

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

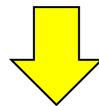
Relazione per la prova finale
**«L'IDROGENO VERDE NEL PROCESSO DI
DECARBONIZZAZIONE»**

Tutor universitario:
Prof. Angelo Zarrella

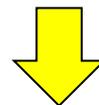
Laureanda:
Francesca Pompa

Padova, 14/09/2022

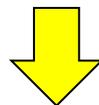
L'UTILIZZO DELLE FONTI FOSSILI HA CONTRIBUITO
NEGATIVAMENTE SUL CAMBIAMENTO CLIMATICO



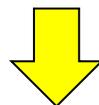
EMISSIONI DI GAS SERRA A LIVELLO GLOBALE
PORTANDO ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA MEDIA
GLOBALE



È NECESSARIO RIDURRE LE EMISSIONI



BISOGNA PENSARE AD UNA TRANSIZIONE VERSO
UN'ECONOMIA PIÙ SOSTENIBILE A BASSO IMPATTO
AMBIENTALE



IDROGENO VERDE

VANTAGGI

- BASSO IMPATTO CLIMATICO
- STOCCABILE
- VERSATILE
- INTERAMENTE PRODOTTO DA FONTE RINNOVABILE

OBIETTIVO DEL LAVORO



ANALIZZARE LE TECNOLOGIE ESISTENTI E IN VIA DI
SVILUPPO PER LA **PRODUZIONE**, LO **STOCCAGGIO** E IL
TRASPORTO DELL'IDROGENO VERDE, SOFFERMANDOMI
SUL LORO PROGRESSO E LE LORO LIMITAZIONI

RAPPRESENTA CIRCA IL 14% DELLA PRODUZIONE MONDIALE DI ENERGIA E SFRUTTA RESIDUI DELLE COLTURE AGRICOLE, RIFIUTI ANIMALI E RIFIUTI ORGANICI URBANI

BIOMASSA

SFRUTTA AMBIENTI CON PRESSIONI E TEMPERATURE TALI DA AVERE UNA BASSA RICHIESTA DI ENERGIA

PROCESSO
TERMOCHIMICO

PROCESSO
BIOLOGICO

LIQUEFAZIONE

PIROLISI

GASSIFICAZIONE

FOTOTROFICO

DARK FERMENTATION

PROCESSO TERMICO CHE AVVIENE SENZA L'UTILIZZO DI OSSIGENO

CONVERSIONE TERMOCHIMICA CHE SFRUTTA ARIA, OSSIGENO O VAPORE

PROCESSO DI FOTOSINTESI CHE INCLUDE:
❖ FOTOLISI DIRETTA
❖ FOTOLISI INDIRECTA
❖ FOTO-FERMENTAZIONE

FERMENTAZIONE ETEROTROFICA

PRODOTTI DEI PROCESSI

- BIOCHAR
- BIO-OLIO
- GAS (TRA CUI IDROGENO)

○ SYNGAS

- INFLUENZATO DA:
- PRE-TRATTAMENTO
 - MATERIA PRIMA
 - CONFIGURAZIONE DEL FOTOBIOREATTORE
 - DISTRIBUZIONE E DENSITÀ DI LUCE

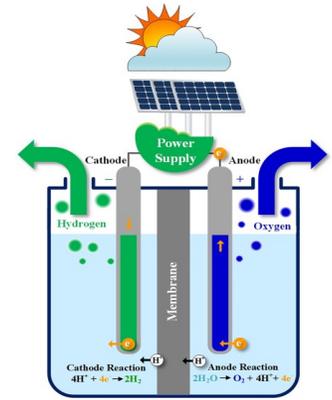
- VANTAGGI:**
- NON RICHIEDE ENERGIA ESTERNA
 - NON RICHIEDE OSSIGENO
 - SFRUTTA LE BIOMASSE DI SCARTO E I RIFIUTI ORGANICI

SVANTAGGIO:
FORMAZIONE DI **CATRAME** CHE SFAVORISCE LA FORMAZIONE DI IDROGENO, CORRODE LE APPARECCHIATUREE E BLOCCA I GASETTI

CONTROLLANDO PARAMETRI DI ESERCIZIO DEI MATERIALI SI RIESCE A CONTROLLARE LA SUA FORMAZIONE

WATER SPLITTING

ENERGIA ELETTRICA, ENERGIA BIOLOGICA, ENERGIA TERMALE E ENERGIA MECCANICA

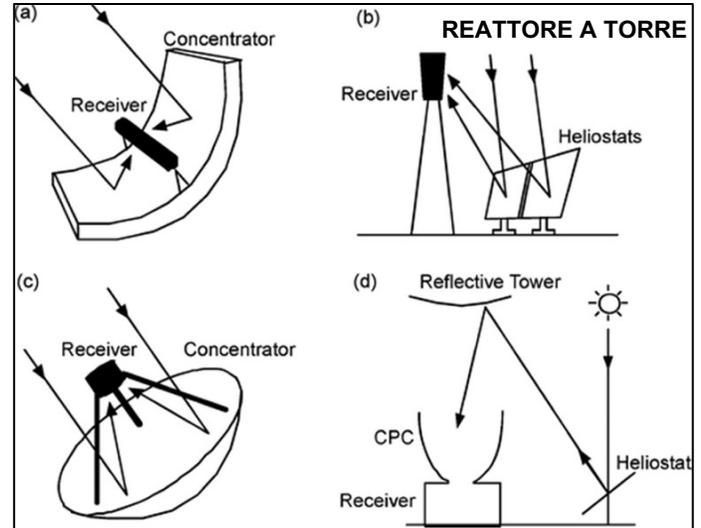


PROCESSO TERMOCHIMICO

PROCESSO TERMICO CHE PRODUCE L'IDROGENO GRAZIE AD UNA SERIE DI REAZIONI CHIMICHE

CONDIZIONI RICHIESTE:

- PRESSIONE > 1 atm
- SISTEMA CHE OPERI A TEMPERATURA > 2227 °C
- SCAMBIATORE DI CALORE CHE OPERI AD ELEVATE TEMPERATURE



PROCESSO CHE PERMETTE DI SCINDERE LA MOLECOLA DELL'ACQUA SFRUTTANDO L'ENERGIA ELETTRICA

ELETTROLISI

TALE REAZIONE AVVIENE IN UN'UNITÀ CHIAMATA ELETTROLIZZATORE. È FORMATO DA UN ANODO E UN CATODO SEPARATI DA UNA MEMBRANA

SVANTAGGI:

- DURATA DI VITA PIÙ BREVE
- COSTI ELEVATI
- DEGRADAZIONE

PEMEC

AUTO-REFORMING TERMICO

TECNOLOGIA DELL'ELETTROLISI A MEMBRANA ELETTROLITICA POLIMERICA TESTATA IN VARI STUDI CON ALIMENTAZIONE AD ENERGIA RINNOVABILE

TURBINA EOLICA DA 10kW | IMPIANTI FOTOVOLTAICI

INTEGRAZIONE DEI PROCESSI DI ATR E ELETTROLISI

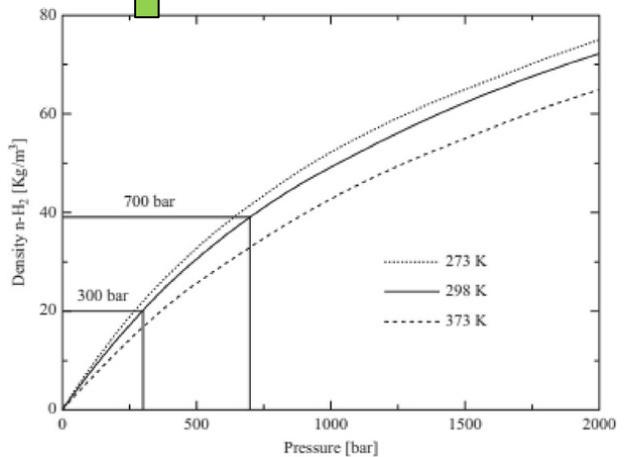
SI SFRUTTA L'OSSIGENO PRODOTTO DALL'ELETTROLISI COME FORNITORE DI CALORE E COME AGENTE OSSIDANTE

IN FORMA COMPRESSA

IDROGENO STOCCATO IN BOMBOLE A GAS IN ACCIAIO CON UNA PRESSIONE DI ESERCIZIO DI 200 bar

SONO STATE PROGETTATE NUOVE BOMBOLE CHE RAGGIUNGONO PRESSIONI DI 800 bar PER RIUSCIRE AD AUMENTARE LA DENSITÀ VOLUMETRICA

AD ALTE DENSITÀ VOLUMETRICHE CORRISPONDONO ALTE PRESSIONI



PROBLEMA PER LA SICUREZZA

IN FORMA LIQUIDA

LIQUEFAZIONE CRIOGENICA

È UN PROCESSO CHE CONSISTE NELLA TRASFORMAZIONE DI UN GAS, IN CONDIZIONI ATMOSFERICHE, IN FORMA LIQUIDA A PRESSIONE ATMOSFERICA MA A TEMPERATURE CRIOGENICHE (< 23 K)

VANTAGGI

- RISOLVE IL PROBLEMA DELLA SICUREZZA
- AUMENTA LA DENSITÀ DI ENERGIA DELL'IDROGENO
- SI OTTENGONO ELEVATE DENSITÀ VOLUMETRICHE DELL'IDROGENO A PRESSIONE ATMOSFERICA

SI PASSA DA 42 g/L CON L'IDROGENO COMPRESSO A 70 g/L DELL'IDROGENO IN FORMA LIQUIDA

PROBLEMA

BOIL-OFF
DURANTE IL PROCESSO DI LIQUEFAZIONE L'IDROGENO TENDE AD EVAPORARE A CAUSA DEL TRSFERIMENTO DI CALORE AL LIQUIDO

QUESTO METODO NECESSINA DI UN CONTENITORE ISOLANTE PER MINIMIZZARE LA PERDITA DI ENERGIA

IN FORMA CRIO-COMPRESSA

METODO CHE COMBINA LA TECNICA DI COMPRESIONE E DI LIQUEFAZIONE

PROCESSO AVVIENE IN DUE FASI

- COMPRESIONE
- RAFFREDDAMENTO

IL RAFFREDDAMENTO DELL'IDROGENO IN FORMA GASSOSA PORTA AD UN NOTEVOLE AUMENTO DELLA DENSITÀ DI ENERGIA E DELLA CAPACITÀ DI STOCCAGGIO

PER FARE QUESTO VIENE USATO L'AZOTO

PORTA AD UN AUMENTO DELLA DENSITÀ VOLUMETRICA DI TRE VOLTE RISPETTO ALL'IDROGENO NON RAFFREDDATO

VANTAGGIO	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none"> ○ I SERBATOI CRIO-COMPRESI SONO I PIÙ SICURI GRAZIE AL LORO DESIGN A DOPPIO STRATO CHE PROTEGGE DALLE INTRUSIONI CHIMICHE E MECCANICHE 	<ul style="list-style-type: none"> ○ IL PERIODO PIÙ LUNGO IN CUI L'IDROGENO PUÒ ESSERE CONSERVATO AL LORO INTERNO È DI SETTE GIORNI ○ QUESTA TECNOLOGIA NON È DISPONIBILE SUL MERCATO

IN FORMA SOLIDA

CHEMISORPTION

PHYSISORPTION

LA TECNOLOGIA SI BASA SU PROCESSI DI **ASSORBIMENTO CHIMICO E FISICO** DELL'IDROGENO CHE AVVIENNGONO SU MATERIALI DI SUPPORTO

→ L'IDROGENO VIENE IMMAGAZZINATO SOTTO FORMA DI IDRATO FINO AL 5% IN PESO

MATERIALI USATI

- IDRURI METALLICI
- NANOTUBI DI CARBONIO
- CLATRATI IDRATI

- AMMONIACA
- METANOLO
- ETANOLO

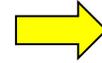
→ SFRUTTANO **IL REFORMING CATALITICO** DEL VETTORE STESSO PER OTTENERE L'IDROGENO

PROPRITÀ DEI GAS IDRATI:

- SICUREZZA: NON ESPLODONO E SONO AUTOESTINGUENTI
- ECONOMICITÀ: LA COMPONENTE PRINCIPALE È L'ACQUA
- EFFICIENZA
- ECOSOSTENIBILITÀ: SONO RIDOTTI AL MINIMO I PROBLEMI DI SMALTIMENTO

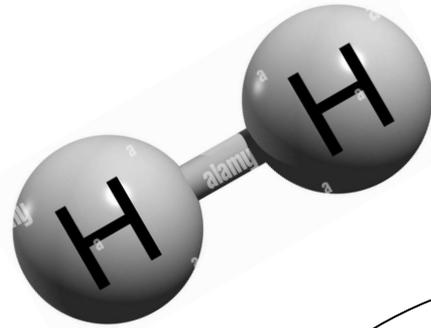
NEI GIACIMENTI L'IDROGENO SI TROVA ALLO STATO GASSOSO

- ALLA TEMPERATURA DI 25 °C
- A PRESSIONE ATMOSFERICA
- HA UNA BASSA TEMPERATURA CRITICA ($T_c = 33$ K)



FORTE INTERAZIONE DI REPULSIONE
TRA LE MOLECOLE DI IDROGENO

QUINDI BISOGNA USARE TECNOLOGIE
CHE RIDUCANO LA MAGGIOR PARTE
DEL VOLUME DEL GAS PER MOTIVI DI
SICUREZZA



È UNO DEI METODI PIÙ UTILIZZATI E PREVEDE L'UTILIZZO DI
BOMBOLE DA GAS O TUBI SOTTO PRESSIONE IN UN RANGE
DI 200-500 bar

UN RIMORCHIO TUBOLARE CON CILINDRI IN ACCIAIO
PUÒ IMMAGAZZINARE FINO A 25.000 I DI IDROGENO
COMPRESSO A 200 bar

I CILINDRI IN COMPOSITO DI FIBRA DI CARBONIO CON
LINER IN POLIETILENE AD ALTA DENSITÀ POSSONO
TRASPORTARE FINO A 39.600 I DI IDROGENO

- I SERBATOI DI QUESTA TIPOLOGIA VENGONO REALIZZATI CON
MATERIALI PIÙ LEGGERI
- VIENE MASSIMIZZATA LA QUANTITÀ DI IDROGENO
TRASPORTATA PER RIMORCHIO
 - POSSONO FUNZIONARE A PRESSIONI ELEVATE
 - SONO PIÙ ECONOMICHE DI UN COSTO DI 2,86 DOLLARI PER
kg DI H₂ CONSEGNAO

TRASPORTO SOTTO FORMA DI GAS COMPRESSO

**TRASPORTO IN FORMA
LIQUIDA**



LA DENSITÀ DELL'IDROGENO
LIQUIDO È SUPERIORE A QUELLA
DELL'IDROGENO GASSOSO



CON QUESTO METODO SI RIESCE A
TRASPORTARE PIÙ IDROGENO A PARITÀ DI
SPAZIO OCCUPATO

IL PROCESSO DI LIQUEFAZIONE COMPORTA
UNA PERDITA PARTE DI ENERGIA

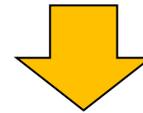
40% PER TRASFERIMENTO DI CALORE AL LIQUIDO DURANTE IL PROCESSO

EVAPORAZIONE O EBOLLIZIONE DI IDROGENO LIQUEFATTO

AUMENTA QUANTO PIÙ SI UTILIZZANO PICCOLI
SERBATOI CON GRANDI RAPPORTI SUPERFICIE-
VOLUME

VANTAGGIO:

- È UN APPROCCIO CONVENIENTE PER PER INVESTIMENTI A BREVE TERMINE



INFATTI RIDURRE I COSTI DI LIQUEFAZIONE DELL'IDROGENO PUÒ AVERE UN IMPATTO POSITIVO SUI COSTI DI SPEDIZIONE SU CAMION,
NAVE E FERROVIA

GASDOTTI

IL FUNZIONAMENTO SI BASA SU UNA STAZIONE DI COMPRESSIONE CHE UTILIZZA IL SISTEMA DI TRASMISSIONE PER FORNIRE L'ENERGIA NECESSARIA PER GARANTIRE CHE IL GAS CONTINUI A FLUIRE CON UNA PORTATA E AD UNA PRESSIONE REGOLARE, IN BASE AI REQUISITI

- HANNO UN BASSO IMPATTO AMBIENTALE
- SONO UN'OPZIONE CONVENIENTE DA UN PUNTO DI VISTA ECONOMICO PER GRANDI CENTRALI (~1000 TONNELLATE METRICHE/GIORNO)

LE PROBABILITÀ CHE UN INCIDENTE SI VERIFICHÌ A CAUSA DI PERDITE O ESPLOSIONI SONO MOLTO RIDOTTE

- VANTAGGI:**
- LA MAGGIOR PARTE DELLE CONDUTTURE SONO INTERRATE
 - ANCHE SE L'INVESTIMENTO DI CAPITALE PER LA POSA È GRANDE, I SUCCESSIVI COSTI DI MANUTENZIONE E GESTIONE DELLA RETE DEI GASDOTTI SONO BASSI

- SVANTAGGI:**
- IL TRASPORTO DELL'IDROGENO ATTRAVERSO GASDOTTI HA PIÙ PROBABILITÀ DI ESSERE SOGGETTO A DELLE PERDITE, RISPETTO AD ALTRI FLUIDI

PER QUESTA SERIE DI MOTIVI VENGONO PROGETTATI DEI COMPONENTI DI UNA RETE DI GASDOTTI REALIZZATI PROPRIO PER IL TRASPORTO DELL'IDROGENO

PER AUMENTARE LA VELOCITÀ CON CUI VIENE TRASPORTATO, DATO CHE LA SUA DENSITÀ È MOLTO BASSA, DEVE ESSERE COMPRESSO TRA I 10 E I 20 bar

I MATERIALI CHE LI COSTITUISCONO SONO MOLTO FRAGILI E CAUSANO A LUNGO ANDARE LA DEGRADAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE E GUASTI NELLE TUBAZIONI

L'IDROGENO PUÒ ESSERE TRASPORTATO IN GASDOTTI GIÀ ESISTENTI MA **NON È** APPROPRIATO SFRUTTARE I GASDOTTI USATI PER IL GAS PERCHÉ I MATERIALI POLIMERICI DI CUI È FATTO SONO POROSI

CIÒ CHE È POSSIBILE FARE INVECE È LA **MISCELAZIONE DELL'IDROGENO CON IL GAS NATURALE** E SFRUTTARE I GASDOTTI ESISTENTI

L'IDROGENO TENDEREBBE A SCAPPARE

MISCELAZIONE DELL'IDROGENO CON GAS NATURALE

TECNOLOGIE DISTINTE DI SEPARAZIONE E PURIFICAZIONE SONO STATE UTILIZZATE PER ESTRARRE L'IDROGENO DAL GAS NATURALE IN GIACIMENTI CHE SIANO IL PIÙ VICINO POSSIBILE AL PUNTO DI UTILIZZO FINALE

MODELLO MATEMATICO *HYDROGEN BLENDED NATURAL GAS (HBNG)*

STUDIATO PER CAPIRE LE INFLUENZE CHE LA MISCELAZIONE HA SULLE CARATTERISTICHE IDRAULICHE E TERMICHE DELLA RETE DEI GASDOTTI

VANTAGGI



- POTREBBE ESSERE IN GRADO DI RIDURRE LA RESISTENZA ALL'ATTRITO DELLA TUBAZIONE
- POTREBBE AUMENTARE LA PORTATA IN VOLUME
- MINIMIZZA I RISCHI DELL'UTILIZZO DI ALTRI METODI UTILIZZATI

SVANTAGGI



- LIVELLI DI MISCELA ELEVATI, AL DI SOPRA DEL 50%, PRESENTANO MOLTI PROBLEMI

- SCELTA DI MATERIALI PER LE TUBAZIONI
- L'IDROGENO HA UN'AMPIA GAMMA DI INFIAMMABILITÀ E BASTA UNA PICCOLA QUANTITÀ DI ENERGIA PER ACCENDERLO

L'ECONOMIA DELL'IDROGENO PUÒ DIVENTARE REALTÀ SE SI TROVA UN METODO DI PRODUZIONE, STOCCAGGIO E TRASPORTO **PULITO, SOSTENIBILE E CONVENIENTE**

● STOCCAGGIO

A CAUSA DI PROBLEMI DI SICUREZZA E COSTI ELEVATI, I **GAS COMPRESSI**, I **LIQUIDI** E LO **STOCCAGGIO CRIO-COMPRESSO** NON SONO POTENZIALI CANDIDATI PER APPLICAZIONI MOBILI

LO **STOCCAGGIO IN SOLIDI**, INVECE, È IN CONTINUO MIGLIORAMENTO E STA DIVENTANDO SEMPRE PIÙ EFFICIENTE

● TRASPORTO

SAPPIAMO CHE IL TRASPORTO DI IDROGENO OFFRE RISULTATI PROMETTENTI, TUTTAVIA È NECESSARIO CONSIDERARE IN MODO ACCURATO ALCUNI PROBLEMI CHE POSSONO SORGERE NELL'UTILIZZO DELLE TECNICHE CHE SONO STATE RIPORTATE

LA DISTRIBUZIONE DI IDROGENO CON **RIMORCHI TUBOLARI SENZA LIQUEFAZIONE** È PIÙ CONVENIENTE DA UN PUNTO DI VISTA ECONOMICO

IL PUNTO DI EBOLLIZIONE DELL'IDROGENO RAPPRESENTA TUTT'ORA UN PROBLEMA INSIEME AL DETERIORAMENTO DELLE TUBAZIONI CHE DIPENDE DAL MATERIALE E DALLE CONDIZIONI DI TEMPERATURA E PRESSIONE DI ESERCIZIO

IL SUCCESSO E LA REALIZZAZIONE DI UN'ECONOMIA SOSTENIBILE BASATA SULL IDROGENO DIPENDONO DA DALLO STUDIO, DALLE RICERCHE E DALLE SPERIMENTAZIONI PER IDENTIFICARE LE AREE PIÙ PROMETTENTI PER I FUTURI SVILUPPI NELLA PRODUZIONE, NELLO STOCCAGGIO E NEL TRASPORTO DELL'IDROGENO

GRAZIE DELL'ASCOLTO