I riscaldatori sono modellati con una singola corrente e rappresentano dispositivi nei quali l'energia termica viene fornita dall'esterno al fluido di processo. La potenza, calcolata e restituita dal software, corrisponde quindi a quella richiesta per ottenere la variazione di entalpia desiderata. Tale potenza deve essere considerata nel bilancio energetico complessivo dell'impianto. In riferimento alla Figura 4.3, l'elemento B1 viene utilizzato per simulare le perdite di calore attraverso le pareti del reattore. Il riscaldatore B2, invece, per simulare il calore necessario alla liquefazione dell'alluminio. In entrambi i casi i dati per la configurazione del componente sono la temperatura e la pressione. Per l'elemento B1, la temperatura è calcolata come il 10% della temperatura di combustione e i valori corrispondenti sono riportati in Tabella 3.4, mentre la pressione è pari alla pressione massima dell'impianto. Nel riscaldatore B2, invece, la temperatura viene mantenuta costante in tutte le simulazioni ed è fissata a 700°C, valore superiore al punto

di fusione dell'alluminio, mentre la pressione corrisponde a quella atmosferica.

## 4.3 Simulazioni

### Dati di input

Le simulazioni vengono condotte fissando, di volta in volta, uno dei valori selezionati per la pressione massima del sistema. Successivamente si varia la pressione minima e, per ciascuna combinazione di pressione massima e minima, si eseguono le sei simulazioni corrispondenti ai sei diversi valori di  $\lambda$  considerati. Abbiamo, inoltre una serie di parametri di input che rimangono costanti in tutte le simulazioni successive; tali parametri sono riportati in Tabella 4.2. Infine, vi sono i parametri che variano al variare di  $\lambda$ , ossia: la portata d'acqua alimentata al reattore, la temperatura in camera di combustione e la temperatura a valle del combustore. In Tabella 4.3 sono riportate le combinazioni di pressione massima e minima che portano a un rapporto di compressione minore o uguale a 50, le quali corrispondono ai valori utilizzati per lo svolgimento delle simulazioni.

Parametro	Valore	Unità
Temperatura acqua in ingresso alla pompa	25	°C
Pressione acqua in ingresso alla pompa	1	bar
Rendimento di conversione alluminio	0,95	-
Portata d'alluminio in ingresso al reattore	1	kg/s
Rendimento isoentropico turbina	0,8	-
Rendimento isoentropico compressore	0,8	-
Temperatura scambiatore B3	700	°C
Pressione scambiatore B3	1	bar

Tabella 4.2: Parametri di input

<b>Pmin [bar]</b>	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
<b>Pmax [bar]</b>	10	10	10	20	10	20	10	20	30	10	20	30
$\beta$	50	33.3	25	50	20	40	16.6	33.3	50	14.2	28.6	42.8
<b>Pmin [bar]</b>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1
<b>Pmax [bar]</b>	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
$\beta$	12.5	25	37.5	50	11.1	22.2	33.3	44.4	10	20	30	40

Tabella 4.3: Rapporti di pressione totali

Le simulazioni in cui la pressione minima è fissata ad 1 bar, rappresentano il caso in cui il compressore non è presente nel sistema. Tali simulazioni sono state eseguite allo scopo di valutare la convenienza dell'espansione sub-atmosferica realizzata dalla turbina. Nel caso in cui risultasse una maggiore convenienza nei casi con pressione minima pari ad 1 bar, si potrebbe far lavorare la turbina fino a tale valore, rendendo

superfluo l'uso del compressore. In questo modo, nel bilancio energetico finale del sistema, verrebbe eliminato il contributo negativo associato al lavoro assorbito dal compressore, con possibile miglioramento delle prestazioni globali.

### Dati di output

Le simulazioni eseguite con il software Aspen Plus producono una serie di parametri di output, quelli di nostro interesse monitorati nel presente studio sono stati riportati in Tabella 4.4. I dati raccolti vengono poi rielaborati e utilizzati per il calcolo delle prestazioni d'impianto.

Parametro	Unità di misura
Potenza turbina	kJ
Potenza compressore	kJ
Potenza pompa	kJ
Temperatura in uscita dalla turbina	°C
Temperatura in ingresso compressore	°C
Temperatura in ingresso compressore	°C
Temperatura in uscita compressore	°C
Temperatura dell'acqua in uscita	°C
Portata d'acqua in uscita	kg/s
Portata d'idrogeno prodotto	kg/s

Tabella 4.4: Parametri di output

# Capitolo 5

## Risultati e calcolo delle prestazioni

In questo capitolo sono stati osservati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche dell'impianto, con l'obiettivo di valutarne il comportamento energetico e le prestazioni complessive. A partire dai dati forniti dal modello è stato eseguito il calcolo degli indicatori prestazionali. L'analisi ha permesso di confrontare diverse configurazioni impiantistiche, evidenziandone i punti di forza e le criticità dal punto di vista energetico. In particolare, sono state individuate le soluzioni più vantaggiose a livello prestazionale, sulla base dei rendimenti calcolati e della potenza netta ottenibile. Oltre agli indicatori principali, sono stati esaminati altri parametri significativi, utili a fornire una visione più completa del funzionamento dell'impianto.

### 5.1 Definizione degli indici di prestazione

#### Potenze termiche

In primo luogo, è necessario definire le potenze termiche associate all'idrogeno prodotto e all'alluminio alimentato al reattore, poichè tali grandezze costituiscono la base per il successivo calcolo delle prestazioni energetiche del sistema. La loro determinazione, effettuata a partire dalle portate massiche e dai relativi poteri calorifici, consente infatti di quantificare i flussi energetici in ingresso e in uscita dall'impianto. La portata di alluminio in ingresso al reattore è costante e questo implica che sia costante anche la portata di idrogeno prodotto, essendo quest'ultima direttamente correlata alla quantità di alluminio che reagisce secondo la stechiometria del processo considerato. Di conseguenza, anche le potenze termiche associate ai due flussi risultano costanti.

$$P_{Al} = \dot{m}_{Al} \cdot LHV_{Al} \quad (5.1)$$

$$P_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2} \quad (5.2)$$

	$\dot{m}$ [kg/s]	LHV [MJ/kg]	P [kW]
Alluminio	1	17,6	17600
Idrogeno	0,106466	120	12775

Tabella 5.1: Portate massiche, poteri calorifici e potenze termiche di idrogeno e alluminio

### **Rendimento elettrico della turbina a vapore**

Per calcolare il rendimento della turbina a vapore, si esegue il rapporto tra la potenza elettrica prodotta della turbina, ottenuta come output dalle simulazioni in Aspen Plus, e la potenza termica fornita al sistema dal combustibile, nel nostro caso rappresentato dall'alluminio. Questo rapporto fornisce il rendimento elettrico della turbina, ovvero la frazione di energia chimica dell'alluminio effettivamente convertita in potenza elettrica dalla macchina.

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_{Al}} \quad (5.3)$$

### **Potenza netta**

La potenza netta rappresenta l'effetto utile in termini di potenza dell'impianto, ed è ottenuta sottraendo alla potenza prodotta dalla turbina la potenza assorbita dal compressore e dalla pompa,

$$P_{net} = P_t - P_c - P_p \quad (5.4)$$

### **Rendimento totale di sistema**

Il rendimento totale del sistema viene calcolato come rapporto tra l'effetto utile, rappresentato dalla potenza netta dell'impianto, e la potenza termica fornita al sistema dal combustibile, nel nostro caso l'alluminio. Questo indice consente di valutare l'efficienza complessiva di conversione dell'energia chimica dell'alluminio in potenza elettrica netta disponibile.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{net}}{P_{Al}} \quad (5.5)$$

### **Rendimento di primo principio**

Il rendimento di primo principio viene calcolato come rapporto tra l'energia utile e l'energia fornita al sistema. Al numeratore si trova la somma tra la potenza netta prodotta dall'impianto e la potenza termica contenuta nell'idrogeno prodotto, mentre al denominatore si trova la somma tra potenza termica fornita tramite il combustibile, nel nostro caso l'alluminio, e l'energia impiegata per la sua liquefazione. Questo indice fornisce una misura complessiva dell'efficienza di conversione dell'energia primaria in energia utile.

$$\eta_I = \frac{P_{net} + P_{H_2}}{P_{Al} + Q_{Al}} \quad (5.6)$$

### **Lavoro specifico netto**

Il lavoro specifico netto è dato dalla differenza tra il contributo positivo di lavoro specifico prodotto della turbina e i contributi negativi di lavoro specifico assorbiti dal compressore e dalla pompa. Il lavoro specifico delle macchine è riferito alle portate massiche dei flussi che le attraversano. In particolare, compressore e turbina sono attraversati dalla somma delle portate massiche dei prodotti principali, ossia idrogeno

e acqua. La pompa, invece, è attraversata esclusivamente dalla portata massica d'acqua in ingresso all'impianto, che viene successivamente alimentata al reattore.

$$l_{net} = l_t - l_c - l_p \quad (5.7)$$

$$l_{net} = \frac{P_t}{\dot{m}_{H_2O,out} + \dot{m}_{H_2}} - \frac{P_c}{\dot{m}_{H_2O,out} + \dot{m}_{H_2}} - \frac{P_p}{\dot{m}_{H_2O,in}} \quad (5.8)$$

## 5.2 Analisi delle simulazioni

Una volta illustrate, nel paragrafo precedente, le formule utilizzate per il calcolo delle prestazioni, si procede con l'analisi dei risultati delle simulazioni eseguite. Ad ogni simulazione è stata impostata la pressione massima d'impianto mentre la pressione minima viene fatta variare. Per ogni combinazione di pressioni, vengono quindi eseguite sei simulazioni corrispondenti a sei valori di  $\lambda$  selezionati.

### Grafici Lavoro-Rendimento

Per ciascuna simulazione è stato innanzitutto calcolato il rendimento totale d'impianto, utilizzando la relazione (5.5). Tale operazione ha permesso di quantificare l'efficienza di conversione dell'energia fornita dal combustibile in potenza netta prodotta dall'impianto. Successivamente, si procede con il calcolo del lavoro netto, seguendo la formula (5.8), che esprime la potenza netta per unità di massa che attraversa i vari componenti. Per eseguire questo calcolo sono stati utilizzati i dati delle portate massiche di acqua in ingresso ed in uscita dall'impianto e di idrogeno prodotto, riportate in Tabella 5.2.

$\lambda$	$\dot{m}_{H_2O,in}$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2O,out}$ [kg/s]	$\dot{m}_{H_2}$ [kg/s]
4	4	3,0485	0,106466
4,1	4,1	3,1485	0,106466
4,2	4,2	3,2485	0,106466
4,3	4,3	3,3485	0,106466
4,4	4,4	3,4485	0,106466
4,5	4,5	3,5485	0,106466

Tabella 5.2: Portate massiche d'acqua in ingresso ed in uscita e di idrogeno prodotto

Come possiamo osservare in Tabella 5.2 la portata massica di idrogeno prodotto risulta costante ad ogni simulazione, secondo la stechiometria del processo, essendo costante la portata di alluminio alimentata al reattore. La portata massica d'acqua in uscita, invece, è un parametro di output fornito direttamente dal software Aspen Plus.

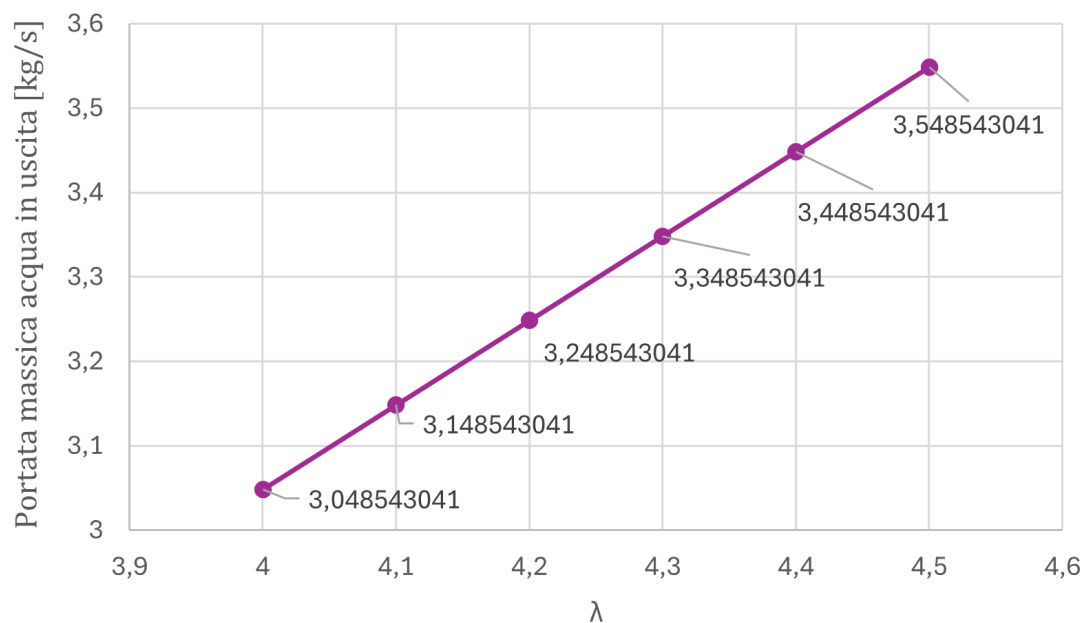


Figura 5.1: Portata massica di acqua in uscita in funzione di  $\lambda$

Come si può osservare in Figura 5.1, la portata massica in uscita dall'ultimo separatore, che ha il compito di separare l'idrogeno dal restante vapore acqueo, varia in modo lineare con  $\lambda$ .

In particolare, la portata aumenta all'aumentare di  $\lambda$ , in quanto un'incremento di tale parametro comporta un maggior eccesso d'acqua nel sistema. La portata d'acqua in uscita dipende esclusivamente dal valore di  $\lambda$  e, più specificamente, dalla quantità d'acqua immessa nel reattore. Essa non è influenzata dagli altri parametri di input impostati per l'esecuzione delle simulazioni.

In sintesi, questi valori riflettono unicamente la frazione di acqua che partecipa alla reazione nel combustore, determinando così, per differenza, il flusso di vapore acqueo separato in uscita. I dati così calcolati vengono utilizzati per la costruzione di grafici che presentano in ascissa il lavoro netto ed in ordinata il rendimento totale di sistema. Ogni grafico è costruito a parità di pressione massima ed ogni curva è a pressione minima costante. I punti che formano le curve corrispondono ognuno ad un valore di  $\lambda$  differente. Questo approccio consente di confrontare le diverse configurazioni non solo in termini di efficienza totale ma anche in termini di energia utile ottenuta per unità di flusso di prodotto.

I grafici lavoro-rendimento di seguito riportati presentano, in ciascun caso, un numero variabile di curve. Questa differenza avviene a causa delle limitazioni imposte al dominio del parametro  $\beta$ , in particolare, il valore massimo di  $\beta$  è stato vincolato a 50, al fine di mantenere le simulazioni entro limiti fisicamente realistici. Per ciascun grafico, costruito mantenendo la pressione massima d'impianto costante, vengono riportate solo le curve corrispondenti ai valori di pressione minimi che consentano di mantenere il parametro  $\beta$  all'interno del range operativo ammissibile precedentemente definito.

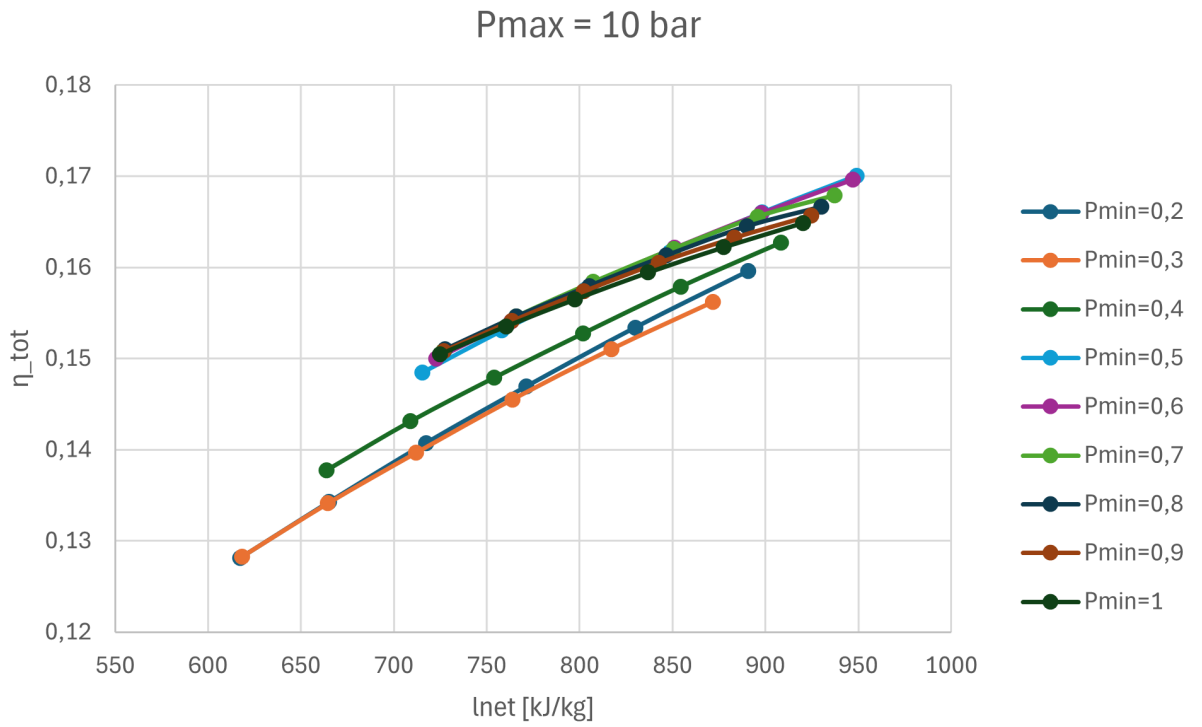


Figura 5.2: Grafico Lavoro-Rendimento Pmax=10 bar

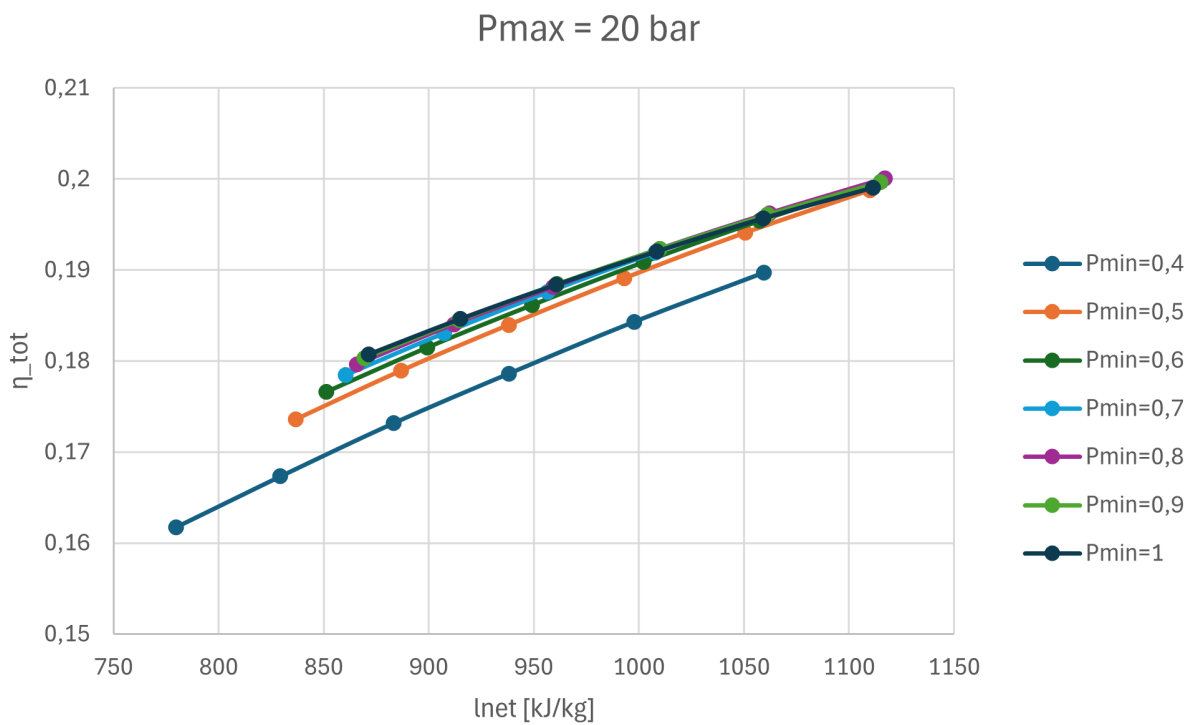


Figura 5.3: Grafico Lavoro-Rendimento Pmax=20 bar

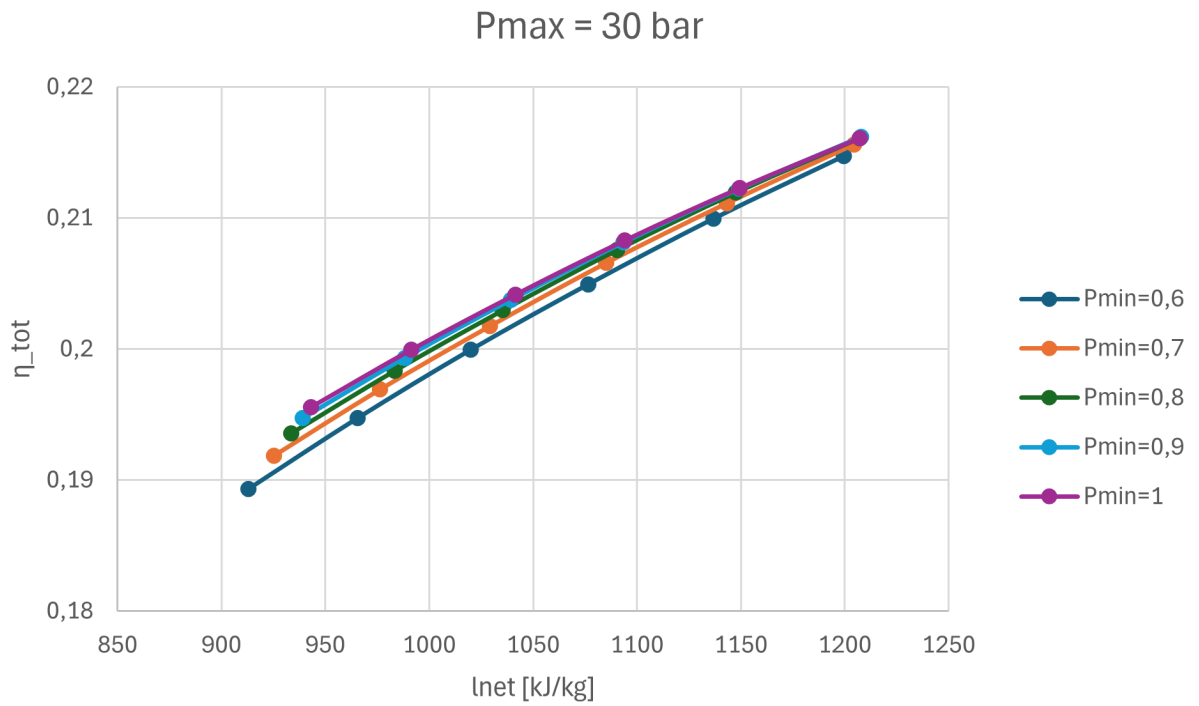


Figura 5.4: Grafico Lavoro-Rendimento Pmax=30 bar

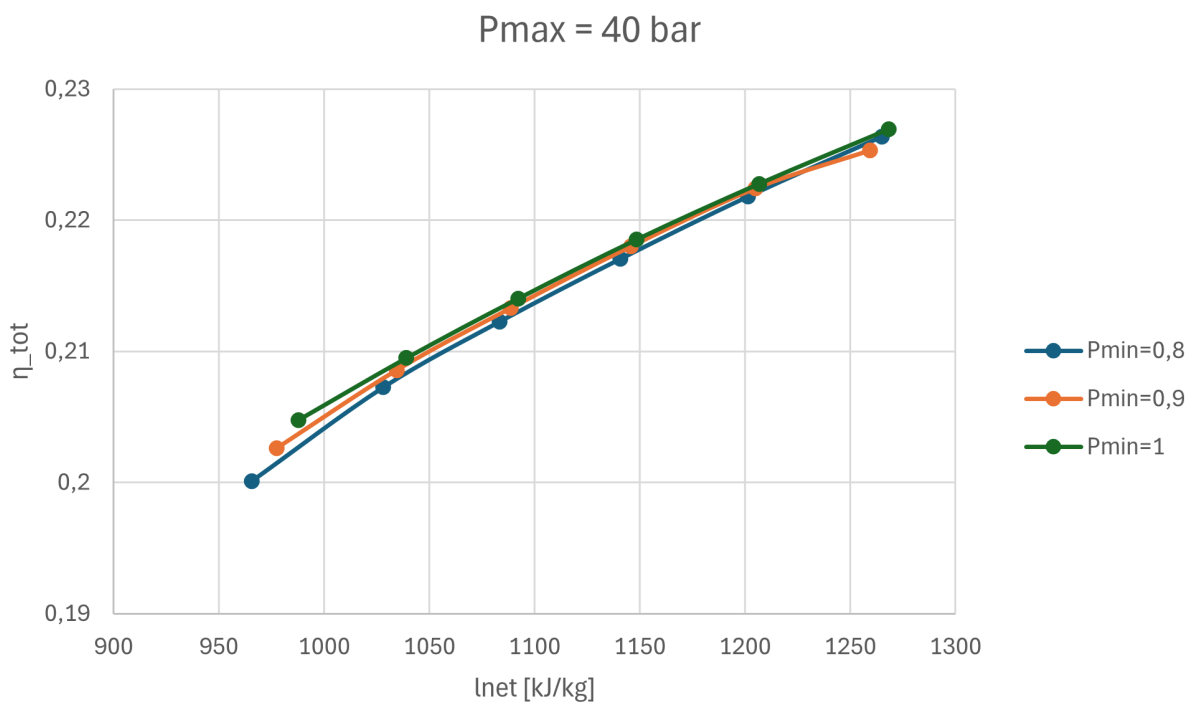


Figura 5.5: Grafico Lavoro-Rendimento Pmax=40 bar

### Valore ottimale del parametro $\lambda$

Attraverso l'osservazione dei grafici lavoro-rendimento riportati nel precedente paragrafo, notiamo che, il fattore  $\lambda$  che massimizza le prestazioni assume sempre valore pari a 4. Per interpretare tale comportamento è necessario analizzare l'andamento della potenza elettrica generata dalla turbina a vapore e delle potenze assorbite dal compressore e dalla pompa. A tale scopo, a titolo esemplificativo, si riportano gli andamenti delle grandezze sopra menzionate con riferimento al caso caratterizzato da una pressione massima pari a 10 bar e una pressione minima pari a 0,5 bar. Gli andamenti relativi alle altre configurazioni mostrano un comportamento del tutto simile, pur assumendo valori numerici differenti.

$$P_t = \dot{m}_{\text{tot}} (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) \quad (5.9)$$

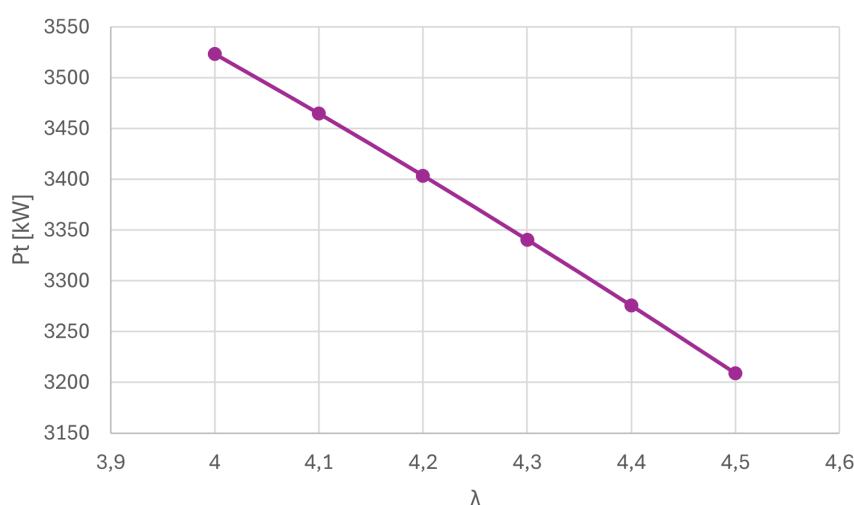


Figura 5.6: Potenza prodotta dalla turbina in funzione di  $\lambda$

In Figura 5.6 è riportato l'andamento della potenza elettrica prodotta dalla turbina in funzione del fattore  $\lambda$ . Si osserva come tale potenza diminuisca all'aumentare di  $\lambda$ , ossia al crescere dell'eccesso d'acqua alimentato al sistema.

Poichè la portata di alluminio immessa nel reattore viene mantenuta costante in ciascuna simulazione, l'energia chimica rilasciata dalla reazione risulta sostanzialmente invariata. Un incremento dell'eccesso d'acqua comporta tuttavia un aumento della massa totale di fluido da riscaldare a parità di energia disponibile; ciò determina una riduzione della temperatura dei prodotti e, conseguentemente, della loro entalpia specifica all'ingresso alla turbina. Ne deriva una riduzione del salto entalpico utile e, quindi, della potenza generata dalla macchina. Sebbene l'aumento di  $\lambda$  comporti un incremento della portata massica in ingresso alla turbina, la riduzione del salto entalpico risulta predominante, evidenziando come non sia possibile incrementare la potenza prodotta semplicemente aumentando la quantità d'acqua che attraversa la turbina. Il flusso alimentato alla turbina è costituito dall'acqua non reagita nel reattore e dall'idrogeno prodotto durante il processo. La portata massica totale in ingresso alla macchina è stata pertanto determinata, per ogni valore di  $\lambda$ , come somma della portata d'acqua residua e della portata di idrogeno riportate in Tabella 5.2. Sulla base di tali grandezze è

stato quindi possibile calcolare e successivamente rappresentare graficamente anche il lavoro specifico della turbina per unità di massa dei prodotti.

$$l_t = \frac{P_t}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,out}} + \dot{m}_{\text{H}_2}} \quad (5.10)$$

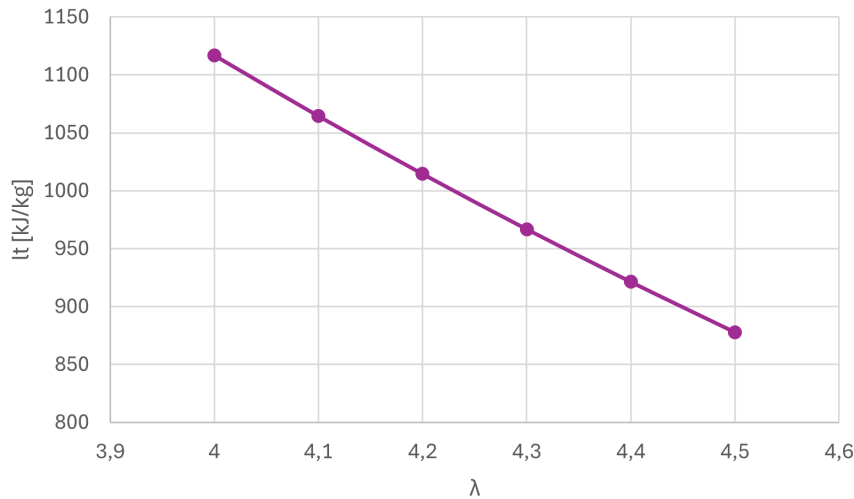


Figura 5.7: Lavoro specifico della turbina in funzione di  $\lambda$

Successivamente si analizza l'andamento della potenza assorbita e del lavoro specifico del compressore. La potenza richiesta dalla macchina per realizzare l'incremento di pressione mostra un andamento crescente all'aumentare del fattore  $\lambda$ . Tale comportamento è riconducibile all'aumento della portata massica dei prodotti in ingresso al compressore: a parità di condizioni operative, una maggiore massa da comprimere richiede infatti un maggiore apporto di lavoro complessivo. L'incremento della potenza assorbita risulta tuttavia contenuto poichè la pressione di esercizio rimane invariata e la temperatura dei prodotti in ingresso alla macchina subisce variazioni modeste. Di conseguenza, il salto entalpico specifico richiesta per la compressione non varia in modo significativo, mentre cresce principalmente il contributo legato alla portata massica. L'andamento della potenza assorbita dal compressore è riportato in Figura 5.8.

$$P_c = \dot{m}_{tot} (h_{out} - h_{in}) \quad (5.11)$$

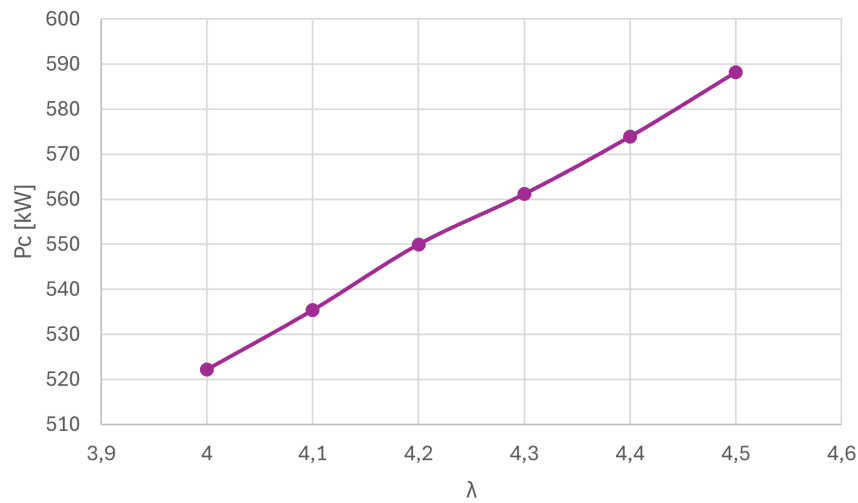


Figura 5.8: Potenza assorbita dal compressore in funzione di  $\lambda$

Diversamente, il lavoro specifico del compressore, definito come il rapporto tra la potenza assorbita e la portata massica totale elaborata, evidenzia un andamento decrescente al crescere di  $\lambda$ . Sebbene la potenza aumenti, l'incremento della portata massica risulta più che proporzionale rispetto a quello della potenza stessa. Di conseguenza, il rapporto tra le grandezze diminuisce, determinando una riduzione del lavoro specifico. Questo comportamento evidenzia come l'aumento dell'eccesso d'acqua comporti principalmente un effetto di diluizione sulla miscela elaborata dal compressore, con un incremento della massa trattata più significativo rispetto alla variazione dell'energia richiesta per unità di tempo.

$$l_c = \frac{P_c}{\dot{m}_{H_2O,out} + \dot{m}_{H_2}} \quad (5.12)$$

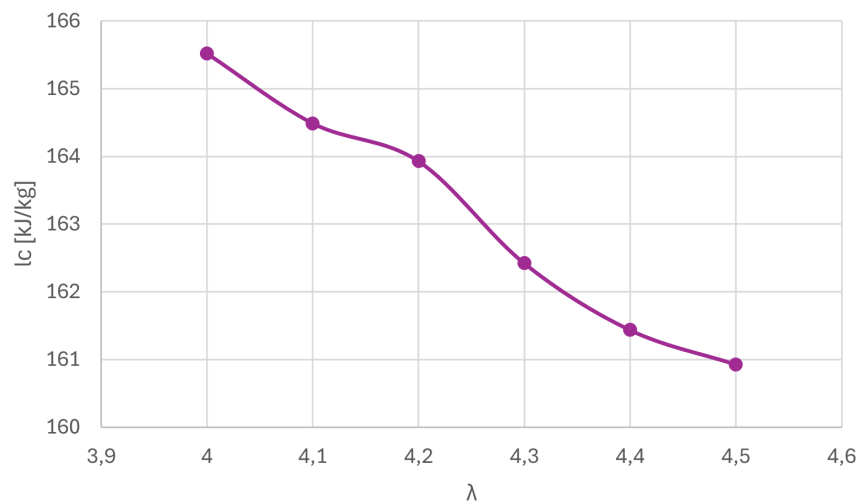


Figura 5.9: Lavoro specifico del compressore in funzione di  $\lambda$

Infine, si analizza l'andamento della potenza assorbita dalla pompa. A differenza di compressore e turbina, la macchina elabora esclusivamente la portata d'acqua in ingresso al sistema, ovvero la corrente alimentata al reattore prima che avvenga la reazione con l'alluminio. Poichè un incremento del fattore  $\lambda$  comporta un aumento della portata massica d'acqua alimentata all'impianto, anche la portata che attraversa la pompa aumenta al crescere di  $\lambda$ . Dal punto di vista energetico, essendo la trasformazione operata dalla pompa caratterizzata da un incremento di pressione a carico di un liquido sostanzialmente incomprimibile, il salto entalpico rimane pressoché costante, poiché dipende principalmente dalla variazione di pressione e dalle proprietà termofisiche dell'acqua, che non subiscono variazioni significative. L'andamento complessivo mostra quindi una tendenza crescente, ma moderata, della potenza richiesta dalla pompa al crescere di  $\lambda$ , imputabile quasi esclusivamente alla crescita della portata massica elaborata.

$$P_p = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{in}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (5.13)$$

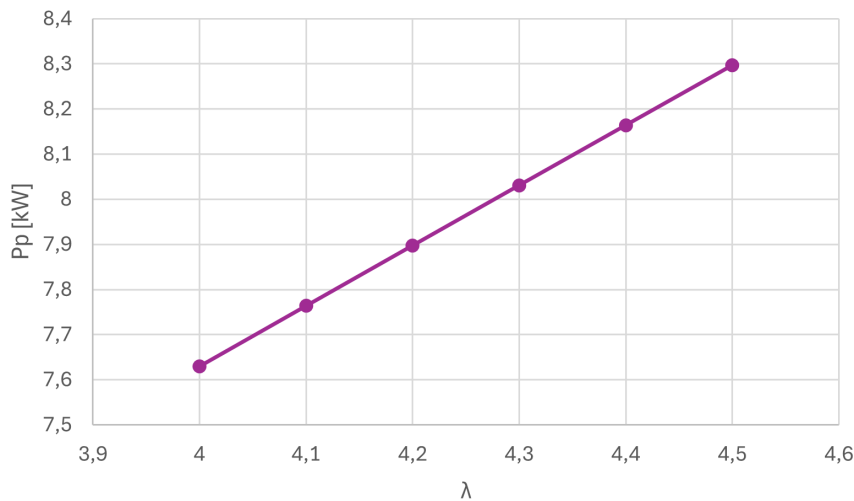


Figura 5.10: Potenza assorbita dalla pompa in funzione di  $\lambda$

Per quanto riguarda il lavoro specifico della pompa, definito come il rapporto tra la potenza assorbita e la portata massica elaborata, si osserva invece un andamento decrescente all'aumentare di  $\lambda$ . Questo comportamento è dovuto al fatto che la portata massica di acqua in ingresso cresce più rapidamente della potenza richiesta, determinando una riduzione del lavoro specifico per unità di massa.

$$l_p = \frac{P_p}{\dot{m}_{H_2O,in}} \quad (5.14)$$

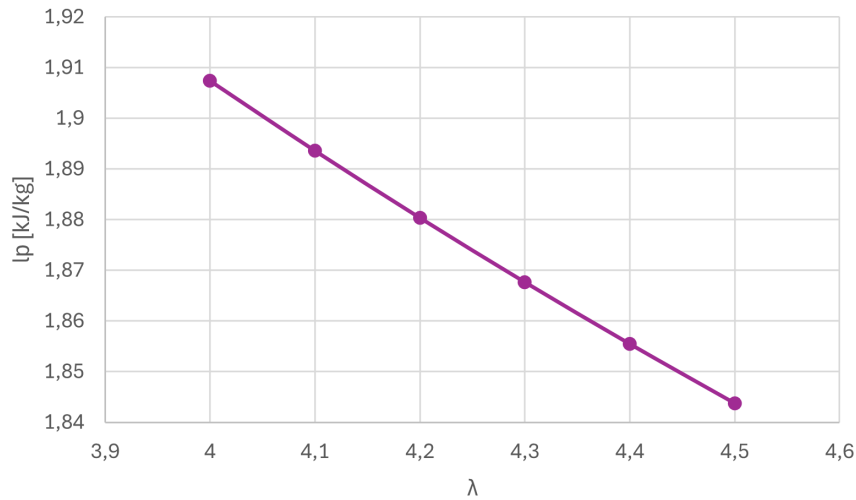


Figura 5.11: Lavoro specifico della pompa in funzione di  $\lambda$

Dopo aver osservato l'andamento delle potenze delle singole macchine, si passa allo studio della potenza netta e del corrispondente lavoro netto in funzione del fattore  $\lambda$ . Si osserva che la potenza netta diminuisce al crescere di  $\lambda$ . Ciò avviene perché, nonostante la potenza assorbita dalla pompa e dal compressore aumenti con l'eccesso d'acqua, tale incremento risulta insufficiente a compensare la riduzione della potenza generata dalla turbina, la quale rappresenta il contributo energetico più significativo del sistema.

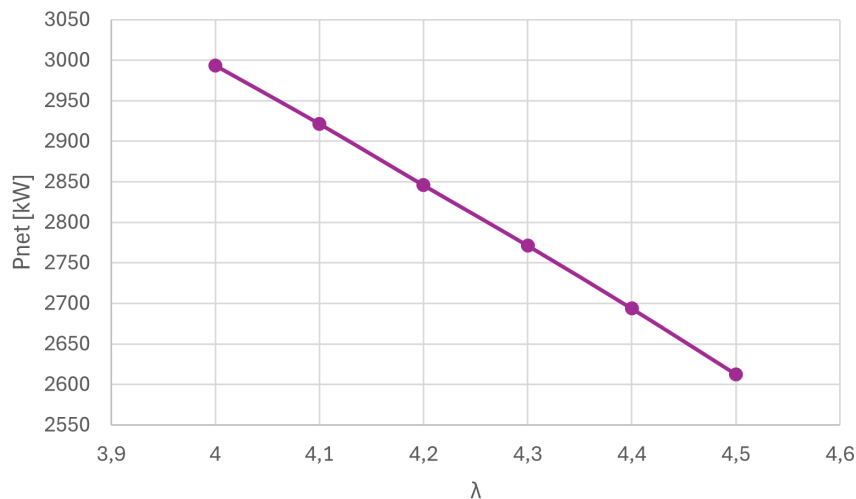


Figura 5.12: Potenza netta in funzione di  $\lambda$

Anche il lavoro specifico netto mostra un andamento decrescente all'aumentare di  $\lambda$ . Questo comportamento è dovuto al fatto che, alla riduzione della potenza netta, si accompagna un aumento della portata massica totale; tuttavia, tale incremento della portata è inferiore rispetto alla diminuzione della potenza, determinando quindi una riduzione del lavoro specifico in termini assoluti.

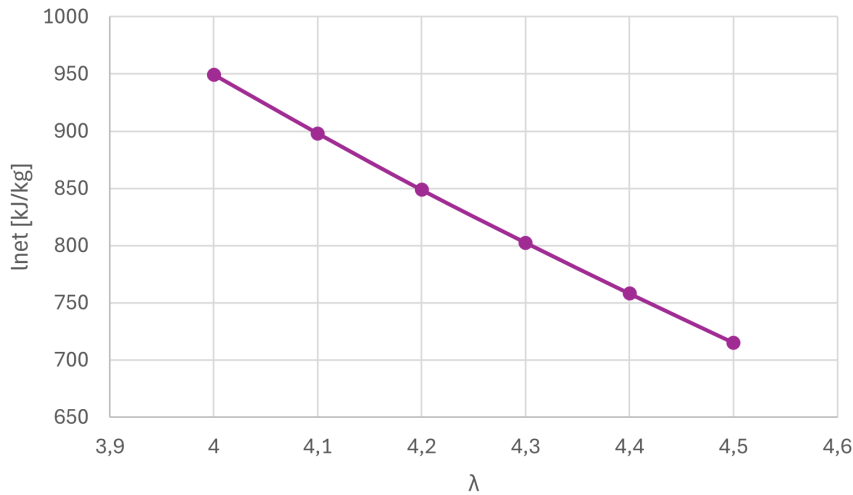


Figura 5.13: Lavoro specifico netto in funzione di  $\lambda$

Infine, in Figura 5.14 è riportato l'andamento del rendimento totale d'impianto in funzione del fattore  $\lambda$ . Si osserva che il rendimento complessivo diminuisce all'aumentare di  $\lambda$ . Infatti, il rendimento totale è direttamente correlato alla potenza netta prodotta, la quale si riduce all'aumentare di  $\lambda$ . Il grafico conferma dunque che valori più elevati di  $\lambda$  penalizzano le prestazioni energetiche complessive del sistema, rendendo meno efficiente la conversione di energia chimica in energia elettrica utile.

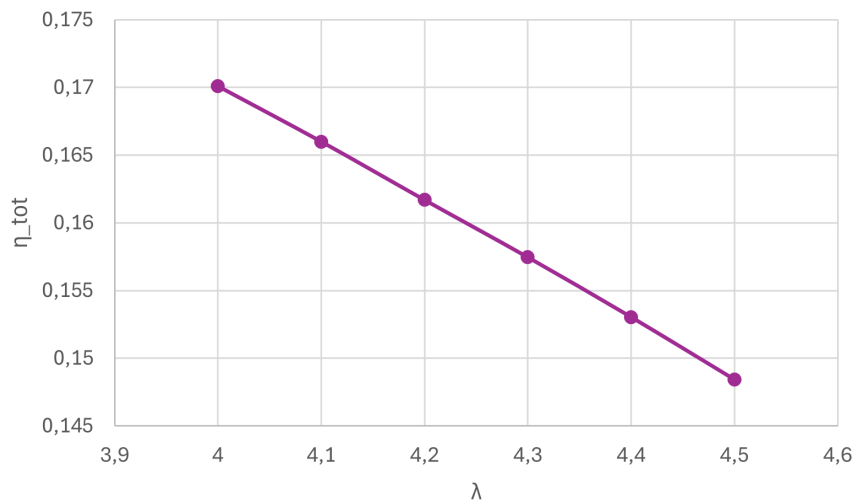


Figura 5.14: Rendimento totale d'impianto in funzione di  $\lambda$

In conclusione dell'analisi relativa a questo parametro, possiamo affermare che il valore ottimale di  $\lambda$  risulta pari a 4. Questa scelta è supportata dall'osservazione degli andamenti di potenza netta e lavoro netto, entrambi con tendenza decrescente al crescere di  $\lambda$ . Per questo motivo si è scelto di adottare come valore ottimale il minimo disponibile all'interno dell'intervallo considerato, in quanto consente di massimizzare l'energia netta recuperabile e il lavoro per unità di massa dei prodotti.

Una volta definito il valore ottimale del fattore  $\lambda$  pari a 4, è possibile analizzare come variano i lavori specifici del compressore e della turbina al variare della pressione minima, mantenendo costante la pressione massima corrispondente ai casi considerati

nelle simulazioni. Questa analisi consente di osservare l'influenza della pressione minima sulle prestazioni delle macchine principali, indipendentemente dall'eccesso d'acqua, che è già stato ottimizzato tramite  $\lambda$ . In particolare, modificando la pressione minima, si interviene sul salto entalpico disponibile per la turbina e sulle condizioni di aspirazione del compressore, due fattori determinanti per il lavoro specifico prodotto o richiesto per unità di massa del fluido. Questa analisi non si estende al lavoro della pompa, in quanto il funzionamento di quest'ultima dipende esclusivamente dalla portata d'acqua in ingresso e dalla pressione massima di esercizio. La pompa opera sempre tra la pressione ambiente e la pressione massima richiesta dal sistema, pertanto la variazione di pressione minima non modifica né la potenza assorbita né il lavoro specifico della macchina. Per semplicità, in seguito vengono riportati solo gli andamenti relativi ad una pressione massima pari a 10 bar, a titolo di esempio. Gli andamenti osservati mostrano un comportamento del tutto simile anche per le altre pressioni massime considerate, sebbene i valori numerici cambino.

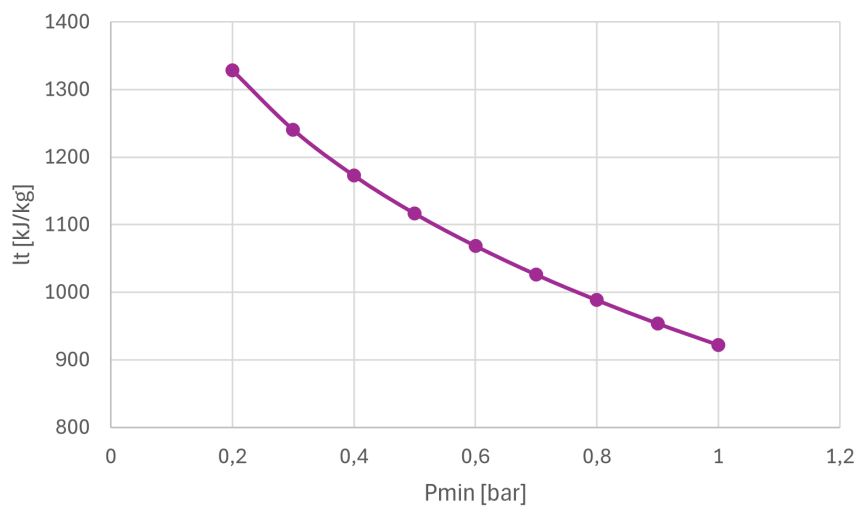


Figura 5.15: Lavoro specifico della turbina in funzione di Pmin

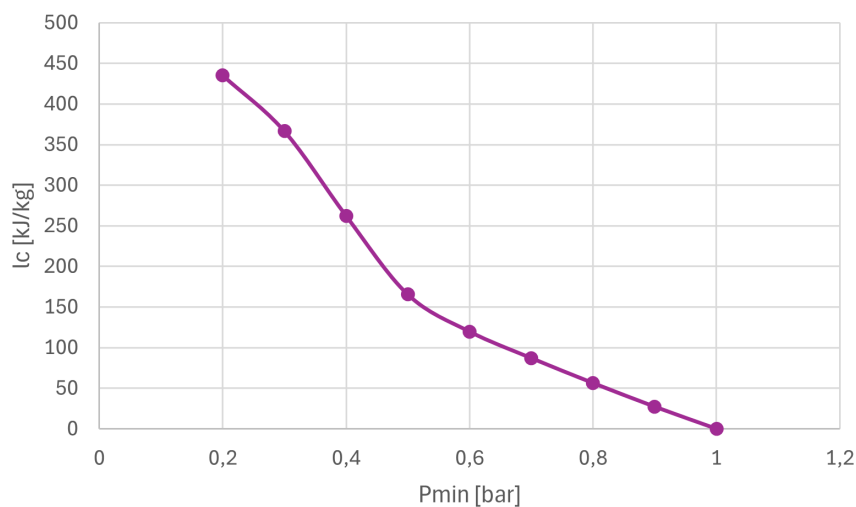


Figura 5.16: Lavoro specifico del compressore in funzione di Pmin

Dai grafici riportati in Figure 5.15 e 5.16, si osserva che i lavori specifici rispettivamente di turbina e compressore diminuiscono all'aumentare della pressione minima d'impianto. Il lavoro specifico della turbina presenta questo andamento poiché l'aumento della pressione minima genera una riduzione del salto entalpico disponibile tra ingresso e uscita della macchina. Una pressione minima più elevata riduce il gradiente di espansione della turbina, determinando una minore energia convertibile in lavoro meccanico per unità di massa di fluido. Anche il lavoro specifico del compressore mostra una riduzione al crescere della pressione minima. Questo accade perché il salto di pressione che il compressore deve realizzare diminuisce all'aumentare della pressione minima, riducendo l'energia richiesta per la compressione. In particolare, quando la pressione minima raggiunge il valore di 1 bar, la pressione di aspirazione coincide con la pressione di mandata del compressore, rendendo quest'ultimo non più necessario. In questo caso il lavoro del compressore è nullo.

### 5.3 Presentazione delle configurazioni con $\lambda$ ottimale e calcolo prestazionale

L'analisi eseguita fino a questo punto ha preso in considerazione singolarmente il parametro  $\lambda$  e la pressione minima. Tuttavia, è necessario individuare le combinazioni ottimali dei tre parametri,  $\lambda$ , pressione minima e pressione massima, che determinano le migliori prestazioni energetiche dell'impianto. Nel caso in esame,  $\lambda$  rimane fissato a 4, essendo già stato ottimizzato rispetto al lavoro netto e al rendimento totale. La scelta della pressione minima deve essere effettuata in accoppiamento con la pressione massima, in quanto il salto entalpico disponibile e il lavoro delle macchine dipendono direttamente da entrambe le pressioni. In Tabella 5.3 vengono quindi riportate le quattro configurazioni ottimali, ognuna corrispondente ad uno dei valori di pressione massima selezionati. La scelta di tali configurazioni è stata eseguita in seguito all'osservazione dei grafici lavoro-rendimento riportati nel paragrafo precedente, per ognuno dei quali è stata individuata la combinazione ottimale che consente di massimizzazione le prestazioni dell'impianto sia in termini di rendimento totale, sia in termini di lavoro netto per unità di portata dei prodotti di processo. Infine, per ogni configurazione ottimale, vengono riportati tutti i risultati ottenuti dalle simulazioni e dai successivi calcoli prestazionali: potenze, lavori specifici, rendimenti e dati relativi al recuperatore, rappresentato in Figura 3.1 dall'elemento numero 2.

Configurazione	Pressione massima [bar]	Pressione minima [bar]	$\beta$	$\lambda$
1	10	0,5	20	4
2	20	0,7	28,6	4
3	30	0,9	33,3	4
4	40	1	40	4

Tabella 5.3: Configurazioni ottimali

## Configurazione 1

$P_t$ [kW]	$P_c$ [kW]	$P_p$ [kW]	$P_{net}$ [kW]
3523,4	522,2	7,63	2993,5

Tabella 5.4: Potenze Configurazione 1

$l_t$ [kJ/kg]	$l_c$ [kJ/kg]	$l_p$ [kJ/kg]	$l_{net}$ [kJ/kg]
1116,8	165,5	1,907	949,3

Tabella 5.5: Lavori specifici Configurazione 1

$\eta_t$	$\eta_{tot}$	$\eta_I$
0,20019	0,17009	0,87785

Tabella 5.6: Rendimenti Configurazione 1



Figura 5.17: Diagramma T-Q Configurazione 1

Parametro	Unità di misura	Valore
$T_{HX}$	°C	173
A	m <sup>2</sup>	74,38
U	kW/m <sup>2</sup> K	0,85
U*A	kW/K	63,23
$\Delta T_{lm}$	°C	43,33
$Q_{HX}$	kW	2739,9

Tabella 5.7: Dati relativi al recuperatore Configurazione 1

## Configurazione 2

$P_t$ [kW]	$P_c$ [kW]	$P_p$ [kW]	$P_{net}$ [kW]
3796,4	258,6	16,12	3521,7

Tabella 5.8: Potenze Configurazione 2

$l_t$ [kJ/kg]	$l_c$ [kJ/kg]	$l_p$ [kJ/kg]	$l_{net}$ [kJ/kg]
1203,3	81,9	4,027	1117,3

Tabella 5.9: Lavori specifici Configurazione 2

$\eta_t$	$\eta_{tot}$	$\eta_I$
0,21571	0,2001	0,90725

Tabella 5.10: Rendimenti Configurazione 2

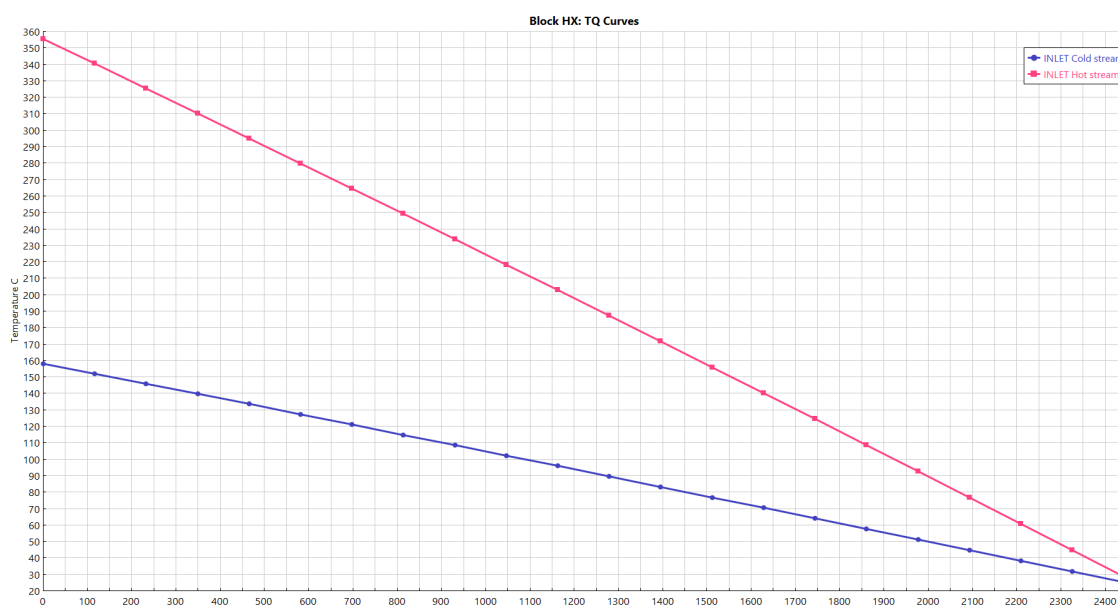


Figura 5.18: Diagramma T-Q Configurazione 2

Parametro	Unità di misura	Valore
$T_{HX}$	°C	158
A	m <sup>2</sup>	60,45
U	kW/m <sup>2</sup> K	0,85
U*A	kW/K	51,38
$\Delta T_{lm}$	°C	47,53
$Q_{HX}$	kW	2442

Tabella 5.11: Dati relativi al recuperatore Configurazione 2

### Configurazione 3

$P_t$ [kW]	$P_c$ [kW]	$P_p$ [kW]	$P_{net}$ [kW]
3904,1	73,9	24,58	3805,5

Tabella 5.12: Potenze Configurazione 3

$l_t$ [kJ/kg]	$l_c$ [kJ/kg]	$l_p$ [kJ/kg]	$l_{net}$ [kJ/kg]
1237,4	23,4	6,146	1207,8

Tabella 5.13: Lavori specifici Configurazione 3

$\eta_t$	$\eta_{tot}$	$\eta_I$
0,22182	0,21622	0,92305

Tabella 5.14: Rendimenti Configurazione 3

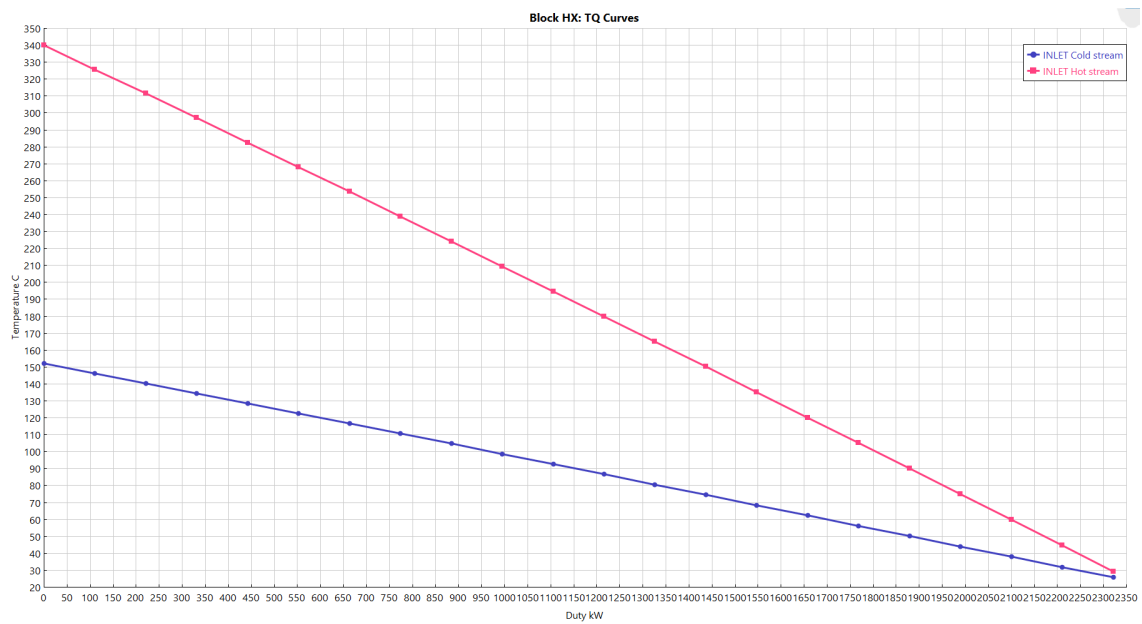


Figura 5.19: Diagramma T-Q Configurazione 3

Parametro	Unità di misura	Valore
$T_{HX}$	°C	152
A	m <sup>2</sup>	58,42
U	kW/m <sup>2</sup> K	0,85
U*A	kW/K	49,66
$\Delta T_{lm}$	°C	46,74
$Q_{HX}$	kW	2320,9

Tabella 5.15: Dati relativi al recuperatore Configurazione 3

## Configurazione 4

$P_t$ [kW]	$P_c$ [kW]	$P_p$ [kW]	$P_{net}$ [kW]
4026,5	0	33,06	3993,5

Tabella 5.16: Potenze Configurazione 4

$l_t$ [kJ/kg]	$l_c$ [kJ/kg]	$l_p$ [kJ/kg]	$l_{net}$ [kJ/kg]
1276,2	0	8,265	1267,9

Tabella 5.17: Lavori specifici Configurazione 4

$\eta_t$	$\eta_{tot}$	$\eta_I$
0,22878	0,2269	0,93351

Tabella 5.18: Rendimenti Configurazione 4

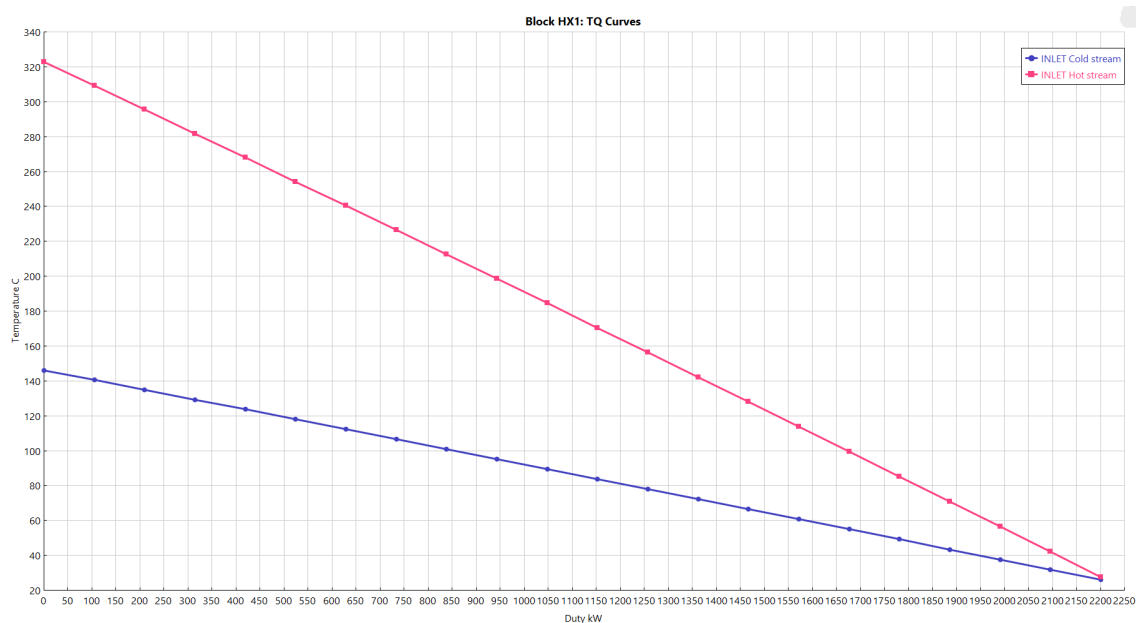


Figura 5.20: Diagramma T-Q Configurazione 4

Parametro	Unità di misura	Valore
$T_{HX}$	°C	146
A	m <sup>2</sup>	69,43
U	kW/m <sup>2</sup> K	0,85
U*A	kW/K	59,02
$\Delta T_{lm}$	°C	37,29
$Q_{HX}$	kW	2200.8

Tabella 5.19: Dati relativi al recuperatore Configurazione 4

## 5.4 Analisi delle configurazioni e individuazione configurazione ottimale

Nel paragrafo precedente sono state individuate quattro configurazioni ottimali, ciascuna associata ad un diverso valore di pressione massima considerato nelle simulazioni. L'analisi è stata condotta ipotizzando inizialmente la pressurizzazione del reattore, con l'obiettivo di valutare se tale scelta fosse effettivamente conveniente dal punto di vista termodinamico. Dai risultati ottenuti emerge chiaramente che la configurazione complessivamente più performante è la numero quattro. In questa configurazione la pressione massima è la più elevata tra quelle analizzate, pari a 40 bar, mentre la pressione minima coincide con quella ambiente. Attraverso l'osservazione del grafico in Figura 5.21 risulta evidente che la configurazione 4 presenta i valori più elevati di potenza netta e lavoro netto specifico.

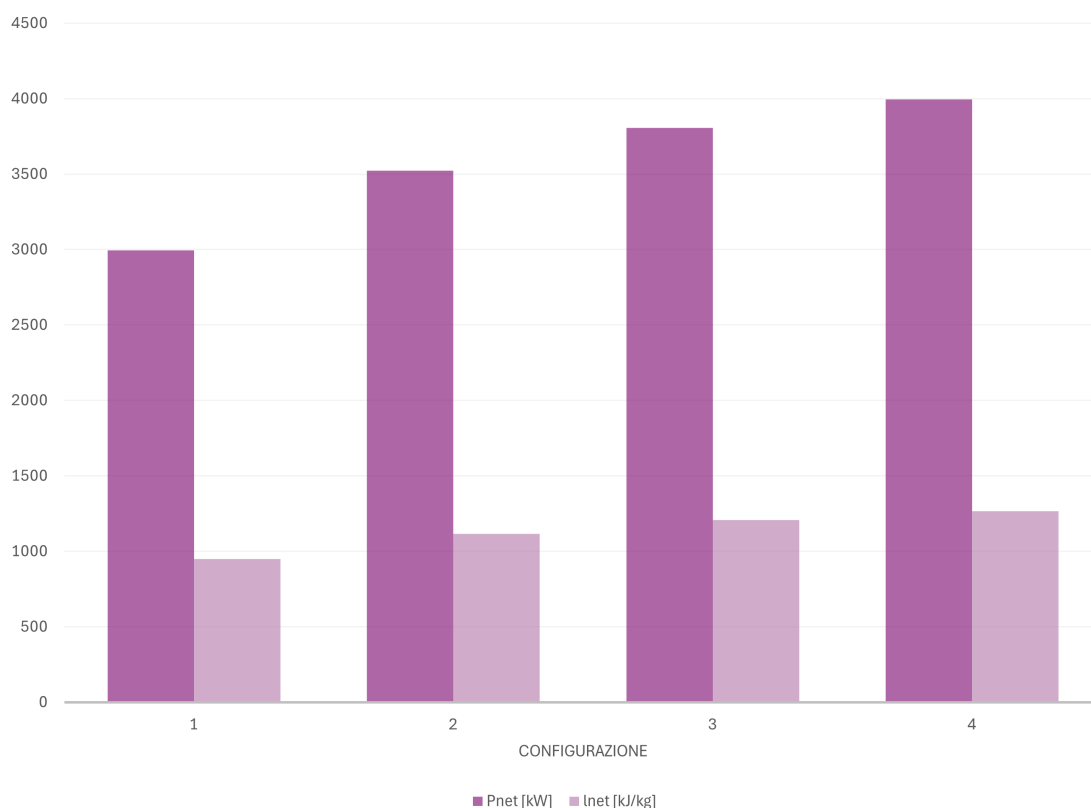


Figura 5.21: Potenze nette e lavori specifici netti delle quattro configurazioni

In Figura 5.22 sono riportati il rendimento totale e il rendimento di primo principio relativi alle quattro configurazioni analizzate. Anche in questo caso si osserva come la configurazione 4 risulti quella ottimale in termini di rendimento.

Il rendimento di primo principio, come si può osservare dai dati ottenuti dalle simulazioni, assume valori piuttosto elevati. Questo risultato è principalmente dovuto all'elevato LHV dell'idrogeno: sebbene la quantità prodotta non sia particolarmente elevata, il suo alto potere calorifico inferiore comporta comunque una potenza termica significativa. Poiché tale potenza compare al numeratore nell'espressione del rendimento di primo principio, il valore complessivo del rendimento risulta elevato. Inoltre, nelle simulazioni è stato ipotizzato un rendimento di conversione dell'alluminio molto alto, pari al 95%, che contribuisce ulteriormente ad aumentare la produzione di idrogeno.

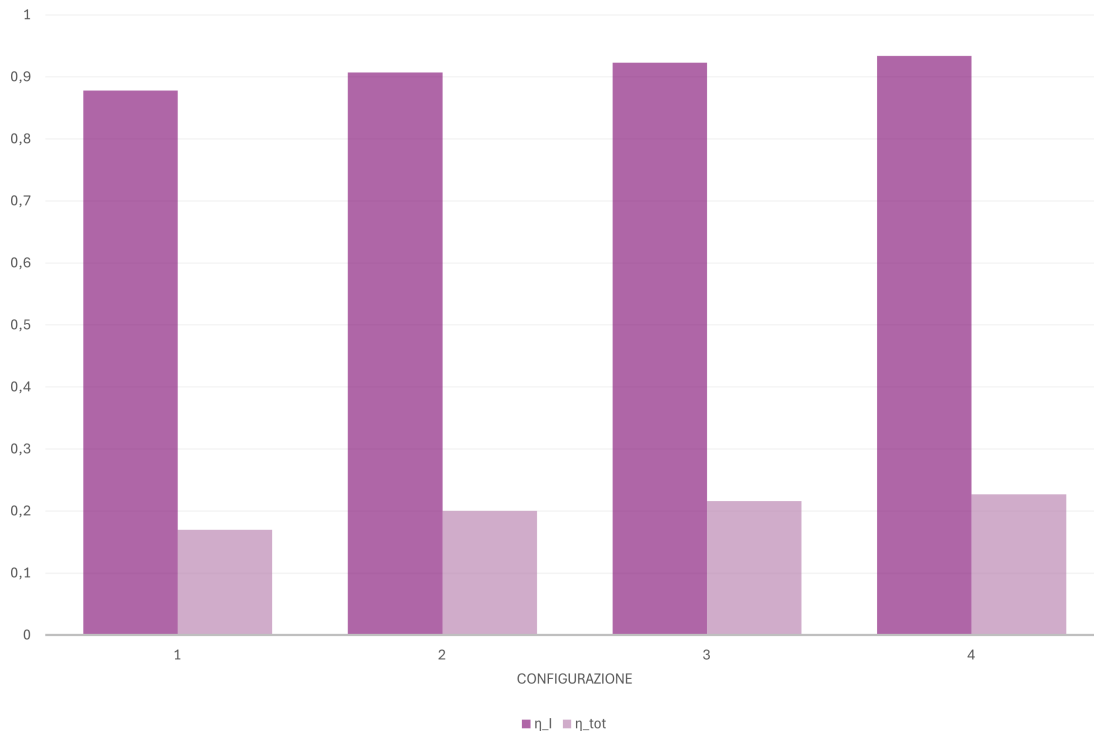


Figura 5.22: Rendimento totale delle quattro configurazioni

Infine possiamo concludere che, nell'ambito del presente studio puramente termodinamico, è risultato conveniente eseguire la pressurizzazione della camera di combustione alla pressione più elevata tra quelle analizzate; tuttavia, la combustione a valore di pressione così elevato risulta molto sollecitata. Infine osserviamo che la presenza del compressore è risultata superflua in quanto, facendo lavorare la turbina fino a pressione ambiente, non è più necessario ricomprimere il fluido.

## 5.5 Confronto con impianto non pressurizzato

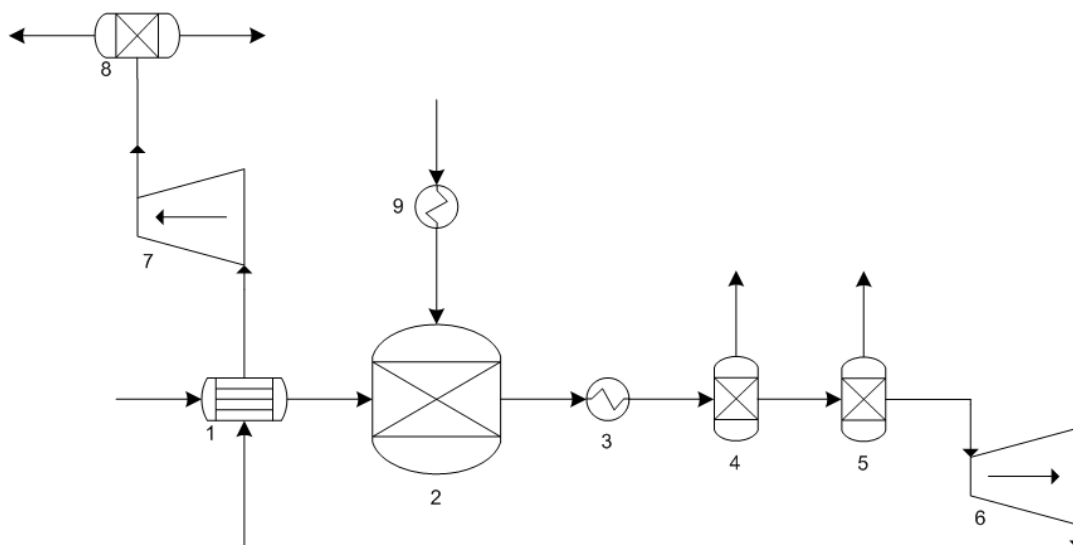


Figura 5.23: Schema d'impianto non pressurizzato

In questo paragrafo viene effettuato un confronto tra le configurazioni simulate nel presente lavoro di tesi e il caso in cui il reattore operi a pressione atmosferica, ovvero senza pressurizzazione. Tale confronto è finalizzato a valutare se la pressurizzazione del combustore risulti effettivamente conveniente, dal punto di vista energetico.

In questa configurazione alternativa la pompa viene eliminata e l'acqua è alimentata al reattore a pressione e temperatura ambiente.

Per quanto riguarda la configurazione 4, tale confronto non può essere effettuato. In questo caso, infatti, la pressione dei prodotti di combustione in uscita dalla turbina è pari ad 1 bar. Poiché anche la combustione avviene alla medesima pressione, non risulta disponibile alcun salto entalpico utile all'espansione. Di conseguenza, la presenza della turbina risulterebbe superflua; analogamente, non sarebbe necessario nemmeno il compressore.

Dal confronto emerge che, in assenza di pressurizzazione del reattore, la potenza prodotta dalla turbina risulta inferiore alla potenza assorbita dal compressore. Di conseguenza, l'impianto non risulta più conveniente dal punto di vista energetico, poiché la potenza netta in queste condizioni assume valore negativo e non si ottiene alcun effetto utile. Ciò è dovuto al fatto che, in assenza di pressurizzazione, il salto entalpico disponibile all'espansione in turbina risulta significativamente inferiore rispetto al caso pressurizzato.

L'aumento del lavoro richiesto dal compressore, invece, è dovuto alla variazione della temperatura in ingresso allo stesso, che a sua volta dipende dalla temperatura dei prodotti in uscita dalla turbina. Questa differenza termica è influenzata dal modo in cui il calore contenuto nella corrente dei prodotti di combustione viene recuperato nello scambiatore per riscaldare l'acqua alimentata al reattore.

La differenza che si osserva tra il caso pressurizzato e quello non pressurizzato è dovuta principalmente alla diversa pressione della corrente fredda in ingresso al recuperatore. Nel caso a pressione atmosferica la temperatura dell'acqua è limitata dal punto di ebollizione, impedendo un ulteriore aumento della temperatura senza transizione di fase. Nel caso pressurizzato, invece, la temperatura di saturazione è significativamente più elevata, consentendo alla corrente fredda di assorbire una maggiore quantità di calore e di raggiungere temperatura più alte. I dati completi relativi alle temperature che si registrano in ogni sezione dell'impianto con pressurizzazione del reattore sono riportati in Appendice.

### **Analisi dei dati relativi al recuperatore di calore HX**

Si considera ora un ulteriore aspetto rilevante in vista di una possibile valutazione economica dell'impianto, analisi che tuttavia non rientra negli obiettivi del presente studio. Tra i dati riportati nel paragrafo precedente sono inclusi anche quelli relativi al recuperatore di calore HX, rappresentato in Figura 3.1 dall'elemento numero 2.

In particolare, i parametri più significativi sono il coefficiente globale di scambio termico  $U$ , l'area di scambio  $A$  e il loro prodotto  $U \cdot A$ . Il coefficiente di scambio termico  $U$  rimane costante in tutte le configurazioni, pari a  $0,85 \text{ kW/m}^2\text{K}$ , di conseguenza, le variazioni di calore scambiato sono attribuibili principalmente alle variazioni della superficie di scambio  $A$  e alla differenza di temperatura media logaritmica  $\Delta T_{lm}$ .

Nei grafici riportati di seguito, sono stati rappresentati i dati relativi al recuperatore in funzione di  $\beta$ , ovvero per ciascuna configurazione considerata.

L'analisi del recuperatore di calore mostra che, nonostante l'area di scambio aumenti

nella configurazione 4, il calore scambiato diminuisce progressivamente da 1 a 4, a causa della riduzione della temperatura di ingresso della corrente calda, mentre la corrente fredda viene riscaldata fino al massimo consentito da Aspen.

La configurazione 1 garantisce il massimo recupero termico, sebbene comporti il costo maggiore per lo scambiatore.

La configurazione 3 rappresenta il caso con scambiatore più compatto dal punto di vista costruttivo e sfrutta meglio il gradiente termico, mentre, la numero 2 costituisce complessivamente un buon compromesso.

La configurazione 4 pur risultando la più vantaggiosa per l'impianto nel suo insieme, non rappresenta la soluzione ottimale dal punto di vista del recuperatore di calore, che presenta una quantità di calore recuperato inferiore ed un costo superiore rispetto alle configurazioni 2 e 3.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (5.15)$$

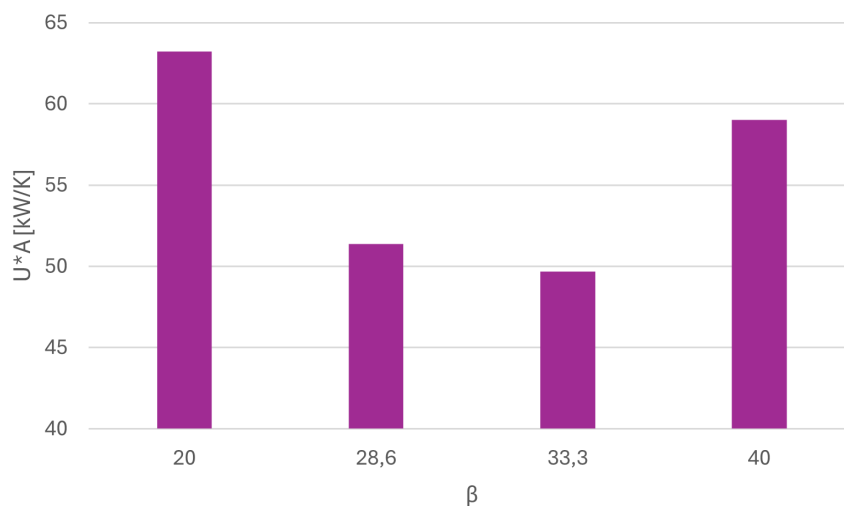


Figura 5.24: Conduttanza termica globale in funzione di  $\beta$

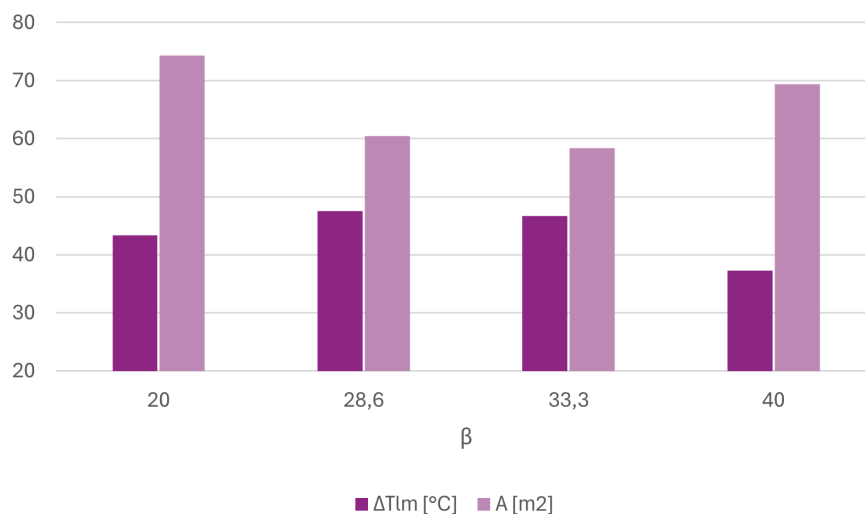


Figura 5.25: Temperatura media logaritmica e Area di scambio in funzione di  $\beta$

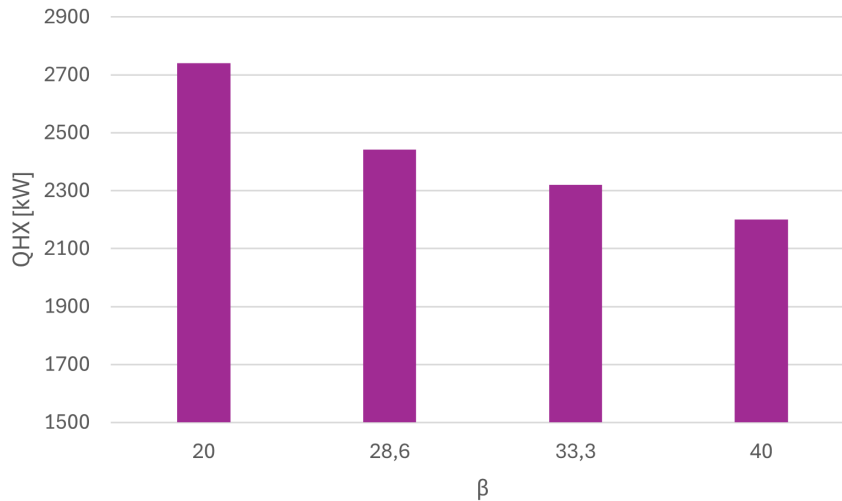


Figura 5.26: Calore scambiato nel recuperatore in funzione di  $\beta$

## 5.6 Ottimizzazione energetica

In questo paragrafo verranno analizzate possibili strategie di ottimizzazione energetica basate sul recupero di calore, con l'obiettivo di ridurre il fabbisogno energetico richiesto per la liquefazione dell'alluminio. Nell'impianto oggetto del presente studio vi sono due correnti in uscita che presentano un contenuto termico ancora recuperabile. La prima è costituita dalla corrente d'acqua in uscita dall'ultimo separatore, la cui temperatura varia in funzione della configurazione impiantistica considerata. La seconda è rappresentata dalla corrente di alluminio incombusto separata dai prodotti della combustione; tale corrente si mantiene alla medesima temperatura in tutte le configurazioni analizzate. Nelle configurazioni 1,2 e 3 è possibile sfruttare entrambe le correnti ai fini dell'ottimizzazione energetica. La configurazione 4, invece, presenta una temperatura dell'acqua in uscita troppo bassa per consentirne un recupero termico efficace; pertanto, in questo caso si procede esclusivamente alla simulazione del recupero di calore dell'alluminio incombusto. L'ottimizzazione viene quantificata attraverso l'indice  $Risparmio\%_{11}$ , che valuta il risparmio percentuale in termini di potenza e l'indice  $\Delta\eta_I$ , che invece quantifica il risparmio in termini di rendimento.

$$\Delta Q_{11} = Q_{11} - Q_{11,ott} \quad (5.16)$$

$$Risparmio\%_{11} = \frac{Q_{11} - Q_{11,ott}}{Q_{11}} \cdot 100\% \quad (5.17)$$

$$\Delta\eta_I = \eta_{I,ott} - \eta_I \quad (5.18)$$

## Recupero termico dalla corrente di alluminio incombusto

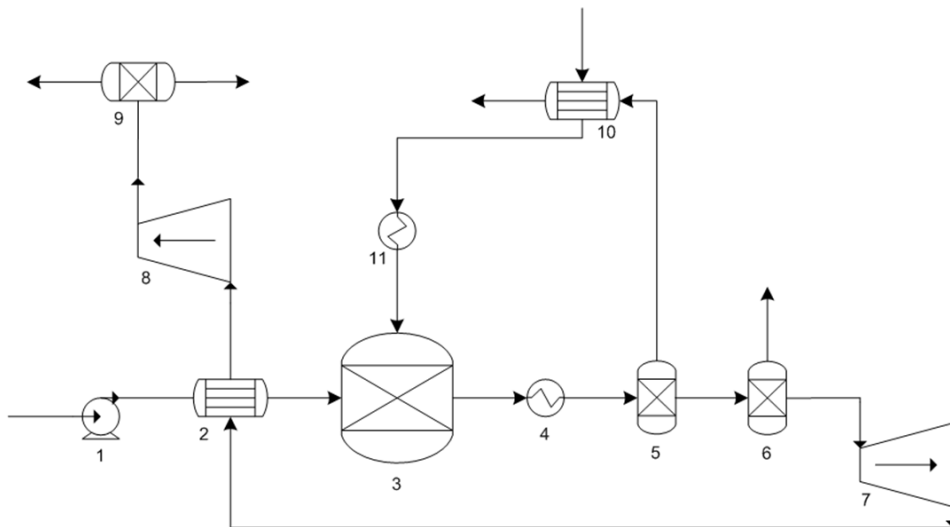


Figura 5.27: Schema d'impianto con recupero termico dalla corrente di alluminio incombusto

In questo caso viene inserito nell'impianto un recuperatore di calore, implementato nel software mediante l'inserimento del blocco *HeatX*, rappresentato in Figura 5.27 dall'elemento numero 10. Il componente è configurato con due correnti in ingresso, quella calda è rappresentata dall'alluminio incombusto, mentre, quella fredda è costituita dall'alluminio alimentato all'impianto, inizialmente a temperatura e pressione ambiente. L'alluminio incombusto, si trova, per ogni configurazione, alla stessa temperatura, pari a 817,8 °C, quindi, genererà sempre lo stesso risparmio energetico.

$T_{Al,f,in}$ [°C]	$T_{Al,f,out}$ [°C]	$T_{Al,c,in}$ [°C]	$T_{Al,c,out}$ [°C]
25	72	817,8	28,7

Tabella 5.20: Temperature delle correnti fredda e calda che attraversano il recuperatore

$Q_{11}$ [kW]	$Q_{11,ott}$ [kW]	$\Delta Q_{11}$ [kW]	Risparmio% <sub>11</sub>
363,8	342,2	21,6	5,95

Tabella 5.21: Risparmio energetico in termini di potenza

Mentre, come osservato in Tabella 5.21, il risparmio energetico legato allo scaldatore 11 rimane lo stesso per ogni configurazione, la quantità di energia risparmiata influenza il rendimento di primo principio delle relative configurazioni. Il risparmio in questi termini viene riportato in Tabella 5.25

Configurazione	$\eta_I$	$\eta_{I,ott}$	$\Delta\eta_I$
1	87,8	87,9	0,106
2	90,7	90,8	0,109
3	92,3	92,4	0,111
4	93,4	93,5	0,112

Tabella 5.22: Risparmio energetico in termini di rendimento di primo principio

### Recupero termico dalla corrente d'acqua in uscita

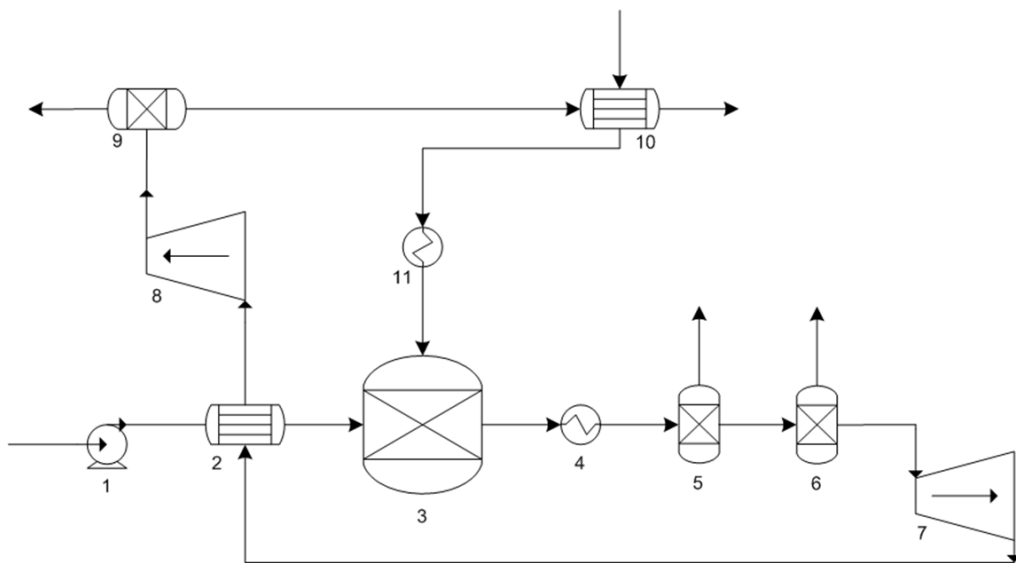


Figura 5.28: Schema d'impianto con recupero termico dalla corrente d'acqua in uscita

In questo caso viene inserito nell'impianto un recuperatore di calore, implementato nel software mediante l'inserimento del blocco *HeatX*, selezionato dalla libreria, rappresentato in Figura 5.28 dall'elemento numero 10. Il componente è configurato con due correnti in ingresso, quella calda è rappresentata dall'acqua in uscita dall'impianto, mentre, quella fredda è costituita dall'alluminio alimentato all'impianto, inizialmente a temperatura e pressione ambiente. La corrente d'acqua in uscita dal separatore 9 presenta un valore di temperatura differente per ogni configurazione analizzata. Tale valore dipende dalla temperatura del flusso in uscita dal compressore.

Configurazione	$T_{H_2O,c,in}$ [°C]	$T_{H_2O,c,out}$ [°C]	$T_{Al,f,in}$ [°C]	$T_{Al,f,out}$ [°C]
1	99,2	93,3	25	98
2	64,9	61,9	25	63
3	39,7	38,7	25	38

Tabella 5.23: Temperature delle correnti fredda e calda che attraversano il recuperatore

Configurazione	$Q_{11}$ [kW]	$Q_{11,ott}$ [kW]	$\Delta Q_{11}$ [kW]	Risparmio% <sub>11</sub>
1	363,8	329,8	34	9,34
2	363,8	346,4	17,4	4,79
3	363,8	357,9	5,9	1,62

Tabella 5.24: Risparmio energetico in termini di potenza

Configurazione	$\eta_I$	$\eta_{I,ott}$	$\Delta\eta_I$
1	87,78	87,95	0,17
2	90,73	90,81	0,09
3	92,31	92,33	0,03

Tabella 5.25: Risparmio energetico in termini di rendimento di primo principio

### Sintesi dei risultati

Osservando i risultati ottenuti dalle simulazioni, si nota che le diverse configurazioni di ottimizzazione energetica non comportano un risparmio sostanziale in termini di potenza.

Il parametro in cui si evidenzia principalmente l'effetto dell'ottimizzazione è il rendimento di primo principio. In particolare, si osserva una riduzione dell'energia richiesta per la liquefazione dell'alluminio, simulata in Aspen Plus tramite lo scambiatore numero 11. Tale contributo compare al denominatore dell'espressione del rendimento di primo principio, in quanto rappresenta una parte dell'energia complessivamente impiegata nell'impianto; di conseguenza, una sua diminuzione determina un incremento del rendimento stesso. Tuttavia, il miglioramento ottenuto in termini di rendimento di primo principio risulta estremamente contenuto, al punto da sollevare dubbi sull'effettiva convenienza di implementare questa ottimizzazione.

# Capitolo 6

## Conclusione

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'analisi termodinamica di un sistema per la produzione di idrogeno basato sulla reazione tra alluminio e acqua, integrato con una turbina a vapore per la generazione elettrica. Lo studio si inserisce nel contesto attuale in cui si pone sempre maggiore attenzione verso tecnologie energetiche sostenibili, nelle quali l'idrogeno viene sempre di più considerato come un vettore energetico strategico per favorire la decarbonizzazione dei sistemi energetici.

Attraverso la modellazione del processo e la successiva simulazione di quest'ultimo, è stato possibile analizzare l'influenza dei principali parametri operativi sulle prestazioni complessive del sistema. In particolare, lo studio si è concentrato sulla valutazione degli effetti del fattore  $\lambda$ , delle pressioni operative del ciclo e delle configurazioni di recupero termico, al fine di individuare le condizioni più favorevoli per il funzionamento dell'impianto.

I principali risultati ottenuti possono essere sintetizzati come segue:

- La produzione di idrogeno dipende unicamente dalla quantità di alluminio alimentata, mentre il fattore  $\lambda$  influisce sulla quantità di acqua residua e sulla massa totale di fluido che circola nell'impianto. Un aumento di  $\lambda$  comporta un maggior consumo di energia termica e una riduzione della frazione di energia convertibile in lavoro utile.
- È stato individuato un valore ottimale del fattore  $\lambda$ , pari a 4, che consente di massimizzare le prestazioni energetiche complessive del sistema. Valori superiori peggiorano il rendimento e il lavoro specifico netto.
- Le pressioni operative del ciclo sono determinanti: aumentare la pressione massima incrementa l'energia estraibile dalla turbina, mentre mantenere la pressione minima vicina a quella atmosferica evita l'uso di un compressore, semplificando l'impianto.
- Il recuperatore di calore mostra che le condizioni ottimali per la potenza netta o il rendimento complessivo non coincidono necessariamente con quelle per massimizzare il recupero termico, evidenziando la necessità di un compromesso progettuale tra efficienza e semplicità impiantistica.
- Le configurazioni di ottimizzazione energetica esplorate producono miglioramenti modesti, suggerendo che eventuali interventi devono essere valutati attentamente in termini di costi e complessità tecnologica.

- Complessivamente, lo studio ha permesso di identificare i principali parametri che influenzano il comportamento del sistema e di fornire indicazioni utili per la progettazione e l'ottimizzazione di impianti basati sulla produzione di idrogeno tramite alluminio e acqua.

Si sottolinea che il lavoro si basa su una modellazione semplificata e su analisi prevalentemente termodinamiche: perdite di calore e dispersioni di carico non sono state considerate. Pertanto, i risultati devono essere interpretati come una valutazione preliminare, utile nella fase iniziale di progettazione.

Sviluppi futuri del lavoro potrebbero includere un'analisi economica del processo e studi più approfonditi sulla sostenibilità complessiva del sistema.

In una prospettiva più ampia, lo sviluppo di tecnologie efficienti e sostenibili per la produzione di idrogeno rappresenta uno degli elementi principali della transizione verso sistemi energetici a basse emissioni di carbonio. In questo contesto, soluzioni basate sull'uso di vettori energetici alternativi possono offrire nuove opportunità per migliorare l'efficienza e la flessibilità dei sistemi energetici. Le simulazioni e le analisi condotte nel presente lavoro forniscono quindi indicazioni utili per futuri sviluppi nel campo della produzione sostenibile di idrogeno.

# Appendice

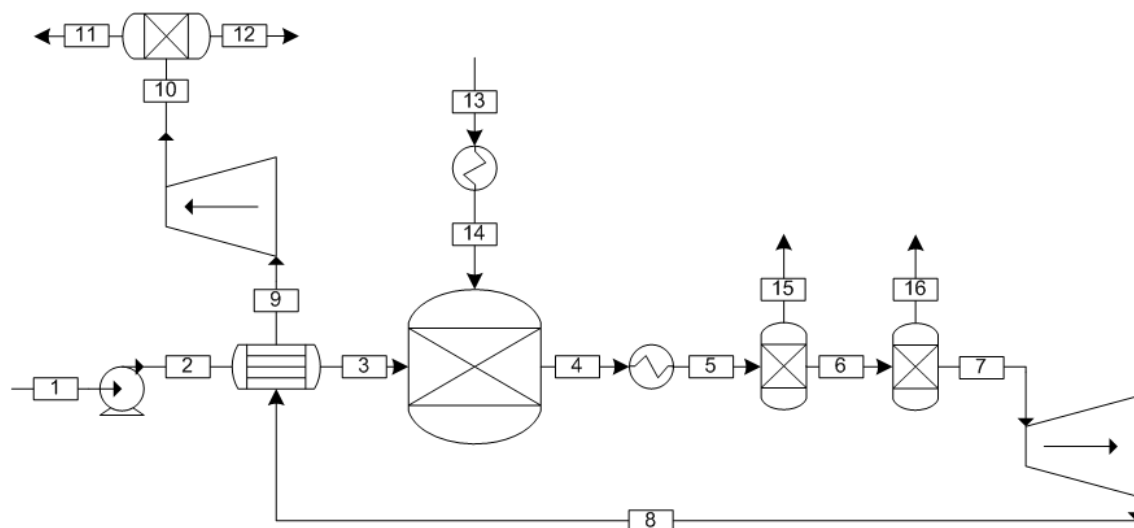


Figura 1: Numerazione sezioni d'impianto - Configurazioni 1, 2 e 3

Sezione	T [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	$\dot{m}$ [kg/s]
1	25	1	-15972,1	4
2	25,23	10	-15970,2	4
3	173	10	-15285,2	4
4	909	10	-12142,0	5
5	817,8	10	-12377,1	5
6	817,8	10	-10745,7	3,205
7	817,8	10	-10983,0	3,155
8	391,91	0.5	-12099,7	3,155
9	26,68	0.5	-12968,2	3,155
10	99,15	1	-12802,7	3,155
11	99,15	1	-15635,1	3,049
12	99,15	1	1066,2	0,106
13	25	1	3795,7	1
14	700	1	4159,6	1
15	817,8	10	-15289,9	1,795
16	817,8	10	4230,7	0,05

Tabella 1: Condizioni termodinamiche delle correnti di processo Configurazione 1

Sezione	T [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	$\dot{m}$ [kg/s]
1	25	1	-15972,1	4
2	25,49	20	-15968,0	4
3	158	20	-15357,6	4
4	909	20	-12143,9	5
5	817.8	20	-12379,4	5
6	817.8	20	-10749,4	3,205
7	817.8	20	-10986,8	3,155
8	355,45	0,7	-12190,1	3,155
9	28,82	0,7	-12964,1	3,155
10	64,87	1	-12882,2	3,155
11	64,87	1	-15791,6	3,049
12	64,87	1	571,8	0,106
13	25	1	3795,7	1
14	700	1	4159,6	1
15	817.8	20	-15289,9	1,795
16	817.8	20	4231,0	0,05

Tabella 2: Condizioni termodinamiche delle correnti di processo Configurazione 2

Sezione	T [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	$\dot{m}$ [kg/s]
1	25	1	-15972,1	4
2	26,01	40	-15965,9	4
3	146	40	-15385,7	4
4	909	40	-12145,8	5
5	817.8	40	-12381,8	5
6	817.8	40	-10753,1	3,205
7	817.8	40	-10990,6	3,155
8	322,8	1	-12228,0	3,155
9	27,62	1	-12963,6	3,155
10	27,62	1	-12940,2	3,155
11	27,62	1	-15905,4	3,049
12	817.8	40	211,0	0,106
13	817.8	40	3795,7	1
14	817.8	40	4159,6	1
15	817.8	40	-15289,9	1,795
16	817.8	40	4231,4	0,05

Tabella 3: Condizioni termodinamiche delle correnti di processo Configurazione 3

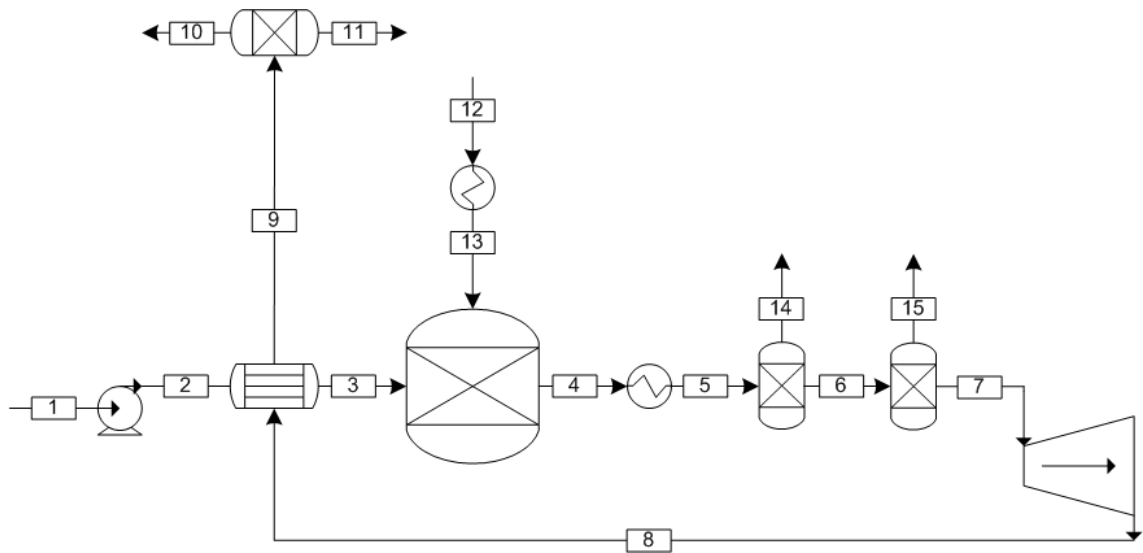


Figura 2: Numerazione sezioni d'impianto - Configurazione 4

Sezione	T [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	$\dot{m}$ [kg/s]
1	25	1	-15972,1	4
2	26,01	40	-15963,8	4
3	146	40	-15413,6	4
4	909	40	-12147,6	5
5	817,8	40	-12384,2	5
6	817,8	40	-10756,8	3,205
7	817,8	40	-10994,3	3,155
8	322,8	1	-12270,5	3,155
9	27,62	1	-12968,1	3,155
10	27,62	1	-15960,2	3,049
11	27,62	1	37,7	0,106
12	25	1	3795,7	1
13	700	1	4159,6	1
14	817,8	40	-15289,9	1,795
15	817,8	40	4231,8	0,05

Tabella 4: Condizioni termodinamiche delle correnti di processo Configurazione 4

# Elenco delle figure

3.1	Schema impianto . . . . .	22
3.2	Temperatura in camera di combustione in funzione della frazione molare di alluminio . . . . .	24
3.3	Temperatura di combustione in funzione di $\lambda$ . . . . .	26
3.4	Effetto della temperatura di combustione . . . . .	27
3.5	Dominio di $\beta$ . . . . .	29
4.1	IF97 . . . . .	30
4.2	PENG-ROB . . . . .	30
4.3	Schema d'impianto nell'interfaccia di Aspen Plus . . . . .	31
4.4	Configurazione reattore . . . . .	31
4.5	Configurazione reazione . . . . .	31
4.6	Configurazione turbina . . . . .	33
4.7	Configurazione compressore . . . . .	33
4.8	Configurazione dello scambiatore di calore HX . . . . .	35
4.9	Diagramma di scambio termico T-Q . . . . .	35
5.1	Portata massica di acqua in uscita in funzione di $\lambda$ . . . . .	41
5.2	Grafico Lavoro-Rendimento $P_{max}=10$ bar . . . . .	42
5.3	Grafico Lavoro-Rendimento $P_{max}=20$ bar . . . . .	42
5.4	Grafico Lavoro-Rendimento $P_{max}=30$ bar . . . . .	43
5.5	Grafico Lavoro-Rendimento $P_{max}=40$ bar . . . . .	43
5.6	Potenza prodotta dalla turbina in funzione di $\lambda$ . . . . .	44
5.7	Lavoro specifico della turbina in funzione di $\lambda$ . . . . .	45
5.8	Potenza assorbita dal compressore in funzione di $\lambda$ . . . . .	46
5.9	Lavoro specifico del compressore in funzione di $\lambda$ . . . . .	46
5.10	Potenza assorbita dalla pompa in funzione di $\lambda$ . . . . .	47
5.11	Lavoro specifico della pompa in funzione di $\lambda$ . . . . .	48
5.12	Potenza netta in funzione di $\lambda$ . . . . .	48
5.13	Lavoro specifico netto in funzione di $\lambda$ . . . . .	49
5.14	Rendimento totale d'impianto in funzione di $\lambda$ . . . . .	49
5.15	Lavoro specifico della turbina in funzione di $P_{min}$ . . . . .	50
5.16	Lavoro specifico del compressore in funzione di $P_{min}$ . . . . .	50
5.17	Diagramma T-Q Configurazione 1 . . . . .	52
5.18	Diagramma T-Q Configurazione 2 . . . . .	53
5.19	Diagramma T-Q Configurazione 3 . . . . .	54
5.20	Diagramma T-Q Configurazione 4 . . . . .	55
5.21	Potenze nette e lavori specifici netti delle quattro configurazioni . . . . .	56
5.22	Rendimento totale delle quattro configurazioni . . . . .	57

5.23	Schema d'impianto non pressurizzato . . . . .	57
5.24	Conduttanza termica globale in funzione di $\beta$ . . . . .	59
5.25	Temperatura media logaritmica e Area di scambio in funzione di $\beta$ . . . . .	59
5.26	Calore scambiato nel recuperatore in funzione di $\beta$ . . . . .	60
5.27	Schema d'impianto con recupero termico dalla corrente di alluminio incombusto . . . . .	61
5.28	Schema d'impianto con recupero termico dalla corrente d'acqua in uscita	62
1	Numerazione sezioni d'impianto - Configurazioni 1, 2 e 3 . . . . .	66
2	Numerazione sezioni d'impianto - Configurazione 4 . . . . .	68

# Bibliografia

- [1] S. Karlilar Pata and M. Balcilar, “Decarbonizing energy: Evaluating fossil fuel displacement by renewables in oecd countries,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, pp. 31304–31313, 2024.
- [2] D-Carbonize, “Comparison of ghg emissions by sector.” <https://d-carbonize.eu/greenhouse-gases/comparison-ghg-emissions-sector/>, 2025. Accessed: 12 March 2026.
- [3] European Commission, “2030 climate, energy and environmental targets.” [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets\\_it](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets_it), 2024. Accessed: 8 March 2026.
- [4] Eurostat, “Energy statistics – latest developments in the eu.” <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20260114-1>, 2026. Accessed: 8 March 2026.
- [5] Eurostat, “Eu primary energy consumption decreased by 1% in 2024.” <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20251211-1>, 2025. Accessed: 8 March 2026.
- [6] European Environment Agency, “Share of energy consumption from renewable sources in europe.” <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from>, 2025. Accessed: 8 March 2026.
- [7] Reuters, “Wind and solar beat fossil fuels in eu power mix in 2025, energy think tank says,” 2026. Accessed: 8 March 2026.
- [8] International Energy Agency, “Hydrogen – breakthrough agenda report 2025.” <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/hydrogen>, 2025. Accessed: 8 March 2026.
- [9] J. M. M. Marín Arcos and D. M. F. Santos, “The hydrogen color spectrum: Techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production,” *Gases*, vol. 3, no. 1, pp. 25–46, 2023.
- [10] M. A. Alreshidi, K. K. Yadav, G. Shoba, A. Gacem, S. Padmanabhan, S. Ganesan, L. Guganathan, J. K. Bhutto, P. Saravanan, A. M. Fallatah, M. A. Abo El-Khair, J. F. Almalawi, M. W. Alam, C. Kavitha, P. Tamizhdurai, and A. Subramani, “Hydrogen in transport: a review of opportunities, challenges, and sustainability concerns,” *RSC Advances*, vol. 15, pp. 23874–23909, 2025.

- [11] J. Hwang, K. Maharjan, and H. Cho, "A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 74, pp. 28629–28648, 2023.
- [12] M. T. Fernández, J. Doe, and J. Smith, "Recent advances in materials for hydrogen storage," *Materials*, vol. 17, no. 21, p. 5152, 2024.
- [13] M. Obaidat, A. Al-Ghandoor, P. Phelan, R. Villalobos, and A. Alkhalidi, "Energy and exergy analyses of different aluminum reduction technologies," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1216, 2018.
- [14] R. Majumder, "Aluminium recycling: The backbone of a circular, low-carbon economy." <https://blog.alcircle.com/aluminium-recycling-the-backbone-of-a-circular-low-carbon-economy/>, 2025. Accessed: 8 March 2026.
- [15] CIAL – Consorzio Nazionale Imballaggi Alluminio, "Results of recycling 2024." <https://www.cial.it/en/results-of-recycling/>, 2024. Accessed: 8 March 2026.
- [16] P. Boudreau, M. Johnson, and J. M. Bergthorson, "Techno-economic assessment of aluminum as a clean energy carrier to decarbonize remote industries," *Energy Advances*, vol. 3, pp. 1919–1931, 2024.
- [17] L. Barelli, L. Trombetti, A. Di Michele, L. Gammaitoni, J. Asenbauer, and S. Passerini, "Aluminum steam oxidation in the framework of long-term energy storage: Experimental analysis of the reaction parameters effect on metal conversion rate," *Energy Technology*, vol. 10, no. 9, p. 2200441, 2022.
- [18] N. Musicco, M. Gelfi, P. Iora, M. Venturelli, N. Artioli, L. Montorsi, and M. Milani, "A review of hydrogen generation methods via aluminum-water reactions," *International Journal of Thermofluids*, vol. 27, p. 101152, 2025.
- [19] H. Balachandran, S. Kumar, S. Venkatesh, and K. Venugopal, "Hydrogen generation from aluminum water reaction for portable power and hydrogen storage: A review," *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, 2018.
- [20] F. Franzoni, M. Milani, L. Montorsi, and V. Golovitchev, "A novel concept for combined hydrogen production and power generation." DISMI – University of Modena and Reggio Emilia; Chalmers University of Technology, 2025.
- [21] S. Mercati, M. Milani, L. Montorsi, and F. Paltrinieri, "Optimization of the working cycle for a hydrogen production and power generation plant based on aluminum combustion with water." Technical report / preprint, 2025.
- [22] M. Milani, F. Irato, S. Mercati, L. Montorsi, and M. Stefani, "Experimental and numerical analysis of the combustor for a cogeneration system based on the aluminum/water reaction." Department of Sciences and Methods for Engineering, University of Modena and Reggio Emilia, Reggio Emilia, Italy, 2025.