

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

Scuola di Dottorato
INDUSTRIAL INNOVATION ENGINEERING
XXVIII CICLO

**METODOLOGIE INNOVATIVE PER L'ANALISI E LA
PROGETTAZIONE DI
SISTEMI INDUSTRIALI COMPLESSI.**

Relatore

Chiar.ma Prof. Ing. Bianca Rimini

Coordinatore/Direttore della Scuola di Dottorato

Chiar.mo Prof. Ing. Mauro dell'Amico

Tesi di Dottorato

Roberto Saponelli

Correlatore

Maurizio Lizzano

Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Barozzi per il suggerimento e la Professoressa Rimini per avermi assistito.

Ci sono persone a cui il ringraziamento arriva solo lasciandone fluire l'aiuto; io sono stato molto fortunato, ne ho incontrate tantissime, più di quelle che avrei mai potuto immaginare.

Grazie a mia Sorella, infinita come sempre, a Nonna Silvana e Nonno Franco, a Maria Chiara, a Maurizio e Federico fondamentali, Paolo, Alfonso, Luca, Elia, Lorenzo, Fabio, Giada, Emanuele, Valentina e tutto il D4P, ai ragazzi di Design, Silvia, Franz, Marco e a tutti gli altri che mi hanno aiutato e soprattutto ascoltato.

Un ringraziamento "speciale" anche a quelli che mi hanno contrastato, soprattutto all'inizio, donandomi la forza per crederci fino in fondo.

Forse è stato l'argomento, intrigante ed attuale, oppure la loro semplice bontà, ma così è successo e spero possa essere di buon auspicio per la divulgazione dei messaggi che si possono leggere solo tra le righe.

La terra è un'alchimia complessa e noi siamo solo una parentesi di essa, forse per osservarla è davvero necessario guardare con gli stessi occhi che da milioni di anni sviluppano e trasformano materia e principi fisici, ogni giorno ... senza saperlo e soprattutto senza stancarsi....

Roberto Saponelli
5 Maggio 2017

INDICE

| | |
|--|-----------|
| <i>Introduzione</i> | 1 |
| <i>Abstract</i> | 3 |
| <i>Mapa dei Capitoli</i> | 5 |
| CAPITOLO 1 PROGRESSI & CULTURA | 6 |
| 1.1 <i>Dal mito alla scienza: il sapere diventa umano e comincia il viaggio</i> | 6 |
| 1.2 <i>Origini & Tecnologia</i> | 7 |
| 1.3 <i>Luhmann e la Teoria dei Sistemi ...NON SOLO Sociali</i> | 8 |
| 1.4 <i>Il concetto del concerto</i> | 14 |
| CAPITOLO 2 IL CAE E LA PROGETTAZIONE | 15 |
| 2.1 <i>Elementi che costituiscono un modello di simulazione</i> | 15 |
| 2.2 <i>La modellazione</i> | 22 |
| 2.3 <i>Definizione di modello 0D</i> | 24 |
| 2.4 <i>Definizione di modello 1D</i> | 26 |
| 2.5 <i>Definizione di modello 3D</i> | 26 |
| 2.6 <i>Approcci grid - based e meshfree</i> | 27 |
| CAPITOLO 3 ALAN TURING E I MODELLI MATEMATICI | 35 |
| 3.1 <i>Ferro e ottone</i> | 35 |
| 3.2 <i>Il Titano Gabbato</i> | 37 |
| 3.3 <i>Le meraviglie del Potere</i> | 38 |
| 3.4 <i>La matematica e la natura, Il modello della Morfogenesi ideato da Alan Turing</i> | 39 |
| CAPITOLO 4 LA CO₂ E LE SUE IMPLICAZIONI | 41 |
| 4.1 <i>Carbon Footprint: Emissioni di CO₂ e stili di vita</i> | 42 |
| 4.2 <i>L'anidride carbonica e l'effetto serra</i> | 46 |
| 4.3 <i>Imitiamo la natura: trasformiamo la CO₂ in risorsa, la fotosintesi</i> | 47 |
| 4.4 <i>L'importanza delle microalghe e dei cianobatteri negli equilibri ecologici e la loro capacità di fissare anidride carbonica</i> | 48 |
| 4.5 <i>Sistemi di coltivazione delle alghe</i> | 53 |
| 4.6 <i>Sistemi di coltivazione delle radiazioni luminose, importanza e soluzioni tecnologiche</i> | 56 |
| CAPITOLO 5 LA SECONDA VITA DELLA CO₂ | 58 |
| 5.1 <i>L'anidride carbonica, gas serra o materia prima?</i> | 61 |
| 5.2 <i>CO₂, un'alternativa al petrolio?</i> | 62 |
| 5.3 <i>Fonti rinnovabili & Storage</i> | 63 |
| 5.4 <i>Il Metano</i> | 65 |
| 5.5 <i>Processo di metanazione</i> | 66 |
| 5.6 <i>Tecnologie di cattura della CO₂</i> | 67 |

| | |
|---|-------------|
| CAPITOLO 6 CO₂E IDROGENO..... | 81 |
| 6.1 CCS Cattura e sequestro della CO ₂ | 81 |
| 6.2 CCU Cattura e riutilizzo della CO ₂ | 82 |
| 6.3 CO ₂ potenziali utilizzi industriali | 85 |
| 6.4 Caso industriale Audi, dal vento alla strada. | 87 |
| 6.5 Caso Carbon Recycling International..... | 91 |
| 6.6 Casi di studio Enea | 94 |
| 6.7 L'Idrogeno..... | 96 |
| 6.8 Quadrigen..... | 101 |
| CAPITOLO 7 IL CASO INDUSTRIALE | 107 |
| 7.1 Il Forno per Ceramica | 114 |
| 7.2 Il Forno Eko..... | 118 |
| 7.3 Rilievi..... | 122 |
| 7.4 I modelli di calcolo tradizionali..... | 123 |
| CAPITOLO 8 SIMULAZIONI 1D E 3D DEL FORNO COMPLETO | 125 |
| 8.1 Simulazione parametrica 1D Forno completo | 127 |
| 8.2 Validazione Numerico - Sperimentale modello 1D..... | 135 |
| 8.3 Modello 1D integrato nel processo | 136 |
| 8.4 Simulazione 3D Forno Completo..... | 137 |
| 8.5 Simulazione cinetica chimica 3D Metanazione forno completo. | 140 |
| 8.6 Analisi e commenti 1D – 3D | 164 |
| 8.7 Il processo di Metanazione ed il pannello di controllo..... | 167 |
| 8.8 Idee per il futuro..... | 172 |
| Conclusioni | 183 |
| Appendice | I |
| <i>A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization</i> | I |
| <i>Please support the “Petition for Integration of renewable CCU in the RED”</i> | III |
| <i>Emissioni di CO₂ e costo dell’impatto “Sociale”</i> | V |
| <i>Valutazione sulla convenienza di far reagire la CO₂ con H₂ per ottenere CH₄.....</i> | VI |
| <i>CCU: alcuni progetti in corso.....</i> | VIII |
| <i>Modalità di gestione delle energie rinnovabili (GME)</i> | XI |
| <i>Biometano</i> | XI |
| <i>Il sistema EU ETS</i> | XIV |
| <i>Commissione Europea, dal 2013 ad oggi.</i> | XX |
| <i>Economia a Metanolo.....</i> | XXIV |
| <i>Hardware in the loop (HIL)</i> | XXV |

| | |
|---|---------------|
| <i>Software-in-the-Loop (SIL)</i> | XXVI |
| <i>Descrizione Gruppo Sacmi</i> | XXVII |
| <i>Schema dimensioni Lastre di grande formato</i> | XXVIII |
| BIBLIOGRAFIA | XXIX |

<<Tutti i progressi della cultura, mediante i quali l'uomo compie la propria educazione, hanno per fine l'applicazione delle conoscenze e delle abilità così acquisite al loro uso nel mondo, ma nel mondo l'oggetto più importante a cui rivolgere quest'applicazione è l'uomo, perché l'uomo è il fine ultimo di se stesso>>

I.Kant (dalla prefazione all'Antropologia Pragmatica)

INTRODUZIONE

Nella logica di perfezionamento del mondo tecnologico esistono molti problemi aggravati dal fatto che questo ambito della scienza è in continua evoluzione e ogni valutazione fatta oggi può non essere così calzante domani. Per di più il "mondo" tecnologico non è uno ma una serie di mondi al quale la Tèchnè è applicata.

La necessità di sviluppare prodotti sempre più performanti richiede l'utilizzo di tecniche di progetto che permettano di ottenere soluzioni non raggiungibili attraverso gli schemi progettuali tradizionali. Contemporaneamente, la necessità di utilizzare, in modo più rapido e approfondito, le metodologie di prototipazione virtuale multifisica di ottimizzazione applicate alla ricerca e allo sviluppo di nuovi prodotti e processi produttivi, rende più difficile ai ricercatori e agli utenti finali la fruibilità completa di tale strumento.

La ricerca in oggetto è nata dall'idea di valutare come l'ambito scientifico delle simulazioni numeriche possa produrre nuovi flussi di progettazione che siano accettati all'interno dello stesso contesto organizzativo. L'obiettivo della ricerca è quello di utilizzare le tecniche di simulazione numerica per introdurre (nell'industria) processi innovativi ad alta efficienza, riducendo il numero di prototipi, con attenzione ai modelli organizzativi che ne potrebbero scaturire.

L'attuale immobilizzo industriale è spesso riconducibile agli alti costi necessari per introdurre nuove tecnologie. L'utilizzo congiunto di tecniche di simulazione finalizzate all'ottenimento di processi industriali a basso impatto

ambientale, è il principale obiettivo della ricerca. In particolare, l'obiettivo industriale della ricerca sarà quello di investigare i sistemi di recupero della CO₂ per la sua trasformazione in Metano e/o Biomassa, tramite metodi industriali di immagazzinamento della stessa (CCS - Carbon Capture and Storage), di utilizzo della CO₂ (CCU - Carbon Capture ad Utilization) e Fotobio-reattori per la produzione di biomassa da microalghe.

ABSTRACT

L'introduzione delle tecniche CAE (Computer Aided Engineering) ha reso possibile modellare parti prototipali direttamente dai dati iniziali di progetto. Questa procedura è stata sinteticamente implementata in un gruppo di processi noti con il nome di Prototipazione Virtuale. Basti ricordare che essa, incidendo solo per circa il 20% sul costo, è responsabile di oltre il 75% dei costi totali di produzione (poiché ne definisce i mezzi), del 70% del costo del ciclo di vita e dell'80% delle caratteristiche qualitative. Sulla base di ciò, si svolgeranno ricerche su casi reali in via di progettazione, allo scopo di validare le tecniche proposte congiuntamente alle tecniche LCA (Life Cycle Assessment) ed all'impatto ecologico dei prodotti stessi.

La ricerca è stata svolta in collaborazione con il Gruppo Sacmi (Sacmi Forni), ENEA, Università di Modena e Reggio DISMI - Dept. of Sciences and Methods for Engineering, BSim – Amesim, Exsenia/Separeco, Omiq e CPFD-Baracuda, Exeni Group e Algaefarm.

Si sono analizzati casi reali sia dal punto di vista della progettazione (CAE) che sul fronte della ricerca e dei test dei metodi innovativi di cattura e riutilizzo di CO₂.

Sebbene la maggior parte delle tecnologie estendibili su scala industriale per il recupero della CO₂ siano ancora nella fase di ricerca e sviluppo, esse presentano un potenziale notevole e ad alto valore aggiunto nell'industria chimica. Quest'ultima può impiegare l'anidride carbonica come materia prima direttamente (building block)¹ in numerosi processi per la sintesi di svariate classi di prodotti. Tra i prodotti ottenibili, l'attenzione è stata rivolta verso il metano, poiché è un prodotto economicamente di sicuro interesse, in quanto utilizzabile come combustibile industriale e come carburante per il settore automotive. Il contesto della ricerca si è rivolto all'Industria Ceramica, in quanto risulta essere un settore molto "energivoro" e che necessita di sviluppi atti a ridurre le emissioni di inquinanti in atmosfera. Va detto che, oltre alla CO₂, gli impianti ceramici generano una grande quantità di calore e di acqua inquinata; si cercherà, quindi, di valutare come, tutti gli "scarti" industriali, possano essere materia prima per nuovi sottoprodotti da utilizzare o stoccare.

¹ Multi-component reactions, MCR, vengono detti building blocks, rappresentano un'importante opportunità per la chimica combinatoriale per la possibilità di sintetizzare nuove molecole, introducendo almeno tre input di diversità (per lo meno quando tutti i componenti sono modificabili a piacimento). Da Wikipedia.

<<Caratteristica comune di ogni attività tecnologica², indipendentemente dall'obiettivo che si prefigge, è l'aspetto connesso alla progettazione. La progettazione è un concetto di difficile definizione: spesso viene caratterizzata come "esercizio dell'immaginazione nella specificazione della forma". Scopo della progettazione è conferire una forma, una struttura o una sistemazione a un prodotto tecnologico da realizzare, affinché esso costituisca un tutto integrato ed equilibrato in grado di servire allo scopo previsto. La progettazione prende le mosse dall'idea di una persona e viene quindi sviluppata prevedendo i possibili contesti nei quali quell'idea verrà applicata ed eventuali sue trasformazioni ed esiti.

Un problema che spesso i progettisti devono affrontare è l'incompatibilità dei requisiti che un prodotto deve soddisfare: la facilità di manutenzione, ad esempio, può essere in conflitto con le esigenze di contenimento dei costi e con quelle di carattere estetico; le considerazioni in materia di sicurezza possono essere difficilmente conciliabili con il completamento del lavoro entro una data prestabilita; mentre i materiali in base a considerazioni di carattere tecnico possono risultare non idonei sotto il profilo ambientale o etico (si pensi alle difficoltà di smaltimento dei rifiuti o alla produzione con metodi inaccettabili come lo sfruttamento della manodopera). Compromesso e ottimizzazione sono quindi assolutamente necessari in questo settore.

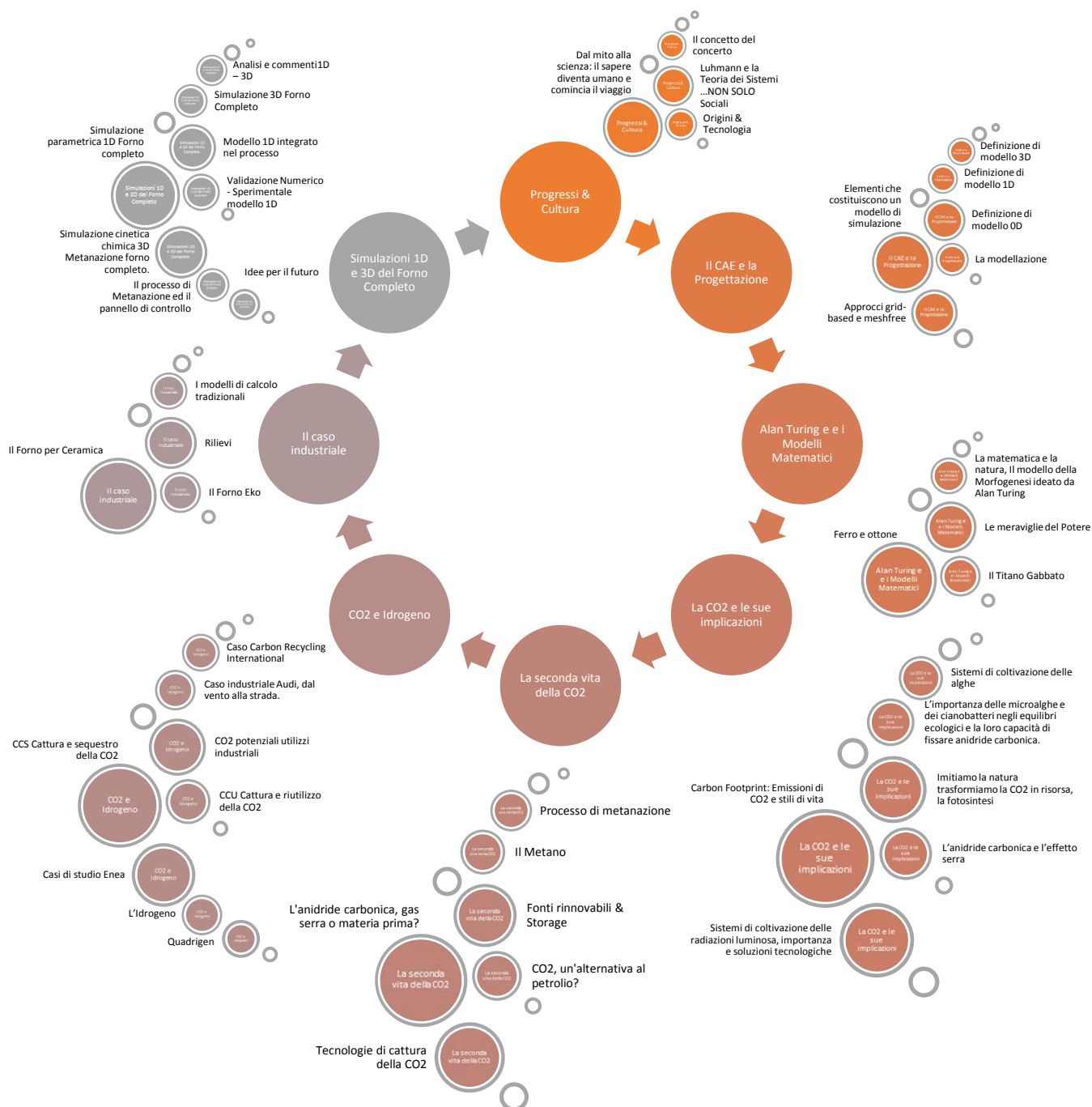
La progettazione può essere rappresentata come una serie di processi lineari, che inizia con l'identificazione di un problema o del requisito di un prodotto, prosegue con la messa a punto di idee per la soluzione, passa poi alla fase propositiva, con un'opzione di progettazione ritenuta valida, e infine alla scelta vera e propria e alla sua successiva valutazione. In realtà, tuttavia, i processi non sono quasi mai così chiari e precisi: l'esperienza derivante da precedenti realizzazioni può, ad esempio, portare a modifiche del progetto. La valutazione viene quindi a essere un processo costante e retroattivo, attraverso le diverse fasi progettuali>>.³

² Insieme delle procedure e dei metodi attraverso i quali si realizza l'applicazione delle conoscenze scientifiche alle attività produttive. La tecnologia è un campo estremamente vasto, caratterizzato da molteplici aspetti: comprende sia il complesso di conoscenze e di studi teorici mirati a risolvere problemi pratici, sia la progettazione e la realizzazione di prodotti di vario tipo, fra i quali capi di vestiario, alimenti, manufatti, strutture edilizie, dispositivi elettronici e sistemi informatici. Il processo tecnologico nasce per soddisfare un'esigenza umana o per dare corpo a un'idea innovativa: a questo fine utilizza risorse di vario tipo, come le conoscenze scientifiche e multidisciplinari, competenze e strumenti tecnici e non ultima l'immaginazione. Tecnologia," Enciclopedia Microsoft® Encarta® 99. © 1993-1998 Microsoft Corporation. Tutti i diritti riservati.

³ "Tecnologia," Enciclopedia Microsoft® Encarta® 99. © 1993-1998 Microsoft Corporation. Tutti i diritti riservati.

MAPPA DEI CAPITOLI

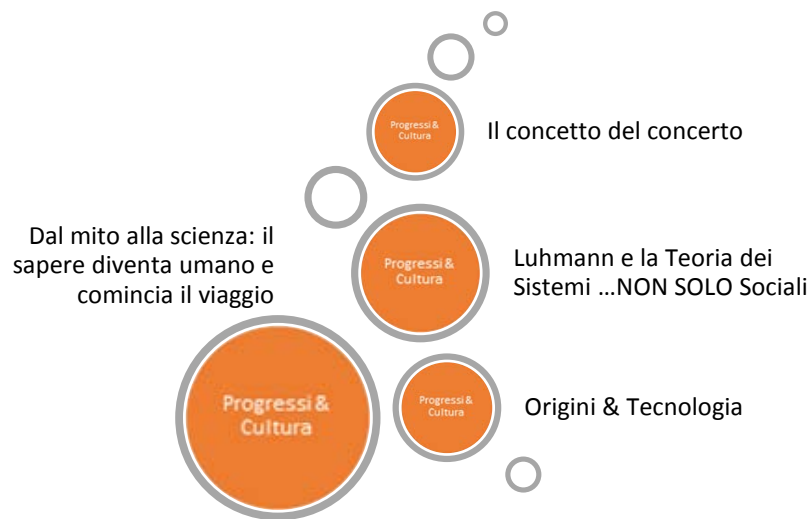
Indice a colori dei capitoli e dei paragrafi.



CAPITOLO 1 *PROGRESSI & CULTURA*

Il percorso del primo capitolo vuole delineare fugacemente l'incipit dei PER-CHE' alla base della speculazione del pensiero che ha sempre supportato l'Uomo attraverso il percorso evolutivo della Scienza e della sua Etica, insieme alla sua conseguente esponenziale produzione tecnologica e che oggi si trova, forse come non mai, ad indagare la profondità, il senso... "l'alternativa trascurata", più che il nuovo e l'ampiezza.

...Un NUOVO/VECCHIO inizio?



1.1 *DAL MITO ALLA SCIENZA: IL SAPERE DIVENTA UMANO E COMINCIA IL VIAGGIO*

<<Prometeo: Titano, figlio di Giapeto e di Climene, fratello di Atlante e di Epimeteo. Foggì il primo uomo con un po' d'argilla, e con l'aiuto di Pallade, di cui godeva il favore, salì in cielo a rapirvi il fuoco per animare con esso la sua statua. Zeus, irritato per questo furto, fece creare, da Efesto, Pandora perché spargesse tutti i mali fra gli uomini e così ne rendesse oltremodo penosa l'esistenza. Prometeo allora ingannò a sua volta Zeus con un'astuzia: fece a pezzi un bue; mise da una parte i pezzi migliori e li nascose sotto la pelle dell'animale; dall'altra dispose abilmente le ossa spolpate, e le coprì d'un bel grasso d'aspetto appetitoso. Zeus, invitato a scegliere si prese le ossa, credendole la parte migliore. Quando s'avvide di questo nuovo inganno, si abbandonò ad una collera violentissima, e punì Prometeo, facendolo incatenare da Efesto ad una roccia del monte Caucaso e mandandogli ogni giorno un'aquila a dilaniargli le carni

immortali ed a pascersi del suo fegato. Ogni notte le ferite guarivano, ma nel giorno successivo ricominciava l'atroce supplizio.

Altri autori narrano diversamente l'origine del supplizio di Prometeo, dicendo che questi aveva insegnato agli uomini tutte le arti, contrariamente ai voleri di Zeus, oppure che il Titano aveva rubato il fuoco a Zeus, per ridarlo agli uomini dopo che il dio l'aveva tolto loro per punirli della loro empietà.

In tutte le versioni e con tutte le numerose varianti del suo mito, Prometeo è il difensore e il benefattore degli uomini; è colui che elargisce loro tutti i benefici del sapere, l'invenzione dei numeri e delle lettere, l'arte di addomesticare gli animali, l'agricoltura, i principi della navigazione, la medicina, l'arte d'interpretare i sogni e i presagi, l'arte di utilizzare e lavorare i metalli, e così via>>.

Ho citato alcune delle innumerevoli versioni del Mito di Prometeo, per sottolinearne l'importante simbologia. Il furto del fuoco e il dono dello stesso all'uomo è trasferibile nella possibilità di creare, nel dono del sapere: è la consegna del primo strumento tecnologico.

Non mi sembra azzardato definire in tal modo il fuoco divino, come non lo è altrettanto considerare la narrazione di Prometeo l'archetipo della nascita della scienza, il suo "Incipit" in senso antropologico.

Da facoltà propria del divino alle mani dell'uomo, la scienza comincia il suo viaggio: Prometeo ne è il simbolo e il mito di Pandora, così strettamente legato a quello del Titano, rappresenta tutte le difficoltà che incontrerà lungo la strada. A seguire, nel mondo del Mito, il viaggio della Scienza è quello di Giasone alla conquista del Vello d'oro e ogni ricercatore un moderno Argonauta. D'altronde la ricerca si è sempre avvalsa del viaggio, come metafora o in senso proprio, per descrivere il farsi dell'acquisizione scientifica, in tutta la sua affascinante e conturbante problematicità.

Oggi la scienza si trova a confrontarsi con questa immensa sfida della conoscenza che ci riporta ai significanti appena enunciati: individuare una rotta che ci permetta di percorrere il labirinto del pensiero e della coscienza, in ambito scientifico, senza perderci.

1.2 ORIGINI & TECNOLOGIA

Il bisogno di sviluppare prodotti sempre più performanti richiede l'utilizzo di tecniche di progetto che permettano di ottenere soluzioni non raggiungibili attraverso gli schemi tradizionali.

Si rende ora necessario un cambiamento di approccio, una modificazione del punto di osservazione che non prescinde dall'acquisito, ma che, oggi, non

può essere offuscato o limitato. Contrariamente, perseverando sullo stesso approccio di pensiero applicato al flusso di progettazione, l'unico risultato potrebbe essere un mero apprezzamento dal punto di vista dei costi.

E' noto che l'introduzione delle tecniche di "Computer Aided Engineering" hanno reso possibile la realizzazione di parti complesse direttamente dai dati iniziali di progetto. Queste procedure sono state sinteticamente implementate in gruppi di processi noti con il nome di "Prototipazione Virtuale".

Tali tecniche possono incidere anche per il 20% sul costo totale del progetto, ma possono poi impattare su oltre il 75% dei costi totali di produzione (poiché ne definiscono i mezzi) e sull'80% delle caratteristiche qualitative.

In questo scenario, è facile pensare che il processo di "digitalizzazione" dovrà essere attento a sviluppare, oltre alle tecnologie abilitanti ed a tutte le tecniche che attualmente contraddistinguono il contesto 4.0, un nuovo modello organizzativo che permetta di fruire in modo funzionale, e non solo gerarchico, tutte le tecniche abilitanti a tutti gli attori.

Parte dell'innovazione, oltre l'analisi dei dati o delle tendenze, sarà interrogarci su come sviluppare i prodotti e soprattutto sul reale utilizzo globale dello standard tecnologico attualizzato.

Il cambiamento, in apparenza ovvio e intrinseco, avverrà tuttavia solo se accetteremo di variare il nostro approccio allo sviluppo del "Design" e se lo contestualizzeremo in un modello organizzativo che abbandoni gli schemi consolidati degli ultimi trent'anni.

1.3 LUHMANN E LA TEORIA DEI SISTEMI ...NON SOLO SOCIALI

Nella logica di valutare come le tecnologie complesse dovranno affrontare il progresso tecnologico per il benessere dell'uomo parallelamente alla difficoltà nell'attualizzare l'urgenza di tale cambiamento all'interno del sistema attuale della progettazione, (essa stessa immersa nell'ambiente scientifico-tecnico- biologico- etico), mi sono avvalso della visione lungimirante della Teoria dei Sistemi di Niklas Luhmann⁴, un illuminato sociologo contemporaneo, padre di uno straordinario format che, nato come chiave di lettura

⁴ Niklas Luhmann (Luneburgo, 8 dicembre 1927 – Oerlinghausen, 6 novembre 1998) è stato un Sociologo e Filosofo tedesco.

Uno dei maggiori esponenti della sociologia tedesca del XX secolo, Luhmann applicò alla società la Teoria dei Sistemi Sociali, che ebbe un forte riscontro anche nel campo della filosofia.

delle dinamiche sociali, è perfetto ed esportabile mezzo in aiuto a comprensione, schematizzazione e chiarimento della complessità in ogni ambito, compreso quello industriale.

Luhmann e la Complessità

(Del Sistema sociale ... e di tutto ciò che ci circonda, compresa l'organizzazione, il senso e la materia della ricerca).

Stiamo vivendo in un momento di complessità senza precedenti, dove tutto si trasforma più rapidamente di quanto non riusciamo a comprendere. Nel mondo che sta emergendo, la complessità è una condizione irriducibile quanto ineluttabile che, se da una parte genera confusione e incertezza, dall'altra ci offre nelle attuali trasformazioni sociali, economiche, scientifiche e culturali, la possibilità di ripensare noi stessi in modo nuovo.

Per capire il nostro tempo, tuttavia, dobbiamo prima comprenderne la complessità - asserirebbe Niklas Luhmann- e, per comprenderla, dobbiamo capire cosa rende questo momento differente da ogni altro: non è il cambiamento in sé, quanto il ritmo del cambiamento stesso.

Ogni cosa si muove sempre più rapidamente, fino a rendere la velocità stessa un obiettivo. In questo modo tutto ciò che abbiamo di più solido sembra dissolversi nell'aria, generando un senso di incertezza e vertigine... ma pare inesorabile che lo sviluppo attuale abbia una sola direzione. Le cose (tutte) tendono a passare da una minore a una maggiore complessità e il compito che ci troviamo ora di fronte non è quello di rifiutare la complessità o di evitarla, ma di imparare a convivere con essa in modo creativo.

Come sempre quando ci si trova coinvolti in vasti e rapidi cambiamenti, è difficile assumere uno sguardo critico con cui valutare quanto accade.

Riconoscere la complessità emergente, lungi dallo scoraggiare l'analisi, invita ad avanzare le più varie ipotesi e le previsioni più diverse.

La nostra epoca potrebbe sembrare segnata secondo alcuni dal passaggio dall'industrialismo al post-industrialismo, secondo altri da un movimento del modernismo verso il postmodernismo o di una cultura di riproduzione, mentre per altri ancora stiamo assistendo alla transizione da un capitalismo di mercato a un capitalismo multinazionale, informatico o digitale.

Sebbene si tratti di punti di vista diversi eppure collegati, l'idea più diffusa è che i cambiamenti in atto non siano separabili dagli esplosivi sviluppi della cibernetica, dell'informatica e delle tecnologie telematiche che sono avvenuti a partire dalla Seconda Guerra Mondiale.

Gran parte di queste tecnologie, benché nate per scopi militari, sono state rapidamente immesse sul mercato, diffondendosi nella società. L'esempio più ovvio è Internet; progettato all'interno delle strategie di difesa militare e diventato, oggi, parte integrante del nuovo ordine economico. E come già in passato tante volte, oppositori e fautori delle nuove tecnologie, ognuno dalla propria parte, non dubitano del fatto che il proliferare delle innovazioni sia destinato a trasformare radicalmente il mondo così come lo conosciamo.

Gli sviluppi tecnologici dell'ultimo mezzo secolo hanno gettato le basi per una rivoluzione vasta e profonda, di portata non inferiore alla Rivoluzione Industriale.

Le tecnologie telematiche e dell'informazione stanno rimodellando il tessuto sociale, politico, economico e culturale della nostra vita.

Per comprendere questi cambiamenti è bene concepire l'informazione nel suo significato più ampio. "Informazioni" non sono soltanto i dati che viaggiano attraverso le reti a fibre ottiche o quelli trasmessi dai media, anche molti processi fisici, chimici e biologici sono elaborazioni di informazioni.

Questa nozione estesa ci obbliga a riconfigurare il rapporto tra natura e cultura, in un rapporto paritario in modo che entrambe emergano ed evolvano insieme, in stretta interazione reciproca.

A mano a mano che l'infinita molteplicità del reale diventa più complessa e a mano a mano che il cambiamento accelera, lo sviluppo si avvicina al momento della complessità, ossia al punto critico, nel quale diventa impossibile orientarsi se non operando una riduzione della complessità, riprendendo attraverso Weber⁵ prima e Luhmann poi, il concetto della cultura come sezione finita tratta dall'infinità priva di senso del mondo.

Luhmann asserisce che il vecchio illuminismo può essere superato con un Illuminismo sociologico alla base del quale vi è l'idea secondo cui l'uomo non può conoscere la spaventosa molteplicità del mondo, ma deve venire a patti con la realtà e delimitare un ambito definito di conoscenze attraverso determinate leggi e muoversi entro questo ambito definito (la complessità della totalità non può essere colta per cui è sempre necessaria una riduzione della complessità stessa). Il suo compito, pertanto, deve prendere atto della complessità del mondo e ridurla. La complessità del mondo deve essere riportata entro una dimensione che possa essere vissuta come espressione di un determinato senso.

⁵ Karl Emil Maximilian Weber (Erfurt, 21 aprile 1864 – Monaco di Baviera, 14 giugno 1920) è stato un sociologo, filosofo, economista e storico tedesco. È considerato uno dei padri fondatori dello studio moderno della sociologia e della pubblica amministrazione.

E' il sistema a compiere questa riduzione di complessità e a rendere di conseguenza possibile il senso, ma esso, deve anche rapportarsi alla complessità dell'ambiente e a venire a patti con esso.

Nel rapporto Sistema / Ambiente della società contemporanea, la realtà industriale deve essere ormai considerata un elemento forte e fondante della società stessa e della sua stessa possibilità di sopravvivenza, nel senso che è proprio dalla complessità creata dalla realtà industriale, che possiamo trarre gli strumenti per ridurre e differenziare le criticità.

Come espresso in prima persona da Luhmann – penso che la nostra unica possibilità sia vivere con l'industria e non contro di essa, ma ad esempio cambiando le fonti energetiche, i combustibili fossili e operando cambiamenti nella produzione batterica, biochimica e nell'economia agricola... ma partendo dalla situazione attuale il Sociologo non può fare alcun pronostico su base empirica. L'unico elemento che forse si può già constatare, è la grande attenzione dedicata dalla nostra società a questi problemi. La società attuale dispone di possibilità di correzione abbastanza veloci che utilizza appena nota qualcosa.

Essa ha capacità di trasformazione e conversione molto rapide, le quali, però, dipendono sempre dalla disponibilità di sufficienti capitali e di sufficienti conoscenze. Cosa, questa, difficile da prevedere e su cui è difficile fare pronostici...Non si possono prevedere le nuove conoscenze, altrimenti sarebbero già conoscenze esistenti.

SISTEMA

La Teoria Generale dei Sistemi, intende per Sistema qualsiasi entità costituita di più elementi fra loro correlati, definita da determinati confini e in rapporto di interazione con l'ambiente esterno.

Per Luhmann un Sistema è un insieme di elementi o di sottoinsiemi interconnessi tra di loro e con l'ambiente esterno tramite relazioni reciproche, ma che si comporta come un tutt'uno, secondo regole generali, con il fine di raggiungere obiettivi prefissati (comuni e individuali), conservando la propria autonomia rispetto all'ambiente con cui opera.

Secondo il sociologo, il Sistema è definito come un'unità fisica e funzionale, dotata di senso, costituita da più parti o sottoinsiemi interagenti (o in relazione funzionale) tra loro; è un continuum senza perdere ogni sua singolarità e dà un contributo univoco ad una finalità comune o ad un obiettivo identificativo di quel Sistema.

Varie sono le tipologie di Sistemi, in Natura (sistemi biologici, organici...) e nella Società (singole interazioni comunicative, organizzazioni o addirittura società).

Nel definire i Sistemi sociali, Luhmann parte dalla premessa che gli elementi primari e unici del sistema stesso non siano gli agenti principali, cioè gli uomini, bensì gli effetti della loro comunicazione, ovvero comunicazioni che producono altra comunicazione.

La forza del sistema, quindi, non è da riferirsi tanto alle sue forze interne che ne garantiscono la continuità, quanto alla capacità di contrapporsi all'ambiente cui esso appartiene e ne minaccia la stabilità.

Un sistema sociale è in grado di costituirsi, ricostituirsi, ma soprattutto di autogestirsi solo, però, mediante una perenne comunicazione, sempre conservando la propria autonomia rispetto all'ambiente.

AMBIENTE

Secondo Luhmann tutti i Sistemi Sociali si situano in un Ambiente: Ambiente è quindi tutto ciò che non fa parte del sistema.

Lo schema analitico fondamentale della Teoria sistemica, al quale Luhmann si ispira, è infatti costituito dalla figura opposizionale Sistema/ Ambiente ove per Sistema, nel suo significato più generale, si intende qualsiasi entità costituita di più elementi tra loro correlati, definita da determinati confini e in rapporto di interazione con l'Ambiente, mentre per Ambiente si designa ciò che è esterno al Sistema e che, rispetto ad esso, presenta un grado maggiore di complessità. Il Sistema è tanto più in grado di sopravvivere, quanto maggiore è la sua capacità di rispondere alla accresciuta complessità dell' Ambiente, con prestazioni selettive finalizzate ad accrescere la complessità interna al sistema stesso.

COMPLESSITA'

Il mondo offre all'uomo una quantità praticamente illimitata di possibilità di esperienza e di azione, alla quale corrisponde una capacità molto ridotta di percepire, elaborare informazioni e agire.

Per complessità Luhmann intende l'eccesso delle possibilità del mondo, ovvero la differenza fra il numero delle possibilità potenziali e il numero di quelle di volta in volta attualizzate.

In questo senso, Complessità significa necessità di selezione e, più nello specifico, si intendono Complessità il numero e la varietà degli elementi di un Sistema, l'estensione e l'incidenza delle relazioni di interdipendenza tra gli elementi del Sistema stesso e la variabilità nel tempo degli elementi e delle loro relazioni.

RIDUZIONE DI COMPLESSITA'

L'esperienza e l'azione sono sempre selettive, nel senso che costituiscono scelte tra innumerevoli possibilità di esperienza e di azione.

L'agire sistemico, in particolare, è selettivo nel senso che realizza una riduzione della complessità dell'ambiente ed è appunto ciò che consente al sistema di reagire congruentemente agli eventi dell'ambiente rilevanti per la sua stabilità.

Il problema della riduzione di Complessità non è solo un problema teorico, ma anche un problema pratico, perché l'uomo è costretto a ridurre la complessità per sopravvivere.

CONTIGENZA E DOPPIA CONTINGENZA

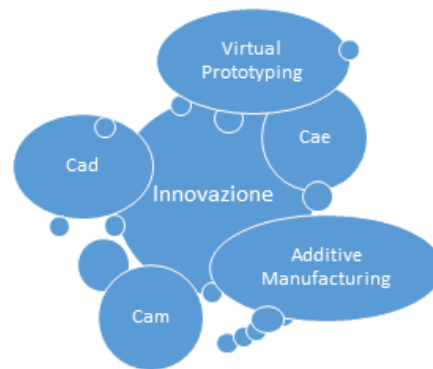
Nel contenuto di esperienza dell'uomo, si trovano rinvii ad altre possibilità che egli attualmente non esperisce a causa della sua limitata capacità di percepire, elaborare informazioni, agire. Le possibilità di ulteriore esperienza possono anche realizzarsi in modo diverso dalle attese. Infatti, nel processo di riduzione della Complessità, si può presentare una possibilità di scelta tra le diverse offerte dal sistema. Inoltre, secondo Luhmann, *“non solo c'è il rischio che si attuino possibilità diverse dalle proprie aspettative ma, quando le azioni di un soggetto sono dirette a un altro soggetto, occorre che il primo tenga presente che ha a che fare non solo con le proprie aspettative ma anche con le aspettative dell'altro (Doppia Contingenza). Il rischio di fallimento della propria azione dipende anche dal fatto che Alter scelga a sua volta e che possa scegliere anche in modo diverso da quello di Ego”*.

SENSO

Il Senso è la relazione selettiva tra il Sistema e il Mondo che rende possibili contemporaneamente la riduzione e il mantenimento della Complessità. Per costruire il Senso è necessario selezionare dalle infinite possibilità offerte dal Mondo (Mondo è l'infinita molteplicità e complessità del reale), alcune specifiche possibilità e attuarle, ma l'attuazione non è mai definitiva in quanto essa implica sempre il porsi nuove possibilità da cui selezionare.

1.4 IL CONCETTO DEL CONCERTO

Definizioni ormai classiche di sistema sono “un sistema complesso di elementi interagenti”⁶, oppure “un gruppo o un insieme di oggetti riuniti da qualche interazione regolare o da una mutua dipendenza per realizzare un determinato fine”⁷; in esse si trova concentrata tutta l’essenza di una visione sistemistica della realtà. Il concetto di insieme non solo fa riferimento ai suoi elementi costitutivi, ma soprattutto alla loro organizzazione al fine di conseguire uno scopo comune e concretizzare che “il tutto è maggiore della somma delle parti”. Tutto ciò per spiegare che diverso è parlare dei singoli pezzi che costituiscono un motore, per esempio prima che venga montato, e del motore medesimo perfettamente funzionante. Non sono i singoli pezzi ma la loro organizzazione perfettamente concertata a fare la differenza.



Innovazione organizzata come un’orchestra

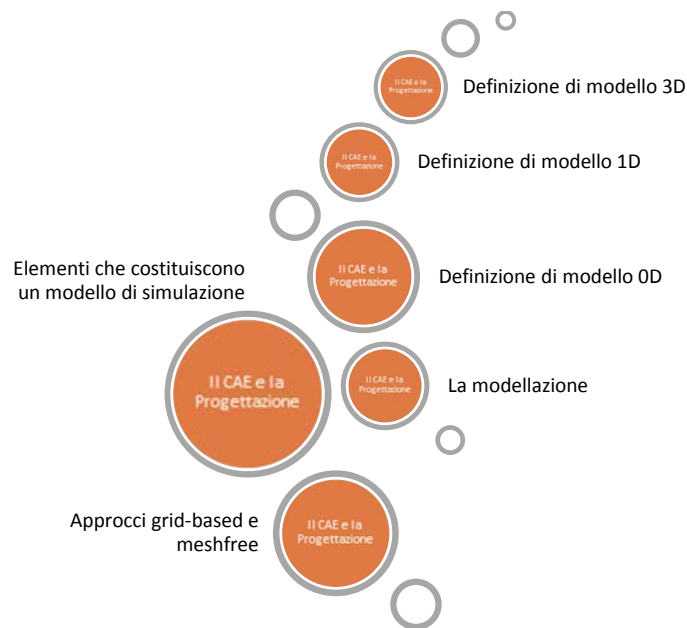
Un’orchestra è un tipico esempio di sistema. Se pur ogni strumento ha la sua singola autonomia, la musica raggiunge la sua più completa organicità solo nel coordinamento degli strumenti e dei musicisti. Il direttore, anche se non suona, svolge l’importantissimo compito di coordinare le varie azioni e di trasferire, dalla sua posizione centrale ai vari musicisti, le sensazioni che, nella loro composizione, non sarebbero in grado di percepire. In questo caso la complessità perfettamente organizzata è un perfezionamento della complessità stessa, ordine al potenziale disordine, sincronia e sintonia delle singolarità che apportano un up-grade all’insieme conservando la propria unicità. I singoli ambiti tecnologici sono strumenti e la loro sinergica organizzazione dà origine agli approcci multi-fisici e multidisciplinari atti a simulare la complessa realtà tecnologica che accomuna ogni ambito industriale.

⁶ L. von Bertalanffy

⁷ Shannon

CAPITOLO 2 IL CAE⁸ E LA PROGETTAZIONE

Dalla speculazione teoretica all'attività pratica: nel secondo capitolo l'attenzione è posta agli strumenti, tecniche puntuali di calcolo multifisico di cui si avvale la "Ricerca in viaggio" per la riduzione di complessità dell'orizzonte teorico e del suo superamento (=validazione).

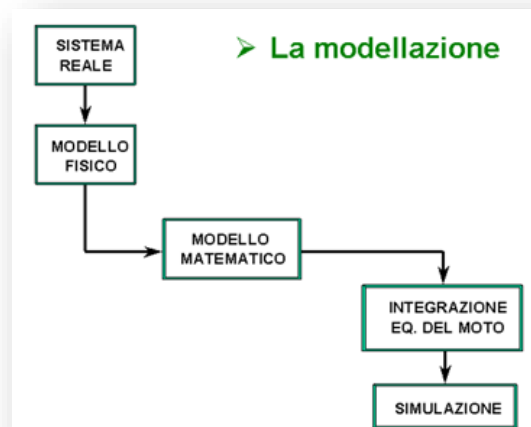


2.1 ELEMENTI CHE COSTITUISCONO UN MODELLO DI SIMULAZIONE

Per simulazione, si intende un modello della realtà che consente di valutare e prevedere lo svolgersi dinamico di una serie di eventi o processi, susseguenti all'imposizione di certe condizioni da parte dell'analista o dell'utente. Le simulazioni sono uno strumento sperimentale di analisi molto potente, utilizzato in svariati ambiti scientifici e tecnologici, dettato dalla difficoltà o impossibilità di riprodurre fisicamente in un laboratorio reale le effettive condizioni da studiare e che si avvale delle grandi possibilità di calcolo offerte dall'informatica e dai sistemi di elaborazione. La simulazione, infatti, altro

⁸ CAE: Computer - Aided - Engineering (ingegneria assistita dal computer) indica le applicazioni software che agevolano la risoluzione di problemi tecnologici tramite il calcolo numerico.

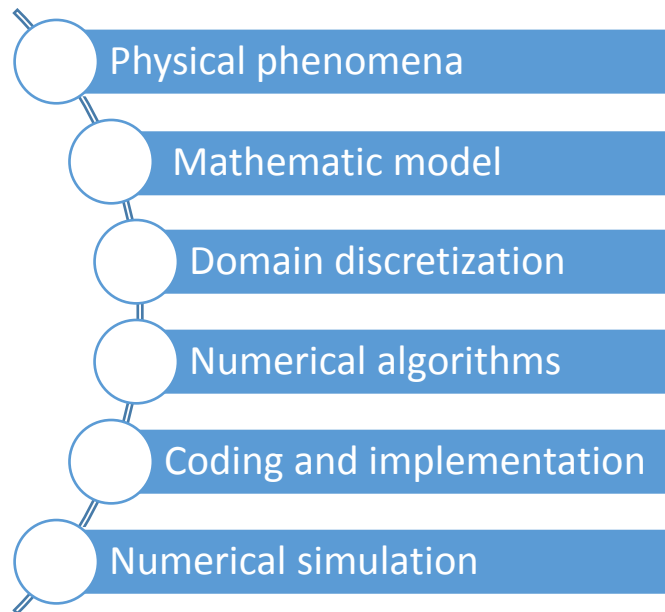
non è che la trasposizione in termini logico-matematico-procedurali di un "modello concettuale" della realtà; tale modello concettuale o modello matematico può essere definito come l'insieme di processi che hanno luogo nel sistema valutato e che permettono di comprendere le logiche di funzionamento del sistema stesso. La simulazione, dunque, è assimilabile ad una sorta di laboratorio virtuale che consente anche un abbattimento dei costi di studio rispetto ad esperimenti complessi realizzati in un laboratorio reale.



Schema Funzionale della "modellazione"

Le simulazioni numeriche, realizzate con l'ausilio di calcolatori elettronici, costituiscono un approccio estremamente importante per la risoluzione di complessi problemi pratici soprattutto in campo ingegneristico. Esse, infatti, permettono di tradurre importanti aspetti di un problema fisico in una forma discreta di descrizione matematica, riproducono e risolvono il problema attraverso il calcolatore e rivelano fenomeni in base alle esigenze dell'analista. Con questo modo di procedere, il problema viene affrontato in tutti i suoi aspetti senza fare troppe assunzioni e semplificazioni. Inoltre le simulazioni numeriche forniscono uno strumento alternativo d'investigazione scientifica all'esecuzione di prove sperimentali in laboratorio o prove in sito, che possono risultare costose, lunghe e talvolta anche pericolose, oltre a presentare difficoltà per ciò che concerne la registrazione e l'acquisizione di dati. Le simulazioni numeriche, infine, svolgono un ruolo prezioso nel fornire validazioni alle teorie, consentono un confronto con i risultati sperimentali e forniscono un aiuto nell'interpretazione e anche nella scoperta di nuovi fenomeni. Di fatto, agiscono come un ponte tra i modelli sperimentali e le previsioni teoriche.

Procedura generale di soluzione delle simulazioni numeriche⁹



Procedura seguita nella conduzione di una simulazione numerica

Le simulazioni numeriche seguono una procedura simile, che si articola nei seguenti passi fondamentali. Anzitutto, partendo da fenomeni fisici osservati, sono ricavati modelli matematici con alcune possibili semplificazioni e assunzioni. Questi modelli matematici sono generalmente espressi nella forma di equazioni governanti, a cui sono associate le corrispondenti condizioni al contorno (*boundary conditions*, BC) e/o condizioni iniziali (*initial conditions*, IC). Nel complesso, le equazioni governanti possono costituire un sistema di equazioni differenziali ordinarie (ODE), di equazioni differenziali alle derivate parziali (PDE), di equazioni integrali o di equazioni in qualsiasi altra forma possibile di legge fisica. Le condizioni al contorno e/o quelle iniziali sono necessarie per determinare le variabili di campo nello spazio e/o nel tempo.

A questo punto, si pone il problema della risoluzione del sistema di equazioni. In generale, una soluzione in forma chiusa non è possibile, e dunque è necessario procedere per via numerica. Il primo passo consiste nel suddividere in componenti discrete il dominio geometrico continuo del problema. Questa discretizzazione spaziale del dominio costituirà la struttura di calcolo per l'approssimazione numerica. La struttura di calcolo è in genere costituita da una griglia o *mesh* formata da nodi connessi in corrispondenza dei quali

⁹ Un approccio numerico per problemi di fluidodinamica: il metodo SPH – L.Lelli 2010

vengono valutate le variabili di campo. Dopo aver eseguito la discretizzazione geometrica è necessario procedere alla discretizzazione numerica, che fornisce un mezzo attraverso cui è possibile ottenere una rappresentazione discreta degli operatori di derivazione o integrazione in forma continua presenti nelle equazioni governanti. Dopo la discretizzazione del dominio e la discretizzazione numerica, le equazioni originali possono essere tradotte in un insieme di equazioni algebriche o equazioni differenziali ordinarie, che possono essere risolte per via numerica attraverso i metodi esistenti. Nel caso di simulazioni numeriche di problemi di fluidodinamica, le equazioni governanti possono essere costituite dalle equazioni di conservazione, che stabiliscono che un certo numero di variabili di campo del sistema, come la massa, il momento e l'energia, devono conservarsi durante il processo di evoluzione del sistema stesso. Questi tre fondamentali principi di conservazione, assieme ad informazioni aggiuntive riguardanti la natura del materiale o del mezzo, le condizioni al contorno e le condizioni iniziali, determinano completamente il comportamento del sistema fluido. Nella maggior parte dei casi, le equazioni governanti sono equazioni differenziali alle derivate parziali (PDE). Eccetto che nei casi più semplici, è molto difficile ottenere una soluzione analitica per tali equazioni. E' dunque necessario ricorrere a tecniche di approssimazione spaziale degli operatori di derivazione o integrazione presenti nelle equazioni differenziali o integrali. Queste tecniche consentono di ottenere un sistema di equazioni algebriche, oppure differenziali ordinarie in cui compare la sola derivata rispetto al tempo. Tale sistema può essere risolto in modo da ottenere valori numerici per le funzioni di campo (come densità, pressione, velocità) in corrispondenza di punti discreti nello spazio e/o nel tempo.

Un sistema è descritto in ogni istante di tempo da un insieme di variabili che prendono nome di *variabili di stato*. Quindi, ad esempio, in riferimento ad un sistema a coda è una variabile di stato il numero degli utenti presenti nel sistema in un certo istante di tempo. Ricordiamo, inoltre, che esistono *sistemi discreti* in cui le variabili cambiano istantaneamente in corrispondenza di precisi istanti di tempo che sono finiti oppure appartenenti ad un insieme numerabile e *sistemi continui* in cui le variabili variano con continuità rispetto al tempo. Si osservi fin d'ora che la scelta di un modello continuo o discreto da utilizzare non è necessariamente obbligata dalla tipologia del sistema; si può infatti decidere, ad esempio, di costruire un modello discreto per un sistema continuo, a seconda dello studio che si vuole effettuare. Un esempio tipico è il caso in cui nel rappresentare una linea ferroviaria, la posizione del treno

può essere descritta da una variabile reale che fornisce la distanza dalla stazione di origine, oppure da variabili binarie che descrivono lo stato libero-occupato di ciascuna delle sezioni di blocco in cui è divisa la linea.

Eventi

Si definisce evento un qualsiasi accadimento istantaneo che fa cambiare il valore di almeno una delle variabili di stato. Esistono eventi esterni al sistema (eventi esogeni) ed eventi interni (eventi endogeni).

Entità e attributi

Le entità sono singoli elementi del sistema che devono essere definiti. Se l'entità fluisce all'interno del sistema si parla di entità dinamica, altrimenti si parla di entità statica. Le entità possono essere caratterizzate da attributi che forniscono un valore di un dato assegnato all'entità stessa. Le entità possono essere raggruppate in classi, che sono insiemi di entità dello stesso tipo, ovvero si possono raggruppare le entità in base ad attributi.

Risorse

Le risorse sono elementi del sistema che forniscono un servizio alle entità. Un'entità può richiedere una o più unità di risorsa e, se questa non è disponibile, l'entità dovrà mettersi, ad esempio, in coda in attesa della sua disponibilità, oppure dovrà intraprendere un'altra azione. Se, invece, la risorsa è disponibile, essa viene "catturata" dall'entità, "trattenuta" per il tempo necessario e poi "rilasciata".

Attività e ritardi

Un'attività è un'operazione la cui durata è nota a priori all'inizio dell'esecuzione dell'attività stessa. Tale durata può essere una costante, un valore aleatorio generato da una distribuzione di probabilità, oppure data in input o calcolata in base ad altri eventi che accadono nel sistema. Un ritardo è un periodo di tempo di durata indefinita che è determinata dalle condizioni stesse del sistema.

Le analisi di simulazione più comunemente richieste ed utilizzate

- **Analisi Strutturale:** permette di stimare il livello di sollecitazione e di deformazione presente in un componente, struttura o cinematismo. Si basa su modelli di calcolo lineari e modelli non-lineari.

I modelli lineari partono dall'assunto che le deformazioni e gli spostamenti geometrici siano di piccola entità (linearità "geometrica") e che il materiale non si deformi plasticamente (linearità "di materiale").

I modelli non-lineari consistono nel tenere in considerazione grandi spostamenti/deformazioni e/o nel sollecitare il materiale oltre il suo limite elastico.

- **Analisi Vibrazionale:** permette di stimare le caratteristiche intrinseche vibrazionali di un componente o struttura (analisi "modale") e le modalità di risposta vibrazionale dello stesso a sollecitazioni di tipo oscillatorio o impulsivo (analisi "armonica").
- **Analisi di trasmissione del calore:** permette di individuare, all'interno dei componenti e delle strutture, la distribuzione di temperature e l'entità e le vie di trasmissione del calore, quando questi si trovano in prossimità di sorgenti di calore. Possono essere analisi stazionarie o transitorie, ovvero rappresentare delle situazioni stabili nel tempo o descrivere l'evoluzione del fenomeno mentre questo evolve.
- **Analisi del comfort acustico e vibratorio(NVH):** è un'estensione dell'Analisi Vibrazionale nel campo delle variazioni di pressione trasmesse al mezzo acustico (aria). Permette di rappresentare il campo acustico presente in prossimità di un componente che sta vibrando e di dettagliarne la distribuzione spaziale sia in termini di intensità che in termini di spettro (frequenze presenti). Queste analisi sono essenziali alla progettazione di componenti meccanici che garantiscano un adeguato comfort acustico e vibrazionale.
- **Analisi Magnetica:** permette di stimare la distribuzione dei flussi magnetici e le forze a questi associate relative ad un componente, struttura o insieme. Anche questa può basarsi su modelli di calcolo lineari e modelli non-lineari, considerati questa volta tali da un punto vista elettromagnetico.
- **Analisi Fluidodinamica:** permette di stimare il campo di moto spaziale di un fluido (velocità, pressione, temperatura, etc..) quando sottoposto a variazioni di pressione o di temperatura. Può essere "interna", ovvero mirata all'analisi di moti che si sviluppano all'interno di ambienti (volumi, condotti, etc..), o "esterna", mirata all'analisi di moti che si sviluppano all'esterno di strutture (aerodinamica di un veicolo, campo di moto dell'aria all'intorno di un radiatore, etc..).

- **Analisi Accoppiate:** sono sostanzialmente analisi contemporanee, che tengono conto delle reciproche interazioni di due o più tipi di analisi (esempio: interazione fluido-struttura (FSI), analisi termo-strutturali, analisi accoppiate magnetico-termiche, etc..).

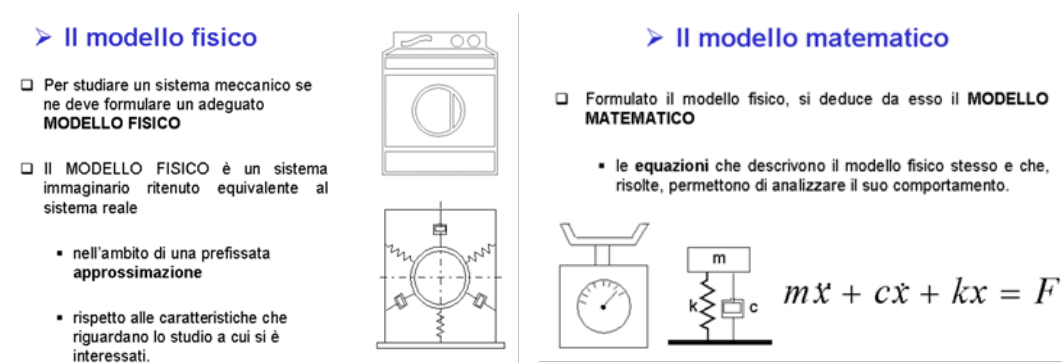
Un loro uso estensivo viene fatto nello studio dei componenti per i sistemi ibridi (HEC), per la previsione del trasferimento di calore e del flusso d'aria dentro e intorno le apparecchiature elettroniche dal singolo componente o scheda fino al sistema completo.

- **Analisi Motore:** ci sono tre classi di modelli numerici che possono essere utilizzate nella simulazione del funzionamento di un motore a combustione interna. Per un calcolo veloce del motore, vengono utilizzati dei semplici modelli zero-dimensionali. Questi, appartenenti alla prima classe, non includono alcuna risoluzione spaziale e descrivono solo i processi generali, senza informazioni su fenomeni locali. Sono utilizzati nel calcolo rapido della coppia e della potenza ottenibile da un motore, sulla base di caratteristiche macro quali alesaggio, corsa, dimensioni di massima del circuito di aspirazione e di quello di scarico, etc... Appartengono alla seconda classe di modelli quelli fenomenologici, che considerano alcuni tipi di risoluzione quasi-spaziale della camera di combustione e utilizzano sotto-modelli più dettagliati per la descrizione dei relativi processi, come la formazione della miscela, l'accensione e la combustione. Questi modelli fenomenologici 1D possono essere usati per predire, con una ragionevole accuratezza, i principali parametri motore (rendimento volumetrico, coppia, potenza, rumore alla bocca, etc.). Rientrano, infine, nella terza classe di modelli i tridimensionali CFD. Nei codici di calcolo CFD-3D, vengono utilizzati modelli più dettagliati e ogni sotto-processo di interesse può essere risolto.

2.2 LA MODELLAZIONE

Il modello costituisce il modo con cui noi formalizziamo il sistema che rappresenta la realtà in esame. I modelli possono essere di tipo diverso e possono essere sia quantitativi che qualitativi. Quelli di simulazione sono in genere dinamici, cioè includono la dimensione temporale e hanno lo scopo di studiare l'andamento nel tempo di un sistema.

Un modello matematico può essere definito come conversione di relazioni fra variabili fisiche del sistema da modellare in corrispondenti strutture matematiche. Quando queste relazioni sono riferite ad uno stato stazionario, il modello ha carattere statico ed è descritto da equazioni algebriche. Quando, invece, il comportamento del Sistema riguarda sia uno stato transitorio, sia stazionario, il modello di riferimento è dinamico ed è descritto da un sistema di equazioni differenziali (di diversi tipi) e una serie di condizioni limite.



Schema concettuale modello fisico vs. modello matematico

I modelli matematici possono essere classificati nelle seguenti categorie:

- **Modelli lineari:** possono essere descritti attraverso equazioni differenziali lineari e obbediscono al principio di sovrapposizione, in caso contrario il modello si dice non lineare.
- **Modelli a parametri concentrati,** sono descritti da equazioni differenziali ordinarie lineari e non lineari, in cui è presente una sola variabile indipendente (in molti casi il tempo). Per sistemi in cui le variabili sono fortemente dipendenti dalle coordinate dello spazio in un certo istante temporale, si devono usare modelli a parametri distribuiti, descritti da equazioni differenziali parziali.

- Modelli stazionari (costanti nel tempo): qui le caratteristiche degli output sono indipendenti dalle condizioni iniziali del sistema. In caso contrario si parla di modelli variabili nel tempo.

- Modelli continui: le loro variabili dipendenti sono definite a partire da un range continuo di variabili indipendenti; nei modelli discreti, invece, le variabili dipendenti sono definite solamente per valori distinti delle variabili indipendenti. I primi sono descritti da equazioni differenziali, gli ultimi da equazioni alle differenze finite.

- Modelli stocastici: le relazioni tra le variabili sono date in termini di valori statistici, in caso contrario i modelli si dicono deterministici.

La simulazione numerica, sia essa strutturale o fluidodinamica, ha acquisito nell'ultimo decennio un ruolo primario nella fase di sviluppo di qualunque tipo di prodotto in campo industriale. Essa infatti consente di abbattere drasticamente i costi ingegneristici, riducendo i tempi di progettazione e le spese di prototipazione/sperimentazione e di perseguire l'ottimizzazione delle caratteristiche del manufatto con un livello di dettaglio inimmaginabile fino a tempi recenti.

La possibilità di utilizzare modelli numerici predittivi durante la fase di progettazione ed ottimizzazione di un componente/impianto comporta una serie di vantaggi, tra i quali:

- la riduzione di campagne sperimentali, molto più onerose in termini di tempo e costi, limitando il loro impiego alle sole configurazioni che presentano risultati numerici interessanti;

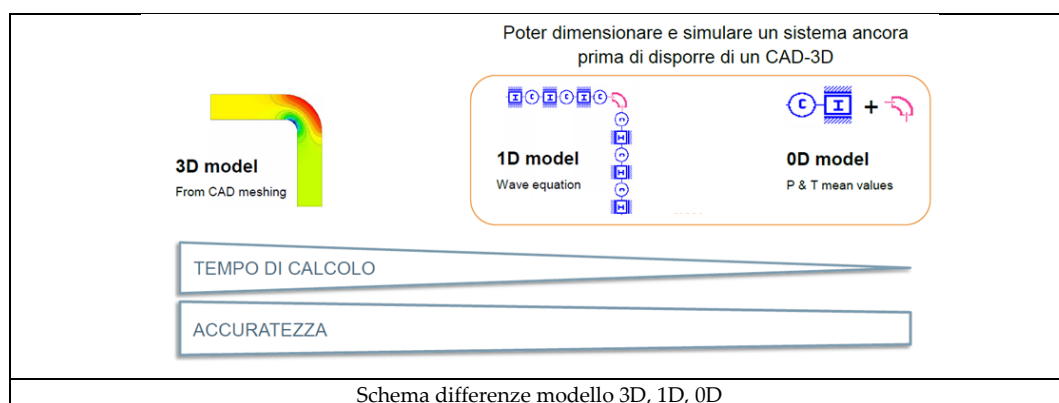
- l'individuazione delle variabili chiave di un fenomeno, facilitandone una sua analisi razionale (analisi di sensitività). Spesso le variabili di controllo presentano interazioni fra di esse e coglierle attraverso una campagna sperimentale vorrebbe dire eseguire innumerevoli prove;

- la previsione dell'andamento di grandezze che non sono facilmente misurabili per via sperimentale, ad esempio le temperature dentro i cilindri. L'obiettivo principale di tutte queste analisi è quello di ottenere informazioni sulla risposta dei sistemi fisici ad alcune condizioni imposte, comunemente indicate come carichi e/o condizioni al contorno.

Elaborare un modello adatto alla simulazione significa scrivere equazioni differenziali non stazionarie da integrare numericamente nel tempo. Le equazioni differenziali sono diversamente scritte in base a differenti approcci modellistici.

2.3 DEFINIZIONE DI MODELLO 0D

Un modello 0D è un sistema tempo-variante i cui parametri hanno significato puntuale e quindi viene anche detto modello a parametri concentrati. Un modello è tale quando le quantità fisiche sono considerate omogenee in una certa regione del sistema modellata come un'unica entità discreta. I modelli a parametri concentrati sono diffusamente utilizzati in ingegneria poiché costituiscono modelli semplici ma sufficientemente accurati per molteplici applicazioni. Si pensi ai modelli dei circuiti elettrici: sono costituiti da reti di componenti nei quali si concentrano proprietà fisiche in realtà distribuite nello spazio (si pensi ad esempio alla resistenza di un cavo che può essere modellata con un singolo resistore). Ciò permette di svolgere calcoli più semplici rispetto alla risoluzione delle equazioni di Maxwell¹⁰. Altri esempi provengono da ogni campo dell'ingegneria. In meccanica, ad esempio, i sistemi massa-molla rappresentano un modello a parametri concentrati. Tale modello è caratterizzato dai soli gradi di libertà essenziali (non più di 3 per membro) In idraulica si utilizzano per modellare reti di serbatoi oppure la presenza di pompe e turbine nei modelli monodimensionali di impianti. È un tipo di modello che non prevede variazioni di grandezze nello spazio.



¹⁰ Le equazioni di Maxwell raggruppano ed estendono le leggi dell'elettromagnetismo note fino alla metà del XIX secolo, tra cui la legge di Gauss per il campo elettrico e la legge di Faraday. Tale sintesi fu compiuta da Maxwell che, aggiungendo la corrente di spostamento alla legge di Ampère, rese simmetriche le equazioni che descrivono il campo elettrico ed il campo magnetico in modo classico, ovvero non quantistico. Si rende visibile in questo modo come essi siano due manifestazioni di una stessa entità, il campo elettromagnetico. Il settore dell'elettromagnetismo che studia i campi elettromagnetici trascurandone gli aspetti quantistici è l'elettrodinamica classica.

- VANTAGGI: semplicità, ridotti costi computazionali.
- SVANTAGGI: modello a “parametri concentrati”. Mancata descrizione del campo di moto. Accuratezza limitata.

Es: modello 0D (termodinamico). La parola stessa zero dimensionale, sta ad indicare che individuata la massa (o volume) di controllo, le grandezze d’interesse che individuano questo sistema sono uniche nel volume. Ad esempio, dato un solo valore di pressione, ciò implica che non ci sono gradienti di pressione e che quindi la velocità è nulla ($v=0$). Di queste 3 equazioni, una non serve in quanto il sistema non è termofluidodinamico e le uniche equazioni che servono sono 2 equazioni della massa e dell’energia.

Fare un modello 0D, vuol dire fare delle assunzioni, capire quali siano le grandezze che si vogliono seguire; dato un sistema non stazionario si devono avere le condizioni iniziali, mentre se il sistema è periodico devono essere assegnate arbitrariamente e aggiornate mediante successivi cicli di calcolo; alla fine si otterranno massa, temperatura, pressione, volume, entropia ecc...

2.4 DEFINIZIONE DI MODELLO 1D

È una semplificazione di un modello tridimensionale che mantiene la dipendenza da un'unica variabile spaziale.

- VANTAGGI:
 - Più dettagliato dello 0D ma meno oneroso del 3D.
 - Possibilità di tenere conto della propagazione in una direzione spaziale di una determinata fenomenologia (es: propagazione dell’onda di pressione nei condotti fluidodinamici)
 - Ridotti costi computazionali.
- SVANTAGGI: Accuratezza limitata ad un'unica direzione spaziale.

2.5 DEFINIZIONE DI MODELLO 3D

Nel modello 3D, si ha la volontà di descrivere la realtà fisica come effettivamente essa è. In particolare, in ambito tridimensionale, si parla di Modellizzazione ad Elementi Finiti (FEM) e di Analisi ad Elementi Finiti (FEA) in ambito prevalentemente strutturale, magnetico, termico di componenti solidi e di Fluidodinamica Computazionale (CFD) in ambito di meccanica dei fluidi.

Quindi, ad esempio, nel caso della termofluidodinamica si avrà la descrizione di un campo di moto tridimensionale, non stazionario, turbolento che è reagente dove ci si aspetta una combustione. Si cerca di descrivere tutti i processi chimici, fisici, termodinamici che si producono in tutti i punti del sistema. Tutto ciò determinerà la necessità d'integrare molte ma molte più equazioni (massa, energia e quantità di moto che è vettoriale e quindi in totale 5 equazioni). Mentre, quindi, in un cilindro zero dimensionale c'è una equazione di bilancio di massa ed una di energia perché sono a parametri concentrati, in un modello tridimensionale si hanno 5 equazioni in ogni punto della camera di combustione, perché si devono descrivere le variazioni nelle tre direzioni spaziali del sistema. I costi computazionali salgono enormemente.

- VANTAGGI: Descrizione dettagliata dei fenomeni fisici.
- SVANTAGGI: (rispetto allo 0D/1D)
 - Elevati tempi di calcolo e costi computazionali
 - Spesso non è necessaria un'informazione eccessivamente dettagliata in relazione al fenomeno o all'indagine che si vuole condurre

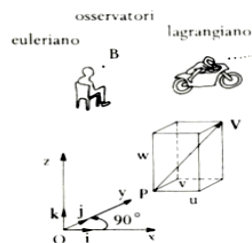
2.6 APPROCCI GRID - BASED E MESHFREE

Metodi grid - based

Esistono due approcci fondamentali per descrivere le equazioni fisiche governanti: la descrizione Euleriana e la descrizione Lagrangiana.

La descrizione Euleriana è una descrizione spaziale ed è tipicamente rappresentata dal metodo alle differenze finite (FDM). La descrizione Lagrangiana è una descrizione materiale ed è tipicamente rappresentata dal metodo degli elementi finiti (FEM).

Sia B una grandezza, scalare o vettoriale, nota in ogni punto del fluido ad ogni istante. Se si tratta di una grandezza scalare, B sarà il valore per unità di volume.



- Punti di vista Euleriano e Lagrangiano abitante.

Per conoscere l'evoluzione di $B = B(x, y, z, t)$ durante il moto del fluido possiamo usare due diversi punti di vista o metodi:

- a) *Euleriano o locale*: si pone un osservatore "seduto" in ogni posizione P dello spazio in modo da determinare B in ogni punto $P(x, y, z)$ ed in ogni istante t ;
- b) *Lagrangiano o molecolare o sostanziale* (dal latino *substantia* cioè materia): si considera ogni punto del fluido come un'entità individuale e si mette un osservatore ad inseguirlo in modo da conoscerne in ogni istante la posizione:

$$x = x(t) \quad , \quad y = y(t) \quad , \quad z = z(t)$$

E' come se un servizio di polizia per essere al corrente degli spostamenti di una popolazione decidesse: a) di installare dei posti fissi di osservazione incaricati di segnalare chi vi passa ed a che ora, oppure b) di far pedinare ogni singolo

Schema punto di vista Euleriano e Lagrangiano¹¹

¹¹ Tratto da: Aerodinamica – E.Mattioli

Ad esempio, nella meccanica dei fluidi, (trascurando le forze esterne, la viscosità e la conduzione del calore), le equazioni di conservazione nella forma PDE sono molto diverse per le due descrizioni:

- Descrizione Lagrangiana

$$\text{Conservazione della massa} \quad \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta}$$

$$\text{Conservazione del momento} \quad \frac{Dv^\beta}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x^\beta}$$

$$\text{Conservazione dell'energia} \quad \frac{De}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta}$$

- Descrizione Euleriana

$$\text{Conservazione della massa} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + v^\beta \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta}$$

$$\text{Conservazione del momento} \quad \frac{\partial v^\beta}{\partial t} + v^\alpha \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x^\beta}$$

$$\text{Conservazione dell'energia} \quad \frac{\partial e}{\partial t} + v^\beta \frac{\partial e}{\partial x^\beta} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta}$$

Nelle precedenti equazioni ρ è la densità, e l'energia interna, \mathbf{x} il vettore posizione, \mathbf{v} il vettore velocità. Le differenze tra i due insiemi di equazioni discendono dalla definizione di derivata totale rispetto al tempo, come combinazione di derivata locale e derivata convettiva:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v^\alpha \frac{\partial}{\partial x^\alpha}$$

Il primo termine è la derivata totale rispetto al tempo, che fisicamente rappresenta la variazione nel tempo di una grandezza lungo il moto di una particella; il secondo termine è la derivata locale, che fisicamente rappresenta la variazione di una grandezza in un dato punto al passare del tempo; il terzo termine è la derivata convettiva, che rappresenta la variazione spaziale della grandezza in esame, ovvero la variazione dovuta allo spostamento della particella nell'intervallo infinitesimo dt , da un punto ad un altro, ove le proprietà del flusso sono spazialmente differenti. Perciò, la derivata totale rispetto al tempo sancisce che una data proprietà di un elemento fluido sta cambiando, mentre quest'ultimo si muove rapidamente passando attraverso un certo punto del flusso. Questo perché 1) in quel dato punto la proprietà stessa può variare nel tempo (derivata locale); 2) l'elemento fluido si sta muovendo verso un altro punto dove la proprietà può essere differente (derivata convettiva).

La descrizione Euleriana e quella Lagrangiana corrispondono a due diverse tipologie di griglie di discretizzazione del dominio: la griglia Euleriana e quella Lagrangiana.

Descrizione Lagrangiana o materiale

Nei metodi che utilizzano la griglia Lagrangiana, come il metodo FEM, la griglia è fissata al materiale durante l'intero processo di calcolo, e perciò si muove assieme al materiale stesso. Poiché ciascun nodo della griglia segue il percorso del materiale, il movimento relativo dei nodi connessi genera l'espansione, la compressione e la deformazione della cella o dell'elemento della mesh. Dal momento che all'interno di ciascuna cella la massa rimane costante, non si verifica alcun flusso di massa attraverso il contorno della cella. Quando il materiale si deforma, la mesh si deforma di conseguenza.

I metodi che utilizzano la griglia Lagrangiana hanno diversi vantaggi:

- a) poichè non esistono termini convettivi nelle equazioni, il codice è concettualmente più semplice e dovrebbe risultare più veloce;
- b) poiché la griglia è fissata sul materiale, la time history di tutte le variabili di campo in un certo punto del materiale può essere facilmente ottenuta;
- c) è possibile posizionare alcuni nodi della griglia in corrispondenza dei contorni e delle interfacce del materiale. Le condizioni al bordo in corrispondenza delle superfici libere, dei contorni in movimento, delle interfacce risultano automaticamente imposte e determinate semplicemente dal movimento di questi nodi;
- d) geometrie irregolari o complicate possono essere adeguatamente trattate utilizzando mesh irregolari;
- e) i metodi lagrangiani sono dal punto di vista computazionale efficienti, poiché non richiedono alcun tipo di griglia aggiuntiva eccetto quella relativa al dominio del problema.

In virtù degli aspetti vantaggiosi sopra elencati, i metodi Lagrangiani sono molto utilizzati soprattutto nell'ambito della meccanica dei solidi, ove le deformazioni non sono così grandi come nel caso dei fluidi.

Tuttavia, tali metodi risultano particolarmente complessi da applicare nei casi di mesh estremamente distorte, poiché l'accuratezza della formulazione e dunque la soluzione possono risultare pesantemente influenzate. Inoltre il valore del time step, che è controllato dalla dimensione dell'elemento più piccolo, può ridursi significativamente, e non consentire più una simulazione efficiente. Una possibile soluzione a questi problemi è la rigenerazione della mesh, ovvero la sostituzione della mesh distorta con una più regolare, operazione che tuttavia può risultare troppo onerosa e che potrebbe portare alla perdita di dati. Per questi motivi in genere non è consigliabile procedere con l'utilizzo di metodi Lagrangiani quando si ha a che fare con problemi che presentano eccessive deformazioni.

Descrizione Euleriana o spaziale

Al contrario della griglia Lagrangiana, la griglia Euleriana è fissa nello spazio, ed i corpi oggetto della simulazione si muovono all'interno di essa attraversandone le celle. Tutti i nodi della griglia e tutte le celle della mesh, perciò, rimangono fissi nello spazio, senza variare nel tempo, mentre i materiali attraversano gli elementi della mesh stessa. La forma e il volume delle celle rimangono costanti durante l'intero processo di calcolo.

Poiché la griglia Euleriana è fissa nello spazio e nel tempo, le deformazioni che possono verificarsi nei corpi non inducono alcuna distorsione nella mesh e perciò non causano le stesse tipologie di problemi che caratterizzano l'approccio Lagrangiano. Per questo motivo i metodi Euleriani sono molto utilizzati nel campo della fluidodinamica, dove il flusso del materiale svolge un ruolo decisamente primario.

Tuttavia questi metodi presentano diversi inconvenienti:

- a) è molto difficile analizzare la time history delle variabili di campo in un certo punto fisso del materiale, poiché i movimenti di quest'ultimo non possono essere seguiti utilizzando una mesh fissata sul materiale stesso. In generale è possibile ottenere la storia nel tempo delle variabili in corrispondenza dei punti fissi della griglia Euleriana;
- b) nei metodi che utilizzano la griglia Euleriana non è facile trattare geometrie irregolari;
- c) poiché i metodi Euleriani seguono il flusso di massa, momento ed energia attraverso i contorni delle celle della mesh, la posizione delle superfici libere, dei bordi deformabili e delle interfacce in movimento dei materiali risulta difficile da determinare in modo accurato.

Combinazione di descrizioni Lagrangiane ed Euleriane

Dai due precedenti paragrafi appare evidente come i metodi Lagrangiani ed Euleriani abbiano caratteristiche differenti, ma soprattutto complementari. Questo suggerisce che la loro combinazione dovrebbe risultare vantaggiosa dal punto di vista computazionale, oltre a rinforzare gli aspetti positivi ed evitare quelli negativi di entrambi i metodi. Questa idea ha portato allo sviluppo di due complessi approcci che utilizzano sia la descrizione Lagrangiana che quella Euleriana: il metodo Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) ed il metodo Arbitrary Lagrange Eulerian (ALE).

Limitazioni dei metodi grid-based

I convenzionali metodi numerici grid-based come i metodi FDM e FEM sono stati largamente impiegati in diverse aree della dinamica dei fluidi e della meccanica dei solidi, e attualmente sono i metodi più utilizzati nelle simulazioni numeriche per ciò che concerne la discretizzazione del dominio e la discretizzazione numerica. Nonostante ciò essi presentano numerosi aspetti negativi che ne limitano l'applicabilità. Un requisito di base per le simulazioni numeriche è senz'altro la generazione della mesh per il dominio del problema. Per i metodi Euleriani la costruzione di una griglia regolare nel caso di geometrie irregolari o complesse non è per nulla semplice, così come la determinazione della posizione precisa delle disomogeneità, delle superfici libere, dei bordi deformabili e delle interfacce in movimento all'interno della griglia fissa. Tali metodi, inoltre, sono difficilmente utilizzabili in presenza di problemi che richiedono il controllo delle proprietà dei materiali all'interno di volumi fissi. Per i metodi Lagrangiani il problema fondamentale è invece la trattazione delle grandi deformazioni, per le quali si rende necessaria la rigenerazione della mesh (operazione detta di "rezoning") che però innalza significativamente i tempi di calcolo e potrebbe peggiorare l'accuratezza della soluzione.

Le limitazioni e le difficoltà dei metodi grid-based sono evidenti nella simulazione di fenomeni idrodinamici quali esplosioni o impatti ad alta velocità, ove sicuramente sono presenti nel primo caso grandi deformazioni, disomogeneità, interfacce in movimento, superfici libere e bordi deformabili, nel secondo caso propagazione di onde di pressione. Tali metodi inoltre sono poco adatti per tutte quelle situazioni nelle quali si ha a che fare più che con continui con insiemi di particelle discrete.

Metodi meshfree

L'idea di base dei metodi meshfree è quella di riuscire a fornire una soluzione numerica stabile e accurata di equazioni integrali o equazioni differenziali alle derivate parziali con tutte le tipologie possibili di condizioni al contorno attraverso un insieme di nodi (o particelle) distribuite arbitrariamente senza usare alcun tipo di mesh che realizza la connessione fra questi nodi.

In questa tesi ci si concentrerà soprattutto sui cosiddetti "metodi meshfree a particelle" che costituiscono la prima classe di metodi meshfree sviluppata nel tempo, e in particolar modo sul metodo SPH (smoothed particle hydrodynamics) che utilizza la rappresentazione integrale per l'approssimazione delle funzioni di campo.

Metodi meshfree particellari (MPMs)

Un metodo meshfree particellare (meshfree particle method) appartiene a quella classe dei metodi meshfree che impiegano un sistema di particelle discrete finite in numero per rappresentare lo stato di un sistema e per seguirne e registrarne i movimenti. Ciascuna particella può o essere direttamente associata a un oggetto fisico discreto oppure rappresentare una parte del dominio continuo del problema. Nell'ambito della dinamica dei fluidi, ciascuna particella possiede un certo numero di variabili di campo come la massa, il momento, l'energia, la posizione, e l'evoluzione del sistema fisico è determinata in base ai principi di conservazione della massa, del momento e dell'energia. I principali metodi meshfree particellari seguono l'approccio Lagrangiano, poiché le particelle rappresentano il sistema fisico che si muove in base alle interazioni interne e alle forze esterne, e così evolve nel tempo. Inoltre la maggior parte di tali metodi utilizza tecniche d'integrazione nel tempo esplicite.

Le particelle infine costituiscono la struttura di calcolo per l'approssimazione delle variabili di campo.

I principali vantaggi dei metodi meshfree particellari rispetto ai convenzionali metodi numerici grid-based sono i seguenti:

- a) il dominio del problema è discretizzato con particelle che non hanno connessione: perciò la trattazione di grandi deformazioni risulta più semplice;
- b) la discretizzazione di geometrie complesse risulta relativamente semplice poiché è richiesta solo una discretizzazione iniziale;
- c) è facile ottenere le caratteristiche dell'intero sistema fisico seguendo il moto delle particelle, identificare superfici libere, interfacce in movimento e bordi deformabili ed ottenere la storia nel tempo delle variabili in ciascun punto del materiale.

La strategia di soluzione dei metodi meshfree particellari

L'obiettivo è quello di realizzare analisi numeriche per problemi complessi senza l'utilizzo di una mesh predefinita che realizzi una connessione fra i nodi.

Le differenze tra i metodi grid-based e i metodi meshfree particellari sono le seguenti:

- il dominio del problema è discretizzato con particelle, ovvero la discretizzazione spaziale è realizzata con una rappresentazione a particelle (particle representation);

- le funzioni, le derivate e gli integrali presenti nelle equazioni governanti sono approssimati utilizzando le particelle, ovvero la discretizzazione numerica è ottenuta con un'approssimazione a particelle (particle approximation).

Rappresentazione a particelle

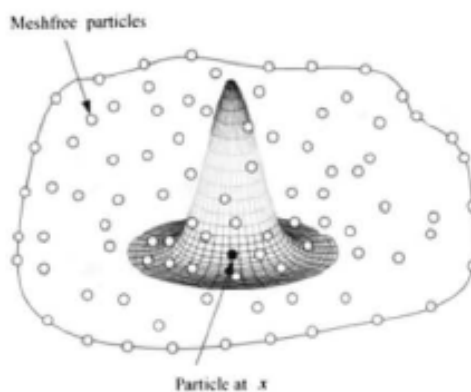
Nei metodi MPMs non c'è bisogno di prescrivere una connessione tra le particelle. Ciò che è richiesto è la distribuzione iniziale delle particelle che rappresentano il dominio del problema, se quest'ultimo non è già inizialmente in forma di particelle discrete. Un possibile modo di procedere consiste nel predisporre le particelle stesse nei baricentri delle celle della mesh, oppure in corrispondenza dei nodi, oppure in entrambe le posizioni.

Approssimazione a particelle

La discretizzazione numerica nei metodi MPMs richiede l'approssimazione dei valori delle funzioni, delle derivate e degli integrali in corrispondenza di una particella attraverso un'approssimazione a particelle utilizzando le informazioni contenute in tutte le particelle adiacenti che hanno influenza sulla particella stessa. L'area d'influenza di una particella è denominata dominio d'influenza o di supporto. Ad esempio una variabile di campo u per una particella posizionata in $\mathbf{x}=(x,y,z)$ all'interno del dominio del problema può essere approssimata utilizzando le informazioni delle particelle all'interno del dominio di supporto della particella in \mathbf{x} nel modo seguente:

$$u(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \Phi_i u_i$$

Dove N è il numero di particelle all'interno del dominio di supporto della particella in \mathbf{x} , u_i è la variabile di campo in corrispondenza della particella i , Φ_i è la funzione di forma della particella i costruita utilizzando le informazioni di tutte le particelle situate all'interno del dominio di supporto della particella in \mathbf{x} .



Dominio di supporto della particella in x

Una tipica procedura di soluzione dei metodi MPMs richiede i seguenti passi:

- 1) rappresentazione del dominio del problema con particelle cosicché siano note le informazioni di calcolo in corrispondenza delle particelle discrete ad un certo istante iniziale t , con un'adeguata trattazione delle condizioni al bordo;
- 2) discretizzazione delle derivate o degli integrali nelle equazioni governanti con adeguate approssimazioni a particelle;
- 3) a partire dalle informazioni note sulla velocità e/o posizione, calcolo delle deformazioni e successivamente delle tensioni in corrispondenza di ciascuna particella discreta all'istante t ;
- 4) calcolo dell'accelerazione di ciascuna particella a partire dalle tensioni calcolate;
- 5) utilizzando l'accelerazione all'istante t , calcolo delle nuove velocità e delle nuove posizioni all'istante di tempo $t+\Delta t$, dove Δt è il passo temporale;
- 6) dalle nuove velocità e/o posizioni, calcolo delle nuove deformazioni all'istante di tempo $t+\Delta t$, e successivamente delle nuove tensioni. Ripetizione delle operazioni 4,5 e 6 fino ad arrivare all'istante di tempo finale.

CAPITOLO 3 ALAN TURING E I MODELLI MATEMATICI

Dedico il terzo capitolo ad un personaggio che a mio avviso identifica gli aspetti, tecnici e filosofici più profondi della scienza moderna; una di quelle menti geniali che ha contribuito a cambiare il corso della nostra storia e che, come spesso è capitato, da Galileo in poi, è risultato scomodo ... Qualcuno, in futuro potrebbe pensare di applicare concettualmente i modelli matematici sviluppati da Turing in alti ambiti industriali?



3.1 FERRO E OTTONE¹²

Nel XX secolo, un lungimirante matematico inglese sognò delle macchine che manipolavano informazioni. Alan Turing, era un pensatore brillante e profondamente originale. Deciso a non dare nulla per scontato e a essere sempre autosufficiente in ogni ambito, potrebbe essere definito un Robinson Crusoe della mente.

Nel 1935 fu attratto da un difficile problema matematico, e riversò su questo la sua attitudine da naufrago, con un successo strepitoso. Turing partì da zero, come sempre, e definì una macchina astratta, assimilabile a un computer in tutto e per tutto, tranne che per il nome; poteva cioè manipolare qualsiasi informazione definibile con precisione. In altre parole, poteva leggere, scrivere, ricordare ed elaborare qualunque informazione.

¹² Tratto integralmente da: Schiavi del Computer? Gregorj J. E. Rawlins Ed. Laterza. 1999

3.2 IL TITANO GABBATO

Nel 1939, allo scoppio della seconda guerra mondiale, Turing andò a lavorare per il governo, per dare una mano a decifrare i radiomessaggi cifrati nemici. Per fortuna dell'Inghilterra, il suo lavoro fu molto facilitato dal fatto che i capi tedeschi, nonostante la loro abilità strategica e militare, vivevano ancora nell'Ottocento: l'Alto Comando tedesco, a dispetto di molti indizi contrari, si rifiutò di credere che nel campo dello spionaggio i giochi potessero cambiare. I tedeschi usavano una macchina per cifrare i loro messaggi, ma non potevano certo immaginare che il nemico potesse usare una macchina per decifrarli: solo degli uomini, secondo loro, erano in grado di farlo.



Enigma, la macchina usata dai soldati tedeschi durante la II guerra mondiale per criptare i messaggi

Comunque, sapevano fare la guerra con grande maestria, e nel 1940 l'Inghilterra era in una situazione disperata. Proprio allora Turing e la sua squadra di decifраторi costruirono una sorta di computer primitivo, e, seduti al tavolo di poker della guerra, se ne servirono per leggere tutte le carte che Hitler aveva in mano...

Non conta davvero molto quanti sottomarini avete, se il vostro nemico sa sempre dove si trovano. I piloti della Royal Air Force furono senza dubbio degli eroi, ma senza la decifrazione dei messaggi e il radar appena inventato in grado di rivelare loro dove sarebbe avvenuto il prossimo attacco, l'Inghilterra forse non sarebbe sopravvissuta per glorificarli. Senza le nuove tecnologie dell'informazione, nell'Atlantico sarebbe stato affondato un numero assai più ingente di navi di rifornimento americane, sarebbero stati abbattuti molti più bombardieri in volo sulla Germania, e probabilmente l'Inghilterra sarebbe stata invasa nel 1941.

3.3 LE MERAVIGLIE DEL POTERE

Prima della fine della guerra Turing si rese conto che avrebbe potuto costruire una versione concreta della sua astratta macchina universale...

*Ma, purtroppo, i burocrati del dopoguerra non capirono gli usi potenziali della macchina ...Anche se finanziarono il progetto di Turing, l'Inghilterra era stremata, l'ignoranza e la burocrazia dure a morire... E Turing puntava lo sguardo così lontano che non capì mai perché doveva spiegare al governo tutto ciò che intravedeva. **Non arrivò mai a capire che la burocrazia si paralizza senza il pungolo della guerra totale, e nel nostro mondo la politica gioca un ruolo più importante della ragione. Non aveva capito che, a dispetto di ciò che diciamo, noi aborriamo i cambiamenti nel modo più assoluto.***

A poco a poco fu estromesso dal suo stesso progetto.

Le persone sono ciò per cui lottano. Privato della sua creatura, Turing non aveva più nulla per cui o contro cui lottare. Poi, nel 1952, la giustizia inglese lo condannò per omosessualità, un crimine allora gravissimo. Fu obbligato a sottoporsi alla castrazione chimica con una terapia ormonale, per evitare la detenzione o la Castrazione chirurgica. Non so quanto sia verità e quanto leggenda...Ma si racconta nelle biografie non ufficiali che in gioventù Turing era rimasto molto colpito dai versi della Strega Cattiva in Biancaneve e i sette nani di Walt Disney: Tuffa la mela nell'intruglio, impregnala col sonno della morte...

...Due settimane dopo il suo quarantaduesimo compleanno, lunedì 7 giugno 1954, Turing mangiò una mela e andò a dormire. Sempre fedele alla sua mentalità da Robinson Crusoe, se l'era riempita di cianuro.



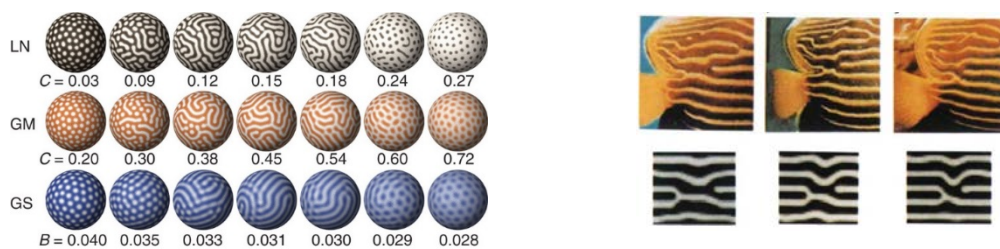
Alan Turing

Turing ha perseguito, naufrago anticipatore, la meccanizzazione sistemica del pensiero attraverso il progetto di costruzione di macchine calcolatrici. Dato il grande successo delle macchine nell'ambito fisico, perché non cercare di estenderne l'uso a quello dell'attività mentale? Tale linea di pensiero costituisce una parte significativa dello sfondo culturale che ha portato all'emergere del computer e di ogni suo sviluppo fino ai giorni nostri e che ha dato spunto, come mai prima, a chi ha saputo coglierne la lungimiranza,

su come guardare i problemi, gli interrogativi e le nuove frontiere del progresso tecnico-scientifico apparentemente inarrivabili, attraverso occhi e profondità nuove e radici antiche.

3.4 LA MATEMATICA E LA NATURA, IL MODELLO DELLA MORFOGENESI IDEATO DA ALAN TURING

La morfogenesi, dal greco morfè cioè forma, è una parte dell'embriologia che analizza la formazione di patterns o forme. Lo studio sui patterns, i modelli degli esseri viventi, e la loro formazione è tutt'oggi un problema aperto. La genetica non è riuscita ancora a dare una spiegazione alla formazione dei patterns e, a causa di questo grande mistero, sono nati diversi modellimatematici, nel tentativo di darne un'interpretazione. Senza alcun dubbio i geni ricoprono un ruolo fondamentale nella formazione dei patterns ma la loro presenza non è sufficiente per ipotizzare una teoria completa. I geni rappresentano uno stampo, una ricetta, ma non danno una soddisfacente spiegazione al meccanismo con il quale l'informazione genetica è trasferita fisicamente nel pattern. Lo studio della morfogenesi ha origini molto antiche, i primi studi risalgono all'epoca di Aristotele, ma solo all'inizio del XX secolo si capì che la matematica potesse ricoprire in tal contesto un ruolo fondamentale. Il biologo matematico Thompson D'Arcy nella sua celebre opera "On the growth and form" è estremamente convinto che un organismo possa essere rappresentato da una funzione in senso matematico. Nella conclusione dell'opera mostra come esempi di curve spirali, le zanne dell'elefante, gli artigli del gatto e i denti del castoreo. Per lo studioso la formazione di un organismo è considerata un evento nello spazio tempo, e non solo nello spazio. Inoltre cerca di dimostrare come crescita e forma siano legate: interpreta entrambe a partire dai loro aspetti matematici e ridimensiona l'importanza della selezione naturale, vista solamente come artefice dell'eliminazione delle forme non adatte. Dopo trentacinque anni dall'opera di D'Arcy, Alan Turing diede un grande contributo allo studio sulla formazione dei patterns.



Esempio di Morfogenesi svolto da Miyazawa, Okamoto e Kondo

Turing aveva letteralmente capito come fanno i leopardi ad avere le loro macchie. Questo è stato l'ultimo importante lavoro da lui completato, culminato nella pubblicazione di un paper chiamato "Le Basi Chimiche della Morfogenesi" nel 1952. Successivamente ha lavorato sulle sue teorie morfogeniche solo sporadicamente ed è difficile non pensare che le sue ricerche lo abbiano portato a riflettere sulla sua stessa biologia come chimicamente alterata. A prescindere da ciò, vero è che Turing ha identificato le equazioni base di reazione-diffusione che si celano dietro a pattern di formazione naturali, come quelle che regolano la spirale di una conchiglia o le strisce di una tigre. Ha proposto l'idea che questi pattern siano formati dall'interazione di due agenti chimici, o "morfogeni": un attivatore ed un inibitore.

L'attivatore incoraggia l'espressione di una determinata caratteristica, come il colore delle macchie di un leopardo, mentre l'inibitore disattiva quella determinata espressione. I due morfogeni si diffondono nel sistema biologico in misure differenti; il risultato è un macropattern nato dalle interazioni chimiche locali. La teoria della morfogenesi di Turing è stata empiricamente convalidata dopo 60 anni dalla sua morte. Il suo canto del cigno scientifico è stato offuscato da molti altri trionfi raccolti durante la sua vita. Nelle biografie, infatti, rivestono ruolo di maggiore importanza la decrittazione di Enigma e il concepimento dell'intelligenza artificiale rispetto alla morfogenesi spesso passata nell'oblio.

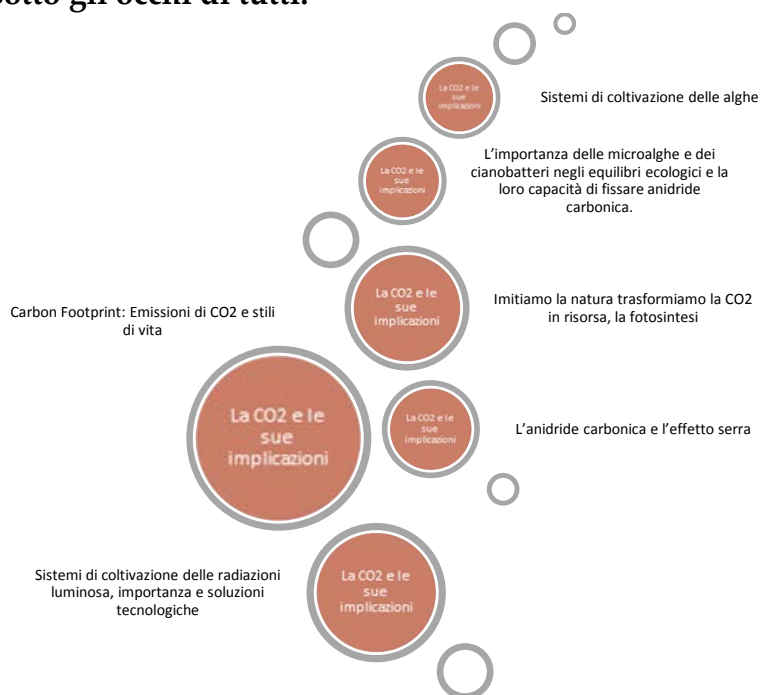
In ogni caso, il fatto che le sue idee e teorie siano state così tante da competere tra loro è un'ulteriore testimonianza del suo genio multidimensionale, e della necessità di imparare sia dal suo tragico destino che dalla sua folle produttività. *Come Turing stesso ha detto nel 1950, "possiamo solo vedere poco davanti a noi, ma in quel poco possiamo trovare un sacco di cose che devono essere fatte."*

Alan Turing ha dimostrato un particolare quanto unico modo di scrutare la natura, accorgersi delle complesse regolarità, ripetizioni e parallelismi che meglio espongono il concetto che già fu di Galilei: la natura, un libro scritto con il linguaggio della matematica. Leggere la natura e poi tradurla nell'universale linguaggio dei numeri, tramite questa astrazione ricondurla ad una teoria esemplare, come nel caso proprio della morfogenesi (dimostrata poi vera), costruendo così un ponte tra i virtuosi e spesso incomprensibili astrattismi del calcolo e la realtà delle cose. Come fa una cellula a sapere quale compito deve svolgere, come fa a sapere in cosa evolvere, come le vengono trasmesse le informazioni necessarie?

CAPITOLO 4 LA CO₂ E LE SUE IMPLICAZIONI

Il nostro "Oggi" è la somma degli accadimenti della nostra storia socio-culturale e scientifico-tecnica. L'ambiente, l'ecosistema, le risorse, il clima, la produzione... Il mondo in cui viviamo è il risultato di azioni, attori e registi... Noi.

Tutto sotto gli occhi di tutti.



Ora e di qui in poi, in accelerazione costante, l'attenzione e l'urgenza saranno poste alla razionalizzazione delle risorse, alla conservazione di un ecosistema vacillante, alla preservazione della qualità dell'ambiente e all'adattamento ai cambiamenti climatici già in atto... Il tutto in un sistema complesso, sempre più complesso e articolato in funzione delle azioni degli attori e dei registi di cui sopra che non accennano a cambiamenti sostanziali... Per ora...

La responsabilità etica della ricerca e, di conseguenza, della produzione, deve in modo imprescindibile muoversi sul COME e sul DOVE...

COME...

-Seguendo un Sistema... La Teoria dei Sistemi di Luhman, importata dall'ambito sociologico, può venire in aiuto nel fornire uno standard di comportamento nella finalizzazione delle energie organizzative.

-Osservando e applicando congiuntamente un approccio organizzativo integrato a metodi matematici evoluti... Strumenti primordiali e sofisticatissimi che la natura insieme alla matematica e ai pensatori folli tra i quali Turing,

citato in precedenza, hanno teorizzato ante litteram concertando semplice e complesso, antico e nuovo...

DOVE...

Dove più serve... Perché ci è impossibile non respirare... La Vita non può esserci senza respiro... Nell'aria, quindi...nell'atmosfera...dove pare esserci un nemico giurato, che continuiamo a produrre e a scartare, ma che gioca contro al nostro benessere, alla nostra omeostasi, un nemico impossibile da ignorare, poiché onnipresente, difficile da ridurre, la cui esistenza, però, risulta essere indispensabile: la CO₂

Il nuovo approccio Deus ex Machina¹³ di questa trattazione è il seguente, occorre chiedersi: la CO₂ è veramente solo un pericolo per l'uomo oppure potrebbe l'uomo stesso e noi ricercatori con gli strumenti tecnico-scientifici in nostro possesso trasformarla in una risorsa?

4.1 CARBON FOOTPRINT: EMISSIONI DI CO₂ E STILI DI VITA

E' noto che ogni giorno con le nostre azioni emettiamo in atmosfera grandi quantità di anidride carbonica (la CO₂) e altri gas, che concorrono al cosiddetto effetto serra e stanno provocando cambiamenti climatici molto importanti.

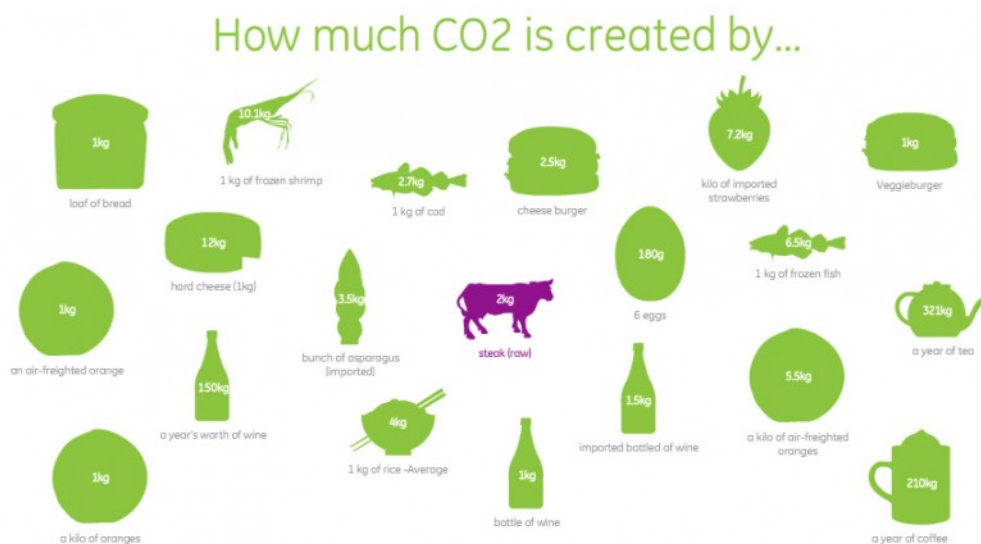


Simbolo del Carbon FootPrint

Ad esempio, mangiando una banana emettiamo 80g di CO₂ eq, mentre una lavatrice a pieno carico provoca il rilascio di 700g CO₂ eq per lavaggio. Accorgersene è difficile perchè queste emissioni non si vedono e non sono rilasciate tutte insieme, ma solo a poco a poco durante le fasi di produzione della

¹³ "Il dio (che parla o appare) da una macchina": nell'antico teatro greco classico, l'apparizione sulla scena della divinità, che veniva realizzata mediante un apposito meccanismo e che di solito costituiva l'elemento risolutore della tragedia; quindi, *fig.*, circostanza o persona che inaspettatamente interviene a risolvere una situazione difficile o è l'artefice del buon andamento di qualcosa.

banana o funzionamento della lavatrice. Ma allora come possiamo capire l'impatto delle nostre azioni in termini di CO₂ eq.? Per quantificare e ridurre questo impatto, gli scienziati hanno ideato un indicatore efficace, l'impronta di carbonio o "Carbon Footprint".



Esempi di CO₂ generata per produzione di prodotti

L'impronta ecologica è un indicatore che determina l'impatto ambientale di un singolo o di una collettività. Essa si calcola su determinati parametri quali le necessità che vengono richieste per condurre il proprio stile di vita, ma anche i consumi energetici.

Si tratta di un concetto un po' astratto, ma che viene sempre più impiegato per valutare la pressione di un singolo, di una collettività e anche di una Nazione nei confronti dell'ambiente.

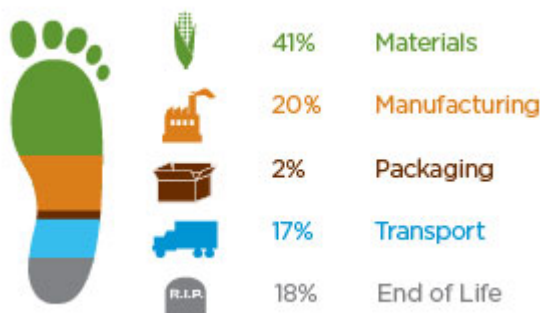
A stabilire i parametri e a calcolare l'impronta ci pensa la Global Footprint Network, punto di riferimento in tema ambientale che dialoga e collabora giornalmente con gli Stati per misurare l'impronta e anche per cercare dei rimedi atti a ridurla.

Il Carbon Footprint in dettaglio rappresenta il totale dei gas serra (Greenhouse gases) che produciamo giornalmente a livello di singolo individuo attraverso la combustione di combustibili fossili per l'elettricità, il riscaldamento, etc, analogo al concetto di WaterFootprint.

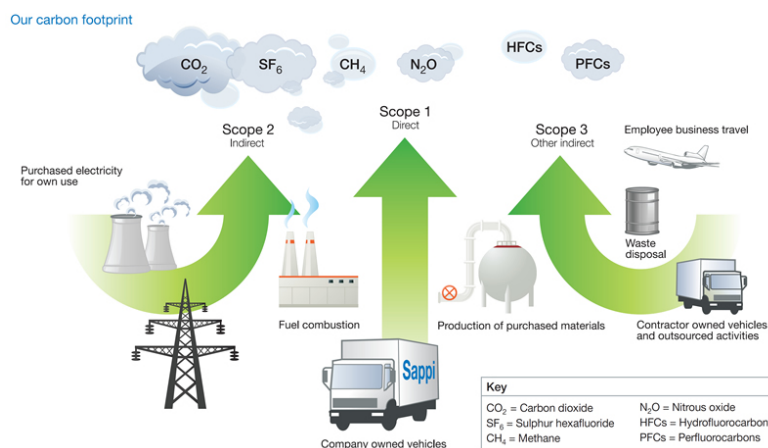
Il Carbon Footprint si misura in KG o tonnellate di Anidride Carbonica equivalente.

Il Carbon Footprint è calcolato come la somma di due componenti, il primario ed il secondario:

- Il Carbon Footprint primario è quello derivante direttamente dalle emissioni di CO₂ che dipendono dalle nostre azioni come i trasporti, il riscaldamento, l'aria condizionata, etc.
- Il secondario invece deriva dalle emissioni generate dal ciclo di vita dei prodotti che usiamo quotidianamente

CO₂ prodotta nel ciclo di vita

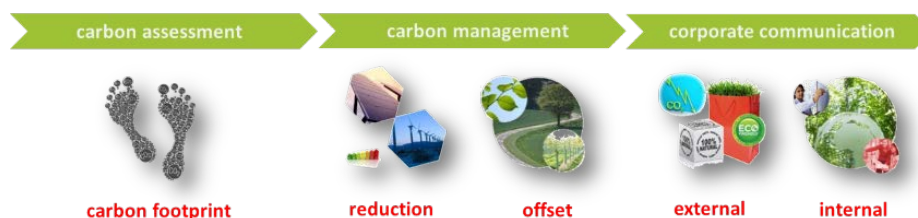
In conformità al Protocollo di Kyoto, i gas ad effetto serra da includere sono: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido d'azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFCs), esafluoruro di zolfo (SF₆) e perfluorocarburi (PFCs). La tCO₂e (tonnellate di CO₂ equivalente) permette di esprimere l'effetto serra prodotto da questi gas in riferimento all'effetto serra prodotto dalla CO₂, considerato pari a 1 (ad esempio il metano ha un potenziale serra 25 volte superiore rispetto alla CO₂, e per questo una tonnellata di metano viene contabilizzata come 25 tonnellate di CO₂ equivalente).



Da cosa è composto il "FootPrint"

La misurazione della carbon footprint di un prodotto o di un processo richiede in particolare l'individuazione e la quantificazione dei consumi di materie prime e di energia nelle fasi selezionate del ciclo di vita dello stesso. A

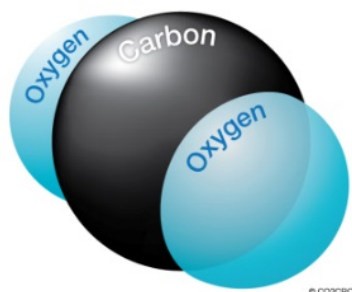
questo proposito l'esperienza degli ultimi anni suggerisce che il label di carbon footprint è percepito dai consumatori come un indice di qualità e sostenibilità delle imprese. Le aziende, oltre a condurre l'analisi e la contabilizzazione delle emissioni di CO₂, si impegnano a definire un sistema di carbon management finalizzato all'identificazione e realizzazione di quegli interventi di riduzione delle emissioni, economicamente efficienti, che utilizzano tecnologie a basso contenuto di carbonio. Le misure di riduzione possono essere integrate quelle per la neutralizzazione delle emissioni (carbon neutrality), realizzabili attraverso attività che mirano a compensare le stesse con misure equivalenti volte a ridurle con azioni economicamente più efficienti o più spendibili in termini di immagine (es. piantumazione di alberi, produzione di energia rinnovabile, etc.).



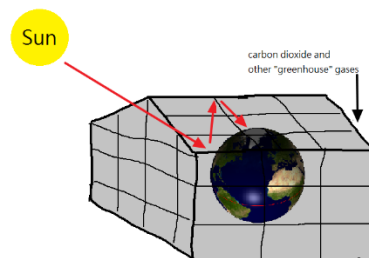
Ipotesi di flusso per il miglioramento del Carbon Footprint

La metodologia sviluppata per il calcolo della CF di un prodotto è piuttosto complessa, così come la sua misura. Per poterlo fare bisogna tenere conto di tutte le fasi della filiera di produzione, a partire dalle materie prime utilizzate, dai trasporti necessari, dal consumo di energia, dalla produzione dei rifiuti e delle emissioni in aria, acqua o suolo. Questo approccio comunemente viene definito approccio dalla culla alla tomba, o più tecnicamente analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA). Si sono sviluppati negli ultimi anni diversi standard di riferimento che garantiscono la metodologia e la bontà delle misure, nonché costituiscono un buon sistema di riferimento per poter comparare la CF di prodotti diversi. I più affidabili e robusti sono il PAS 2050 e il GHG Protocol Product Standard (sviluppato dal World Resource Institute e World Business Council for Sustainable). È prevista una ulteriore armonizzazione con la pubblicazione della norma ISO 14067.

4.2 L'ANIDRIDE CARBONICA E L'EFFETTO SERRA



Schema Molecola CO₂



Schema effetto serra

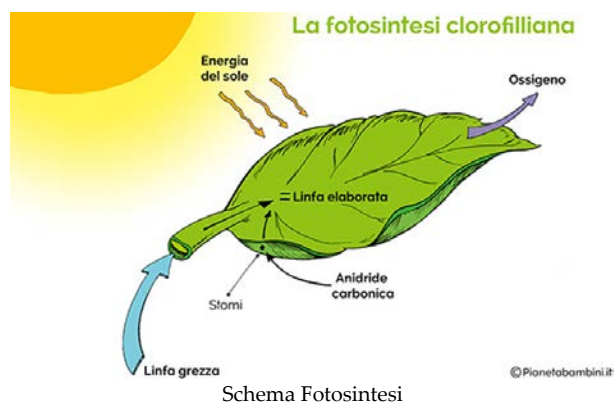
L'anidride carbonica (CO₂) è un gas incolore composto da due atomi di ossigeno e un atomo di carbonio, che si forma durante la combustione di un qualsiasi elemento contenente carbonio. Viene utilizzata dalle piante durante la fotosintesi ed è il gas che emettiamo espirando. Durante il corso dei secoli, il livello di anidride carbonica nell'atmosfera si è mantenuto in equilibrio all'interno dei cicli naturali, ma l'industrializzazione e l'invenzione delle automobili hanno alterato questo equilibrio, incrementando significativamente la quantità di CO₂ presente in atmosfera. A differenza di altre sostanze, la CO₂ non è direttamente dannosa per la nostra salute, ma lo è indirettamente; essa infatti concorre a quello che viene definito comunemente effetto serra il cui intensificarsi sta producendo dei significativi cambiamenti sul clima a livello globale, che richiedono misure urgenti di intervento. Oltre all'anidride carbonica, il metano (CH₄), il protossido di azoto (N₂O), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC) e l'esfluoruro di zolfo producono questo effetto, anche se in misura diversa l'uno dall'altro. Per poter tenerne conto e allo stesso tempo semplificare un po' le cose, "gli scienziati" hanno deciso di riferire il potenziale di ciascun gas alla CO₂ con il global warming potential, ovvero la misura di quanto un determinato gas influisce sui cambiamenti climatici in un dato periodo di tempo se comparato con la stessa quantità di CO₂. Ad esempio, il metano in un arco di tempo di 50 anni ha un GWP pari a 56, ovvero 1 kg di CH₄ emesso in atmosfera ha un effetto equivalente a quello di 56 kg di CO₂.¹⁴

¹⁴ Fonte Eni Scuole

4.3 IMITIAMO LA NATURA: TRASFORMIAMO LA CO₂ IN RISORSA, LA FOTOSINTESI

Ritorniamo a come l'abbiamo studiata alle scuole elementari, quando la maestra ci diceva di non mettere le piante in camera da letto ma solo in salotto. E' da questi insegnamenti "elementari" che dobbiamo ripartire con l'osservazione del pianeta.

La fotosintesi clorofilliana rende possibile la vita delle piante e di chi lo abita. La "fotosintesi clorofilliana" consiste nella produzione di sostanze nutritive per la pianta in presenza di luce e clorofilla (cioè quella sostanza che, tra le altre cose, rende verdi le foglie). Quando la luce colpisce le foglie, la clorofilla si attiva e trasforma l'anidride carbonica, l'acqua e i sali minerali assorbiti dalle radici in sostanze nutritive per la pianta (zuccheri e amidi) e ossigeno. Quest'ultimo viene immesso nell'ambiente e nell'aria attraverso dei piccoli forellini presenti sulle foglie, mentre gli zuccheri e gli amidi vengono utilizzati dalla pianta per vivere, crescere, fiorire e produrre semi e frutti. Visto che, tale procedimento è innescato dalla luce, avviene solamente di giorno. Durante la notte, infatti, la pianta respira e immette anidride carbonica nell'ambiente, proprio come noi.



La fotosintesi clorofilliana è un processo chimico per mezzo del quale, in presenza di luce solare, le piante verdi e altri organismi producono sostanze organiche, principalmente carboidrati, a partire dal primo reagente, l'anidride carbonica atmosferica e l'acqua metabolica¹⁵. La serie di reazioni chimiche

¹⁵ Smith, A. L., Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology, Oxford University Press, 1997, p. 508, ISBN 0-19-854768-4.

che costituiscono la fotosintesi rientra tra i processi anabolici (di sintesi) dei carboidrati ed è del tutto opposta ai processi inversi di catabolismo (ossidazione).

Durante la fotosintesi, con la mediazione della clorofilla, la luce solare permette di convertire sei molecole di CO₂ e sei molecole d'H₂O in una molecola di glucosio (C₆H₁₂O₆), zucchero fondamentale per la vita della pianta. Come sottoprodotto della reazione si producono sei molecole di ossigeno, che la pianta libera nell'atmosfera attraverso gli stomi che si trovano nella foglia. La fotosintesi clorofilliana è il processo di produzione primaria di composti organici da sostanze inorganiche nettamente dominante sulla Terra. E', inoltre, l'unico processo biologicamente importante in grado di raccogliere l'energia solare.

La quantità di energia solare catturata dalla fotosintesi è immensa, dell'ordine dei 100 terawatt¹⁶, che è circa sei volte quanto consuma attualmente la civiltà umana¹⁷. Oltre che dell'energia, la fotosintesi è anche la fonte di carbonio dei composti organici degli organismi viventi. Essa trasforma, ogni anno, circa 115×10⁹ chilogrammi di carbonio atmosferico in biomassa.¹⁸

4.4 L'IMPORTANZA DELLE MICROALGHE E DEI CIANOBATTERI NEGLI EQUILIBRI ECOLOGICI E LA LORO CAPACITÀ DI FISSARE ANIDRIDE CARBONICA.

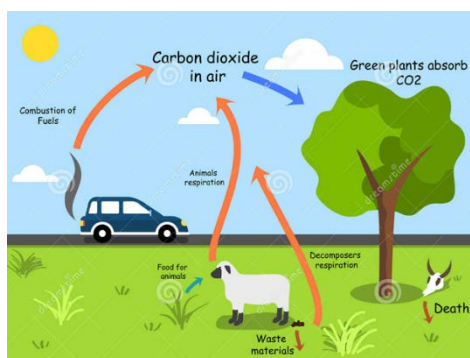
I cianobatteri sono ritenuti essere gli organismi che hanno prodotto per primi l'ossigeno atmosferico come scarto della fotosintesi ossigenica a partire da 3,5 miliardi di anni fa. Negli ambienti acquatici, le microalghe e i cianobatteri sono i produttori primari di ossigeno e costituiscono un importante anello della catena trofica degli ecosistemi marini, garantendo il flusso di materia ed energia necessario per il mantenimento degli organismi eterotrofi. L'energia utilizzata per la fotosintesi proveniente dalle radiazioni solari, attraversa gli strati d'acqua più superficiali permettendo la fotosintesi nei primi 40 metri di profondità. Essa risulta dunque un processo fondamentale nell'ecosistema perché da una parte produce ossigeno fondamentale per le specie animali e, dall'altra, fissa nel mondo vegetale la CO₂, che gli altri esseri viventi

¹⁶ Neelson KH, Conrad PG, *Life: past, present and future*, in *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.*, vol. 354, n° 1392, 1999, pp. 1923–39, DOI:10.1098/rstb.1999.0532, PMC 1692713, PMID 10670014.

¹⁷ World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980–2004 (XLS), Energy Information Administration, 31 luglio 2006

¹⁸ "Photosynthesis," McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, Vol. 13, p. 469, 2007

aerobici (uomo e animali) rilasciano nell'atmosfera attraverso la respirazione che consiste nell'assunzione dell'ossigeno atmosferico e nell'eliminazione di anidride carbonica e acqua, per mezzo di apparati e organi diversi (polmoni, branchie, trachee e inoltre diffusione dei gas attraverso la superficie corporea). Questa importante fissazione dell'anidride carbonica nel mondo vegetale consente di ridurre l'effetto serra determinato dalla presenza di gas come la stessa CO_2 . L'effetto serra consiste nel riscaldamento del pianeta per effetto dell'azione dei gas serra presenti nell'aria a concentrazioni relativamente basse (anidride carbonica, vapore acqueo, metano, ecc.). Tali gas permettono alle radiazioni solari di attraversare l'atmosfera mentre ostacolano il passaggio verso lo spazio di parte delle radiazioni infrarosse provenienti dalla superficie della Terra e dalla bassa atmosfera (il calore riemesso) comportandosi come i vetri di una serra per favorire la regolazione ed il mantenimento della temperatura terrestre ai valori odierni. Prima della Rivoluzione Industriale, l'uomo rilasciava pochi gas in atmosfera, ma ora la crescita della popolazione, l'utilizzo dei combustibili fossili e la deforestazione del secolo scorso (attualmente sembra si sia invertita la tendenza a deforestare) contribuiscono non poco al cambiamento nella composizione atmosferica. Le registrazioni dell'Organizzazione mondiale della meteorologia certificano che nel 2015 è stata varcata stabilmente la soglia delle 400 parti per milione di CO_2 . Anche i dati pubblicati dall'osservatorio hawaiano Mauna Loa Observatory della NOAA (US National Oceanic and Atmospheric Administration), certificano questo livello di CO_2 atmosferica che non si registrava sulla Terra da circa 3 milioni di anni, quando la temperatura media era di 3-4 °C più calda, il mare era alto 30 metri più di oggi e l'uomo non esisteva ancora. Inoltre la NOAA fa notare che si è giunti a questo valore di concentrazione di CO_2 in atmosfera con un tasso di crescita senza precedenti di 2-3 ppm/anno. Difatti aumenti di concentrazione di solo 10 ppm nelle ere passate hanno storicamente richiesto 1.000 o più anni.



Ciclo del carbonio prodotto da animali, uomo e attività umana e fissato da fotosintesi dei vegetali

La fotosintesi esercitata dai microrganismi fotosintetici risulta un fenomeno quantitativamente rilevante per diversi motivi. L'efficienza di conversione dell'energia solare in biomassa delle colture algali, e quindi la produttività per ettaro, è molto maggiore di quella ottenibile con le colture tradizionali. Da un ettaro di girasole o di colza si possono produrre 700-1000 kg di olio per anno, mentre le colture algali, se realizzate in adeguati impianti a reattori chiusi o "fotobioreattori", possono superare, alle nostre latitudini, le 20 tonnellate di olio per ettaro e per anno ed hanno un potenziale di oltre 30 tonnellate nei paesi tropicali¹⁹. Le colture algali non competono con le colture agrarie che necessitano di terreni fertili, non richiedono pesticidi e si possono realizzare su acqua di mare o su acque reflue da dove, in sinergia con i batteri associati, le microalghe prelevano i nutrienti che riciclano in biomassa dalla quale è poi possibile ottenere mangimi proteici o fertilizzanti oltre che biocombustibili. Le colture algali fissano grandi quantità di CO₂ (circa due chilogrammi di CO₂ per ogni chilogrammo di biomassa algale prodotta) ed inoltre possono efficientemente prelevarla dai fumi di combustione delle centrali termoelettriche o dai gassificatori. A dimostrazione della quantità di CO₂ fissata nella biomassa algale e della rilevanza che può avere la biomassa algale nella stessa fissazione della CO₂, la stechiometria può definire i quantitativi di composti necessari per comporre 1 Kg di biomassa algale (ad esempio di *Chlorella* spp. - vedere tabella sotto). Il calcolo stechiometrico permette di determinare matematicamente le quantità di reagenti e prodotti coinvolti in una reazione chimica. Nella tabella riportata di seguito, sono presenti in colonna (a) il peso degli elementi presenti in 1 kg di *Chlorella* spp., in colonna (b) il peso atomico dei singoli elementi, in colonna (c) la composizione molare di ogni singolo elemento che compone l'alga, in colonna (d) la quantità di composti che bisogna impiegare per produrre 1 kg di biomassa, composti in cui sono presenti i singoli elementi. Per produrre 1 Kg di *Chlorella* in cui è presente 594,43 gr di carbonio occorrono 2.179,58 gr di CO₂. Difatti: 594,43 grammi di carbonio equivalgono a 49,54 moli di Carbonio (peso atomico 12). La CO₂ ha una massa molare di 44. Di conseguenza 49,54 moli di CO₂ (equivalenti a 594,43 gr. di solo carbonio) equivalgono a 49,54 x 44 (valore approssimato) = 2179,58 gr. di CO₂.

Per produrre 1 Kg di *Chlorella* in cui sono presenti 594,43 gr di carbonio occorrono 2.179,58 gr di CO₂.

¹⁹ Rodolfi et al., 2007

Difatti: 594,43 grammi di carbonio equivalgono a 49,54 moli di Carbonio (peso atomico 12). La CO₂ ha una massa molare di 44. Di conseguenza 49,54 moli di CO₂ (equivalenti a 594,43 gr. di solo carbonio) equivalgono a 49,54 x 44 (valore approssimato) = 2179,58 gr. di CO₂.

| Analisi stechiometrica su fissazione di CO ₂ nella biomassa: Clorella vulgaris spp. | Composizione dell'alga (a) | Elementi (b) | Composizione molare dell'alga (c) | Quantità di composti nutrienti per produrre 1 Kg di alga (d) |
|--|----------------------------|--------------|-----------------------------------|--|
| ELEMENTI | g/kg di alga (peso secco) | Peso atom. | mol/kg | g/kg di alga |
| C | 594,43 | 12 | 49,54 | (CO ₂) 2.179,58 |
| H | 92,86 | 1 | 92,86 | (H ₂ O) 1.671,48 |
| O | 246,94 | 16 | 15,43 | (H ₂ O) 246,88 |
| N | 64,62 | 14 | 4,62 | (nitrati) 392,33 |
| P | 1,15 | 31 | 0,04 | (fosfati) 6,24 |
| | Tot. 1.000 | | | |
| Peso molare CO₂ | 44 | | g/mol | |
| Peso molare Carbonio | 12 | | g/mol | |
| Carbonio in alga secca | 594,4 | | g | |
| CO₂ necessaria | 2.179,47 | | g | |

Spirulina, Chlorella ed altre microalghe e cianobatteri, sono molto numerosi sulla terra: a seconda delle specie, le loro dimensioni individuali possono variare da pochi micrometri a qualche centinaia di millesimi di millimetro (10⁻⁶ m.)²⁰. La loro attività fotosintetica è fondamentale per la vita sulla terra in quanto si stima che producano fra il 30% e il 50% dell'ossigeno atmosferico, fissando contemporaneamente anidride carbonica per poter crescere e sintetizzare nuova sostanza organica. La biodiversità delle microalghe rappresenta una risorsa poco sfruttata: solamente 35.000 specie sono state descritte rispetto a quelle esistenti stimate essere fra 200.000 e 800.000. Comunemente questi microrganismi presentano un contenuto di proteine, carboidrati e grassi che varia notevolmente secondo le specie e le caratteristiche dell'ambiente in cui crescono. I lipidi, ad esempio, sono compresi tra un minimo dell'1 % ed un massimo del 40 % del loro peso secco. Tali quantità possono

²⁰ Sfruttamento delle microalghe tra realtà e prospettive – Fabio Barbato ed al. Enea Roma n° 26 Aprile 2012 - Tredici, 2007

variare in relazione alle condizioni di allestimento delle colture e alla temperatura così, quando le alghe unicellulari crescono in situazioni di carenza di sostanze nutritive, possono incrementare la resa di lipidi ad oltre il 70 % del loro peso secco e raggiungere valori di produttività pari a 12-14 g DW (peso secco) m⁻² day⁻¹ ²¹. Gli studi svolti per potenziare l'impiego delle alghe come coltura a uso energetico in diverse regioni del mondo hanno evidenziato la loro flessibilità. E' stato dimostrato che la crescita delle microalghe risulta notevolmente più rapida di quella delle piante terrestri se le alghe sono opportunamente fornite di nutrienti, luce e CO₂ ²². Di conseguenza, l'elevata produttività delle colture in termini di biomassa e il veloce ciclo di crescita dei microrganismi, consentirebbero di ottenere, attraverso una coltivazione massificata di questi microrganismi, notevoli quantità di biocarburanti a fronte di un' elevata fissazione di CO₂ nella biomassa vegetale (vedi sopra: 20 tonnellate di olio/anno ottenibile in coltura algale in fotobioreattori contro 1 tonnellata di olio per ettaro coltivato a colza). Questa situazione potrebbe bilanciare l'effetto serra sul nostro pianeta e ridurre i cambiamenti climatici generati da un eccesso di CO₂ nell'atmosfera. Sul versante delle energie rinnovabili, le colture algali rappresentano dunque una delle soluzioni di maggiore potenziale e sostenibilità. Se tecnologie quali la produzione di idrogeno, oggetto di numerose ricerche²³ necessitano ancora di studi di base per superare i limiti²⁴, la produzione di olio combustibile, metano ed etanolo, sono possibili. Ma purtroppo le colture algali come fonte di biocombustibili o sistemi per abbattere le emissioni di gas serra rappresentano ancora un obiettivo avveniristico, ancora una frontiera a cui giungere attraverso un cammino sicuramente complesso ma percorribile. Attualmente una coltura algale massiva di larga scala consuma più energia di quanta ne fissi sotto forma utile. Si consuma in queste coltivazioni energia necessaria per agitare la coltura, separare dal mezzo le microscopiche cellule algali, seccare la biomassa ed estrarre l'olio o la frazione combustibile, oltre all'energia contenuta nei materiali utilizzati per costruire i reattori e le strutture accessorie. Solo una gestione controllata, secondo molti ricercatori, attraverso l'impiego di CO₂ da combustione come fonte di carbonio e di acque reflue come fertilizzante, l'adozione di reattori di bassissimo costo di costruzione e gestione per unità di superficie ed un'attenta valorizzazione di tutti i costituenti della bio-

²¹ Walker, 2009; Mata, 2010

²² Pulz, 2001- Tredici ed al. 2007

²³ M. Tredici ed al.

²⁴ Torzillo et al., 2007

massa dopo estrazione dell'olio, potrà portare ad un bilancio energetico positivo fra energia consumata dal sistema per produrre biofuel ed energia fissata nella biomassa.

4.5 *SISTEMI DI COLTIVAZIONE DELLE ALGHE*²⁵

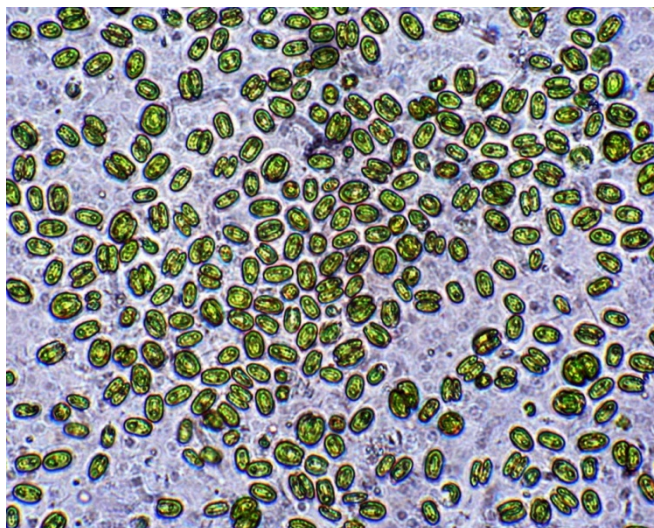


Immagine al microscopio ottico di una coltura di laboratorio della microalga marina Tetraselmis suecica (Fonte ISMAR-CNR)

Le microalghe possiedono alcune caratteristiche peculiari che contribuiscono a renderle particolarmente interessanti come la possibilità di essere coltivate in qualsiasi contesto (acque dolci, acque salate e acque ad elevato contenuto organico) ed una ottima efficienza di conversione dell'energia solare in biomassa (algale) che rende la loro produttività potenziale di gran lunga maggiore di quella ottenibile con le colture agricole tradizionali. Sfruttando la naturale capacità riproduttiva di questi micro-organismi e le innovative tecnologie non inquinanti, le alghe possono venire coltivate non solo in open pond situati all'aperto in situazioni climatiche ed ambientali favorevoli per illuminazione e temperature ma anche in sistemi chiusi: i fotobioreattori. La biomassa può essere utilizzata per differenti applicazioni: produrre biocarburante, generare energia elettrica e produrre sostanze (bioprodotti) di grande interesse in diversi settori industriali quali la produzione di integratori alimentari, farmaci, cosmetici e mangimi. Nonostante il livello di conoscenza scientifica raggiunto e i potenziali vantaggi, l'idea di utilizzare la fotosintesi

²⁵ Scritto il 25 February 2013 da Marco Faimali

delle microalghe come soluzione energetica è quanto mai controversa e il dibattito sulla reale possibilità di sfruttare questa risorsa come alternativa ai combustibili fossili o ai bio-combustibili da piante terrestri resta più che mai aperto anche se novità applicative interessanti ne risvegliano di tanto in tanto un rinnovato interesse. Detto ciò, l'ipotesi "microalgale" come soluzione energetica è ancora viva e continua a sorprendere.

Un' applicazione tecnologica di edilizia ecocompatibile: la casa ad alghe (Germania 2017) potrebbe rendere attuale la produzione di biomassa algale per produzione di energia. Questa soluzione difatti potrebbe ottimizzare la termostatazione nelle abitazioni attraverso la produzione di biomassa algale: l'energia impiegata per produrre alghe sarebbe contestualmente impiegata per termostatare l'abitazione con il vantaggio di ottenere biomassa per continuare nel circolo virtuoso che porta alla produzione energetica per l'abitazione. Questa sinergia fra termostatazione dell'abitazione e produzione di alghe potrebbe rendere vantaggioso nel tempo il bilancio energetico fra energia prodotta ed energia impiegata con la biomassa algale. Quello abitativo potrebbe essere un segmento economico interessante per l'inserimento della biomassa algale nel comparto energetico.



Rappresentazione virtuale della casa a microalghe²⁶

²⁶ Biq – Das Algen Haus: <http://www.biq-wilhelmsburg.de/>

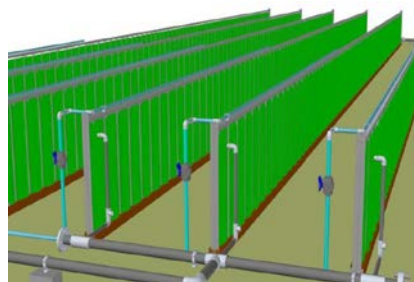
Si tratta di una palazzina di cinque piani dove le pareti sono rivestite da pannelli di vetro necessari per la coltivazione delle microalghe che crescono al loro interno. Le microalghe, grazie al processo di fotosintesi, assorbono i raggi solari e l'anidride carbonica creando un sistema di ombreggiamento. La struttura atta alla coltivazione delle microalghe funziona da isolamento acustico e termico: grazie all'ombreggiamento, l'edificio riesce a tenere temperature più basse in estate e sfruttare il calore prodotto dalla biomassa per il riscaldamento durante l'inverno. Le alghe forniscono biomassa, dalla quale, in un vicino impianto a biogas, si estrae metano; contemporaneamente viene prodotto calore che viene immesso nuovamente nell'edificio. La Casa ad Alghe può ottenere un guadagno netto di circa 4.500 kWh di energia all'anno. In altre parole, la facciata ad alghe potrebbe fornire l'energia necessaria per soddisfare il fabbisogno elettrico di una famiglia di almeno 4 persone.



Esempio di fotobioreattori anulari con illuminazione interna per la coltivazione in door. Questo sistema consente di arrivare ad elevatissime concentrazioni grazie al completo utilizzo per la fotosintesi della luce artificiale senza dispersioni e alla movimentazione del mezzo con insufflazione di CO₂.

Esempio di coltivazione in open pond all'aperto: una ruota a pale movimenta la coltura aumentando l'esposizione alla luce solare dei microrganismi con il movimento. La performance di crescita può essere incrementata con l'insufflazione di CO₂.

Esempio di fotobioreattori a pannello per coltivazione out-door: il rapporto fra il volume del reattore e la superficie esposta è ottimizzato con questa configurazione per ottenere il massimo di illuminazione solare per unità di volume. La movimentazione dei microrganismi attraverso insufflazione di aria e CO₂ consente di arrivare ad elevate concentrazioni: 4-5 gr/l (d.w.-peso secco) nel caso della *Chlorella Spp.*



4.6 *SISTEMI DI COLTIVAZIONE DELLE RADIAZIONI LUMI- NOSE, IMPORTANZA E SOLUZIONI TECNOLOGICHE*

La luce risulta di fondamentale importanza per l'allevamento indoor di microrganismi fotosintetici, indiscutibilmente per la sopravvivenza dei microrganismi stessi, ma soprattutto per modulare la produzione delle sostanze d'interesse. Essa è costituita dall'insieme delle radiazioni visibili dello spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda compresa tra 380 e 750 nm, che l'occhio umano percepisce nella gamma cromatica compresa fra il violetto ed il rosso. Essa è quindi, una piccola parte dell'ampio spettro di radiazioni provenienti dal sole e costituisce la luce utile per la fotosintesi (PAR, photosynthetic Active Radiation).

L'insieme di reazioni che avvengono nella fotosintesi, richiedono la presenza di specifici pigmenti fotosintetici, cioè molecole in grado di assorbire la luce in una certa banda del visibile; queste sono clorofille, caroteni, xantofille, ficocitrine, ficocianine ecc.. La fotosintesi microalgale è influenzata dalla quantità e qualità della luce incidente e dalla densità cellulare delle colture. Quindi per ottimizzare la crescita delle microalghe è necessario progettare impianti efficienti che permettano di controllare le condizioni di coltura e soprattutto, di sfruttare al meglio la fonte di luce incidente.

Colture con densità cellulare elevata richiedono un'intensità luminosa maggiore per ottenere il massimo dell'attività fotosintetica (PB max), che, in ogni caso, risulta inferiore a quella che può essere raggiunta in una coltura con bassa densità cellulare, in quanto la luce è attenuata dall'elevata concentrazione dei microrganismi che si schermano fra di loro. Le colture con un'alta densità cellulare che comporta ombreggiamento, quindi, possono essere inibite nella crescita; le alghe, tuttavia, si possono fotoacclimatare sia agli alti livelli di intensità luminosa (HL, High light), che a quelli più bassi (LL, Low Light).

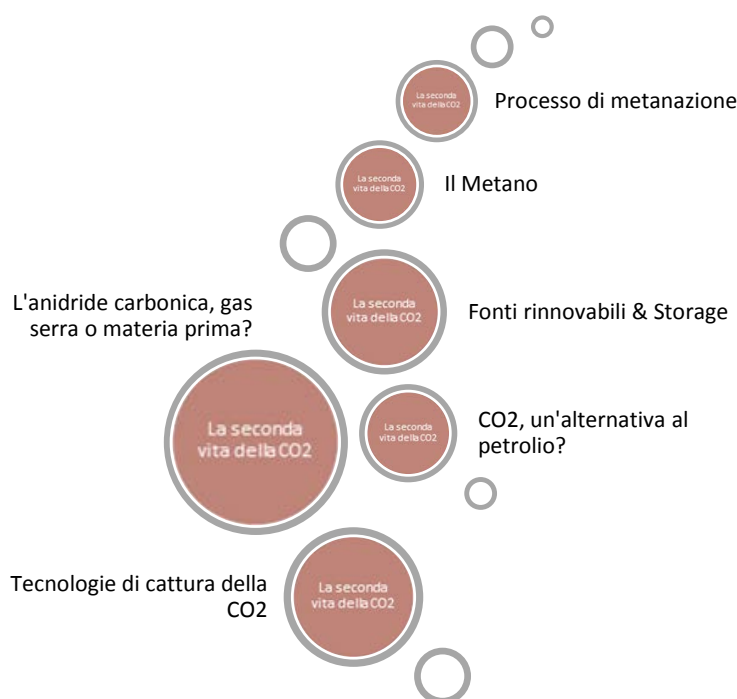
Le microalghe che si acclimatano ad alte intensità di luce tipicamente hanno:

- un alto tasso fotosintetico (PB)
- un basso contenuto di clorofilla per unità di biomassa
- alti livelli di pigmenti ausiliari come i carotenoidi
- bassa efficienza fotosintetica
- alto valore di IK (transizione tra fotosintesi luce dipendente e luce saturante).

Le microalghe e i cianobatteri che, invece, si acclimatano a basse intensità luminose hanno:

- basso tasso fotosintetico (PB)
- alto contenuto di clorofilla per unità di biomassa
- bassi livelli di pigmenti ausiliari come i carotenoidi
- alta efficienza fotosintetica
- basso valore di IK (transizione tra fotosintesi luce dipendente e luce saturante).

CAPITOLO 5 LA SECONDA VITA DELLA CO₂



Se diamo un'occhiata in rete, è facile reperire la definizione del carbonio²⁷. In questa sede considero unicamente la parte di mio interesse, sunto di 3 anni di ricerca: unito all'idrogeno, l'anidride carbonica forma vari composti chiamati "idrocarburi", che sono essenziali per l'industria in forma di combustibili fossili. Non essendo un chimico, tale affermazione mi sembra affascinante in quanto balza all'occhio immediatamente che, essendo tutti consapevoli di avere grandi quantità di carbonio sotto forma principalmente di anidride carbonica, potremmo disporre di grandi quantità di materia prima per generare

²⁷ E' l'elemento chimico della tavola periodica degli elementi che ha come simbolo C e come numero atomico 6. È un elemento non metallico, tetravalente (e raramente bivalente), insolubile nei solventi, inodore e insapore. Le sue differenti forme (o più precisamente allotropi) includono uno dei più morbidi (grafite) e dei più duri (diamante) materiali conosciuti. Altre forme allotropiche del carbonio sono il carbonio amorfo e i fullereni. Inoltre, ha una grande affinità per i legami chimici con atomi di altri elementi a basso peso atomico (tra cui il carbonio stesso) e le sue piccole dimensioni lo rendono in grado di formare legami multipli (proprietà che viene definita "desmalusogenia"). Queste proprietà permettono l'esistenza di 10 milioni di composti del carbonio. I composti di carbonio formano le basi di tutta la vita sulla Terra e il ciclo del carbonio-azoto fornisce parte dell'energia prodotta dalle stelle. Il carbonio si trova in tutte le forme di vita organica ed è la base della chimica organica. Tale non metallo ha l'interessante caratteristica di essere in grado di legarsi con sé stesso e con una vasta gamma di elementi (producendo più di 10 milioni di composti). Unito all'ossigeno forma il biossido di carbonio, che è assolutamente vitale per la crescita delle piante. Combinato a ossigeno e idrogeno forma vari gruppi di composti, tra i quali gli acidi grassi, essenziali per la vita, e gli esteri, che danno il sapore a molti frutti. Sebbene l'isotopo più comune sia il carbonio-12 (il cui nucleo è formato da 6 protoni e 6 neutroni), l'isotopo carbonio-14 è anch'esso di fondamentale importanza per le sue applicazioni pratiche, essendo comunemente usato per la datazione radioattiva di antichi reperti.

idrocarburi di sintesi²⁸. A questo punto il problema si sposta sull'aver l'idrogeno e sulle metodologie per ottenere il legame tra le molecole di CO₂ e H₂. Considerando la moltitudine di prodotti di sintesi che realizziamo, ritengo che le strategie industriali dovrebbero orientarsi principalmente alla realizzazione di sistemi produttivi atti a massimizzare l'utilizzo di tale opportunità. La CO₂ non è un inquinante, sebbene sotto certi aspetti possa sembrarlo, il maggior impatto ambientale dell'anidride carbonica è conseguente alla sua qualità di gas serra. Pur essendo l'effetto serra di per sé un effetto che avviene normalmente in natura, quando è troppo accentuato provoca un forte riscaldamento che ha effetti assai dannosi in agricoltura, per la salute e nell'ambiente in generale.

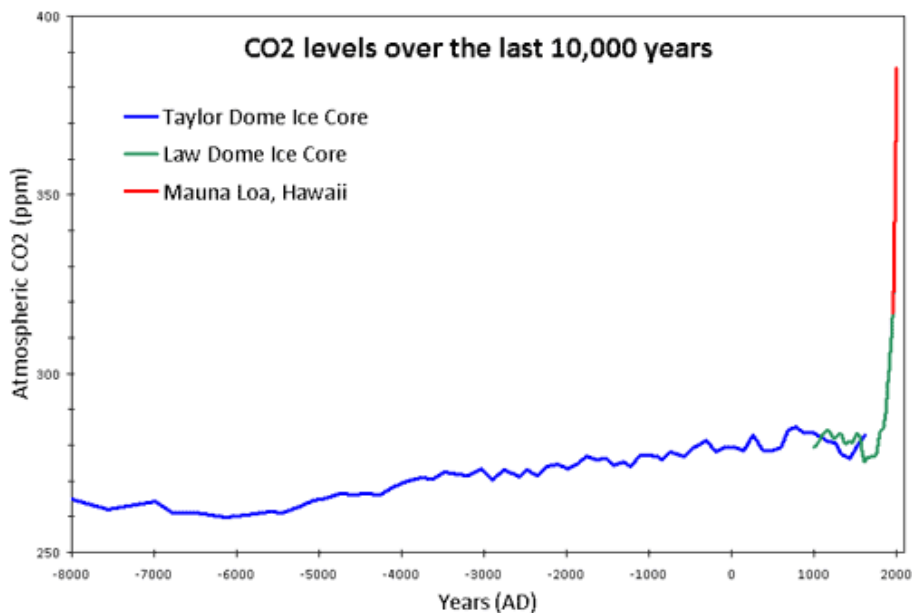
L'etichetta di inquinante, improvvisamente affibbiata alla CO₂, è un cattivo servizio svolto nei confronti di un gas che ha svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella sostenibilità di tutte le forme di vita sulla nostra meravigliosa Terra. Madre Terra ha sicuramente stabilito che la CO₂ non sia un inquinante.²⁹...

L'eccessiva concentrazione di CO₂ costituisce un inquinamento che, se non mitigato, farà aumentare la temperatura e provocherà stress anche irreversibili nelle colture. Normalmente consideriamo inquinanti delle sostanze che contaminano e rendono sporco o pericoloso l'ambiente. Un esempio classico è il biossido di zolfo, un sottoprodotto dell'attività industriale. Forti concentrazioni di SO₂ provocano problemi respiratori. Ugualmente eccessiva presenza di SO₂ nell'atmosfera causa le piogge acide. La SO₂ ha quindi un effetto diretto sulla salute e sull'ambiente. L'anidride carbonica invece è un gas naturalmente presente nell'atmosfera, che è sempre esistito anche prima che l'Uomo facesse la sua comparsa. Le piante ne hanno bisogno per sopravvivere. L'effetto serra prodotto dalla CO₂ fa sì che il nostro Clima sia temperato. Come possiamo allora considerare la CO₂? Un gas inquinante?

²⁸ Sintesi chimica: è l'esecuzione di una reazione chimica o di una sequenza di reazioni chimiche consecutive allo scopo di ottenere uno o più composti. Tale sequenza deve risultare riproducibile, affidabile e, se mirata alla produzione industriale, scalabile. Il termine "sintesi" nella sua accezione attuale fu impiegato per la prima volta da Adolph Wilhelm Hermann Kolbe. Le reazioni della sequenza possono essere seguite da processi fisici di separazione (precipitazione, distillazione, estrazione, ecc.) atti a purificarne i prodotti, oppure possono portare direttamente alla formazione del prodotto finale desiderato tramite una sintesi one-pot eliminando la necessità di ricorrere a tali processi intermedi. Ognuno dei passaggi della sintesi è contraddistinto da una resa, che rappresenta il rapporto tra il prodotto di reazione effettivamente ottenuto e quello teoricamente previsto dalla stechiometria se la reazione fosse completa. Le reazioni secondarie sono generalmente indesiderate proprio perché abbassano la resa del prodotto voluto. La messa a punto di un'opportuna sequenza di reazioni dipende dalle materie prime a disposizione, dalle quantità in gioco, dal fatto che la reazione debba condursi in laboratorio o in un impianto industriale, nonché dalle esigenze di sicurezza e convenienza economica delle reazioni e dei processi necessari per isolare i composti intermedi e il prodotto desiderato.

²⁹ Di Robert Balling

Una sostanza viene definita in senso generale un inquinante quando provoca instabilità o altera la vivibilità di un ecosistema. Negli ultimi 10000 anni la concentrazione della anidride carbonica atmosferica è rimasta sostanzialmente stabile. Negli ultimi 150 anni, le emissioni di CO₂ da parte dell'Uomo hanno alterato questo equilibrio. L'aumento della CO₂ ha alcuni effetti diretti sull'ambiente, ma l'impatto principale è sulla temperatura che viene ad aumentare.

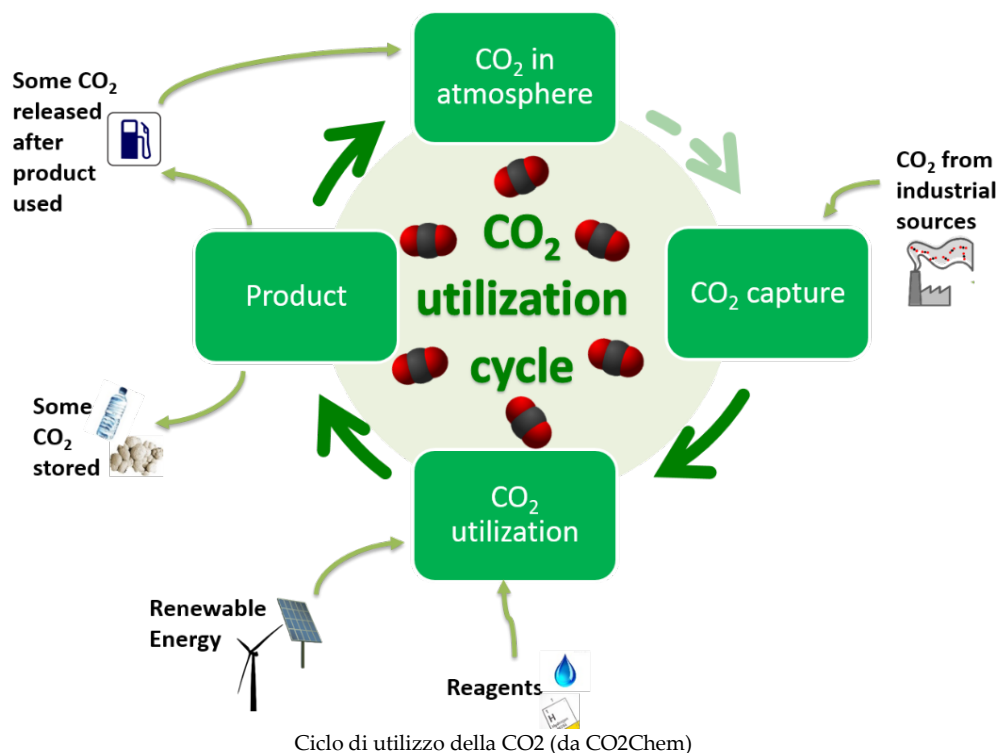


Concentrazioni di CO₂ (parti per milione) negli ultimi diecimila anni. La linea blu si riferisce alle carote di ghiaccio di Taylor Dome (NOAA). La linea verde a quelle di Law Dome (CDIAC). La linea rossa rappresenta le misure dirette di Mauna Loa, Hawaii (NOAA).

L'aumento di CO₂ provoca un incremento dell'effetto serra e quindi innalzamento delle temperature che a sua volta genera diverse conseguenze. Alcuni effetti possono essere anche benefici, quali quelli sull'agricoltura alle latitudini più elevate e miglioramento del ciclo vegetativo in alcune circostanze. Comunque le conseguenze negative superano di gran lunga le positive. La scelta di definire la CO₂ un inquinante appare un gioco puramente semantico. Il risultato complessivo derivante dall'aumento della CO₂ causerà un impatto fortemente negativo sul nostro ambiente e sulle condizioni di vita dell'umanità. A questo punto sorge spontanea la domanda: perché non la rendiamo innocua rendendola utile?

5.1 L'ANIDRIDE CARBONICA, GAS SERRA O MATERIA PRIMA?

L'anidride carbonica è, per esempio, uno dei principali sottoprodotti emessi da centrali elettriche a carbone o in generale da qualsiasi processo di combustione con combustibili fossili e come già detto, è considerato come la principale causa dei cambiamenti climatici del mondo. Non stiamo dicendo nulla di nuovo ed è noto che il sentire comune sulla CO₂ è di essere percepita come il più pericoloso gas ad effetto serra, e che nel bene o nel male, la sua corretta gestione, potrebbe cambiare in futuro del nostro pianeta. La necessità di evitare le emissioni di CO₂, non potrà scomparire, anche in un mondo ideale, essendo parte integrante del ciclo naturale e non solo industriale, ma è un importante imperativo sociale, sviluppare tecnologie atte a diminuirne o controllarne tali emissioni. La ricerca industriale si sta indirizzando sempre di più a valutare le possibili alternative di riutilizzo della CO₂ come "building block" da destinare all'industria chimica ma le ricerche a mio avviso più promettenti e sostenibili, sono quelle rivolte ad utilizzare direttamente la CO₂ per altri scopi industriali come la produzione di nuovi combustibili.

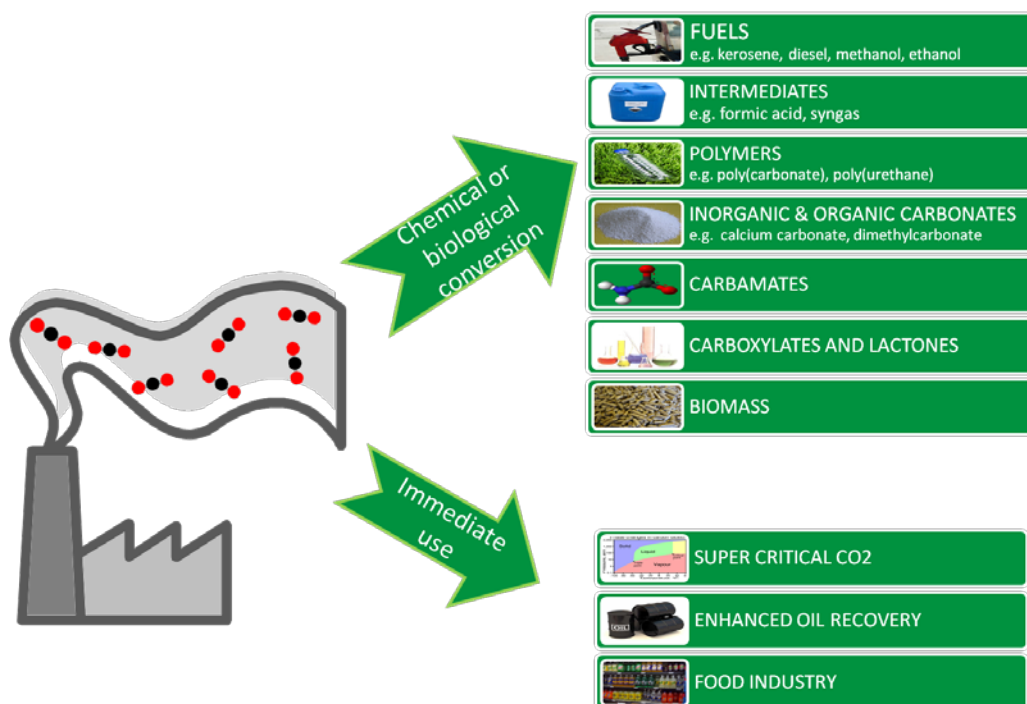


5.2 CO₂, UN'ALTERNATIVA AL PETROLIO?

In molti stanno prendendo in considerazione l'utilizzo di anidride carbonica come una singola materia prima chimica di carbonio per la produzione di prodotti a valore aggiunto. Le fonti fossili sono fonti "finite" oppure in alcuni casi troppo onerose da raggiungere per l'estrazione. Tale situazione contingente, crea grossi punti interrogativi intorno alla sicurezza dell'approvvigionamento di materie prime. È all'interno di questo scenario che si creano le potenzialità di utilizzo diretto della CO₂ come materia prima per sotto-prodotti chimici (plastica per parti leggere nel settore automotive, materassi, mobili imbottiti, isolanti, solventi ecc.). Molti "Chimici" vedono la CO₂ come risorsa potenzialmente preziosa in vista della riduzione di produzione del petrolio. La CO₂ è però un composto a bassa energia, relativamente inerte. Questo è un grande svantaggio, in quanto le reazioni successive per combinare la CO₂ richiederanno molta energia. A questo proposito, la ricerca è rivolta allo studio di processi chimici addizionati di catalizzatori³⁰ ad alta efficienza atti a superare la bassa reattività della CO₂. Le fonti rinnovabili presentano una produzione energetica poco flessibile rispetto alla domanda. L'accumulo energetico permette di conseguire un'offerta energetica più rispondente alla domanda. L'idea è di utilizzare "eccedenze" di energia elettrica da fonti rinnovabili (prodotte in ore di ridotta domanda) per produrre idrogeno elettrolitico (H₂) che, reagendo con anidride carbonica (CO₂), viene poi convertito in metano (CH₄). Al momento della combustione, il metano così prodotto restituisce all'ambiente la CO₂ assorbita nel processo dando luogo ad un ciclo virtualmente quasi esente da emissioni di CO₂. Esso può essere immesso in rete, usato per alimentare veicoli ad "emissioni zero", accumulato per successivi utilizzi o anche utilizzato in celle a combustibile di tipo MCFC o SOFC. Il sistema si comporta come un volano energetico ad emissioni zero e si basa su tecnologie mature di immediata disponibilità quali l'elettrolisi e il processo di metanazione. La CO₂ proviene da processi industriali, impianti chimici, impianti di gassificazione del carbone, o anche da impianti di separazione della CO₂ (questi ultimi ancora in fase di sviluppo) installati in impianti termoelettrici. L'estensione della produzione di metano da CO₂ riciclata, si configura come un sistema di accumulo energetico di taglia modulabile, in base alle disponibilità di energia elettrica, idoneo per l'integrazione

³⁰ Un catalizzatore è una specie chimica che interviene durante lo svolgimento di una reazione chimica che, modificando il complesso attivato della reazione, permette un abbassamento dell'energia di attivazione, aumentando quindi la velocità, rimanendo comunque inalterato al termine della stessa (a differenza dei reagenti, che si consumano al procedere della reazione).

in piccoli sistemi di generazione distribuita. Potrebbero essere anche installati presso piccoli impianti industriali o termoelettrici assorbendo (almeno in parte) le emissioni di CO₂. L'accumulo di metano permette anche di fornire energia elettrica quando richiesto dalla rete, contribuendo a ridurre lo sfasamento temporale tra domanda ed offerta tipico delle fonti rinnovabili, il tutto a parità di emissioni, in termini di life cycle analysis. Va detto che il processo di metanazione, presenta un grado di flessibilità maggiore rispetto ad altri sistemi di accumulo energetico in quanto il vettore energetico prodotto (metano) trova applicazione, oltre che nell'elettrogenazione, anche nei trasporti, o in alternativa può essere immesso direttamente nella rete di distribuzione del gas naturale. Se inoltre il metano viene prodotto a partire da fonti primarie senza emissioni di CO₂ (es., eolico, idroelettrico) la sua combustione restituisce all'ambiente le emissioni sottratte nel processo di produzione e quindi il ciclo sarebbe virtualmente ad emissioni zero.



Esempi di utilizzi diretti della CO₂ (da CO₂Chem)

5.3 FONTI RINNOVABILI & STORAGE

La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è in graduale crescita in tutta Europa, in linea con le aspettative promosse da Horizon 2020, ma ovviamente con la crescita delle fonti rinnovabili, ci si interroga sul come gestire ed eventualmente stoccare tale produzione per le esigenze dell'Uomo

che spesso non coincidono temporalmente con le scelte della natura. La disponibilità di energia eolica e fotovoltaica non è uniforme ed è suscettibile a variazioni significative a seconda dell'ora del giorno e dalle condizioni stagionali. Le famiglie e gli utenti industriali hanno bisogno di energia anche quando piove o se non c'è vento. D'altra parte, quando il vento soffia troppo forte, l'energia elettrica deve essere ugualmente immessa in rete, che in alcuni casi non è in grado di assorbire picchi così repentini e gli operatori sono a volte costretti a staccare i generatori dalla stessa per evitare condizioni di sovraccarico. Per esempio, in Germania, il numero di arresti forzati dei parchi eolici è più che triplicato negli ultimi anni. Un esempio, nel 2011, sono stati persi 400 GWh, che corrispondono all'energia elettrica sufficiente per la fornitura di 90.000 famiglie in un anno. La sfida sarà quella di sviluppare tecnologie capaci di immagazzinare energia quando è prodotta e indipendentemente dalla tipologia di fonte rinnovabile da cui proviene, per renderla nuovamente disponibile nel momento della necessità. L'ipotesi più accreditata attualmente è lo "storage" con batterie, ma comporta dei notevoli problemi di smaltimento delle batterie esauste e di immagazzinamento di grandi quantità. La produzione annua di carbonato di litio attuale è stimata in 120.000 tonnellate all'anno. Questo materiale è usato nella fabbricazione di batterie per computer, smartphone e altri dispositivi elettronici portatili. Un'altra applicazione importante è il suo utilizzo per le batterie delle auto elettriche e per "storage". I giacimenti di litio si trovano in Bolivia, Argentina, Cile, Cina, Stati Uniti e Australia. Invece, la produzione di batterie al litio è concentrata in Asia (60% della produzione mondiale nel 2012), con il Giappone che fa da apripista. Questo metallo si trova più frequentemente in combinazione con sali, compreso quello marino e i più grandi giacimenti mondiali si trovano nei laghi salati delle Ande sopra i 3.500m. Di quelli i due più importanti sono il lago di Atacama in Cile e il lago di Uyuni in Bolivia con un'estensione di 12.000 km². La Bolivia infatti possiede circa il 50% delle riserve mondiali. Dai loro giacimenti di carbonato di litio si estrae oltre l'85% delle risorse mondiali. Quindi nel futuro il Sudamerica potrebbe assumere un maggior peso nelle vicende globali. Nuovi mercati geo-strategici si stanno aprendo in Bolivia, Cile e Argentina. Ovunque si sta combattendo una guerra per il controllo delle risorse, fatta per il momento solamente da industria, finanza e diplomazia. Questo ampio sviluppo delle batterie al litio pone anche altre domande. Che si fa con le batterie quando sono state utilizzate? Inquinano l'ambiente? Sono pericolose? I loro materiali possono essere riciclati e riutilizzati? Ci sono delle normative ambientali che regolano questa attività? Tutte le tecnologie di batterie contengono più o meno componenti tossici. La sua pericolosità

viene dall'elettrolita (miscela fra un solvente organico e un sale di litio), il quale è tossico e infiammabile.

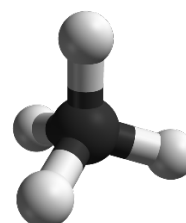
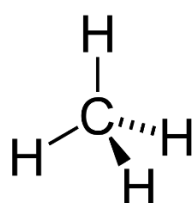
Una delle possibili soluzioni per trasformare i picchi di energia elettrica in energia chimica accumulabile, è la trasformazione in gas metano di sintesi. La CO₂ potrebbe effettivamente aiutare a risolvere il problema di accumulo di energia, agendo come un "container" di energia primaria da fonti rinnovabili. Con la conversione di CO₂ in metano, si potrebbero trasformare enormi quantitativi di energia elettrica in energia chimica facilmente integrabile con i metodi di stoccaggio o utilizzo standard. L'oggetto della ricerca sarà proprio quella di investigare se tale potenzialità potrebbe essere sviluppabile nel contesto industriale di produzione di materiali ceramici.

Il processo può essere sintetizzato in due fasi:

1. L'energia elettrica viene usata per estrarre idrogeno dall'acqua mediante elettrolisi.
2. L'idrogeno e la CO₂ verranno convertite in gas metano e acqua tramite processo di metanizzazione in presenza di un catalizzatore.

Esistono vari progetti in ambito europeo³¹ già in corso da alcuni anni, per migliorare la cattura diretta della CO₂ derivante dai settori più disparati (dai cementifici, alla produzione di pannolini). Nel nostro caso, è stato impostato all'interno del contesto industriale ceramico al fine di valutare un approccio industriale ben preciso e replicabile su larga scala qualora si riscontrasse una vera sostenibilità economica.

5.4 IL METANO



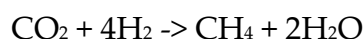
Il metano è un idrocarburo semplice (alcano) formato da un atomo di carbonio e quattro di idrogeno; la sua formula chimica è CH₄, e si trova in natura sotto forma di gas.

³¹ Technologies for sustainability climate protection - Federal Ministry of Education and Research (BMBF)

Nell'autunno del 1776 Alessandro Volta studiò un fenomeno noto anche in epoche più lontane, segnalatogli da Carlo Giuseppe Campi: in un'ansa stagnante del fiume Lambro, avvicinando una fiamma alla superficie si accendevano delle fiammelle azzurrine. Questo fenomeno era già stato studiato separatamente da Lavoisier, Franklin e Priestley pochi anni prima ed era stato classificato semplicemente come un'esalazione di aria infiammabile, di origine minerale. Volta volle andare più a fondo alla questione. Mentre era ospite ad Angera nella casa dell'amica Teresa Castiglioni (Angera 1750 - Como 1821), scoprì l'aria infiammabile nella palude dell'isolino Partegora, in località Bruscherà (provincia di Varese). Provando a smuovere il fondo con l'aiuto di un bastone vide che risalivano delle bolle di gas e le raccolse in bottiglie. Diede a questo gas il nome di aria infiammabile di palude e scoprì che poteva essere incendiato, sia per mezzo di una candela accesa, sia mediante una scarica elettrica. Ne dedusse che il gas si formava nella decomposizione di sostanze animali e vegetali. Pensando immediatamente a un suo utilizzo pratico costruì dapprima una pistola elettroflogopneumatica in legno, metallo e vetro, il cui scopo sarebbe stato di trasmettere un segnale a distanza; in seguito realizzò una lucerna ad aria infiammabile e perfezionò l'eudiometro per la misura e l'analisi dei gas.

5.5 *PROCESSO DI METANAZIONE*

La metanazione³² è un processo fisico-chimico per generare il metano da una miscela di vari gas ricavati dalla fermentazione di biomasse o da una gassificazione termochimica. I componenti principali sono il biossido di carbonio, in quanto noi partiamo da fumi derivanti da processi di combustione estratti da forni industriali e idrogeno. I principali catalizzatori usati per questa reazione sono rutenio, cobalto, nichel e ferro. Il seguente processo principale descrive la metanazione:



La reazione di Sabatier³³, o processo Sabatier, è una reazione chimica in cui il diossido di carbonio reagisce con l'idrogeno, in presenza di nichel, rutenio,

³² A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization, Melis S. Duyar COLUMBIA UNIVERSITY - 2015

³³ Paul Sabatier (Carcassonne, 5 novembre 1854 – Tolosa, 14 agosto 1941) è stato un chimico francese, premio Nobel per la chimica nel 1912 insieme a Victor Grignard. Il Premio Nobel gli venne conferito con la seguente motivazione: "Per il suo metodo di idrogenazione dei composti organici in presenza di metalli finemente suddivisi per mezzo del

cobalto ferro quale catalizzatore e in condizioni di temperatura ottimale compresa tra 300-400 °C e alta pressione (ma possono variare in funzione del catalizzatore), producendo metano e acqua. Occasionalmente viene utilizzato anche un catalizzatore a base di rutenio supportato su allumina, più costoso ma anche più efficiente. La reazione prende nome dal suo scopritore Paul Sabatier e ha carattere esotermico con sviluppo di 39,2 kcal/mol. In campo tecnologico viene sfruttata per sintetizzare metano a partire dal syngas ottenuto dalla gassificazione.

5.6 TECNOLOGIE DI CATTURA DELLA CO₂

Tecnologie di Cattura³⁴

Negli impianti industriali la cattura della CO₂ avviene per mezzo di tre tecnologie³⁵

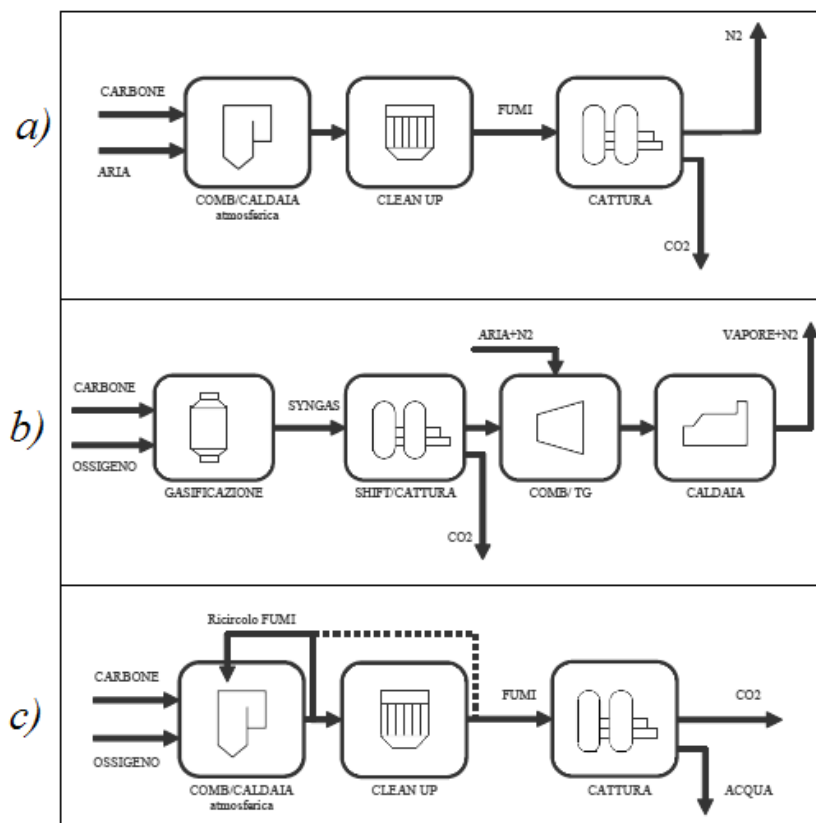
- a) Cattura Post-combustione: consiste nella rimozione per mezzo di sorbenti chimici (principalmente a base di ammine) della CO₂ dai fumi di scarico. Oltre alla CO₂ è possibile catturare anche altre sostanze dannose o tossiche come ad esempio gli ossidi dello zolfo. E' adottabile in tutti gli impianti già costruiti per mezzo di interventi di retro-fitting e non altera il ciclo termodinamico ma, a causa della bassa concentrazione di CO₂ nei fumi, ha costi d'installazione e costi di rigenerazione del sorbente elevati;
- b) Cattura Pre-combustione: il combustibile è parzialmente ossidato in un gassificatore, producendo un gas ricco di CO. Il syngas ottenuto è mandato in un reattore dove reagisce con vapore acqueo formando CO₂ e H₂ che vengono separati con metodi ad alta pressione che rendono il processo più performante rispetto al caso precedente. Questa tecnologia è particolarmente adatta in sistemi IGCC e cicli combinati a gas.
- c) Ossi-combustione: la combustione avviene con una corrente di ossigeno puro in assenza di aria generando CO₂ e vapore acqueo. Una parte del gas ottenuto è ricircolato in camera di combustione per controllare la temperatura e ottenendo in uscita un gas composto all'80%

quale negli ultimi anni si è fortemente fatto avanzare il progresso della chimica organica". La sua opera più importante fu il trattato *La catalisi nella chimica organica* pubblicato nel 1913.

³⁴ Fonte ENEA

³⁵ A. A. Olajire, "CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review Energy", vol. 35, no. 6, pp. 2610–2628, Jun. 2010

da CO₂. La separazione avviene condensando l'acqua dei fumi. La produzione di NO_x è praticamente assente mentre il vantaggio di una semplice rimozione della CO₂ è bilanciato dalla presenza di un'unità di separazione dell'aria (ASU) che rappresenta un significativo costo d'esercizio. Per questo motivo negli ultimi anni si stanno studiando membrane di separazione dell'aria ad alta temperatura.



Tecnologie di cattura della CO₂. a) Post-combustione; b) Pre-combustione; c) Ossi-combustione. [fonte: ENEA]

Metodi di Cattura

I metodi di cattura più usati consistono nell'uso di sorbenti chimici in grado di reagire in presenza di determinate specie chimiche trattenendole al loro interno, una volta saturi sono rigenerati cioè riportati al loro stato iniziale rilasciando le sostanze catturate. Nel tempo questi metodi sono stati riadattati e studiati specificamente per la cattura della CO₂ ma, tutt'ora rappresentano una grande parte del costo delle tecnologie CCS (fino al 75%) che, nel caso venisse applicato a tutti gli impianti di produzione elettrica esistenti, si ripercuoterebbe con un aumento medio del costo dell'elettricità del 50%. Per

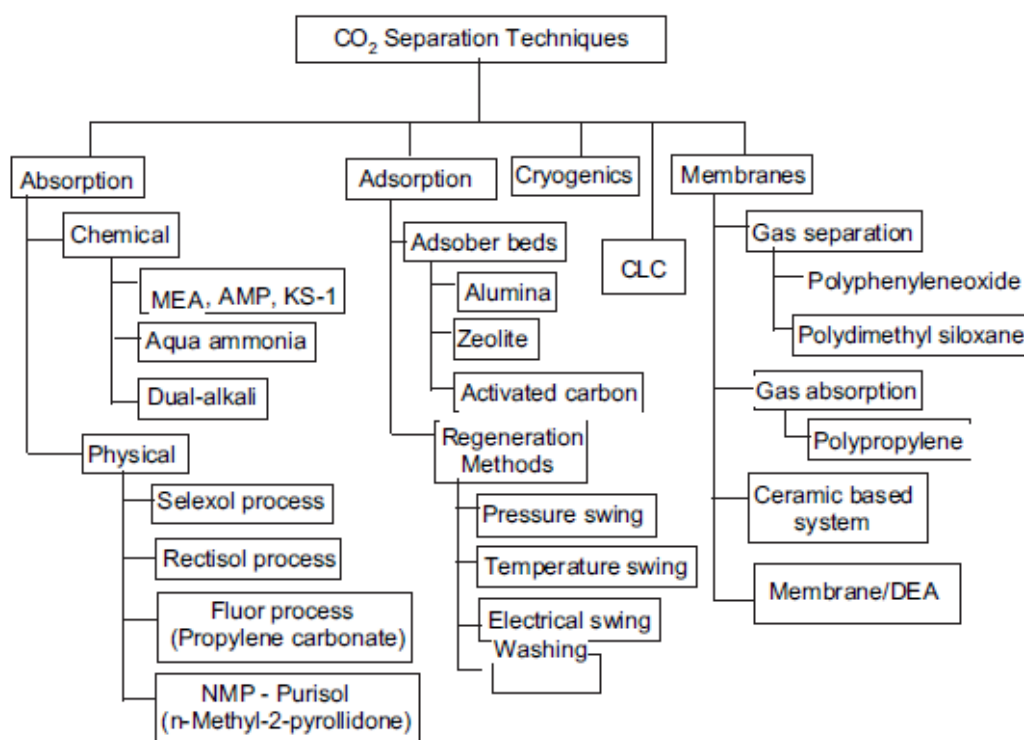
questo motivo c'è un grande interesse sulla riduzione dei costi di tali tecnologie con l'adozione di nuovi sorbenti e tecniche che sfruttino fenomeni fisici diversi.

Assorbimento

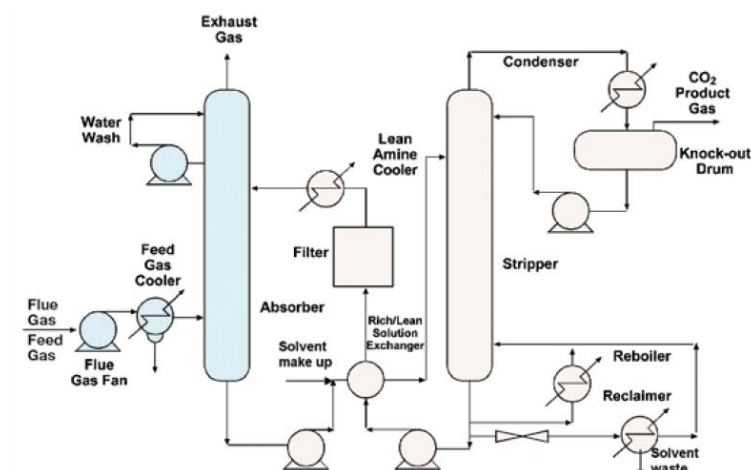
In genere con il termine assorbimento ci si riferisce al fenomeno di trasferimento di una specie chimica sulla superficie di un solido. Il termine in realtà viene comunemente usato per indicare due fenomeni chimici: assorbimento ed adsorbimento.

Il primo riguarda la diffusione di un gas all'interno di un liquido con conseguente attraversamento dell'interfaccia liquido-gas, mentre il secondo riguarda l'accumulo di molecole di gas in corrispondenza dell'interfaccia solido-gas. Si opera un'ulteriore suddivisione in chimico e fisico: chimico se i legami tra le molecole sono interazioni forti (esempio legame ionico o covalente); fisico per interazioni deboli (esempio legame di Van der Waals).

Nella figura sottostante, sono riportati i principali sorbenti industriali o processi chimici proposti fino a questo momento.



Metodi di cattura per la cattura della CO₂.



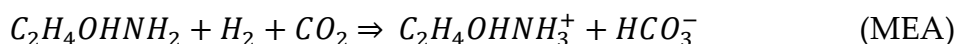
Schema di cattura della CO₂ con metodi ad assorbimento

Absorbimento

Di seguito è riportato lo schema impiantistico usato per la realizzazione dell'assorbimento non solo della CO₂ ma di qualsiasi altra sostanza inquinante che si intenda rimuovere con questo tipo di sorbenti. Sono presenti due colonne di distillazione, una (*absorber*) funziona da assorbitore cioè cattura la sostanza inquinante mentre l'altra (*stripper*) rigenera il sorbente. Tra le due ci sono delle pompe per la circolazione del fluido e degli scambiatori di calore in quanto assorbimento e rigenerazione avvengono solitamente a temperature differenti; per lo stesso motivo è presente un riscaldatore che ricircola parte della portata dello stripper. Il fluido in uscita dallo *stripper* è condensato per rimuovere eventuali impurità ed ottenere un maggiore grado di purezza della sostanza catturata.

Absorbimento chimico

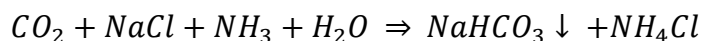
Come detto in precedenza l'assorbimento chimico consiste nell'interazione forte tra due specie chimiche questo comporta una notevole energia per la rigenerazione del sorbente. Questi sistemi sono molto efficienti e quindi sono preferiti laddove ci sia una bassa concentrazione di CO₂ nel flusso di gas da depurare. Sono metodi derivati da altri processi industriali quali ad esempio la pulitura del gas naturale. Il principale sorbente per questo tipo di processo sono le ammine e in particolare monoetanolammine (MEA) ma anche dietanolammina (DEA) e Metildietanolammina (MDEA). Queste reagiscono con la CO₂ formando composti solidi o liquidi secondo la seguente reazione:



Tra gli svantaggi:

- bassa capacità di assorbimento del sorbente;
- alto tasso di corrosione;
- degradazione delle ammine dovute alla presenza di SO₂, NO₂, HCl e O₂;
- alta energia di rigenerazione.

Un altro tipo di sorbente proposto è a base di acqua e ammoniaca che è in grado di catturare SO₂, NO_x, CO₂, HCl, HF. Non ha problemi di degradazione in presenza di altre specie chimiche ma persiste una bassa capacità del sorbente per la cattura della CO₂. Sono allo studio processi (dual-alkali) che sfruttano l'ammoniaca come catalizzatore in presenza di cloruro di sodio per la produzione di carbonato di sodio secondo la reazione:



Absorbimento fisico

In questo caso la CO₂ è assorbita in un liquido seguendo la legge di Henry: un gas che esercita una pressione sulla superficie di un liquido vi entra in soluzione finché non raggiunge all'interno del liquido la stessa pressione che ne esercita all'esterno. Questo fenomeno è fortemente legato alla solubilità del gas nel liquido che a sua volta dipende dalle pressioni parziali e dalla temperatura della soluzione, non avviene la rottura dei legami intermolecolari ma solo interazioni "deboli" tra molecole. Ciò richiede una quantità di energia per la rigenerazione del sorbente più bassa rispetto al caso precedente. Il più noto processo che sfrutta questa tecnologia è il *Selexol*®, nato nel 1969 per depurare il gas naturale dalla CO₂ e dall'H₂S. Utilizza come sorbente il dimetiletere polietilenglicole CH₃(CH₂CH₂O)_nCH₃ dove "n" è un numero compreso tra 3 e 9. Tra i suoi vantaggi:

- L'assorbimento avviene a bassa temperatura 0 – 5°C senza calore di reazione;
- Il flusso rigenerato è secco, non contiene vapore;
- Costi d'impianto e d'esercizio modesti;
- La rigenerazione può avvenire iniettando nello stripper un flusso d'aria, di vapore o un gas inerte;
- La rigenerazione avviene abbassando la pressione, non è richiesto calore.

Il processo è altresì affine agli idrocarburi pesanti che vengono catturati insieme alla CO₂ formando dei solidi in sospensione. Diventa più efficiente ad alta pressione, quindi il vantaggio che deriva da un aumento dell'efficienza è annullato dalla maggiorazione del costo di esercizio e dalla nascita dei problemi tipici per l'esercizio ad alta pressione.

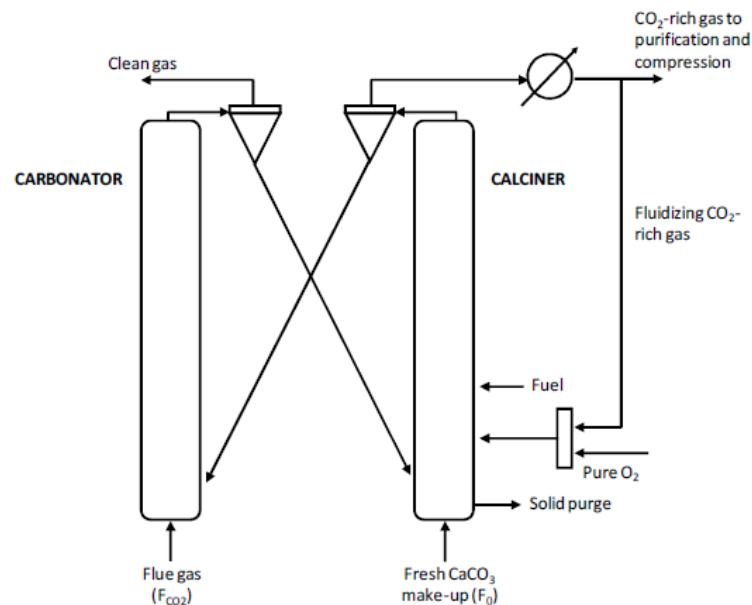
Un altro processo usato per gli stessi scopi del *Selexol*® è il *Rectisol*® che usa come solvente il metanolo. Tra i suoi vantaggi:

- è completamente miscibile in acqua, non forma schiume;
- è chimicamente e termicamente stabile;
- non è corrosivo;
- non ci sono problemi di corrosione quindi possono essere usati acciai al carbonio per l'attrezzatura;
- il solvente può essere facilmente rigenerato a bassa pressione senza calore.

Uno dei problemi del processo è che è in grado di assorbire i metalli formando dei nuclei solidi durante il suo mantenimento a bassa temperatura. È in generale un processo piuttosto complesso e ha bisogno di refrigerare il solvente con un ingente costo capitale e di esercizio per l'impianto.

Adsorbimento

Nell'adsorbimento le molecole di uno specifico gas sono catturate sulla superficie di un solido per mezzo di legami chimici deboli (nel caso di adsorbimento fisico) o forti (adsorbimento chimico). La rigenerazione può avvenire per mezzo di un abbassamento della pressione o un aumento di temperatura o con il passaggio di una corrente attraverso il sorbente o una combinazione di questi. La tecnica principalmente usata per l'adsorbimento fisico è quella dei "setacci molecolari" (*molecular sieve*) che sono appositamente progettati per una separazione basata sulla massa delle molecole. I più noti sono le zeoliti e i carboni attivi entrambi caratterizzati da una elevata microporosità (superficie specifica compresa tra 500 e 2500m²/g), caratteristica essenziale per i setacci molecolari. Lo schema impiantistico utilizzato non è concettualmente differente da quello dell'adsorbimento ma i componenti sono differenti: non ci sono colonne di frazionamento bensì reattori. Nella figura sottostante è riportato un esempio per l'ossido di calcio. Sono presenti due reattori chiamati carbonatore e calcinatore, nel primo avviene la reazione di formazione del carbonato quindi la cattura della CO₂, nel secondo avviene la rigenerazione del sorbente con il relativo rilascio della CO₂ e successivo raffreddamento per mezzo di uno scambiatore di calore.

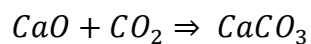


Schema di cattura della CO₂ con metodo ad adsorbimento, in particolare CaO.

Tra i sorbenti che vengono utilizzati per l'adsorbimento chimico ricordiamo lo zirconato di litio e l'ossido di calcio. Il primo è stato studiato come sorbente ad alta temperatura perché può essere rigenerato tra i 450°C e 600°C secondo la reazione:



L'ossido di calcio è particolarmente interessante perché reagisce con la CO₂ secondo la reazione:



fornendo il calore necessario al mantenimento della temperatura. L'ossido di calcio può essere ottenuto dalla dolomite che è un minerale comune composto da carbonati di calcio e magnesio che si decompongono rispettivamente a temperature prossime ai 200°C e 900°C.

Metodi Criogenici

È possibile separare la CO₂ da una corrente gassosa attraverso la condensazione e la distillazione. È un processo largamente usato nell'industria per ottenere un grado di purezza maggiore del 90%. La CO₂ è portata ad una temperatura minore di -73°C attraverso un grande dispendio di energia. Tra i processi proposti ricordiamo *CrioCell*TM che elimina i consumi d'acqua, l'uso

di sostanze chimiche e i problemi connessi alla corrosione. Questo metodo è particolarmente adatto nel caso di ossi-combustione.

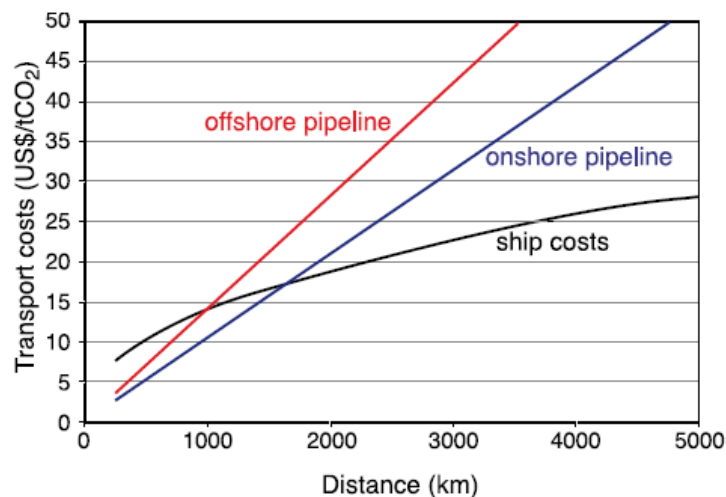
Membrane

Le membrane sono barriere semi-permeabili capaci di separare varie sostanze attraverso diversi meccanismi come diffusione in liquidi, in solidi, salti molecolari, trasporto ionico. Possono essere porose o non porose, costituite di materiali organici (polimeri) o non organici (carboni attivi, zeoliti, materiali ceramici o metallici). Due sono le caratteristiche principali di una membrana: la selettività cioè la capacità della membrana di far passare un determinato gas, e la permeabilità cioè la sua capacità di far passare una determinata quantità di gas. Membrane molto permeabili sono in genere poco costose ma hanno bassa selettività per la CO₂ sono cioè scarsamente performanti. Le membrane non porose hanno un'alta selettività e sono in genere utilizzate in processi di separazione dell'idrogeno, al contrario quelle porose hanno basse selettività e richiedono la presenza di uno strato di supporto (in genere ceramico o metallico) che fornisce integrità strutturale ma offre allo stesso tempo un basso coefficiente di trasporto di massa. Queste membrane sono di particolare interesse non tanto per la rimozione della CO₂ quanto per la possibilità di ridurre i costi per le unità di separazione dell'aria (ASU) degli impianti di Ossi-combustione. Operando ad alta temperatura (200-400°C) consentono di sfruttare i cascami termici presenti in impianti di potenza e, evitando l'utilizzo di tecniche criogeniche, notoriamente costose, consentono una stretta integrazione con le restanti parti dell'impianto.

Trasporto della CO₂

Il trasporto della CO₂ può avvenire in forma liquida o come gas compresso. Prima del trasporto vero e proprio la CO₂ viene disidratata per evitare la formazione di idrati (solidi simili al ghiaccio) ed eliminare sostanze che causerebbero la corrosione di pompe valvole e tubi. Nel caso di trasporto liquido dopo la disidratazione la CO₂ è compressa e raffreddata a temperature criogeniche. Come per altri gas compressi il costo del trasporto sotto forma liquida diventa economicamente sostenibile, se comparato con altri sistemi di trasporto, solo per grandi quantità di gas trasportato e per lunghe distanze. Questo implica la creazione di stazioni di liquefazione e rigassificazione con conseguenti complicazioni impiantistiche. Problemi connessi a questo tipo di

istallazioni sono molto simili a quelli riscontrati in impianti analoghi che trattano metano o GPL. In generale queste tecnologie sono sufficientemente mature per essere sfruttate laddove ci sia un'effettiva convenienza economica.



Costo del trasporto della CO₂ in funzione della distanza percorsa per diverse opzioni tecnologiche

Un altro modo di trasportare la CO₂ già in uso nel campo di estrazione del petrolio è attraverso *pipelines* o condutture in pressione (compresa tra 48 e 96 bar)³⁶. Questi sistemi sono usati principalmente negli Stati Uniti per realizzare il recupero assistito di petrolio (EOR dall'inglese *Enhanced Oil and Gas Recovery*). Il flusso di CO₂ è generato da stazioni di pompaggio che consentono di ottenere una portata costante. Il costo è relativamente modesto, per un percorso di 100km varia tra 1 e 4€ per tonnellata trasportata. Attualmente esistono circa 3000km di condutture di questo tipo asservite al trasporto di CO₂.

Stoccaggio della CO₂

Diversi sono i metodi di stoccaggio proposti nel corso degli anni:

- Geologico;
- Minerale;
- Oceanico;
- Biofissazione;
- Usi Industriali.

³⁶ G. Girardi, S. Giammartini, A. Calabrò, P. Deiana "Produzione sostenibile di energia elettrica da combustibili fossili: obiettivo zero emission -Le tecnologie CCS (Carbon Capture& Storage) Position Paper", ENEA, Report RSE/2009/22.

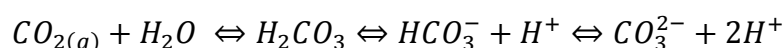
Sotto il nome “stoccaggio geologico” rientrano una serie di provvedimenti il cui scopo principale è quello di immettere la CO₂ nelle profondità terrestri. Tra questi: pompaggio in saline profonde, in pozzi petroliferi esauriti, in giacimenti di carbone non più sfruttabili, in campi geotermici non sfruttabili. Questa idea è nata dall’osservazione che nel sottosuolo sono presenti delle cavità contenenti grandi quantità di CO₂ da milioni di anni. Eventuali depositi devono rispondere a precisi criteri strutturali e chimici per poter ospitare uno stoccaggio di questo tipo. Di seguito si riporta la capacità stimata a livello mondiale dall’IPCC.

| Tipo di riserva | Stima minima [GtCO ₂] | Stima massima [GtCO ₂] |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Giacimenti di gas e petrolio | 675 | 900 |
| Giacimenti di carbone | 3-15 | 200 |
| Saline profonde | 1000 | Incerto, probabilmente 10000 |

Stima della capacità dei depositi geologici mondiali per la CO₂. [fonte: IPCC 2013]

Lo “stoccaggio minerale” prevede di far reagire la CO₂ con minerali che fissino il carbonio formando carbonati e rilasciando ossigeno. Tra questi ricordiamo: SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, FeO, K₂O, Fe₂O₃. Il rilascio della CO₂ da rocce contenenti questi ossidi è molto lento quindi sono particolarmente adatte allo scopo, ma c’è lo svantaggio che per far avvenire la reazione di cattura c’è bisogno di grandi quantità di energia e questo rende attualmente non economicamente sostenibile l’uso di tale tecnologia.

Lo “stoccaggio oceanico” consiste nell’iniettare la CO₂ a profondità comprese tra i 100 e 3000 m sotto il livello del mare. A queste profondità la pressione è tale da favorire la reazione con acqua sciogliendo la CO₂.



La solubilità della CO₂ cala all’aumentare della temperatura e della salinità. La CO₂ dissolta in acqua produce un acido debole che reagisce con i minerali del fondo marino in modo analogo a quanto visto per lo stoccaggio naturale ma con l’effetto di un aumento del pH accelerando il fenomeno dell’acidificazione degli oceani. Per questo ed altri motivi³⁷ negli ultimi anni tale soluzione è stata sconsigliata dall’IPCC³⁸ Lo stoccaggio attraverso biofissazione prevede la produzione di biomassa a partire da CO₂ ed energia solare, per

³⁷ La spiegazione di queste scelte sarà discussa nel paragrafo successivo

³⁸ B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, “IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”, *Intergovernmental panel on climatechange*, 2013

mezzo di microalghe o ciano-batteri che sfruttino il fenomeno della fotosintesi. E' inoltre possibile trasformare questa biomassa in combustibile ottenendo metano, metanolo, idrogeno o biodiesel. Uno dei primi processi industriali, chiamato "Joule™" (dal nome dell'azienda creatrice), prevede la coltura di micro-alghe, la raccolta delle scorie da esse prodotte (lipidi), l'estrazione dei trigliceridi dai lipidi e infine l'esterificazione per ottenere un prodotto finito simile al biodiesel³⁹. In questo caso il bilancio netto di CO₂ è molto basso, idealmente pari a zero.

Rischi Connessi all'Uso della CO₂

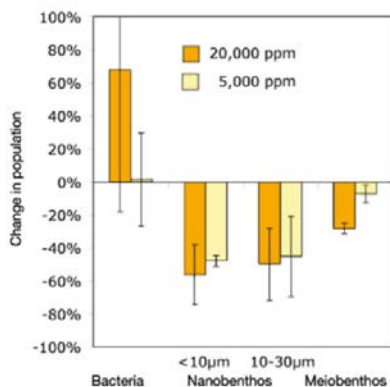
La CO₂ non è un gas tossico per l'uomo e non produce esplosioni quindi il rischio connesso ad una sua fuga è legato principalmente alle elevate concentrazioni nell'aria che causano asfissia. Tra gli incidenti ricordiamo quello del lago Nyos in Cameroon nel 1986. Sotto tale lago, di origine vulcanica, era presente un deposito naturale di CO₂ di cui non si conosceva l'esistenza. In seguito ad un evento sismico si è generata una fuga di un'enorme quantità di CO₂ che ha causato la morte di 1700 persone. Per questo motivo tali depositi, sia naturali che artificiali, devono essere costantemente monitorati. I rischi connessi allo stoccaggio della CO₂ in depositi sotterranei sono dovuti principalmente ad una fuoriuscita del gas dal deposito nel quale è stato confinato. Per questo motivo nel rapporto dell'IPCC sui sistemi CCS vengono indicate alcune caratteristiche fondamentali per l'individuazione dei siti atti ad ospitare i depositi geologici. Tra questi, oltre ad una capacità strutturale di resistere nel tempo (escludendo a priori le zone a rischio sismico) è richiesto che la CO₂ reagisca gradualmente con i minerali presenti nelle rocce formando altri composti non pericolosi (trappola minerale).

In questo modo la sicurezza dello stoccaggio aumenta con il trascorrere del tempo. Vengono altresì proposti dei metodi valutativi per l'accettabilità delle inevitabili fuoriuscite di gas dal deposito stabilendo che un deposito può essere considerato:

- accettabile se trattiene il 99% della CO₂ immessa dopo un periodo di 100 anni;
- eccellente se trattiene il 99% della CO₂ immessa dopo un periodo di 1000 anni.

³⁹ D.E. Robertson, S.A. Jacobson, F. Morgan, D. Berry, G.M. Church, N.B. Afeyan "A new dawn for industrial photosynthesis", Springerlink, 2011.

Nel caso di stoccaggio oceanico la CO₂ genera due effetti dannosi: sposta l'equilibrio dello ione HCO₃⁻ modificando il Ph e reagisce direttamente con gli organismi unicellulari quali fitoplancton, alghe e batteri. In particolare si è osservato che cambiando la concentrazione di CO₂ disciolta in acqua si modifica la popolazione di microrganismi che costituisce il plancton che è la base della catena alimentare marina con conseguenze potenzialmente pericolose per l'intero ecosistema.⁴⁰



Cambiamenti percentuali nella popolazione di batteri, nanobenthos e meiobenthos esposti a diverse concentrazioni di CO₂ durante 3 esperimenti condotti a 2000m di profondità a Nankai Trough nel nord-ovest del Pacifico.

| Affected processes | Organisms tested |
|---|---|
| Calcification | <ul style="list-style-type: none"> • Corals • Calcareous benthos and plankton |
| Acid-base regulation | <ul style="list-style-type: none"> • Fish • Sipunculids • Crustaceans |
| Mortality | <ul style="list-style-type: none"> • Scallops • Fish • Copepods • Echinoderms/gastropods • Sipunculids |
| N-metabolism | <ul style="list-style-type: none"> • Sipunculids |
| Protein biosynthesis | <ul style="list-style-type: none"> • Fish • Sipunculids • Crustaceans |
| Ion homeostasis | <ul style="list-style-type: none"> • Fish, crustaceans • Sipunculids |
| Growth | <ul style="list-style-type: none"> • Crustaceans • Scallops • Mussels • Fish • Echinoderms/gastropods |
| Reproductive performance | <ul style="list-style-type: none"> • Echinoderms • Fish • Copepods |
| Cardio-respiratory functions | <ul style="list-style-type: none"> • Fish |
| Photosynthesis | <ul style="list-style-type: none"> • Phytoplankton |
| Growth and calcification | |
| Ecosystem structure | |
| Feedback on biogeochemical cycles (elemental stoichiometry C: N:P, DOC exudation) | |
| | |

Effetti fisiologici ed ecologici della CO₂ nel mare profondo

⁴⁰ H. Ishida, Y. Watanabe, T. Fukuhara, S. Kaneko, K. Firisawa, and Y. Shirayama, "2005: In situ enclosure experiment using a benthic chamber system to assess the effect of high concentration of CO₂ on deep-sea benthic communities" *Journal of Oceanography*, 2005.

Questi fenomeni avvengono principalmente nella parte più superficiale degli oceani, mentre la CO₂ viene iniettata a grandi profondità. Nondimeno studi dell'IPCC hanno messo in evidenza gli effetti della CO₂ sugli organismi che vivono in acque profonde. I risultati sono riportati in figura. Come si nota, sono numerosi i fattori alteranti che causerebbero conseguenze non completamente prevedibili ma comunque dannose per l'attuale ecosistema.

Usi Industriali della CO₂

La CO₂ è utilizzata in diversi processi industriali tra cui: produzione di urea, sistemi di refrigerazione, come agente inerte per l'impacchettamento di cibi, bevande, sistemi di saldatura, estintori, trattamento delle acque di processo, orticoltura, sotto forma di carbonato di calcio per l'industria cartiera e molte altre piccole applicazioni. Nella maggior parte dei processi industriali la CO₂ non è usata in forma pura ma legata ad altre sostanze (principalmente carbonati). Per questo motivo diventa particolarmente interessante, per la sua cattura, l'adozione di sorbenti che una volta esauriti possano essere direttamente utilizzati in altri processi chimici, come ad esempio il CaCO₃ che è alla base della produzione dei cementi. Nella tabella seguente, sono riportate le produzioni annuali di vari composti chimici, l'uso di CO₂ necessaria, nonché il possibile tempo di stoccaggio della CO₂. Si nota che le quantità confrontate con le emissioni globali annuali sono di piccola entità. Nel 2004 ad esempio, nella sola Italia, sono state registrate 450MtCO₂ che corrisponde all'1,7% del totale mondiale di quell'anno ed è circa 3 volte la quantità di CO₂ impiegata dall'industria globale in un anno. Osservando i tempi di stoccaggio della CO₂ riportati in nella figura sottostante emerge che per alcuni dei processi non si può parlare di stoccaggio a lungo termine quindi è più corretto parlare di un ritardo nell'emissione che varia da pochi giorni ad alcuni secoli in base al processo considerato.

| Chemical product class or application | Yearly market (Mt yr ⁻¹) | Amount of CO ₂ used per Mt product (MtCO ₂) | Source of CO ₂ | Lifetime ^b |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|-----------------------|
| Urea | 90 | 65 | Industrial | Six months |
| Methanol (additive to CO) | 24 | <8 | Industrial | Six months |
| Inorganic carbonates | 8 | 3 | Industrial, Natural ^a | Decades to centuries |
| Organic carbonates | 2.6 | 0.2 | Industrial, Natural ^a | Decades to centuries |
| Polyurethanes | 10 | <10 | Industrial, Natural ^a | Decades to centuries |
| Technological | 10 | 10 | Industrial, Natural ^a | Days to years |
| Food | 8 | 8 | Industrial, Natural ^a | Months to years |

^a Natural sources include both geological wells and fermentation.

^b The fraction of used CO₂ that is still stored after the indicated period of time drops to zero.

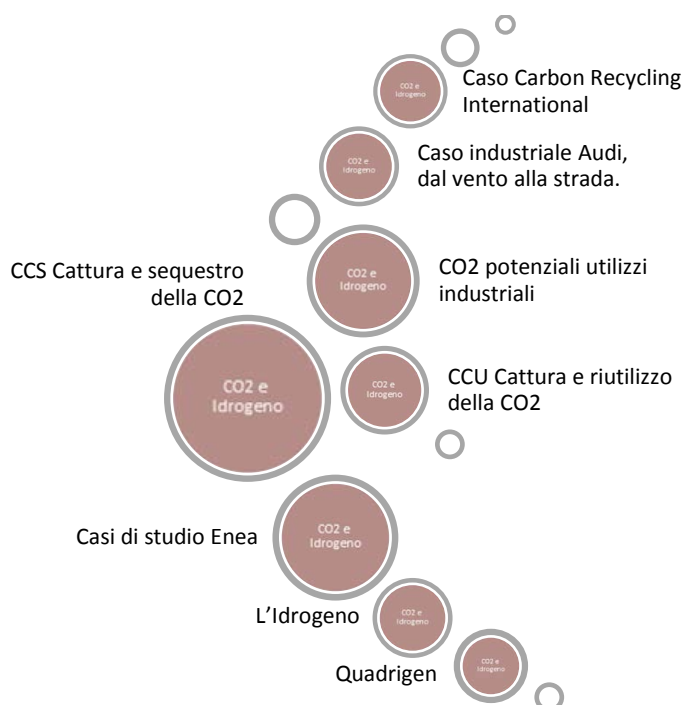
Ne segue che un uso dell'anidride carbonica catturata, sarebbe in grado di coprire la richiesta dell'industria ma non contribuirebbe in maniera sostanziale alla riduzione delle emissioni di tale gas.

Grandi quantità di CO₂ sono usate per il recupero assistito del petrolio (EOR) un'operazione tipica nell'industria estrattiva degli idrocarburi che consiste nell'iniettare in un giacimento sotterraneo della CO₂ ad alta pressione per aumentare la porosità delle rocce. Il risultato finale è un aumento della produttività del sito che può arrivare in certi casi a 60%⁴¹.

⁴¹ <http://www.museoenergia.it/>

CAPITOLO 6 CO₂ E IDROGENO

Considerando che le previsioni di consumo di energia a livello mondiale indica un continuo aumento delle emissioni di anidride carbonica ed il relativo aumento delle concentrazioni di CO₂ nell'atmosfera ma non vengono apportate modifiche sostanziali ai metodi di produzione dell'energia, come potremmo pensare che la situazione cambi? Così, CCS e soprattutto CCU sono tra le maggiori sfide tecnologiche e sociali più urgenti da affrontate per l'umanità. Nel campo della CCU, la portata e la natura del problema è tale che la sensibilità della comunità scientifica sarà decisiva per il successo delle soluzioni tecnologiche su larga scala.

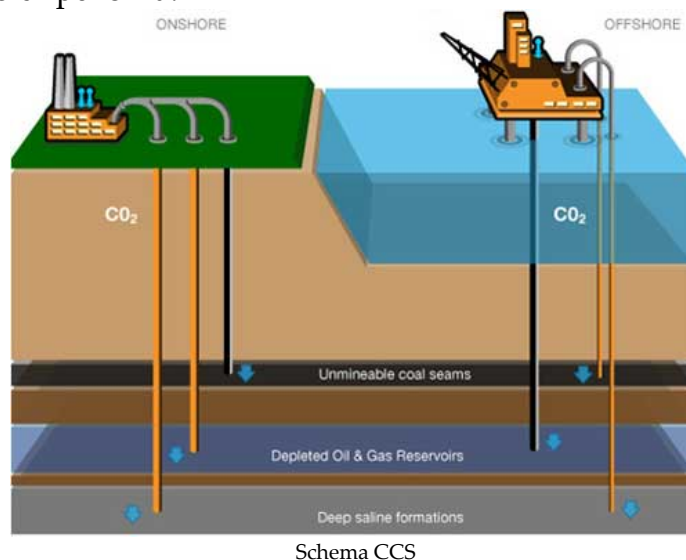


6.1 CCS CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO₂

La tecnologia CCS⁴² comporta la cattura di CO₂ da una sorgente industriale combinata con il suo trasporto, attraverso una conduttura, una nave dedicata o un altro mezzo, e lo stoccaggio in una formazione geologica. Tale tecnologia è spesso vista come una soluzione interessante nel portfolio di opzioni di

⁴² La cattura e sequestro (o stoccaggio) del carbonio (CCS, derivato dal termine inglese Carbon Capture and Storage - o Sequestration).

riduzione, che risulta importante per le centrali elettriche a carbone in primo luogo, ma che può essere applicata anche in settori industriali quali quelli del ferro, dell'acciaio e dell'industria chimica. La fattibilità tecnica ed economica del metodo CCS è argomento di discussione. Negli ultimi anni diversi casi di progetti CCS sono stati cancellati per motivi tecnici, anche se gli esperti non ritengono che le barriere tecnologiche siano i principali ostacoli per la realizzazione dei progetti CCS. I costi più alti per i progetti di CCS riguardano le tecnologie necessarie per la cattura della CO₂, ma anche i costi di stoccaggio e soprattutto di trasporto possono essere significativi. I costi di trasporto possono aumentare con lunghe distanze, volumi bassi e terreni difficili. Allo stesso tempo, il costo per la cattura può essere basso, quando la fonte di CO₂ proviene da un processo che si conclude con la formazione di CO₂ con un elevato grado di purezza.



6.2 CCU CATTURA E RIUTILIZZO DELLA CO₂

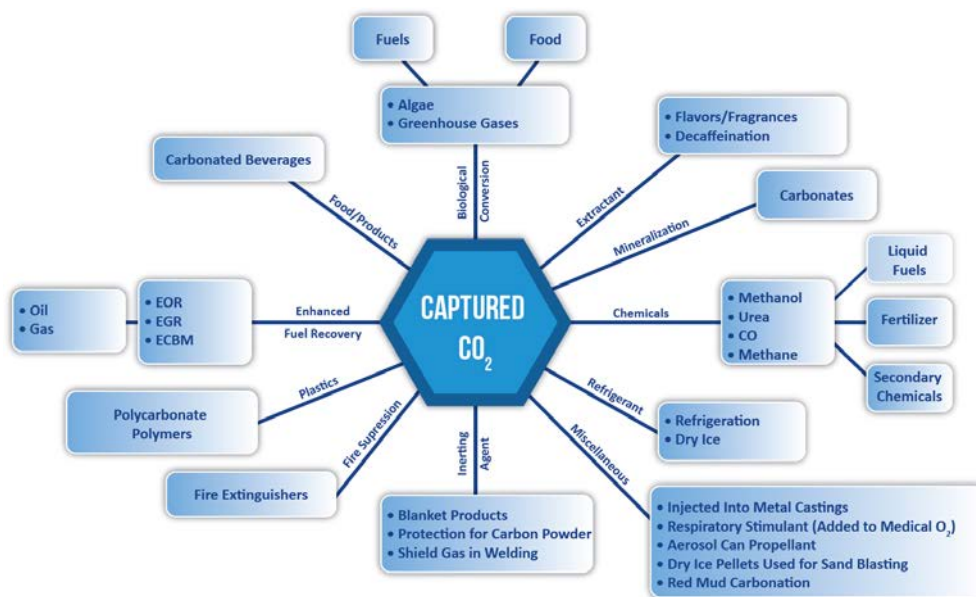
La cattura e l'utilizzo del carbonio (CCU Carbon Capture & Utilization) apre la strada ad una nuova economia dove la CO₂ viene utilizzata come materia prima nella fabbricazione, per esempio, di combustibili, carbonati, polimeri e prodotti chimici. L'utilizzo della CO₂ può mitigare le emissioni di carbonio nell'atmosfera riducendo il consumo delle materie prime fossili, evitando così l'emissione di altre sostanze associate ad esse. Grazie a questo potenziale intrinseco, CCU è considerata un'alternativa ai metodi di stoccaggio di CO₂

(CCS). Il centro Lowcarbonfuture⁴³, ha recentemente pubblicato un rapporto⁴⁴ che fornisce la prima valutazione tecnica ed economica completa relativa alla cattura e all'utilizzo del carbonio, come valida opzione, ma poco conosciuta, per la riduzione delle emissioni di carbonio. Invece di trattare la CO₂ come rifiuto, come nel caso della cattura e stoccaggio (CCS), il processo CCU prevede l'utilizzo diretto di CO₂ come materia prima per la sintesi chimica di altre sostanze. Tuttavia, tale tecnologia è in fase di ricerca e di sviluppo, non è ancora divulgata su larga scala e necessita di investimenti. Gli approcci CCU sono attualmente al centro di molti dibattiti scientifici in quanto sembrano promettenti, ma non ancora applicati su larga scala come fino ad ora è stato fatto con i metodi di stoccaggio. Tuttavia, pur essendo i metodi CCS consolidati, hanno dimostrato negli ultimi anni, elevati costi di investimento per ovviare all'incertezza sulla potenziale capacità di perdite delle sacche sotterranee con conseguenti problemi sociali. Va inoltre detto che la velocità con cui i progetti CCS procedono, potrebbero non essere sufficienti per raggiungere la riduzione del 80% delle emissioni globali di CO₂ prefissate dall'Unione Europea per il 2050. Con tali urgenti problematiche climatiche, le tecniche di CCU potrebbero diventare un'alternativa fondamentale. Le tecnologie CCU giocheranno un ruolo cruciale per il futuro del sistema energetico e per la salvaguardia del clima. Tale tecnologia vista in simbiosi con la produzione di energia da fonti rinnovabili, potrebbe diventare una materia prima praticamente infinita per la produzione di combustibili e di prodotti chimici. Dalla simbiosi tra CCU ed energie rinnovabili, è stato coniato il termine rCCU (renewable-CCU). Tale acronimo sintetizza la capacità di convertire grandi quantità di energia elettrica non "programmabile" in combustibili facilmente stoccabili come il metano. Un altro problema non trascurabile, è il vantaggio di non gravare sull'infrastruttura di rete con picchi di produzione elettrica che potrebbero comprometterne il funzionamento. L'Unione europea non può permettersi di perdere o ritardare la diffusione di questi nuovi approcci tecnologici atti ad immagazzinare l'elettricità da fonti rinnovabili. L'Unione europea dovrebbe diventare il leader nel rCCU, non solo dal punto di vista della ricerca e sviluppo, ma soprattutto utilizzandone appieno il potenziale strategico. A tal proposito è stata sottoscritta una petizione "Petition for Integration of renewable CCU in the RED (Renewable Energy Directive)"⁴⁵ atta a sensibilizzare la Commissione europea.

⁴³ <http://www.lowcarbonfutures.org/>

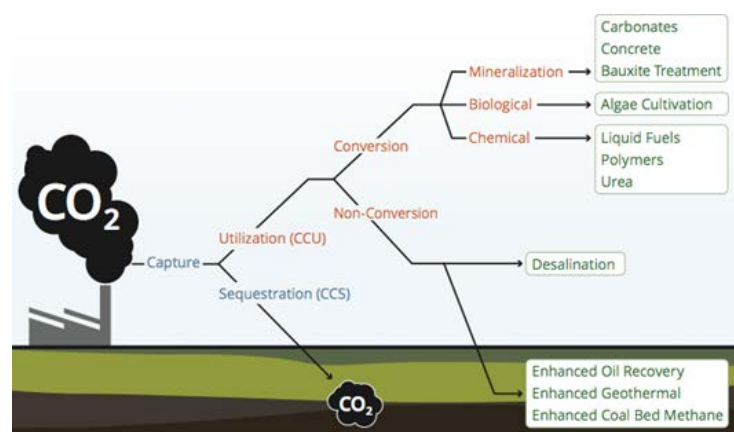
⁴⁴ Carbon Capture and Utilization in the green economy

⁴⁵ <http://co2-chemistry.eu/CCU-petition/wp-content/uploads/2016/10/16-10-25-Petition-for-Integration-of-renewable-CCU-in-the-RED.pdf> (vedi appendice)



Schema generale applicazioni CCU

Il processo di cattura e riutilizzo della CO_2 (CCU) è considerato come una parziale alternativa al percorso di trasporto e stoccaggio di una parte della CO_2 . Tale processo da solo cattura la CO_2 e la converte in prodotti di valore commerciale. Tuttavia non può realisticamente porre rimedio a tutte le emissioni a causa dei volumi interessati e i potenziali mercati per i singoli prodotti. Inoltre, a causa del fabbisogno energetico richiesto dal processo CCU, è probabile che le operazioni di conversione si svolgano nei periodi di bassa domanda di energia, quando l'elettricità rinnovabile è relativamente poco costosa. Bisogna considerare anche altri fattori che influenzano la fattibilità commerciale di CCU, quali la disponibilità di idrogeno e di altre materie prime nella catena di approvvigionamento e un sistema di approccio per l'integrazione di risorse, energia e territorio.



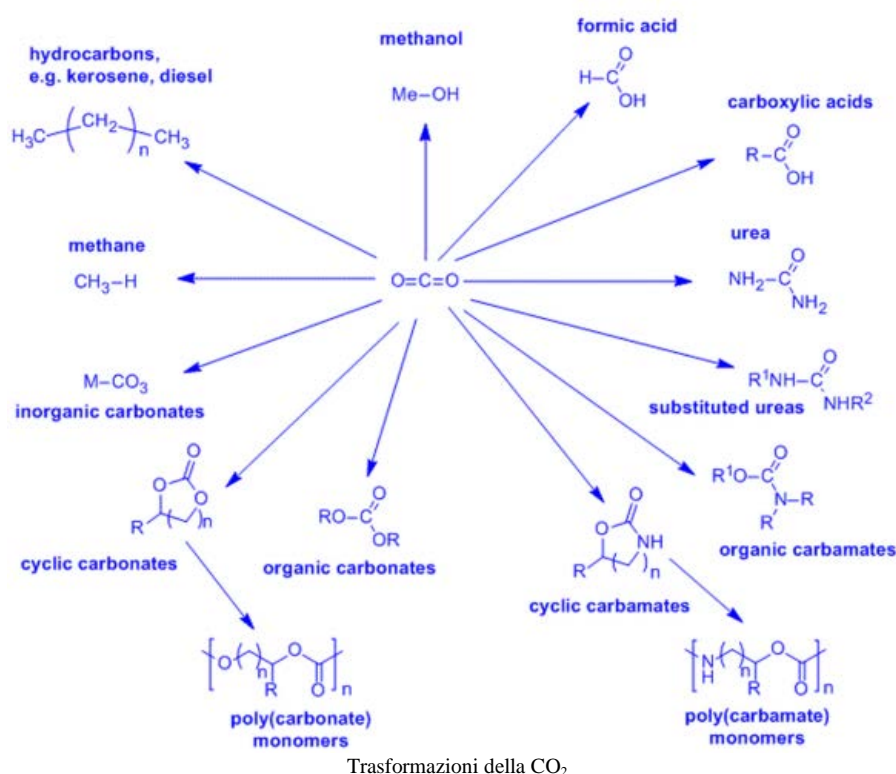
Schema concettuale CCU

6.3 CO₂ POTENZIALI UTILIZZI INDUSTRIALI

La CO₂ è un composto chimico che può essere utilizzato per la produzione di combustibili sintetici, oppure come fluido motore (ad esempio nelle centrali geotermiche), come materia prima nei processi chimici e in applicazioni nel campo delle biotecnologie o per la fabbricazione di una vasta gamma di altri prodotti. Finora, la CO₂ è efficacemente utilizzata per la produzione di urea, refrigeranti, bevande, sistemi di saldatura, estintori, trattamento delle acque, orticoltura, carbonato di calcio precipitato per l'industria cartaria, come agente inerte per gli imballaggi alimentari e per molte altre applicazioni di portata più limitata⁴⁶. Inoltre, sono emerse di recente diverse possibilità di utilizzarla sfruttando vari canali per la produzione di prodotti chimici (ad esempio: polimeri, acidi organici, alcoli, zuccheri), o per la produzione di combustibile (ad esempio: metanolo, biocarburanti ricavati da alghe, gas naturale sintetico). Tuttavia, la maggior parte di queste tecnologie sono ancora in fase di R&S. Inoltre, tenuto conto del loro meccanismo specifico di stoccaggio – temporaneo o permanente – e del fatto che i volumi di CO₂ coinvolti non sono necessariamente sufficienti, non è possibile trarre chiare conclusioni sui loro effetti in termini di abbattimento della CO₂. Indipendentemente dal loro potenziale per ridurre le emissioni di CO₂, i vari modi di utilizzare questo composto chimico rappresentano un'opzione diretta a breve termine per generare entrate. In tal modo, la CO₂ non sarebbe più considerata un prodotto di scarto ma una materia prima e ciò contribuirebbe a rendere più accettabili all'opinione pubblica le tecnologie CCU - CCS. L'anidride carbonica, in condizioni standard, è una molecola non-polare e chimicamente non reattiva che persiste quindi in atmosfera. È prodotta naturalmente attraverso la combustione di materiali carboniosi e l'attività vulcanica, ma è anche un importante inquinante prodotta dall'utilizzo antropogenico di materiali carboniosi. A causa della sua bassa reattività, per poter convertire la CO₂ in prodotti di valore economico bisogna fornire energia o utilizzare catalizzatori per ridurre l'energia di attivazione necessaria per le reazioni. A causa delle enormi quantità di emissioni di CO₂ derivanti dalle attività di natura antropica, è necessario che questi processi siano diversi a causa dei requisiti della catena di approvvigionamento e della capacità globale. Una spinta per gli investimenti per il riutilizzo dell'anidride carbonica sarà la capacità di garantire la fornitura di combustibili e prodotti

⁴⁶ Fonte: Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos e Leo Meyer, a cura di, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, capitolo 7.3, IPCC, 2005.

chimici di base che hanno sempre utilizzato materie prime petrolchimiche. I prezzi delle materie petrolchimiche sono dettati dal prezzo del greggio e la sua fluttuazione può portare ad instabilità sulla fornitura e sul prezzo. Utilizzando la CO₂ è possibile mantenere il carbonio all'interno di un ciclo. È possibile intrappolare il carbonio in una forma permanente, ad esempio tramite mineralizzazione accelerata, per produrre materiali da costruzione e per formare un polimero, o trasformarlo in un vettore energetico, ad esempio come un combustibile liquido sintetico. Tuttavia, con la conversione in combustibili, per mantenere il ciclo sarebbe necessaria la cattura della CO₂ dall'aria. All'interno della vasta gamma di possibili prodotti vi sono intermedi preziosi, tra cui gas di sintesi e piccole molecole organiche. La figura seguente mostra alcune delle importanti trasformazioni della CO₂ che sono state individuate fino ad oggi.



Questo rappresenta un piccolo sottoinsieme di tutto lo scenario dei prodotti chimici ed è solo di recente che gli sforzi si sono concentrati sulla diversificazione del portfolio delle reazioni.

Questo è un settore che è stato identificato dal Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) nelle loro Grand Challenges rivolgendo l'attenzione verso un'economia chimica sostenibile entro il 2050. Pertanto, la ricerca sul modo in cui la CO₂ può essere efficacemente utilizzata rappresenta un'area privilegiata di grande interesse per gli investimenti. Infatti, the International Conference on Carbon Dioxide and Utilisation sta crescendo di anno

in anno e vengono scoperti sempre più velocemente nuovi percorsi di reazione.

Oltre il metano, Metanolo e DME

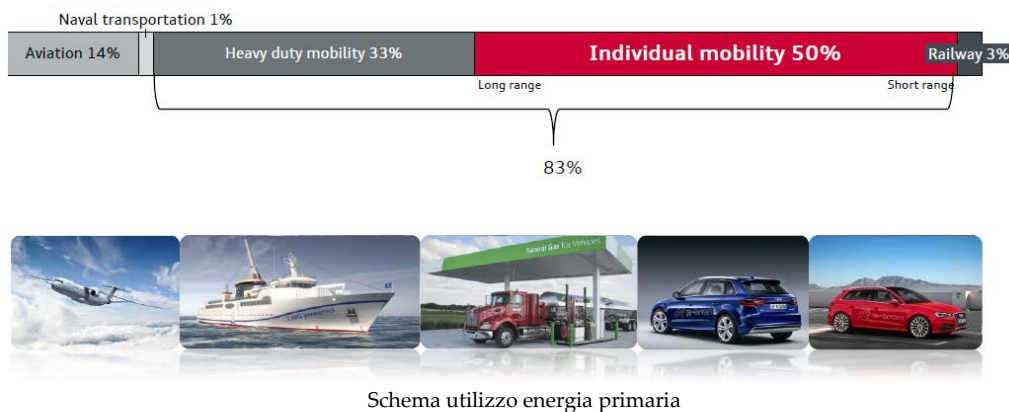
Oltre al metano, altre molecole meritano una attenzione particolare per la versatilità del loro impiego, che va dal diretto utilizzo come combustibili o carburanti alla molteplicità delle trasformazioni cui sono suscettibili per produrre una vasta gamma di prodotti di largo utilizzo. Fra queste molecole un ruolo di primaria importanza lo occupano il metanolo ed il dimetil-etero (DME), tanto che G. A. Olah (Nobel per la Chimica 1994) ha introdotto il concetto di "Methanol Economy" per indicare l'impatto che il riciclaggio della CO₂ come CH₃OH e DME potrebbe avere sull'economia mondiale. Il metanolo è un liquido e quindi la densità di energia immagazzinata è di gran lunga superiore a quella del metano, a parità di volume. Il metanolo è ottenuto per reazione di CO₂ con H₂; se quest'ultimo è ottenuto da fonte rinnovabile, riconducibile in qualche modo all'energia solare, il metanolo come il metano risulta essere un utile mezzo per il trasporto e lo stoccaggio di energia. I primi impieghi del metanolo, chiamato originariamente alcool del legno perchè ottenuto come sottoprodotto della produzione di carbone da legname, furono come combustibile. Attualmente è uno dei principali materiali di base dell'industria chimica ed è prodotto in misura di circa 50 Mton per anno. L'impiego del metanolo come carburante in motori a benzina è iniziato negli anni '60 del secolo scorso. Il prodotto della disidratazione del metanolo, cioè il dimetil-etero (DME), è invece idoneo a sostituire il gasolio nei motori diesel. Altri possibili impieghi del DME vanno dall'uso come gas domestico a come sorgente di idrogeno in fuel cells. Il DME è il più semplice degli eteri ed è un gas non tossico, non corrosivo, sicuro da manipolare e che viene facilmente liquefatto come il GPL. Metanolo e DME si candidano pertanto a sostituire o integrare gli attuali carburanti derivati da fonte fossile.

6.4 CASO INDUSTRIALE AUDI, DAL VENTO ALLA STRADA⁴⁷.

Il punto di partenza della filiera dell'e-gas sono quattro centrali eoliche da 3,6 MW ognuna di cui Audi ha contribuito a finanziare la costruzione nel mare del Nord. Questa elettricità pulita può essere utilizzata immediatamente per costruire ed alimentare vetture elettriche.

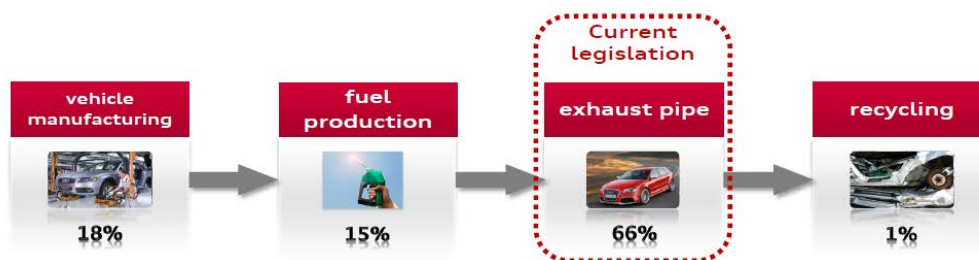
⁴⁷ Copyright Audi di tutto il presente capitolo

Secondo una prima stima, Audi dice che è sufficiente per produrre 1.000 A1 e-tron e far loro percorrere 10.000 km all'anno. Il resto di quest'energia alimenterebbe un secondo impianto atto a trasformare su larga scala l'energia in due fasi: prima idrogeno, poi metano. Più vantaggioso, è trasformare l'idrogeno in metano di sintesi, l'e-gas, attraverso un processo di "metanazione" e utilizzarlo come carburante alla stessa maniera di quanto si fa oggi. Ci sono altri vantaggi: sia il metano che l'elettricità prodotta in eccesso possono essere immagazzinate nella rete in caso di eccesso di produzione; il processo di metanazione impiega CO₂, che può essere così sottratta all'atmosfera o ricavata da produzioni industriali. Secondo gli studi del centro ricerche Audi, più dell'80% dell'energia primaria consumata sarà impiegata per trasporti e veicoli individuali; circa 5.000 TWh del consumo di energia dell'UE sarà impiegato per il settore della mobilità da qui al 2020⁴⁸



Schema utilizzo energia primaria

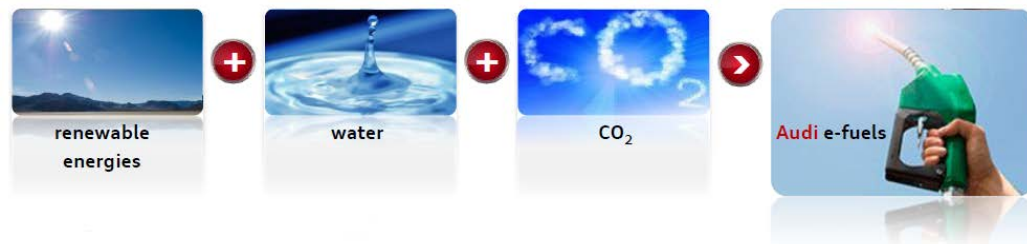
Andando a svolgere il calcolo del Carbon Footprint, risulta che la criticità maggiore è per gli scarichi delle auto individuali.



Schema Footprint per tipologia di veicolo - LCA

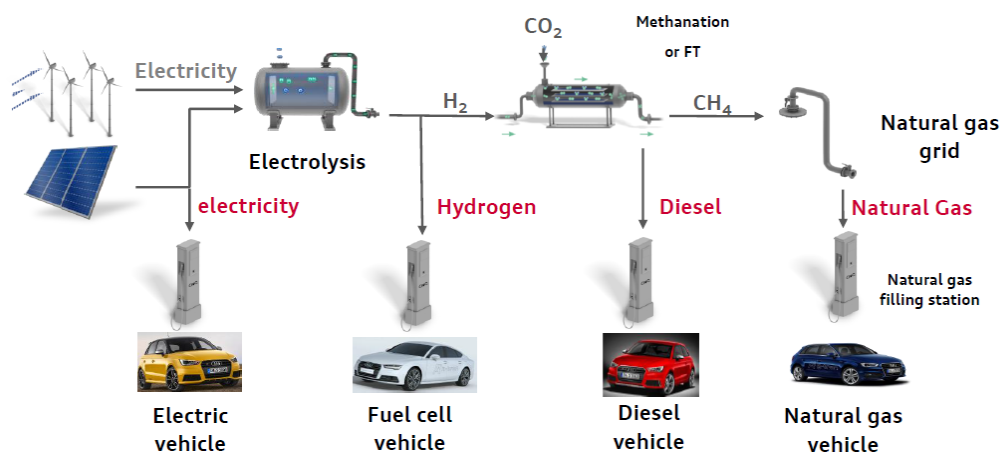
⁴⁸ European Commission, DG Energy and Transport: European Energy and Transport, Trends to 2030

L'idea di Audi di creare combustibili di sintesi, sfruttando CO₂ ed energie rinnovabili in eccesso, si basa sul concetto di produrre combustibili senza dover utilizzare terreni coltivabili, di poter sfruttare le infrastrutture esistenti (piping, distributori, metodi di stoccaggio, ecc ecc) e di poter ridurre le finali emissioni di CO₂.



Percorso concettuale produzione e-fuels

L'elettricità proveniente da fonti rinnovabili può essere utilizzata direttamente o può essere convertita in idrogeno verde, gasolio, benzina o gas naturale da utilizzare in seguito.



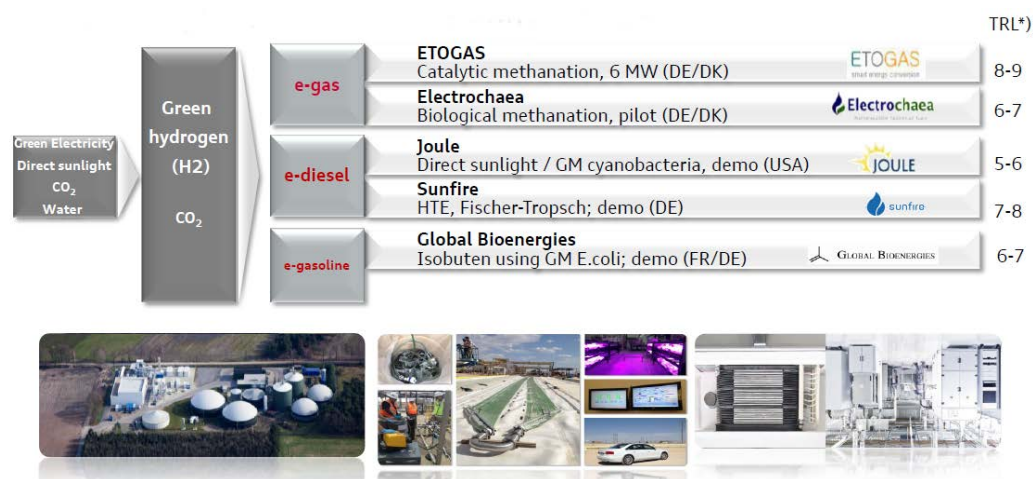
Schema concettuale produzione combustibili partendo da fonti rinnovabili

L'impianto sperimentale così composto, produce circa 1000 t/anno di CH₄, sequestrando circa 2800 t/anno di CO₂. Grazie alle celle combustibili alimentate da 6 MW provenienti da fonti rinnovabili, verrà realizzato in loco l'idrogeno necessario per garantire il processo di metanazione. Questo può essere ulteriormente ottimizzato abbinando il calore residuale del processo di metanazione per l'impianto adiacente di produzione di biogas. Tale impianto, alimentato a scarti alimentari, fornisce la CO₂ per la metanazione.



Foto aerea impianto sperimentale Audi e-gas (Werlte – Germania)

Audi sta estendendo il processo di produzione di biocarburanti anche verso biodiesel e biobenzine insieme ad altre aziende partner. Le tecnologie menzionate sono state al vaglio di ricerche accurate e sono attualmente pronte per l'estensione sul mercato.



*) Technology Readiness Level (TRL): 1: Grundprinzip bewiesen; 4: Pilot im Labor; 5: Pilot in relevanter Umgebung; 9: industrielle Anlage

Lista progetti in corso e collaborazioni

Il progetto Audi è attualmente pronto per l'estensione su larga scala lasciando sperare ad una riduzione ipotetica del 70% delle emissioni di Gas serra. Va detto che oltre il grande vantaggio di ridurre i gas serra, si avrà un nuovo incentivo al mondo delle rinnovabili in quanto diventeranno parte integrante del sistema. Il progetto di Audi è molto interessante e non isolato: ci sono altri progetti in Germania che stanno sperimentando tecniche di accumulo dei surplus energetici derivanti da fonti rinnovabili tramite la trasformazione in idrogeno e in metano, che lasciano ben sperare sulla loro futura estensione e replicabilità.

6.5 CASO CARBON RECYCLING INTERNATIONAL

La tecnologia del “riciclo” della CO₂ in carburanti commercialmente validi trova un alleato insperato nella geotermia. L’azienda islandese Carbon Recycling International⁴⁹ sta mettendo a punto una tecnica di produzione del metanolo⁵⁰ sfruttando l’energia e l’anidride carbonica contenuta nei cicli ad alta entalpia in quanto nei sistemi geotermici i fluidi che vengono reimmessi nel ciclo, contemporaneamente al loro sfruttamento, trascinano con sé in quantità relativamente piccole una serie di gas non condensabili: anidride carbonica, idrogeno solforato, metano, boro, mercurio e arsenico, formati a seguito di reazioni che avvengono nel sottosuolo e, che indipendentemente dall’attività di estrazione, darebbero comunque luogo ad emanazioni spontanee dal terreno. Partendo da questo dato di fatto la società ha realizzato un impianto di recupero della CO₂ adiacente ad una centrale geotermica attiva dal 1976, nell’area vulcanica meridionale della penisola islandese. L’impianto è in grado di riciclare l’anidride carbonica in maniera più economica rispetto a quella delle “convenzionali” centrali di CCS (in quanto non deve essere separata dall’azoto) per produrre in cambio “Vulcanol”⁵¹. E’ stato ribattezzato con questo nome il metanolo ottenuto attraverso l’innovativa tecnica brevettata da Carbon Recycling International. L’energia elettrica prodotta dalla centrale geotermica può inoltre essere in parte sfruttata per l’elettrolisi dell’acqua, così da avere direttamente in loco l’idrogeno necessario per la produzione di metanolo.

⁴⁹ Carbon Riciclaggio Internazionale (CRI) è stata fondata nel 2006 a Reykjavik, Islanda per sviluppare e commercializzare un processo per la produzione di combustibile da industriale emissioni di anidride carbonica (CO₂). Nel 2007, l’azienda membro MI ha aperto un impianto pilota a Reykjavik, Islanda e ha dimostrato la fattibilità del suo processo produttivo Emissioni-to-Liquid carburante. CEO K.C. Tran si aspetta CRI per aumentare la produzione ad una “scala industriale” entro settembre 2011 con un litro a 5 milioni di un impianto di anno, che permette di convertire le emissioni di CO₂ della centrale HS Gombo in metanolo rinnovabile. Inoltre, CRI ha annunciato piani per tentare di costruire un impianto di CO₂ al metanolo in Islanda settentrionale, che avrebbe utilizzato le emissioni da impianto geotermico 60 MW di Landsvirkjun in Krafla per la produzione di oltre 100 milioni di litri di metanolo l’anno. (<http://carbonrecycling.is/>)

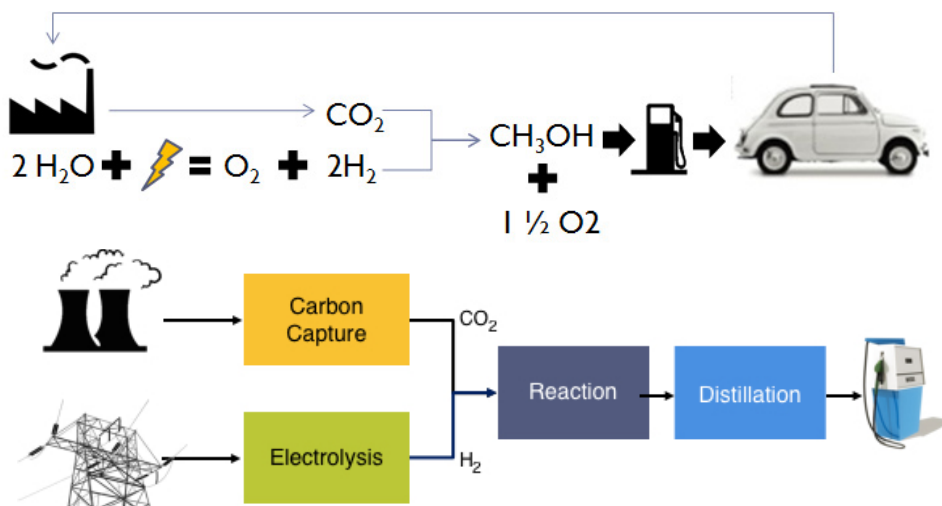
⁵⁰ Il metanolo (CH₃OH) è il più semplice degli alcoli, noto anche come alcol metilico o spirito di legno, L’atomo di carbonio è al centro di un tetraedro grossomodo regolare i cui vertici sono occupati dall’atomo di ossigeno e dai tre atomi di idrogeno direttamente legati ad esso. A temperatura ambiente, si presenta come un liquido incolore dall’odore caratteristico. È molto volatile ed estremamente infiammabile. La fiamma di metanolo è invisibile. È completamente solubile in molti solventi organici, quali il cloroformio, ed in acqua. Viene usato come solvente e combustibile e nella produzione della formaldeide

⁵¹ “E’ fatta con l’energia proveniente da un vulcano”



Methanol plant at Svartsengi, Reykjanes for Carbon Recycling International

Il modo migliore per definire la tecnologia introdotta dalla CRI, è “Elettricità Liquida” in quanto viene trasformata in combustibile liquido l'energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili. Il liquido così prodotto, il metanolo, potrà essere utilizzato per motori a combustione interna. In estrema sintesi il processo è concettualmente simile ad immagazzinare energia elettrica in una batteria, ma senza avere l'onere di doverla smaltire a fine ciclo.



Schema concetto impianto CRI

Il processo denominato “Vulcanol” è in grado di ridurre le emissioni di carbonio di oltre il 90% rispetto ai combustibili fossili, se consideriamo il ciclo di

vita completo. Biocarburanti, come l'etanolo e il biodiesel, sono prodotti che comprendono parti derivanti da combustibili fossili e parti che derivano dall'agricoltura che preferibilmente dovrebbero essere riservate alle produzioni alimentari. La produzione di Vulcanol non richiede zone seminate da cui estrarre biomasse, non produce emissioni dirette di gas serra nel processo di produzione e utilizza energia prodotta da fonti rinnovabili per la trasformazione, garantendo un minimo impatto ambientale. Un esempio applicativo, oltre all'autotrazione (vedi immagine sottostante).



Esempio di veicolo stradale alimentato a metanolo di sintesi (Progetto CRI)

Un'alta possibile estensione del metanolo è come combustibile per utilizzi marini del futuro. Nella conferenza "Making Marine Applications Greener"⁵², tenutasi il 4 ottobre 2016 a Reykjavik è stato affrontato il tema dell'inquinamento dei Mari del Nord ed è emerso come il metanolo potrebbe diventare un grande combustibile marittimo in quanto "pulito" e biodegradabile, inoltre se prodotto dalla tecnologia "Emissions-to-Liquids di CRI", si potrebbero abbattere drasticamente le emissioni di CO₂.

Considerando il forte aumento del traffico marittimo nell'Artico, si potrebbe ipotizzare su larga scala l'utilizzo di combustibili "sostenibili" per migliorare l'impatto ambientale e la salvaguardia della fauna ittica. Nella conferenza sono stati menzionati alcune iniziative in corso tra cui la costruzione di 9 grandi petroliere che verranno alimentate a metanolo (Corea e Giappone), e la conversione di un traghetto da 1.300 passeggeri della compagnia Stena.

⁵² Fonte CRI

6.6 CASI DI STUDIO ENEA

Il suo nome è **ZECOMIX**, deriva da un progetto di ricerca dell'ENEA, ha per la prima volta testato su scala pilota una nuova metodologia di interesse industriale per produrre un combustibile "pulito" a partire da combustibili fossili. Si tratta di un'innovativa tecnologia, fino ad oggi sperimentata solo in laboratorio, basata sulla de-carbonizzazione del combustibile fossile, con produzione di gas ad alto contenuto di idrogeno e la contemporanea cattura della CO₂, per il suo successivo sequestro geologico o la sua utilizzazione. La tecnica, sperimentata sulla piattaforma ZECOMIX⁵³ (*Zero Emission of Carbon with MIXed technologies*), infrastruttura di ricerca fra le più avanzate a livello internazionale (inserita tra le infrastrutture di eccellenza del portale europeo MERIL - www.meril.eu), è denominata *SE-WGS* (*Sorption Enhanced - Water GasShift*) e consente, operando a pressione atmosferica attraverso l'utilizzo di un sorbente naturale (ossido di calcio), privo di qualsiasi tossicità per l'uomo, per l'ambiente e di bassissimo costo, la contemporanea produzione di idrogeno e cattura della CO₂.



Reattore di "Calcium Looping", cuore della Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX



Reattore di "Calcium Looping", cuore della Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX

"Il processo non solo è sostenibile dal punto di vista economico ed ambientale, ma può essere pienamente integrato, oltre che in sistemi per la produzione di energia, anche in sistemi industriali altamente energivori come impianti siderurgici e cementifici, consentendo un abbattimento significativo delle emissioni di CO₂, nonché importanti vantaggi in termini di efficienza energetica. Esso dunque si candida a rappresentare la tecnologia in grado di

⁵³ Stefano Stendardo, Centro Ricerche Casaccia - Enea

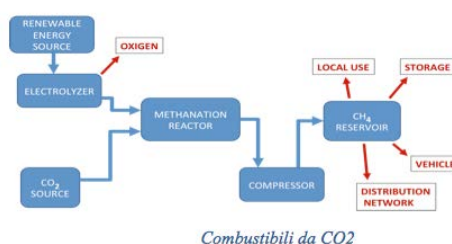
abbattere in maniera significativa il costo della separazione della CO₂, uno degli ostacoli principali alla penetrazione industriale delle tecnologie CCS (*Carbon Capture and Storage*), nonché una via fattibile per la reale de-carbonizzazione del sistema energetico ed industriale”.

Progetto Fenice⁵⁴

FENICE è il primo impianto dimostrativo italiano per la trasformazione di CO₂ in combustibile.



Impianto Fenice



L'impianto è stato realizzato dopo attività condotte su piccoli sistemi sperimentali in scala da laboratorio. Si tratta di un impianto che, lavorando ad alte pressioni e a temperature di circa 200 °C, rivitalizza il carbonio presente nella CO₂ attraverso la sua riduzione con idrogeno: dalla reazione si ottiene metano ed acqua. L'elettrolizzatore, che l'impianto FENICE utilizza per la produzione di idrogeno, può essere alimentato da fonti rinnovabili, come i pannelli fotovoltaici o i generatori eolici, consentendo l'immagazzinamento dell'energia solare sotto forma chimica. Questa metodologia di stoccaggio presenta, oltre ai benefici di natura ambientale, significativi vantaggi in termini di versatilità, in quanto il metano prodotto può essere utilizzato in vari modi sia per uso locale che per la distribuzione in rete. Attualmente l'impianto può produrre 250 NL/h di metano, ma le sue potenzialità sono molto superiori. Inoltre, nello stesso impianto, utilizzando opportuni catalizzatori, si può produrre anche metanolo e dimetil-etero (DME). Questi ultimi sono considerati combustibili alternativi per autoveicoli dalle ottime qualità e dal basso impatto ambientale. Il sistema è caratterizzato da un'elevata flessibilità ed è in grado di sperimentare la tecnologia per diverse applicazioni, tra cui la valorizzazione energetica di siti di rilascio spontaneo delle CO₂, di cui l'Ita-

⁵⁴ UTILIZZO DELLA CO₂ PER PRODUZIONE DI COMBUSTIBILI - Vincenzo Barbarossa, Rosanna Viscardi (ENEA) - Settembre 2014

lia è ricca per presenza di vulcani sul suo territorio. Il nome di questo impianto si ispira al mitologico uccello dell'Araba Fenice, che rinasce dalle proprie ceneri dopo la morte, a voler così simboleggiare la rigenerazione del combustibile a partire dal principale prodotto di combustione. L'utilizzo della CO₂ come materiale di partenza per la sintesi di prodotti chimici di base e di combustibili può rappresentare un importante contributo al riciclo del carbonio. I risultati ottenuti dall'ENEA, inerenti al processo di metanazione sull'impianto FENICE, si inquadrano in un contesto scientifico e tecnologico di rilevanza strategica e di straordinaria attualità. Si concretizza infatti la possibilità di utilizzo della CO₂ come materia prima per la produzione di combustibili alternativi attraverso la realizzazione di un ciclo chiuso, caratterizzato da emissioni in atmosfera di CO₂ nulle. Dopo aver concentrato in questi anni l'interesse sulla produzione di metano, in considerazione della grande diffusione di questo combustibile nel nostro paese, l'attività di ricerca si sposta sulla conversione di CO₂ in metanolo e dimetil-etere (DME). Queste due molecole rappresentano dei combustibili alternativi sia per l'autotrazione che per l'uso domestico. L'idea è quella di abbandonare gli attuali processi industriali, basati sulla conversione del monossido di carbonio, per ottenere invece metanolo attraverso nuovi catalizzatori di sintesi, sfruttando l'idrogenazione dell'anidride carbonica. Il dimetil-etere (DME) rappresenta un attraente combustibile sintetico multi-uso (autotrazione, celle a combustibile, riscaldamento domestico, etc.), alternativo al gasolio, caratterizzato da una elevata efficienza termica e da emissioni molto ridotte di PM10. Attualmente, il DME è prodotto dal Gas Naturale attraverso un processo industriale che comprende a) la generazione di syngas; b) la sintesi di metanolo; c) la disidratazione di metanolo a DME.

6.7 L'IDROGENO

L'idrogeno (dal greco "ύδωρ" (ùdor) e "γένος" (ghènos), "generatore di acqua") è di gran lunga l'elemento più abbondante nell'universo, dal momento che molte stelle, la maggior parte, risultano esserne costituite in una percentuale pari anche al 75-90% della propria massa. Con l'ossigeno ed il silicio è l'elemento più abbondante del nostro pianeta. L'idrogeno (simbolo H) è il primo elemento della tavola periodica; è quello più semplice, più leggero e più comune dell'universo ed è presente in tutti i composti organici e organismi viventi. Allo stato elementare esiste sotto forma di molecola biatomica (H₂). A pressione atmosferica e a temperatura ambiente (298K) è un gas incolore, inodore, insapore ed altamente infiammabile. E' poco comune nel nostro

pianeta in forma pura, infatti è rintracciabile allo stato libero solo in gas vulcanici e in alcuni gas naturali: la sua leggerezza, infatti, lo fa fuggire alla gravità terrestre e la sua estrema reattività fa sì che formi numerosi composti chimici. Come parte di composti l'idrogeno è il decimo elemento più abbondante della terra presente soprattutto nell'acqua, nei minerali e negli idrocarburi come petrolio e gas naturale. Esso forma numerosi composti con il carbonio, chiamati composti organici. Alcuni di questi sono idrocarburi, come il metano (CH_4), l'etano (C_2H_6), il propano (C_3H_8), il butano (C_4H_{10}), altri alcoli come il metanolo (CH_3OH) e l'etanolo ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). L'idrogeno può anche essere prodotto dall'acqua scindendo la stessa nei suoi componenti (idrogeno e ossigeno) attraverso diversi processi tra i quali, quello più consolidato, è l'elettrolisi.

L'elettrolisi dell'acqua

Si tratta di un processo elettrochimico che permette di ricavare dall'acqua idrogeno gassoso H_2 . La tecnica non è inquinante, dato che l'unico prodotto di scarto del processo è l'ossigeno O_2 . Gli impianti commerciali di elettrolisi sono ottimizzati per la produzione d'idrogeno ad alta purezza e presentano impatto ambientale nullo. L'elettrolisi, schematicamente, può essere rappresentata dalla seguente reazione: acqua più energia elettrica uguale idrogeno più ossigeno:

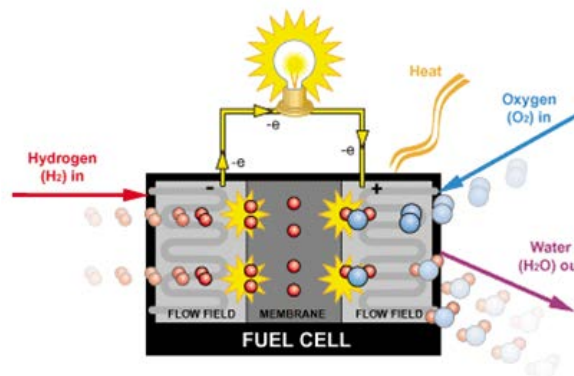
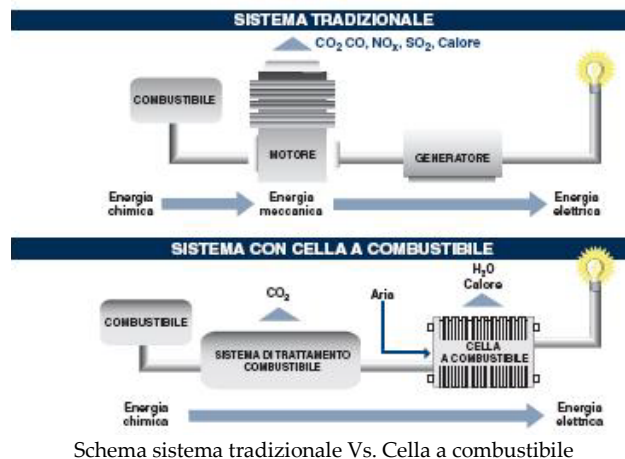


I principali utilizzi dell'idrogeno

Attualmente pensati per il futuro, riguardano l'impiego come combustibile per la generazione di energia elettrica e per il trasporto. Tuttavia, lo strumento principale il cui sviluppo condizionerà pesantemente la reale affermazione dell'idrogeno come vettore energetico pulito è, senza dubbio, la cella a combustibile.

Una cella a combustibile

È un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettricità e calore senza passare attraverso cicli termici e quindi senza risentire delle limitazioni imposte a questi ultimi dalla termodinamica.



Cella a Combustibile o Fuel Cell

In sostanza funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico ma, a differenza di quest'ultima, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile ed ossidante.

Purtroppo, dal punto di vista della sicurezza, esistono ancora molte perplessità a causa della poca familiarità con questo vettore, il che porta ad un suo utilizzo in condizioni particolarmente restrittive.

Tuttavia, al di là della soggettiva "percezione di rischio", un'analisi attenta ridimensiona il concetto di pericolosità dell'idrogeno.

Questo gas è infatti meno infiammabile della benzina: la sua temperatura di autoaccensione è di circa 550 °C, contro i 230-500 °C (a seconda dei tipi) della benzina. L'idrogeno è inoltre il più leggero degli elementi (quindici volte meno dell'aria) e perciò si diluisce molto rapidamente in spazi aperti. È infine praticamente impossibile farlo detonare, se non in spazi confinati.

Per individuare concentrazioni potenzialmente pericolose (> 4% in aria) si utilizzano sensori che possono facilmente comandare adeguati sistemi di sicurezza. Per esempio, i veicoli prototipo della BMW, hanno vetri e tettuccio che, in caso di presenza del gas, si aprono automaticamente. Quando brucia,

l'idrogeno si consuma molto rapidamente, sempre con fiamme dirette verso l'alto e caratterizzate da una radiazione termica a lunghezza d'onda molto bassa, quindi facilmente assorbibile dall'atmosfera. È stato calcolato, facendo uso di dati sperimentali, che l'incendio di un veicolo a benzina si protrae per 20-30 minuti, mentre per un veicolo ad idrogeno non dura più di 1-2 minuti.



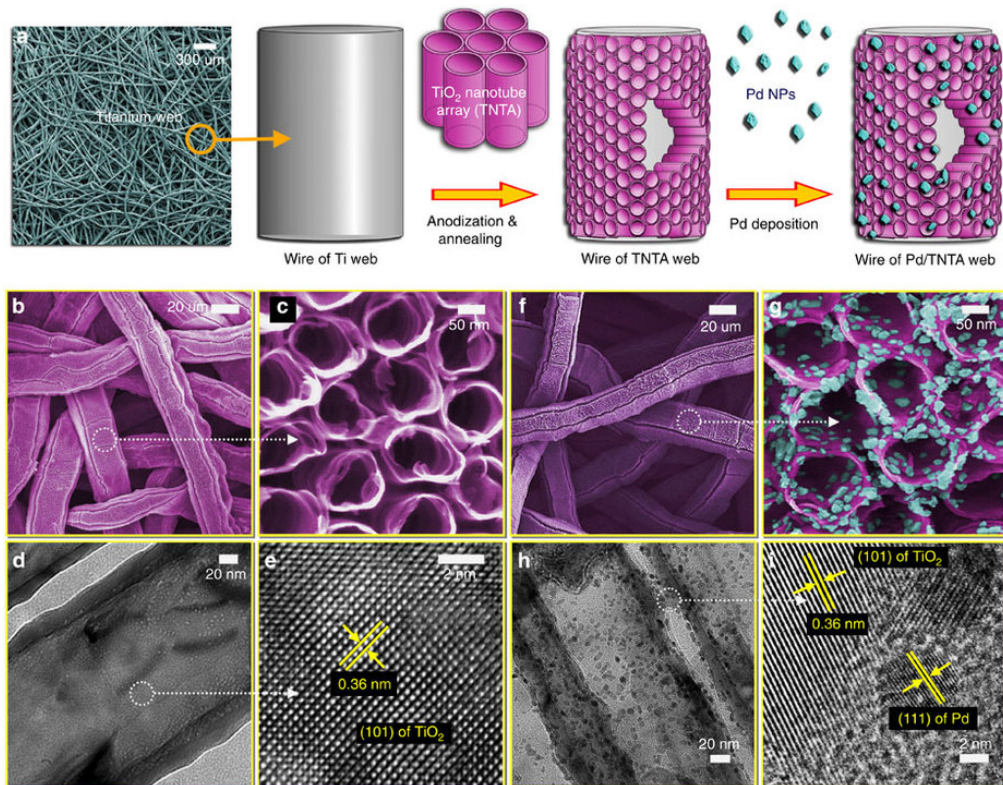
Confronto infiammabilità auto ad idrogeno Vs. auto a benzina

La bassa radiazione termica, propria delle fiamme da idrogeno, fa sì che esistano poche possibilità (al di là dell'esposizione diretta alla fiamma) che materiali vicini possano essere a loro volta incendiati, riducendo così, oltre alla durata dell'incendio, anche il pericolo di emissioni tossiche. L'idrogeno, al contrario dei combustibili fossili, non è tossico, né corrosivo ed eventuali perdite dai serbatoi non causano problemi di inquinamento del terreno o di falde idriche sotterranee⁵⁵. La ricerca di base si sta muovendo verso fronti atti a rendere più efficiente la produzione dell'idrogeno tramite metodi non dipendenti dagli idrocarburi e meno dispendiosi dal punto di vista energetico, come l'elettrolisi. Una novità emersa recentemente, riguarda un elettrolizzatore in grado di produrre idrogeno, ma non ossigeno, a partire da soluzioni acquose da alcoli rinnovabili (etanolo, glicerolo o altri alcoli superiori estratti da biomasse), ottenendo un risparmio energetico del 60% rispetto all'elettrolisi dell'acqua⁵⁶. Per rompere l'acqua in presenza di alcoli serve meno energia rispetto a quella necessaria in presenza esclusivamente di acqua. Il cuore della nuova tecnologia è rappresentato dagli elettrodi nanostrutturati impiegati in una cella elettrolitica di nuova generazione. Grazie a questi è possibile realizzare elettrolizzatori per produrre idrogeno da soluzioni acquose di alcoli derivati da biomasse, consumando 18,5 kWh per la produzione di 1 kg

⁵⁵ Tratto da ENEA " IDROGENO energia del futuro"

⁵⁶ Nanotechnology makes biomass electrolysis more energy efficient than water electrolysis - Y. X. Chen, A. Lavacchi, H. A. Miller, M. Bevilacqua, J. Filippi, M. Innocenti, A. Marchionni, W. Oberhauser, L. Wang & F. Vizza -2014 <http://www.nature.com/articles/ncomms5036>

di idrogeno, rispetto a 45 KWh per 1 kg di idrogeno prodotto da sola acqua, un grande guadagno energetico ed economico.



Schema anodo con nanostruttura caratterizzato con microscopio elettronico

Arrivare alla realizzazione di celle a combustibile efficienti, in grado di funzionare utilizzando scarti delle colture, come materia prima per produrre combustibile, porterebbe alla riduzione della dipendenza dal petrolio. Il progetto europeo Decore⁵⁷, sta sviluppando dei componenti delle celle a combustibile adatti per inserire il bioetanolo direttamente nella cella a combustibile, ponendo così le basi per la produzione futura di idrogeno pulito e a basso “costo” energetico.

⁵⁷ http://cordis.europa.eu/result/rcn/165018_it.html

6.8 QUADRIGEN

Sistema di conversione energetica basato sulla combustione alluminio-acqua

L'idea di integrare nella ricerca l'innovativo sistema Quadrigen, frutto di una pluriennale attività svolta dal *Dept. of Sciences and Methods for Engineering University of Modena and Reggio Emilia*, che ha portato anche alla stesura di un Brevetto⁵⁸, nasce dal fatto che parte preponderante degli studi in atto sui metodi di CCU riguardano le problematiche legate alla produzione di idrogeno a basso costo. Con il QUADRIGEN, oltre ad essere separati mediante reazione idrogeno ed ossigeno, si ottiene come sottoprodotto allumina⁵⁹, materia prima impiegata nell'industria ceramica. Di tutta evidenza è il collegamento al caso di studio della presente ricerca, contestualizzata nell'impiantistica ceramica. Tale tecnologia innovativa potrebbe diventare un tassello di una nuova impiantistica evoluta atta a integrare sempre più sistemi, tecnologie, risorse e scarti in una visione d'insieme ottimizzata.

Ma cos'è realmente il QUADRIGEN e perché tale sistema di conversione è chiamato così?

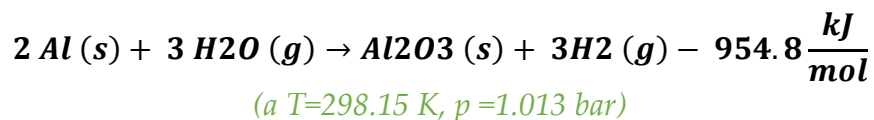
Il QUADRIGEN è un sistema energetico cogenerativo basato su un concetto innovativo che sfrutta la reazione di combustione di particolato di alluminio in ambiente saturo d'acqua.

Il prototipo del sistema è denominato QUADRIGEN, poiché vengono generate integralmente e simultaneamente quattro fonti di energia, quali: idrogeno, vapore ad alta temperatura, calore (utilizzabile in un ciclo cogenerativo) e lavoro meccanico (prelevabile da un albero motore connesso a una turbina).

⁵⁸ Italian patent MO2008A000249, Sept. 2008 - Extended to European patent PCT/EP2009/062334, Sept.2009

⁵⁹ L'ossido di alluminio (o allumina) è l'ossido ceramico dell'alluminio caratterizzato da formula chimica Al_2O_3 . Questo materiale, all'apparenza molto fragile e poco utilizzabile, risulta invece fondamentale in campo industriale, per le sue proprietà quali la resistenza agli acidi, l'elevata conducibilità termica, e la scarsa conducibilità elettrica, ed è anche catalizzatore d'interesse industriale. Viene utilizzato in moltissimi campi, quali l'industria dei laterizi, dei refrattari e delle ceramiche, l'elettronica e la meccanica, oltre ad essere usata nella biomedica come materiale di innesto. È la base di alcuni minerali come rubino e zaffiro, che si differenziano a seconda delle impurezze metalliche presenti nel reticolo cristallino. A temperatura ambiente si presenta come un solido bianco inodore. Dal punto di vista elettrico è un isolante. Viene utilizzato nella crescita epitassiale di dispositivi elettronici come substrato, considerando il buon matching reticolare che consente con alcuni dei semiconduttori più utilizzati

La reazione caratteristica, fortemente esotermica, su cui si basa il sistema è la seguente:



Tale peculiarità ha permesso di sviluppare un'applicazione classificabile come Combined heat Hydrogen Steam and Power (CHHSP), in cui è possibile utilizzare il calore generato dalla reazione per produrre vapore surriscaldato, a sua volta utilizzabile all'interno di un ciclo a turbina o all'interno di un impianto cogenerativo. Il sistema oggetto di studio è presentato nel brevetto⁶⁰.

Combustione alluminio – acqua

È comunemente risaputo che l'alluminio possa essere utilizzato quale combustibile solido. Sin dalla metà del secolo scorso, infatti, numerosi scienziati hanno focalizzato il proprio interesse sulla proprietà esotermica della reazione di combustione tra alluminio e acqua, interrogandosi sulla opportunità di sfruttare l'energia generata in applicazioni tecnologiche, specialmente in campo missilistico e spaziale⁶¹. Nella condizione di equilibrio, la reazione tra alluminio solido e vapore acqueo può essere descritta come nell'equazione sopra riportata. Un aspetto fondamentale della combustione dell'alluminio è rappresentato dal ridotto impatto ambientale, dovuto principalmente alla mancata formazione di sostanze inquinanti, anidride carbonica e dal possibile reimpiego dell'allumina prodotta dalla reazione. Inoltre è la separazione tra idrogeno e ossigeno a permettere un maggior controllo dell'innescò, rendendo la reazione completamente sicura, rappresentando così un ulteriore punto di forza dell'impianto sotto l'aspetto della sicurezza.

Basandosi sul modello numerico implementato e trattato all'interno dell'articolo⁶², si assume di introdurre alluminio solido nell'impianto (alle condizioni iniziali di 30° C e pressione ambiente) a cui si applica un pretrattamento di lavorazione meccanica, in modo da ottenere un particolato solido di alluminio di dimensioni prossime a 20 μ. Successivamente, si fa reagire il particolato di alluminio ottenuto con acqua e sperimentalmente è stato verificato che si raggiunge la temperatura finale di circa 1200 °C.

⁶⁰ Vedi Bibliografia

⁶¹ Vedi Bibliografia

⁶² Vedi Bibliografia

Quindi, è stato così possibile costruire il bilancio energetico ideale: tra 1 kg di alluminio in reazione con 1002 g di acqua, formano 1890 g di allumina e 112 g di idrogeno puro rilasciando, contemporaneamente, una quantità di calore pari a 17.5 MJ.

Cogenerazione

Sulla base delle caratteristiche evidenziate nel precedente paragrafo, è stato possibile concepire un sistema di conversione energetica il cui provider sia appunto la reazione tra alluminio e acqua, in merito alla molteplicità di fonti energetiche prodotte dalla reazione.

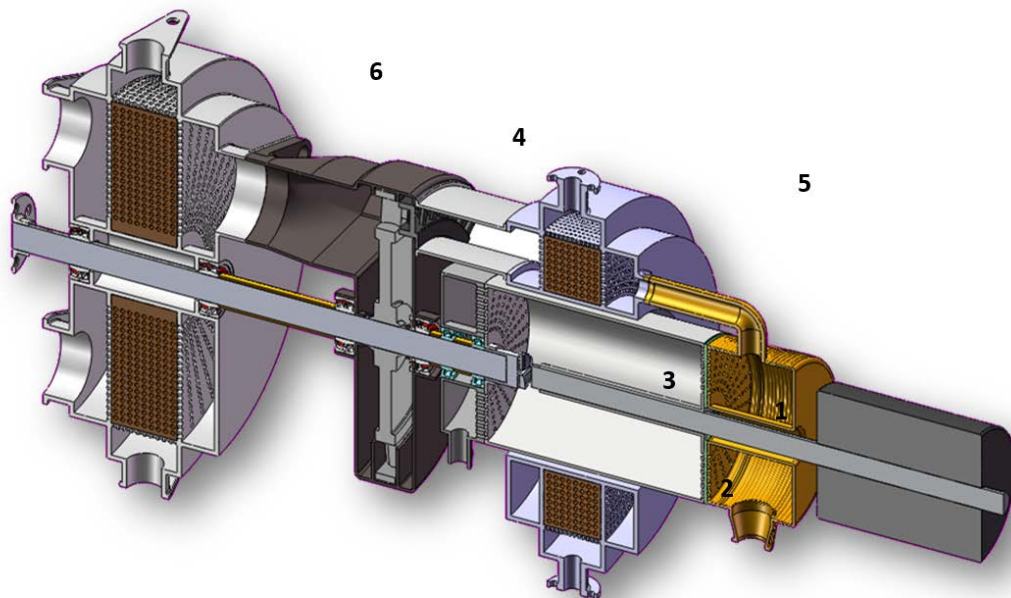
Produzione di idrogeno

Considerando l'idrogeno prodotto dalla reazione quale fonte energetica principale, è possibile convertire i 112 g di idrogeno prodotto da 1 kg di alluminio in approssimativamente 13.5 MJ, ovvero l'equivalente di 270 g di metano, 320 g di gasolio e 500 g di etanolo. Ipotizzando di integrare i dati precedentemente descritti con le moderne applicazioni automobilistiche (secondo le tecnologie disponibili possono immagazzinare una quantità di 3 kg di idrogeno compresso su un veicolo di classe media) è possibile assumere che con tale quantità di idrogeno si potrebbe coprire una distanza di 270 km, rispetto ai 7 kg di gas naturale compresso, ai 13 kg di Diesel o ai 14.5 kg di Benzina Super. Ritornando alla reazione, è possibile perciò ottenere 3 kg di idrogeno da approssimativamente una barra di alluminio di 28 kg, con diametro di 115 mm e lunghezza di 1 m. Di tutta evidenza come il sistema di conversione energetica descritto potrebbe essere interessante nel campo dell'industria automobilistica, non solo come unità di potenza per erogare lavoro meccanico, ma anche come *provider* di un'ampia quantità di idrogeno "on demand" da utilizzare in una fuel cell oppure in un motore a combustione interna. Un'unità cogenerativa basata sulla combustione dell'alluminio in acqua potrebbe essere persino più attraente per altri tipi di mezzi di trasporto, basti pensare ad applicazioni navali o ferroviarie in cui l'impianto possa soddisfare non solo la richiesta propulsiva, ma addirittura potrebbe rispondere alle esigenze di richiesta di energia elettrica (o di calore) necessaria allo svolgimento delle attività a bordo del mezzo.

Prototipo Quadrigen - Caratteristiche impianto

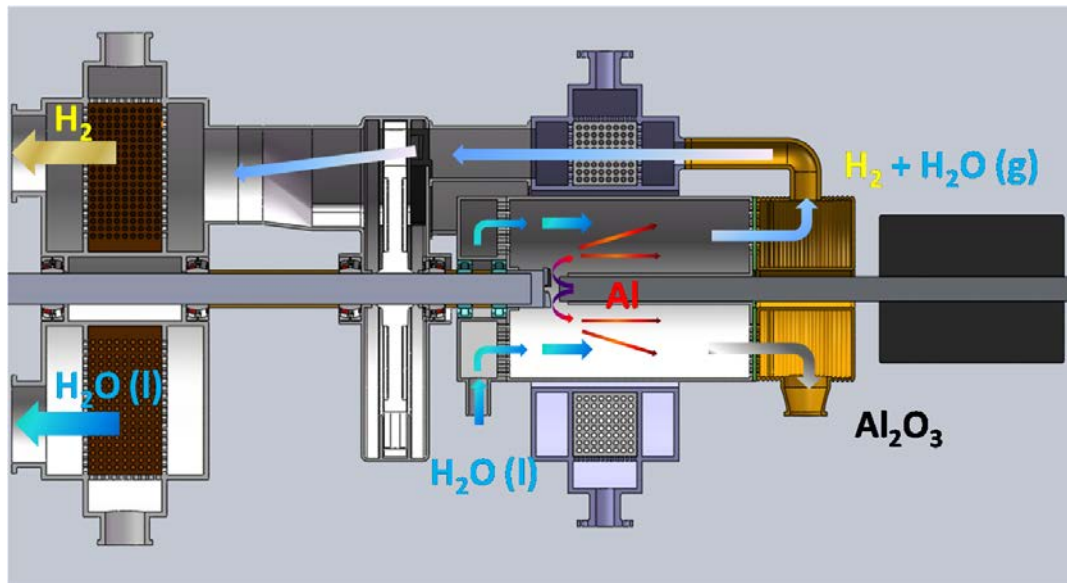
La struttura concettuale di tale impianto presenta la conformazione riportata in figura, in cui si possono distinguere:

1. Camera di combustione (o corpo bollitore);
2. Barra di alluminio;
3. Utensile;
4. Turbina gas/vapore;
5. Scambiatore di alta pressione;
6. Scambiatore di bassa pressione (condensatore di vapore)



Il funzionamento del sistema (rappresentato nella figura sottostante) prevede l'immissione contemporanea all'interno della camera di combustione di una corrente di acqua allo stato liquido e di particolato di alluminio. La polvere di alluminio è prodotta per lavorazione meccanica di una barra mediante un utensile rotante in modo continuo. L'acqua viene immessa all'interno della camera attraverso una serie di piccoli fori disposti attorno all'utensile con lo scopo di regolarizzare e uniformare il flusso, allontanando le particelle d'lu-

minio dalla zona di lavorazione meccanica prima della completa combustione, in modo tale da proteggere l'utensile stesso dal calore prodotto dalla reazione.



Prototipo QUADRIGEN, schema funzionale

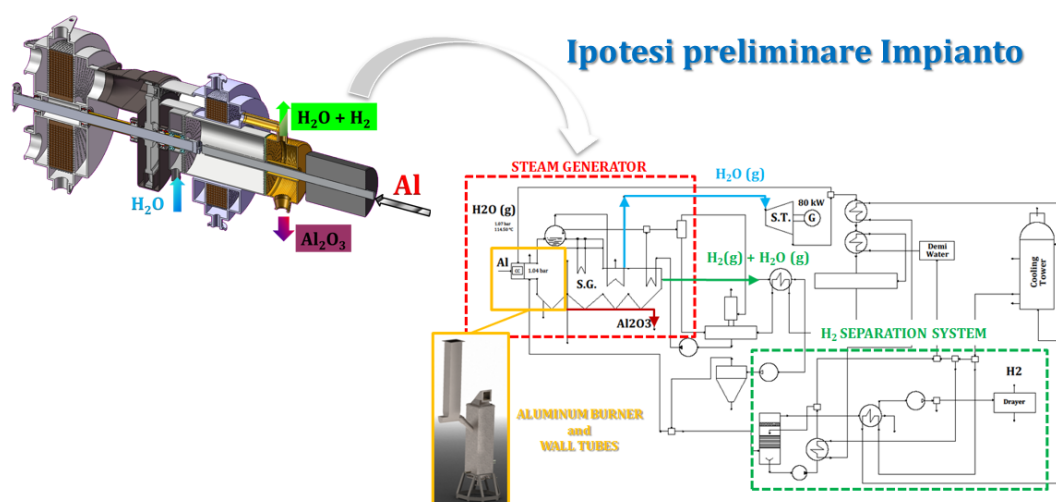
Impatto ambientale

Il sistema QUADRIGEN può essere considerato anche come un sistema di produzione d'idrogeno alternativo a quelli tradizionali. Tra essi si ricordano i principali:

- Reforming da gas naturale
- Reforming da liquidi bio-derivati
- Processo Termochimico
- Elettrolisi dell'acqua
- Processo fotochimico
- Idrogeno biologico

Il processo più diffuso a livello industriale (in quanto quello economicamente più vantaggioso) è il reforming da gas naturale (in genere metano) che però è caratterizzato da una produzione di circa 7.33 kg di anidride carbonica ogni kg d'idrogeno prodotto, contro gli 0 kg prodotti (idealmente) dal solo sistema QUADRIGEN. Considerando, però, anche il ciclo di produzione dell'alluminio, l'intero sistema presenta una produzione di anidride carbo-

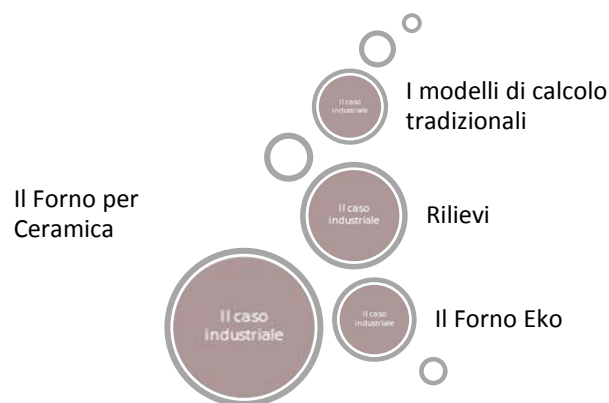
nica pari a circa 29.7 kg per ogni kg d'idrogeno prodotto. Applicando il recupero dell'ossido di alluminio prodotto dalla reazione di combustione, escludendo conseguentemente il processo di estrazione dal minerale di bauxite, la produzione di anidride carbonica si riduce a 14.58 kg per ogni kg d'idrogeno prodotto (secondo il processo di produzione elettrolitico classico a consumo di anodo in carbonio). Tale sistema solo in apparenza risulta svantaggioso a livello d'impatto ambientale rispetto al reforming da gas naturale, in quanto il processo Hall-Herault può essere sostituito da celle elettrolitiche ad anodo inerte o da celle con catodo in titanio diboride TiB_2 (entrambe tecnologie innovative ma già in fase di sperimentazione su impianti industriali di prova): tali tecniche sono caratterizzate da una riduzione dell'energia elettrica necessaria al processo di circa il 25% (da 13 ÷ 16 kWh a 9.75 ÷ 12 kWh per kg di alluminio prodotto) e soprattutto non presentano produzione di gas effetto serra. Pertanto, l'unica ulteriore fonte di anidride carbonica diventa il processo di produzione dell'energia elettrica necessaria alla riduzione elettrolitica dell'allumina. Nel caso in cui vengano utilizzate fonti rinnovabili per ottenere tale energia (come quella solare o idroelettrica), il sistema di conversione dell'energia e di produzione d'idrogeno studiato è in via teorica completamente eco-sostenibile.



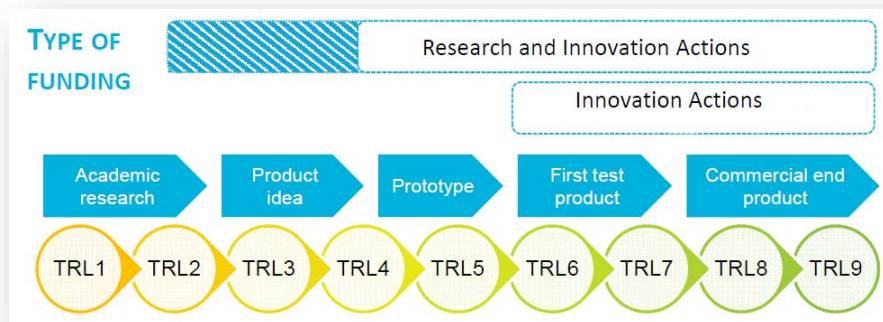
Schematizzazione QuadriGen – Ipotesi preliminare impianto.

CAPITOLO 7 IL CASO INDUSTRIALE

La presente ricerca è giunta ora alla sua validazione. Nello specifico si è pensato di cercare un campo d'applicazione atto a poter verificare se le considerazioni fino ad ora svolte, siano realisticamente applicabili su scala industriale.



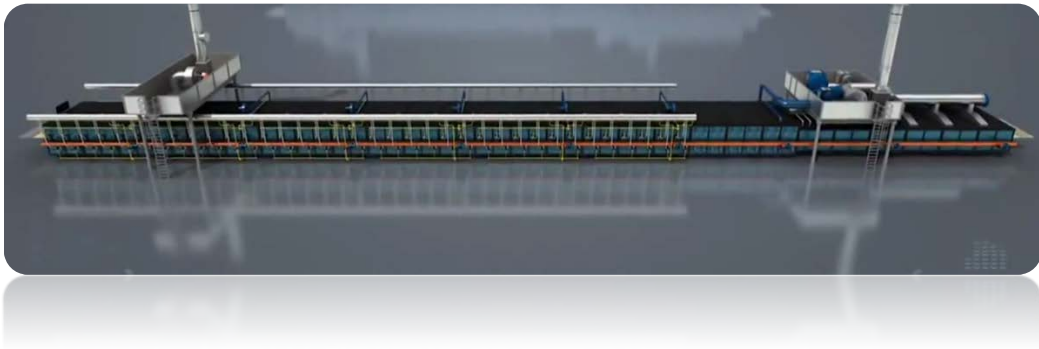
Per parlare nel “gergo” dei progetti di ricerca, si è pensato di trovare un campo d'applicazione mai esplorato, ma pronto per essere applicato su un prototipo reale. Nello specifico valuteremo un livello pari a TRL 6⁶³.



Schema del TRL

⁶³ Technology readiness levels (TRL) are a method of estimating technology maturity of Critical Technology Elements (CTE) of a program during the acquisition process. They are determined during a Technology Readiness Assessment (TRA) that examines program concepts, technology requirements, and demonstrated technology capabilities. TRL are based on a scale from 1 to 9 with 9 being the most mature technology. The use of TRLs enables consistent, uniform discussions of technical maturity across different types of technology. A comprehensive approach and discussion about TRLs has been published by the European Association of Research and Technology Organisations (EARTO).

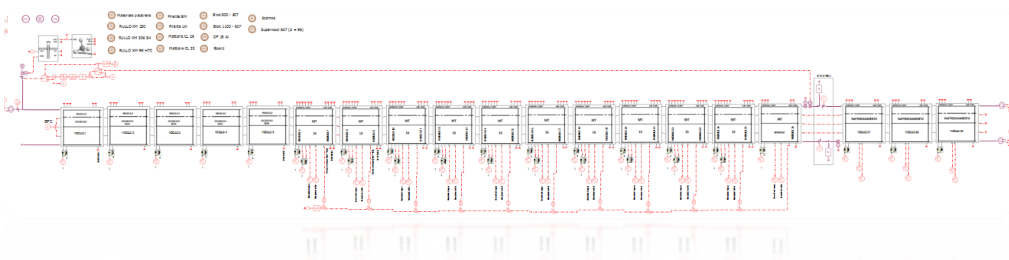
Si è cercato un settore industriale in cui siano presenti grandi consumi di energia (settore ceramico) e conseguentemente dove si possano immediatamente apprezzare eventuali risparmi sui combustibili. Si è così individuata la macchina termica più “energivora” di un impianto “classico” per la produzione di piastrelle, cioè il forno continuo.



Rendering Forno Continuo per la produzione di piastrelle ceramiche

Individuato il caso di studio, si è pensato di realizzare un modello matematico completo per creare una sorta di “digital twin” (gemello digitale) necessario per poter simulare le varie condizioni di studio. Per semplificare il peso computazionale, si è proceduto con un modello monodimensionale (1D) ma comprensivo di tutte le logiche multifisiche presenti nella macchina termica, al fine di rendere il più “realistiche” possibili le simulazioni.

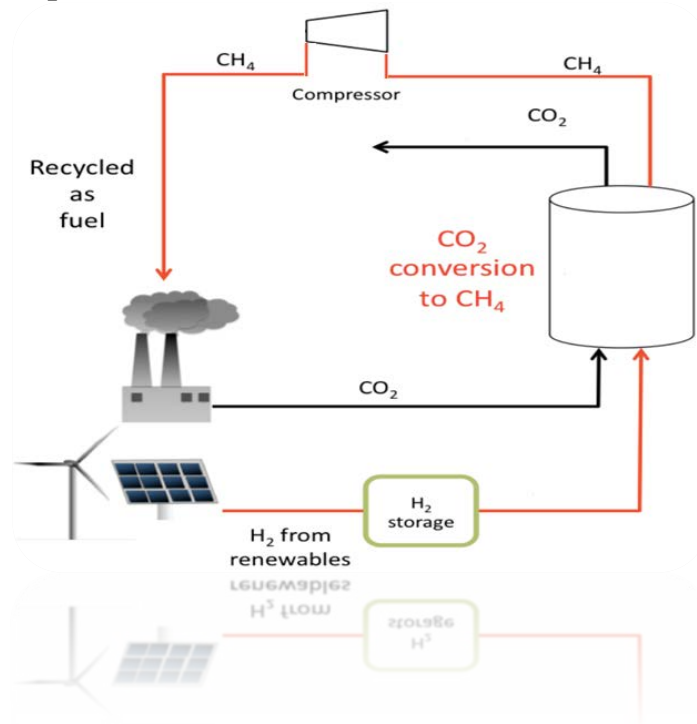
Nella presente tesi, oltre a mettere a punto un sistema di calcolo in grado di validare la teoria trattata, si cercherà un metodo di simulazione utilizzabile in futuro per migliorare le fasi di progettazione e personalizzazione dei forni in via di sviluppo.



Digital Twin – 1D - Forno

Il caso di studio trattato prenderà quindi in esame sia il funzionamento intrinseco, che la possibile modellazione numerica di ciò che viene immesso in

atmosfera, per valutare il possibile riutilizzo delle emissioni (CCU), **applicazione mai fatta prima d'ora nel settore Ceramico.**



Schema concettuale processo da applicare all'industria ceramica

E' stato scelto un forno continuo per ceramica di produzione del Gruppo Sacmi⁶⁴.



Esempio di Impianto Industriale Ceramico



Esempio di Forno per Ceramica

⁶⁴ Vedi appendice

Storia della Ceramica

I prodotti ceramici possono essere definiti come artefatti costituiti da materiale inorganico, con proprietà non-metalliche, che vengono sottoposti in alcune fasi del ciclo di produzione ad alte temperature. La parola “ceramica” deriva dalla parola greca *Keramos* che significa ‘creta’ o ‘terracotta’. Il termine greco è tuttavia strettamente connesso a un’antica radice sanscrita che significava ‘bruciare’ (utilizzata in origine anche per indicare ‘cose bruciate’). Le piastrelle di ceramica ricoprono un posto unico nella storia. Infatti, possono essere annoverate a buon diritto come il primo prodotto di uso domestico ad associare l’aspetto funzionale e decorativo. La loro origine viene fatta risalire almeno al IV secolo a.C., quando in Egitto erano utilizzate per decorare vari tipi di casa. In quell’epoca, i mattoni di argilla venivano essiccati al sole o si cuocevano e per trattarne la superficie vi si applicavano i primi smalti, di colore blu e realizzati con il rame. Antichi esempi di piastrelle risalenti allo stesso periodo e generalmente decorate con semplici strisce alternate bianche e blu – sono state rinvenute in Mesopotamia. Altre, più recenti e articolate, si trovano in Tunisia (IX secolo), Kashan Iran (XI secolo) e in diverse moschee del Medio Oriente, utilizzate per rappresentare versi del Corano iscritti su fondi di vari colori (dal XII secolo in poi). Quanto all’Asia orientale, cui per esigenze di spazio possiamo solo accennare fuggacemente, sin dall’antichità ha registrato un’intensa attività ceramica. I principali produttori furono la Cina, la Corea e il Giappone. La storia della piastrella italiana ha origine durante il Basso Medioevo, quando sia per la strutturazione architettonica che per la decorazione degli edifici pubblici e religiosi si evidenzia la necessità di utilizzare meglio e, dunque, di progettare la ceramica di pavimentazioni e rivestimenti. Dalle esagonette tardo-romane in cotto con l’incluso di marmo, attraverso le figurazioni medioevali o all’ampia cultura decorativa ‘islamica’ e “moresca”, si arriva così a una produzione anche italiana di maiolica decorata, prevalentemente utilizzata negli interni. Così come per molti altri prodotti nella storia del design italiano, il Belpaese ha preso a prestito da altre culture e ha poi migliorato il prodotto originario usando l’ingegnosità e la creatività artistica locale. Già nel XII secolo erano attive le manifatture di maiolica ingobbata di Firenze, Siena, Orvieto e Faenza, ma fu nel XV secolo che l’arte ceramica visse il suo periodo felice. La terracotta, in precedenza limitata agli ornamenti - incisi o a rilievo - intorno a porte, finestre e archi, fu nobilitata in pregevoli opere di scultura da artisti come Antonio Pollaiuolo e Donatello in Toscana, Niccolò dell’Arca e Guido Mazzoni in Emilia. Nel contempo, Luca e Andrea Della Robbia perfezionarono l’uso delle maioliche nella scultura e nella decorazione. Da allora e per lungo tempo una posizione di primo piano fu occupata dalle ceramiche di

Faenza, città dal cui nome deriva il termine francese *faïence*, coniato dopo il 1600 e tuttora usato come sinonimo di maiolica (anche nella versione italiana di ritorno, 'faenza').

Dopo la maiolica istoriata, a Faenza ebbe grande successo una decorazione stilizzata a colori tenui su smalto bianco (lo stile dei "bianchi di Faenza"). In Liguria, i più antichi reperti archeologici e le notizie ricavabili dai documenti di archivio concordano nel fissare nell'ultimo quarto del XV secolo l'inizio della produzione ceramica ad Albisola. La vicina Savona ha invece una tradizione molto più remota che, secondo studi recenti, risale al XII secolo. Molto presto, nei primi anni del Cinquecento, ha inizio la produzione dei laggioni, piastrelle da rivestimento per pavimenti o pareti, ricoperte di smalto a vivaci colori, secondo disegni in parte derivati dall'arte islamica, in parte di gusto rinascimentale. Le piastrelle di ceramica sono il risultato di un processo produttivo costituito da diverse fasi che variano in funzione del tipo di prodotto, smaltato o non smaltato, che si vuole ottenere.

Materie prime – impasto

Gli impasti per la produzione di piastrelle sono miscele di diverse materie prime: argillose, che forniscono la plasticità necessaria alla successiva manipolazione delle piastrelle; quarzose, con funzione strutturale necessaria a limitare le variazioni dimensionali in essiccamento e cottura; feldspatiche, in grado di produrre una fase liquida di viscosità adeguata durante la cottura. L'impasto viene preparato secondo operazioni di macinazione, miscelazione-omogeneizzazione e regolazione del contenuto d'acqua. Al termine di questa prima fase si possono ottenere due differenti tipi d'impasto: in polvere, con un contenuto d'acqua del 4-7%, adatto alla formatura per pressatura; in pasta, con un contenuto d'acqua del 15-20% per la formatura per estrusione.

Formatura-essiccamento

La maggior parte delle piastrelle italiane viene formata per pressatura, fase in cui l'impasto, nella forma di una polvere semisecca, viene compresso tra due superfici. Questa operazione conferisce al prodotto la forma desiderata e anche la giusta compattezza e resistenza. Cotto e clinker vengono prevalentemente formati per estrusione: la pasta delle materie prime viene sagomata nella forma di un nastro continuo opportunamente tagliato in seguito. Successivamente, tramite l'impiego di essiccatoi rapidi ad aria calda, viene eliminata l'acqua di impasto dal prodotto. La delicatezza dell'operazione necessita di un rigoroso controllo, al fine di prevenire fenomeni dannosi.

Smalti e smaltatura

Gli smalti sono miscele di diversi minerali e composti macinati in acqua che vengono applicati sulla superficie delle piastrelle e portati a fusione. Durante il raffreddamento, lo strato fuso si solidifica, formando un vetro che conferisce alle piastrelle particolari caratteristiche estetiche (lucentezza, colore) e tecniche (impermeabilità, durezza).

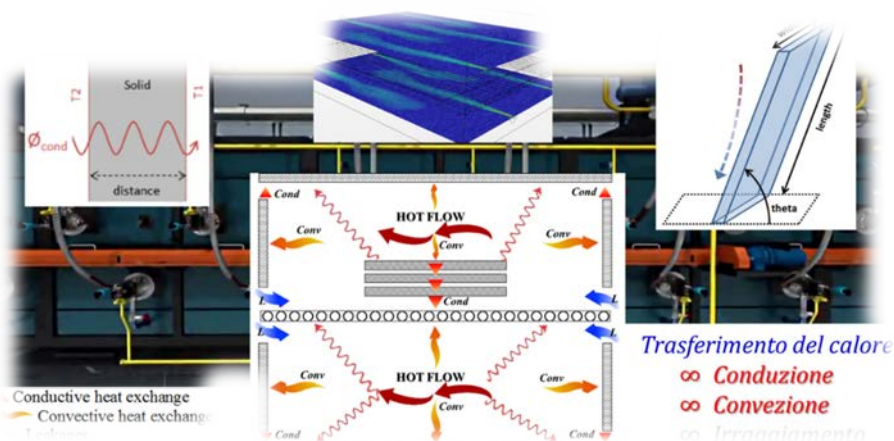
Cottura-scelta

La cottura delle piastrelle viene realizzata in forni continui su rulli, nei quali vengono raggiunte temperature elevate (da 900°C a oltre 1250°C). Lungo il percorso all'interno del forno le piastrelle vengono dapprima riscaldate fino alla temperatura massima di cottura e, dopo una definita permanenza a tale temperatura, progressivamente raffreddate. Nella cottura il prodotto subisce reazioni e trasformazioni chimico-fisiche necessarie a ottenere una struttura meccanicamente resistente.

L'ultima fase del processo produttivo è la scelta, la quale ha tre obiettivi: l'eliminazione dei pezzi difettosi, la suddivisione in prima e seconda scelta e il raggruppamento in lotti omogenei per tono e calibro.

Fase critica, la cottura delle piastrelle

Tra le varie fasi produttive, che tralasciamo in questa sede per non dilungarci ulteriormente, la cottura è una delle fasi più importanti e più delicate del ciclo produttivo della ceramica.



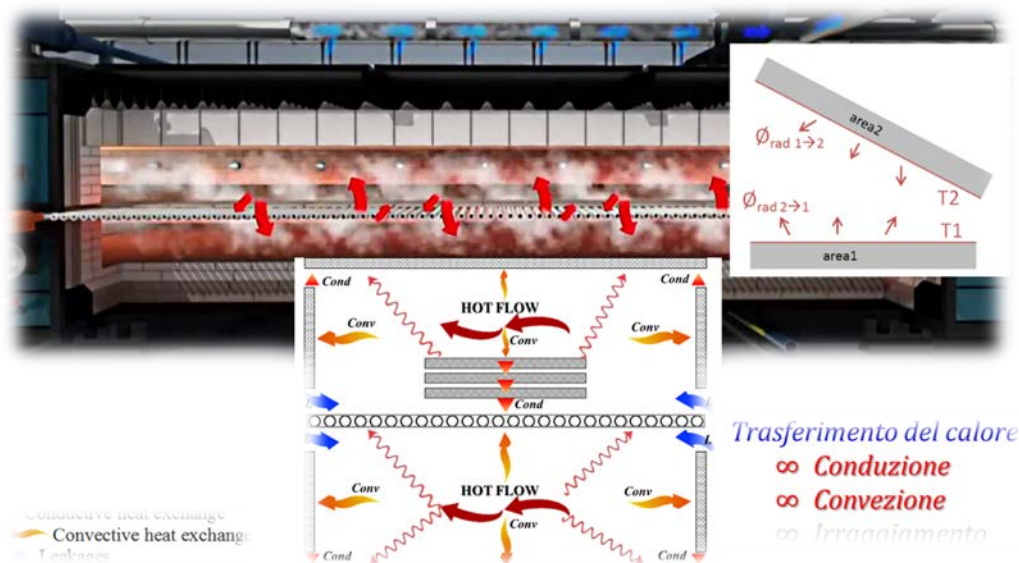
Schema problematiche "termiche" presenti nella zona di cottura

Cuocere vuol dire rendere l'oggetto, precedentemente foggato ed essiccato, resistente e funzionale. Per poter cuocere, occorre somministrare agli oggetti una determinata quantità di calore, innalzando la temperatura secondo un

profilo predeterminato, in modo che avvengano tutte le reazioni chimico fisiche, rendendo i manufatti idonei alla funzione alla quale sono destinati.

Brevemente le principali reazioni che seguono la cottura sono:

- Temperatura ambiente a 120 °C eliminazione acqua residua dell'impasto.
- Tra 300 e 400 °C combustione delle materie organiche.
- Tra 500 e 650 °C disidratazione dei materiali argillosi.
- A 575 °C trasformazione allotropica del quarzo.
- Tra 800 e 900 °C decomposizione dei carbonati con sviluppo di CO₂ gassosa.
- Tra 900 e 1220 °C reazioni di sinterizzazione.



Schema problematiche "termiche" presnti nella zona di cottura

Il trattamento termico dei prodotti ceramici è un processo complesso, che deve considerare e ben rappresentare le diverse interazioni non lineari nel corpo ceramico e con l'ambiente del forno che a sua volta risponde non linearmente agli input. Un primo problema nella cottura dei prodotti ceramici è quello di accrescere e mantenere la temperatura del corpo in modo uniforme, ciò per evitare, durante le fasi di naturale contrazione del materiale, il

formarsi di stati tensionali differenziali all'interno della lastra inducibili possibili rotture. Oltre a ciò vi è la necessità di favorire la fuoriuscita dei vapori e gas rilasciati dal corpo ceramico durante le prime fasi del trattamento termico, fase anch'essa determinante sulla qualità del prodotto. Non meno problematica è la fase di raffreddamento del prodotto che deve garantire, come in riscaldamento e cottura, l'elevato grado di uniformità di temperatura nel corpo ceramico. Lo scorretto raffreddamento della lastra dà risposte immediate e/o effetti ritardati e distribuiti nel tempo quali sfili, deformazioni ecc.

7.1 IL FORNO PER CERAMICA

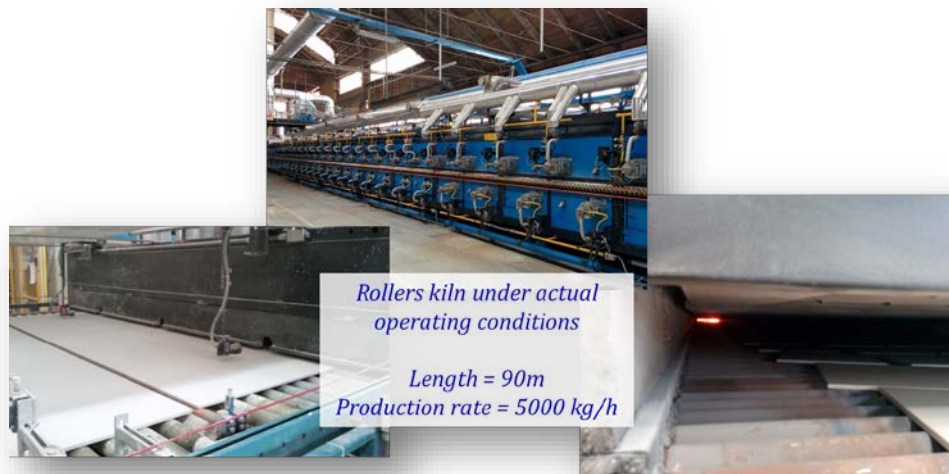
Il forno è un apparecchio industriale nel quale un materiale è trattato secondo un determinato procedimento, che si svolge a temperatura superiore a quella ambientale, a questo scopo è somministrato del calore in misura e modo adeguato. L'industria ceramica ha usato per secoli i forni intermittenti.



Esempio di forno intermittente per articoli sanitari

Successivamente, per le grandi produzioni, si sono sviluppati i forni continui, per l'economia di combustibile e di mano d'opera. In un primo tempo i forni continui erano di tipo a fiamma mobile, in seguito hanno preso piede quelli a galleria e fiamma fissa, detti comunemente forni a tunnel. La Sacmi Forni⁶⁵ è specializzata nella progettazione di forni a galleria di tipo a rulli, rivolti all'industria della ceramica. In questa classe di forni il materiale avanza supportato da rulli refrattari rotanti, ed è caricato in monostrato. Questo forno è particolarmente adatto per cotture veloci.

⁶⁵ Vedi appendice



Esempio di rulli all'interno del forno

La progettazione dei forni

La necessità dell'industria ceramica di disporre d'impianti sempre più efficienti e competitivi, orienta verso apparecchi molto specializzati ed espressamente studiati per ogni materiale.

I dati del problema

Per la progettazione e ottimizzazione di un forno è necessario considerare i seguenti aspetti:

1. Caratteristiche del materiale ceramico da trattare:
 - a. Caratteristiche fisiche
 - b. Caratteristiche chimiche
 - c. Caratteristiche dimensionali

2. Caratteristiche del trattamento
 - a. Curva termica
 - b. Posizione e valore di tutte le reazioni e trasformazioni (assorbimento e cessione calore, variazioni volumetriche)
 - c. Atmosfera richiesta
 - d. I punti critici
 - e. Le tolleranze ammesse

3. Esigenze specifiche di progetto e impiantistiche
 - a. Combustibile
 - b. Scarti di produzione
 - c. Frequenza dei cambi formato
 - d. Recupero di calore

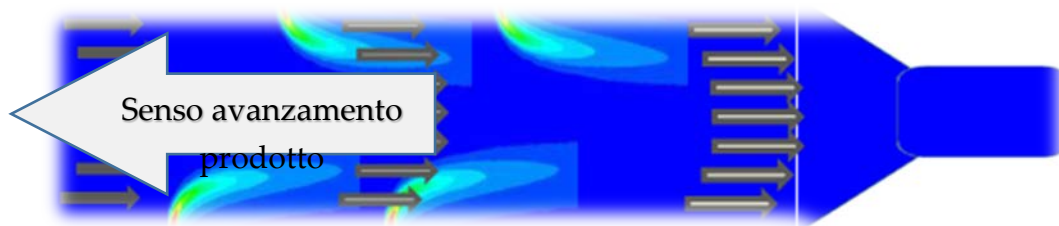
Le fasi della progettazione.

Le fasi della progettazione sono così schematizzabili:

1. Scelta del tipo di forno
2. Dimensionamento
3. Impostazione termotecnica
4. Sviluppo costruttivo

Aspetti funzionali del forno

Dalla zona di raffreddamento si forma un flusso di corrente d'aria e va incrementando la sua massa via via che percorre il tunnel, richiamata verso l'ingresso del forno con azione meccanica. I bruciatori, distribuiti lungo le pareti del forno, insufflano, all'interno del tunnel, e perpendicolarmente al flusso principale, i prodotti della combustione atti a fornire l'energia termica necessaria al processo. I fumi generati dai bruciatori vanno a sommarsi a quelli già in transito e, mischiandosi con questi, fuoriescono dal camino in testa al forno. I fumi percorrono la galleria in senso contrario rispetto all'avanzamento del materiale, ciò per ottimizzare lo scambio termico fumi-prodotto.



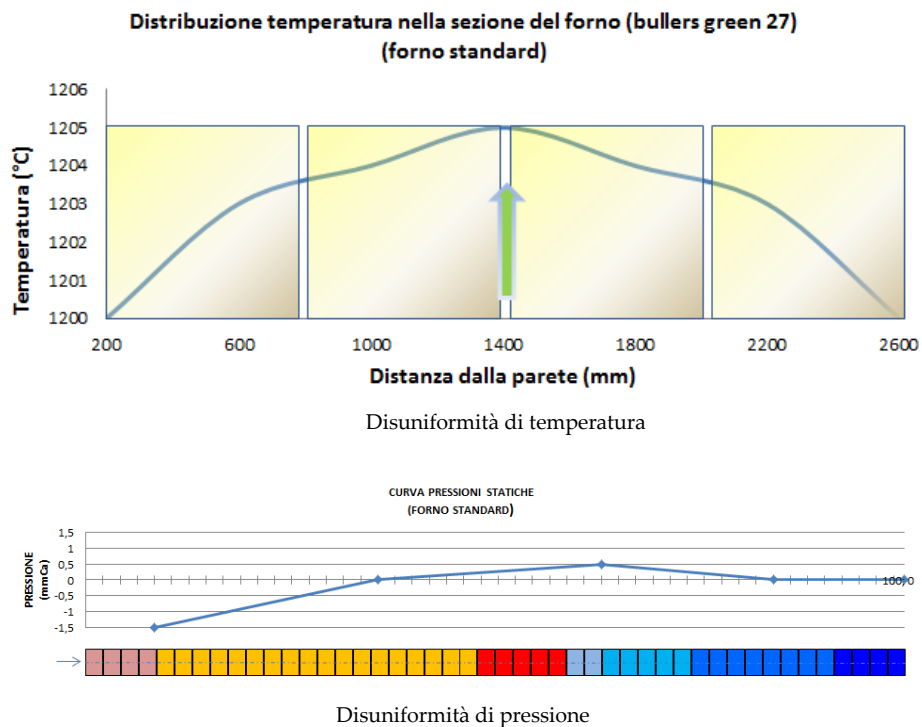
Schematizzazione flussi in un forno tradizionale

Le caratteristiche termofluidodinamiche del flusso principale sono influenzate da diversi fattori. Analizzando il fluido transitante, si rilevano delle disomogeneità nella sezione trasversale del forno. Queste differenze si riflettono sulla qualità del prodotto, e di conseguenza sulla necessità pratica di

correggere gli errori e l'incontrollabilità del processo, implementando l'impianto con attrezzature adeguate a quella specifica condizione di lavoro e materiale in trattamento. Le soluzioni trovate difficilmente sono replicabili proprio perché legate ad una particolare necessità.

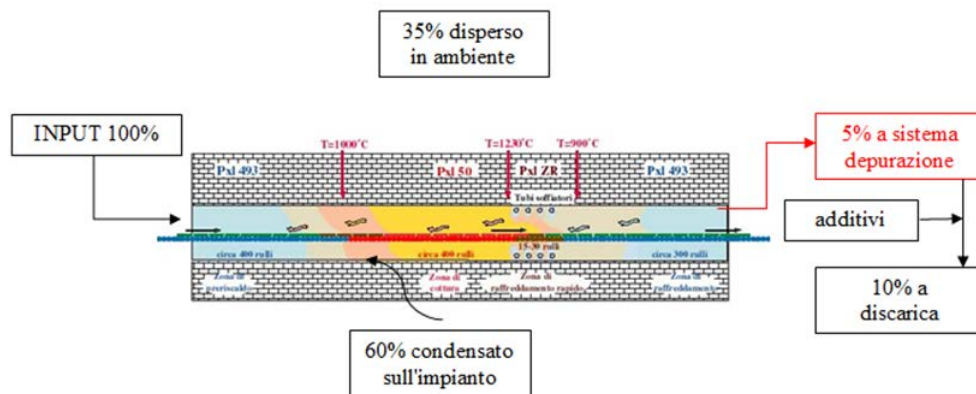
I limiti di un impianto basato sul flusso longitudinale sono vari, fra i più significativi si possono identificare:

- I vincoli dimensionali sia in senso trasversale sia in quello longitudinale, infatti, quanto più si eccede nelle dimensioni del forno, più palesi diventano le disuniformità di temperatura, pressione e concentrazioni di specie chimiche. Evidenti appaiono le differenze di caratteristiche finali del prodotto.



- La raccolta delle sostanze inquinanti emesse dal prodotto durante il trattamento termico che mischiandosi ai prodotti della combustione, prevalentemente costituiti da vapore acqueo, formano acidi dannosi per l'ambiente e le strutture del forno. Questi fumi possono essere depurati solo dopo che un'importante parte del carico inquinante si è depositato e accumulato sulle strutture del forno, e la diluizione è tanto importante da richiedere un consistente dispendio di energia elettrica.

- Variabilità di risultato sulla qualità del prodotto, in particolare nei casi di alimentazione incostante del prodotto, ciò dovuto a fatti accidentali o programmati.



Schematizzazione in termini percentuali del flusso degli inquinanti in un forno tradizionale

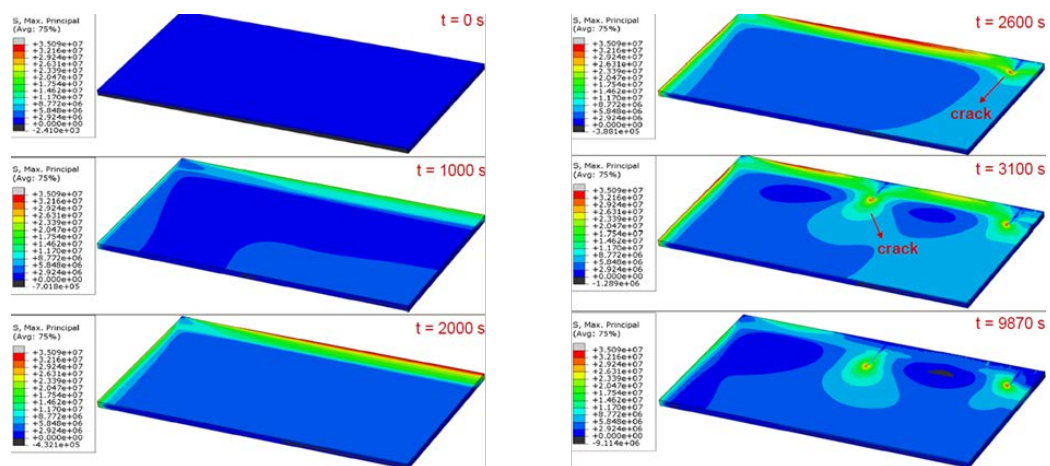
7.2 IL FORNO EKO⁶⁶

Il trattamento termico di lastre di grande formato⁶⁷ è un sistema complesso che deve considerare e ben rappresentare le diverse interazioni non lineari nel corpo ceramico con l'ambiente del forno che a sua volta risponde non linearmente agli input. Un primo problema nella cottura di grandi lastre ceramiche è quello di accrescere e mantenere la temperatura del corpo in modo uniforme, ciò per evitare, durante le fasi di naturale contrazione del materiale, il formarsi di stati tensionali differenziali all'interno della lastra inducenti possibili rotture. Oltre a ciò, è presente la necessità di favorire la fuoriuscita di vapori e gas rilasciati dal corpo ceramico durante le prime fasi del trattamento termico, fase anch'essa determinante sulla qualità del prodotto. Non meno problematica è la fase di raffreddamento del prodotto, che deve garantire, come nella fase di riscaldamento e cottura, l'elevato grado di uniformità di temperatura nel corpo ceramico stesso.

L'errato raffreddamento della lastra dà risposte immediate e/o effetti ritardati e distribuiti nel tempo, quali sfilii, deformazioni ecc..

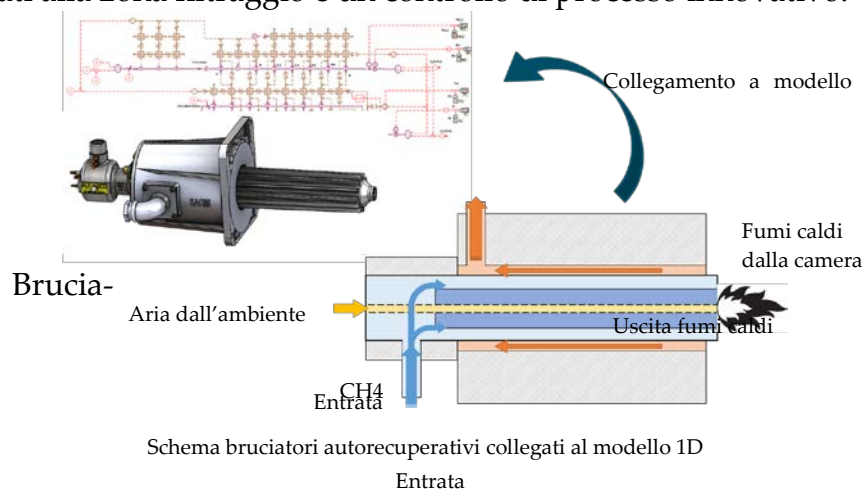
⁶⁶www.sacmi.com/it-IT/Prodotti-e-Servizi/Ceramics/Approfondimenti/Campagna-forno-EKO.aspx?idc=68141&ln=it-IT%20

⁶⁷ Vedi immagine in appendice



Esempio di analisi CFD accoppiata ad analisi FEM per la valutazione del tensionamento dovuto al transitorio termico.

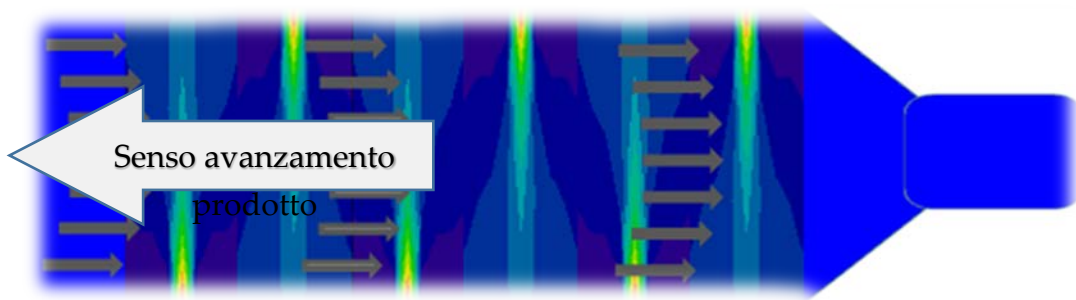
Un forno per ceramica deve racchiudere in sé tutte le peculiarità sopra descritte al fine di ottenere il prodotto voluto. EKO, è il nuovo forno monostrato a rulli di Sacmi⁶⁸, con bruciatori auto recuperanti che permette la gestione dello scambio termico fumi/prodotto, la riduzione del volume dei fumi estratti ed indirizzati alla zona filtraggio e un controllo di processo innovativo.



Schema bruciatori autorecuperativi collegati al modello 1D

I prodotti della combustione, generati dal singolo bruciatore, percorrono la sezione trasversale del forno. Il vantaggio di conoscere il percorso dei fumi, si trasforma nel conoscere in modo deterministico le cause e gli effetti sul prodotto. In questa configurazione i fumi percorrono, come detto, trasversalmente la sezione del forno per poi essere intercettati dai due bruciatori antagonisti, posti uno a destra e l'altro a sinistra del dardo.

⁶⁸ Sacmi Imola, www.sacmi.it, vedi Appendice

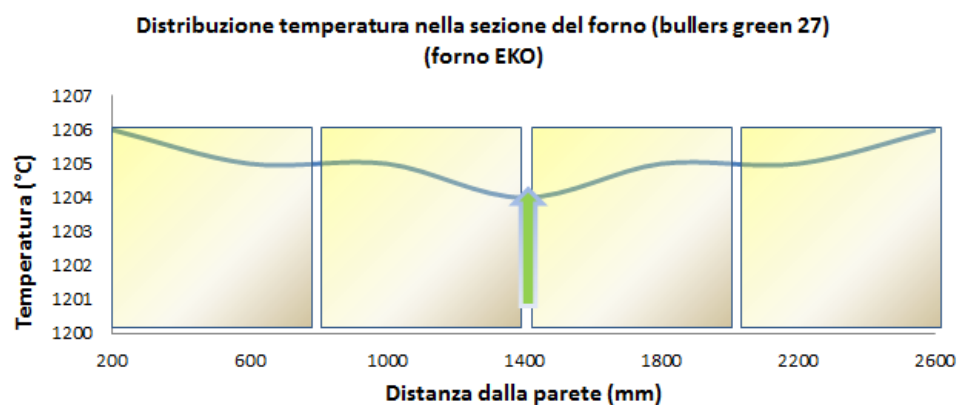


Schematizzazione flussi trasversali di un forno

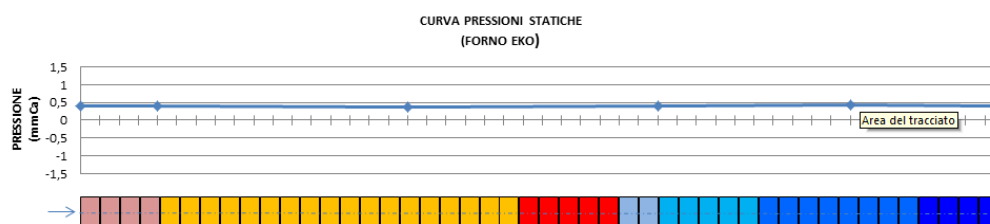
Nelle descritte condizioni, la quantità dei fumi, che percorrono il forno parallelamente all'asse longitudinale, è ridotta sensibilmente, tale da non perturbare, se non marginalmente, la traiettoria dei fumi in moto trasversale.

In questa nuova prospettiva, le condizioni di funzionamento sono migliorative:

- limiti dimensionali sulla lunghezza decadono, mentre il limite in larghezza è dovuto alla resistenza meccanica del rullo.
- distribuzione delle temperature è stabilmente uniforme, infatti è invariante rispetto alla presenza o meno del prodotto da trattare e analogamente per la pressione.

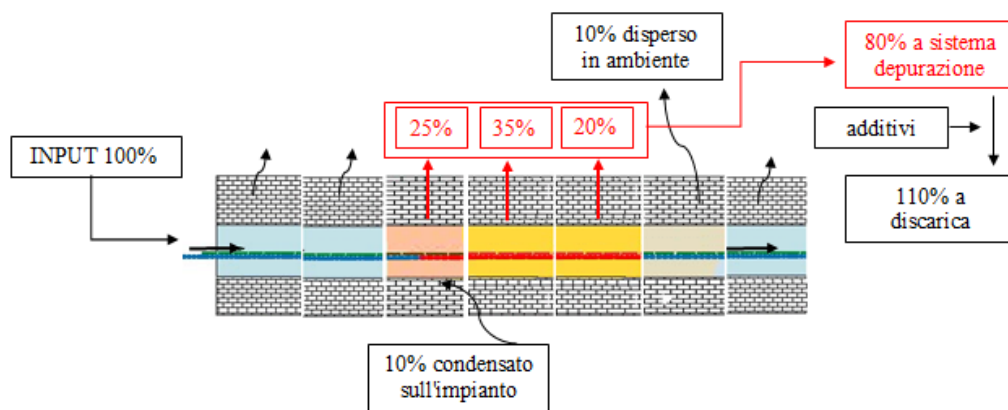


Distribuzione delle temperature forno



Distribuzione pressioni statiche forno

- possibilità di catturare e abbattere una quantità superiore di sostanze inquinanti, estratte dalla camera del forno, nella zona stessa dove si sviluppano. Questa condizione ha due vantaggi: il primo dovuto alla significativa concentrazione di sostanza inquinante contenuta nei bassi volumi di fumi estratti, rendendone più efficace l'abbattimento, il secondo, la possibilità di evitare la formazione di nuove specie chimiche, ciò dovuto alla selettiva estrazione dei gas.



Schematizzazione in termini percentuali del flusso degli inquinanti in un forno

- condizioni di esercizio più stabili e conseguente incremento della qualità del prodotto. Le caratteristiche tecniche ed estetiche finali del manufatto sono simili in tutta la sezione trasversale.

7.3 RILIEVI

Per avere un'idea dei volumi di emissioni in gioco in un impianto per la cottura di piastrelle, utilizziamo i dati medi forniti dal Centro Ceramico presso un produttore su un forno Sacmi.

| | UM | Fumi Esausti | Raffreddamento finale | | | Materiale | | Combustione gas naturale |
|-----------------|--------------------|--------------|-----------------------|-------------|------------|-----------|--------|--------------------------|
| | | | Alta Temp. | Bassa Temp. | Degasatore | Teorico | Reale | |
| Portata | Nm ³ /h | 6910 | 17663 | 20242 | 16016 | | | |
| | kg/h | | | | | 5799 | | |
| | Sm ³ /h | | | | | | | 297 |
| CO | kg/h | 0,477 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | | | |
| CO ₂ | kg/h | 701,301 | 8,674 | 0,000 | 31,461 | | | 578,083 |
| NO _x | kg/h | 0,000 | 0,035 | 0,027 | 0,032 | | | |
| NO ₂ | kg/h | 0,000 | 0,035 | 0,027 | 0,032 | | | |
| SO ₂ | kg/h | 0,719 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 4,019 | 3,653 | |
| SOV | kg/h | 0,014 | 0,121 | 0,168 | 0,090 | | | |
| FLORURI | kg/h | 0,454 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,728 | 0,278 | |
| UMIDITA' | kg/h | 194,522 | 93,435 | 102,220 | n.r. | 76,976 | | 452,144 |
| POLVERI | kg/h | 0,132 | 0,013 | 0,020 | n.r. | | | |
| PIOMBO | kg/h | 0,007 | 0,000 | 0,000 | n.r. | 0,203 | 0,209 | |
| ZINCO | kg/h | 0,006 | 0,004 | 0,003 | n.r. | 1,583 | 2,128 | |
| CROMO | kg/h | 0,000 | 0,001 | 0,000 | n.r. | 0,609 | 0,661 | |
| FERRO | kg/h | 0,002 | 0,004 | 0,010 | n.r. | 38,019 | 46,972 | |
| NICHEL | kg/h | 0,000 | 0,001 | 0,000 | n.r. | 0,128 | 0,128 | |

Fissando l'attenzione sull'emissione di CO₂ si evince che si emettono in atmosfera 0,12 kgCO₂/kg - prodotto, considerato che all'anno si producono in Italia circa 390 milioni di m² di piastrelle (peso specifico 20 kg/m²) si immettono in atmosfera 936 milioni di kg di CO₂.

7.4 I MODELLI DI CALCOLO TRADIZIONALI

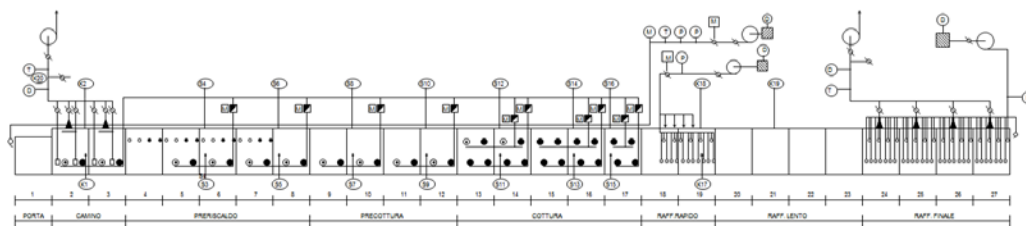
Fino ad oggi, sono stati utilizzati fogli di calcolo e procedure di computo relativamente semplici, fondati su fattori di proporzionalità. Basandosi, quindi, sull'esperienza maturata in anni di presenza sul mercato, si tende a consolidare quanto acquisito e difficilmente ci si discosta da esso. Quest'atteggiamento è comune al settore impiantistico dove l'innovazione è vincolata da un lato alla reale necessità dell'utilizzatore finale che scarsamente conosce l'impianto in uso e che spesso percepisce l'ottimizzazione più come un aumento dei costi che come una favorevole opportunità di incremento e, dall'altra, il fornitore che per innovare ha la necessità di sperimentare al fine di valutare l'ottimizzazione dei seguenti parametri:

- Ottimizzazione dello scambio termico fumi/prodotto.
- Riduzione del consumo.
- Ottimizzazione nel controllo del profilo della curva di temperatura.
- Condizione pressoria positiva e stabile per tutto il forno.
- Stabilità delle temperature e della pressione al variare dei volumi di produzione.
- Possibilità di selezionare i fumi con l'intento di depurarli, ove richiesto, o riutilizzarli tal quali.

Di seguito alcuni fogli di calcolo utilizzati:

| PRODOTTO | | AZIONE | |
|---|-------------------|--------|----------|
| DESCRIZIONE | UNITA' | VALORE | PROGETTO |
| MATERIALE DA CUCIARE | | | |
| tipo prodotto | | VC | |
| umidità residua | % | 8.0 | |
| umidità cottura | % | 8.0 | |
| perdita di forno | % | 8.0 | |
| Produzione richiesta | pezzi/24h | 2400 | |
| Indice di flessibilità (val = 1 nessuna flessibilità - val = 1.1 incremento flessibilità) | | 1.01 | |
| Peso medio articolo (kg) | kg | 17.3 | |
| TRATTAMENTO TERMICO | | | |
| temperatura | °C | 1200 | |
| Scala di cottura | h | 24 | |
| temperatura prodotto all'uscita forno (prestante) | °C | 80 | |
| temperatura ambiente | °C | 20 | |
| CARRELLO | | | |
| lunghezza utile | mm | 3000 | |
| lunghezza utile | mm | 1000 | |
| altezza utile | mm | 800 | |
| Densità di carica | kg/m ³ | 4.5 | |
| Supportata | kg/20 | 63.20 | |
| Acciaio carico | kg/20 | 20 | |
| Carico utile | kg/20 | 360 | |
| Carico utile | kg/20 | 360 | |

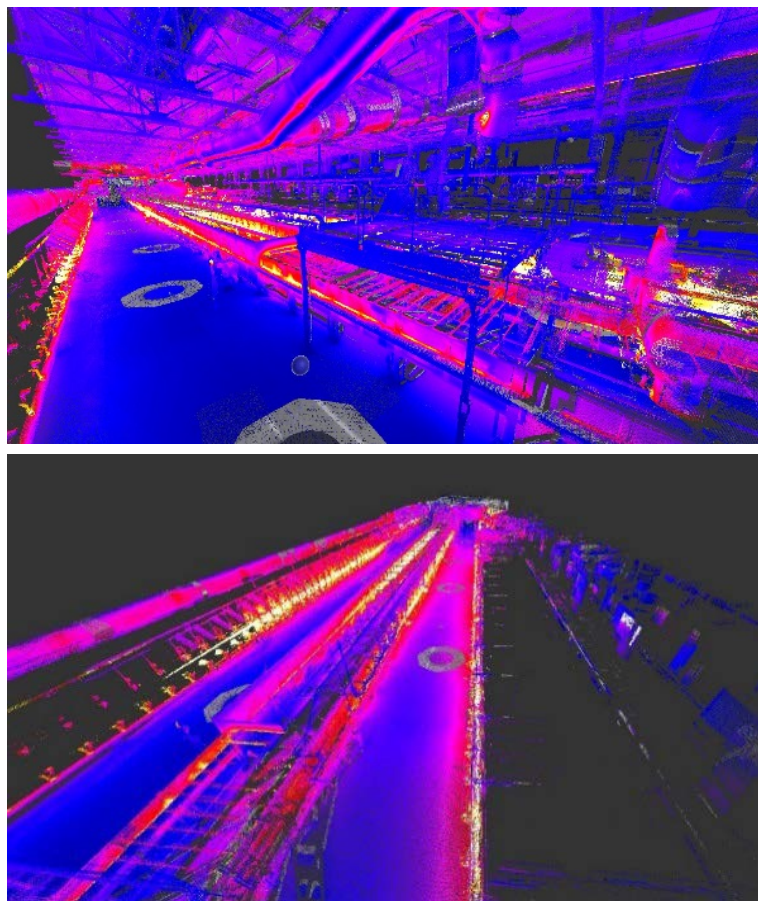
Interfaccia utente foglio Excel



Schema funzionale Forno implementato nel foglio Excel

L'approccio con foglio di calcolo, opera delle semplificazioni nella realizzazione dei modelli di simulazione, in quanto sono difficilmente implementabili fisiche complesse. Solo tramite accurate fasi di programmazione sarà possibile ampliare le potenzialità, ma ogni qualvolta fosse necessario implementare delle modifiche, sarà necessario ricorrere ad un programmatore esperto. Quanto sopra solo per spiegare che i metodi consolidati sono realizzati con strumenti "semplici" ma racchiudono al proprio interno personalizzazioni molto spinte. Solo con l'implementazione di strumenti di simulazione innovativi si potranno dimostrare le reali potenzialità del CAE esteso all'impiantistica ceramica. Nei prossimi capitoli vedremo alcuni approcci di simulazione tesi a migliorare ed integrare la situazione attuale.

Di seguito sono riportate alcune immagini tratte dal rilievo termografico 3D⁶⁹ abbinato allo scanner Laser Z-F⁷⁰ utilizzato durante i rilievi svolti sul Forno Eko installato presso la Coop Ceramica di Borgo Tossignano (Bo). Nello stesso giorno sono stati condotti anche i rilievi sui fumi d'uscita dal forno.



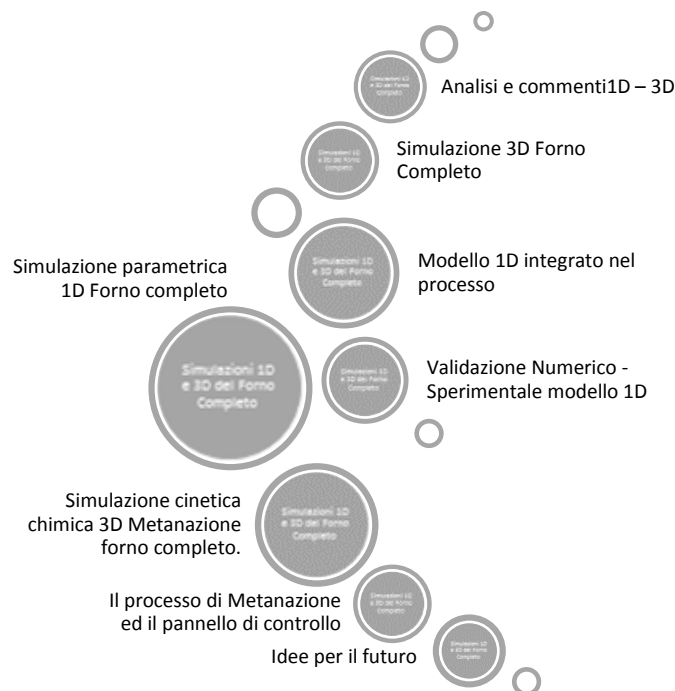
Plot termocamera 3D

⁶⁹ <http://www.microgeo.it/it/laser-scanner/zf-tcam.aspx>

⁷⁰ http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010X.3d_laser_scanner.0.html?&L=1

CAPITOLO 8 SIMULAZIONI 1D E 3D DEL FORNO COMPLETO

Il percorso del presente capitolo spiega come l'uso dello strumento informatico 1D possa permettere di creare il modello virtuale della realtà industriale da simulare.



Lo scopo finale sarà quello di ottenere una visione d'insieme capace di valutare le strade da percorrere per l'ottimizzazione dell'impianto. Conseguentemente, si potranno valutare i riutilizzi delle emissioni e/o del calore. Nello specifico, andremo a valutare se il modello di calcolo realizzato con la piattaforma Amesim⁷¹, messa a punto dal *Dept. of Sciences and Methods for Engineering University of Modena and Reggio Emilia*, nel contesto di una ricerca di dottorato specifica svolta in collaborazione con il Gruppo Sacmi, possa essere utilizzata direttamente come base di partenza per gli studi della *metanazione*, oppure necessari di ulteriori indagini con successivi approcci 3D.

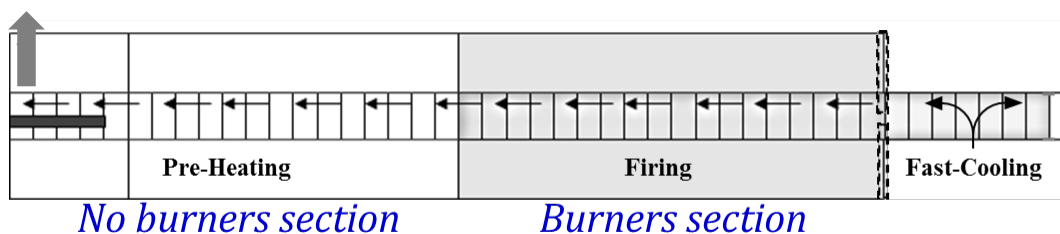
⁷¹ Siemens - LMS Amesim è un piattaforma software per modellare e simulare le prestazioni dinamiche di un sistema multi-fisico (idraulica, meccanica, pneumatica, termica, elettrica..) e relativo controllo, in un'unica piattaforma.

I valori ottenuti verranno confrontati con i dati sperimentali per mettere a punto modelli finalizzati a simulare diverse configurazioni d'impianto e si valuterà se la piattaforma ottenuta potrà essere utilizzata come strumento di utilizzo quotidiano per la progettazione.

Nel dettaglio, il modello proposto avrà lo scopo di simulare il funzionamento dell'intero forno EKO, con la possibilità di valutare ed interagire su ogni singolo componente. In prima battuta, si agirà verificando i risultati del modello monodimensionale sviluppato con i modelli consolidati e validati da prove sperimentali. Successivamente, si procederà nel verificare se l'infrastruttura impostata potrà diventare uno strumento di simulazione per la progettazione e non solo un valido supporto per la ricerca e sviluppo. Il vantaggio dell'approccio monodimensionale si apprezza principalmente sulla parte di pre-processing in quanto non necessita della conoscenza approfondita di linguaggi di programmazione. Modellando ad oggetti, pur lasciando la possibilità di integrare input e output esterni e/o co-simulazione tramite l'implementazione di codice ad hoc, si può usufruire di librerie di componenti già quasi totalmente utilizzabili.

L'approccio di calcolo scelto seguirà il seguente percorso:

- Studiare il metodo di calcolo parametrico per il forno completo;
- Validare sul forno di produzione il modello virtuale;
- Integrare le analisi del Forno completo 1D con le analisi 3D dei bruciatori;
- Applicare le tecniche di Additive Manufacturing per la produzione di testine speciali;
- Valutare nuove soluzioni per il recupero ed il riutilizzo della CO₂ (CCU).



Schema forno che verrà traferito nel modello 1D

8.1 SIMULAZIONE PARAMETRICA 1D FORNO COMPLETO

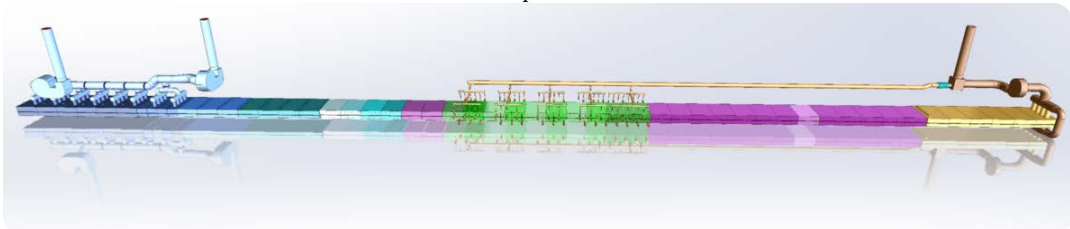
Entrando ora nello specifico del modello 1D del forno, costruito impiegando Amesim, per semplicità si focalizzerà l'attenzione solo su alcune rappresentazioni grafiche, necessarie per valutare il processo e per comprendere la motivazione dell'approccio 1D utilizzato.

Considerando i rapidi tempi di risposta del modello 1D (pur essendo parametrico e modulare), si cercherà di affrontare la globalità dell'impianto al fine di poter valutare nella sua interezza il sistema.

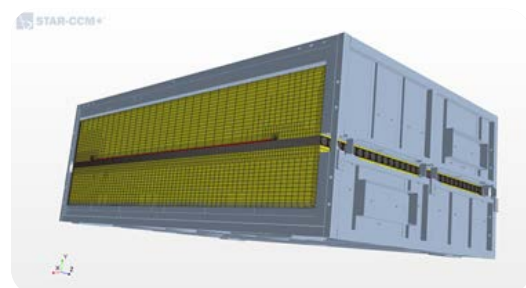
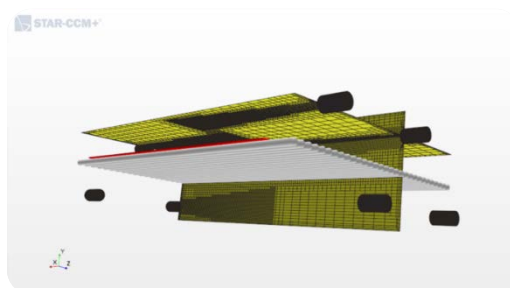
Prima di entrare nell'osservazione del modello monodimensionale, si procede citando alcune considerazioni di base sulla differenza tra modelli 3D e modelli 1D.

L'approccio 3D garantisce un grado di dettaglio molto elevato, ma allo stesso tempo la complessità per la trattazione delle geometrie e delle fisiche comporta un lavoro di modellazione e di calcolo elevatissimo, dal quale deriverebbe un'analisi del comportamento globale molto onerosa. Nelle immagini sottostanti vengono evidenziate alcune particolarità racchiuse nel caso di studio 3D.

Geometria 3D parte fluida forno



Alcuni dettagli di zone nelle quali la parte fluida è stata discretizzata tramite "Mesh".

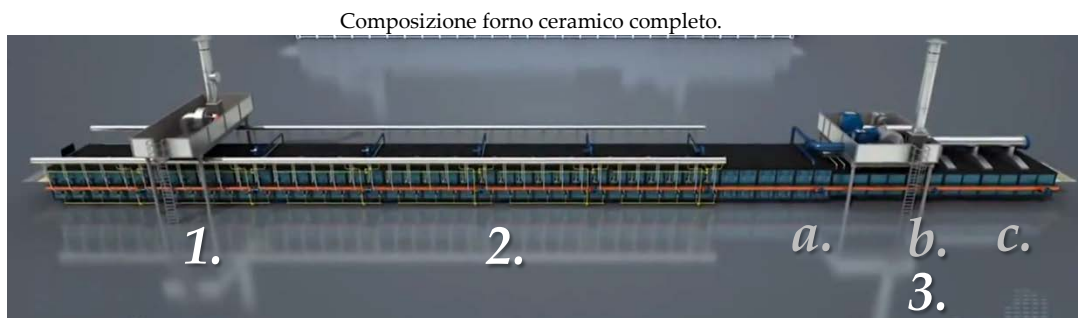


La definizione di un modello 3D può prevedere anche la semplificazione dei dettagli non necessari, adottando elaborazioni manuali comunque onerose. Mantenendo la geometria nativa, infatti, il numero di elementi e la complessità delle interazioni raggiungerebbero dimensioni affrontabili solo tecnologie HPC (High Performance Computing).

Il concetto di trasformare un “oggetto” 3D in “logiche” 1D è quindi la risposta alla necessità di valutare il comportamento globale di sistemi molto complessi, considerando tutti i componenti nel loro funzionamento, senza operare semplificazioni geometriche e garantendo la fedeltà del modello fisico. L’approccio utilizzato è stato quello di realizzare un modello completo di un forno ceramico reale, composto da sotto modelli interconnessi, molto accurati e parametrizzabili singolarmente.

Nell’immagine sotto riportata si possono notare le zone che compongono il forno ceramico completo:

1. Pre Riscaldamento
2. Cottura
3. Raffreddamento. Quest’ultima zona è ulteriormente suddivisa:
 - a. Rapido
 - b. Lento
 - c. Finale.



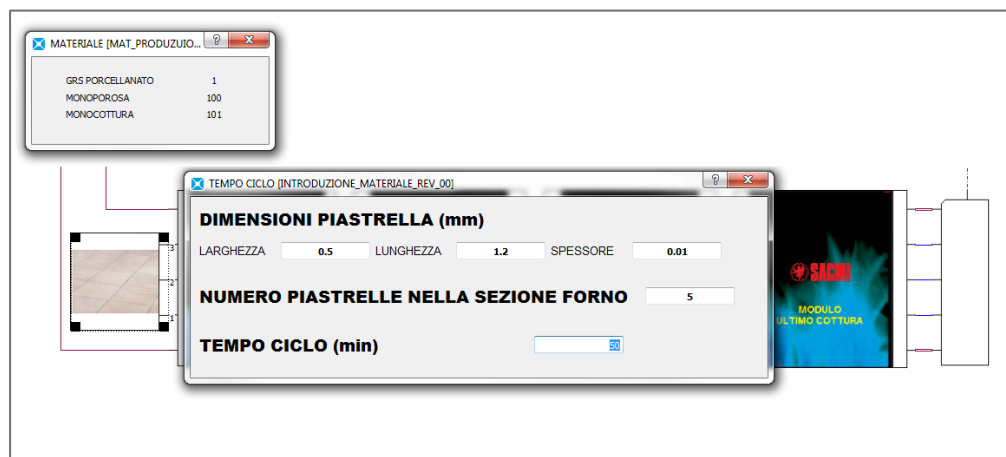
Le varie zone nella realtà sono composte da moduli le cui dimensioni sono standardizzate e sono realizzati con differenti allestimenti in termini di numero di bruciatori, tipologia di rulli, tipologia di isolante termico, presenza di raffreddamento, più una vasta scelta di funzioni accessorie. La composizione di tutti questi elementi definisce il reale funzionamento del forno.

Nel modello 1D è stata seguita una suddivisione analoga, nella quale ogni componente definisce un insieme di parametri fisici che, nella simulazione dinamica, evolveranno fino al raggiungimento dell’equilibrio, interagendo reciprocamente.

Entrando nel dettaglio, il primo elemento interattivo è l'interfaccia, dove si compongono i vari "macro moduli di forno" fino ad ottenerne il modello completo e si definiscono le caratteristiche dei componenti e del materiale da processare.

All'ingresso del forno verrà definito il materiale da cuocere, semplicemente cliccando sull'immagine della piastrella. Si potranno definire:

- Il ciclo termico di produzione
- Le dimensioni
- Il peso specifico del materiale
- La velocità di avanzamento



Le caratteristiche ed i componenti di ogni "macro modulo forno" sono stati configurati a priori tramite "moduli elementari". Tramite essi il progettista si trova a scegliere la configurazione in modo guidato impiegando maschere di selezione, senza dovere entrare nel dettaglio del funzionamento del "macro modulo". Ad esempio, i materiali refrattari e le diverse tipologie di materiali dei rulli sono stati classificati e, cliccando sui vari campi presenti nella maschera del modello, è possibile definirne le dimensioni, il tipo di isolamento delle pareti, il tipo di rullo installato e la presenza di eventuali strozzature per aumentare la velocità dei fumi in zone specifiche.

I moduli, pur essendo limitati nel loro numero, risultano fortemente personalizzabili, con riferimento sia alle caratteristiche costruttive, sia ai parametri di funzionamento (relativi, ad esempio, alla sequenza di accensione o alla temperatura di raffreddamento).

Questo significa che, tramite pochi macro moduli memorizzati in una libreria personalizzata, è possibile comporre un modello modulare perfettamente

configurabile ed allineato con quanto il produttore è in grado di realizzare per il proprio cliente.

Come già anticipato, è stato possibile raggiungere un elevato livello di personalizzazione, abbinato ad una elevata semplicità operativa “fail safe”, grazie all’impiego di “Applicazioni Interfaccia” che hanno permesso di costruire delle maschere di inserimento interattive, in grado di suggerire i corretti valori dei vari parametri in base al contesto.

Questa è una caratteristica particolarmente utile offerta da Amesim, la quale permette anche di creare delle interfacce grafiche in grado di rappresentare su un normale schermo un sistema contenente centinaia di variabili di stato, difficilmente interpretabili con il solo impiego di grafici.

Viene così realizzata una piattaforma di simulazione in grado di valutare il comportamento di un forno ceramico nella sua interezza, con un livello di dettaglio in grado di far apprezzare la differenza apportata dalla scelta di differenti componenti installati nei “macro moduli”.

“Applicazione Interfaccia” del Macro Modulo Forno

The image displays four overlapping windows from the 'Applicazione Interfaccia' software, used for configuring the Macro Modulo Forno. Each window is titled 'MODULO INGRESSO [MODULO_AN_INIZIALE_REV_00]' and contains specific configuration parameters.

Window 1: Internal Dimensions

- Lunghezza interna: m, 2.1
- Larghezza interna: m, 2.95
- Altezza interna: m, 0.8

Window 2: Diameter and Thickness

- Diametro: m, 0.054
- Spessore: m, 0.007
- Lunghezza nullo: m, 3.92

Window 3: Surface Areas

- Superficie di passaggio fumi sopra piano di carico: m², 3.18
- Superficie di passaggio fumi sotto piano di carico: m², 3.18

Window 4: Insulation Specifications

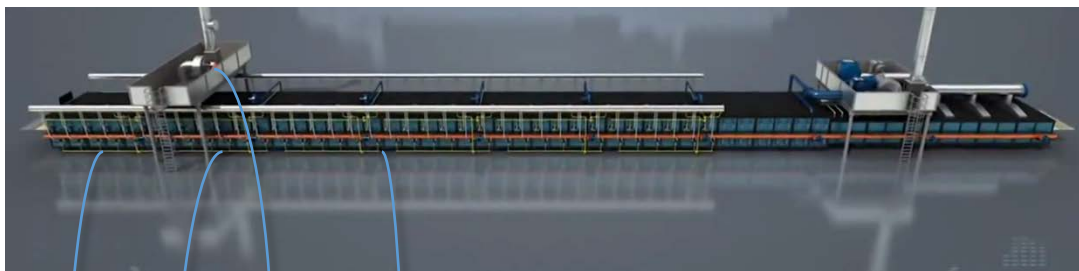
Isolamento parete sopra asse rulli

| Descrizione voce | Riferimento | Spessore (mm) | Riferimento | Spessore (mm) |
|---|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Primo strato il più esterno (faccia fredda) | 11 | 15 | 11 | 15 |
| Secondo strato | 11 | 15 | 11 | 15 |
| Terzo strato | 11 | 20 | 11 | 20 |
| Quarto strato | 9 | 15 | 9 | 15 |
| Quinto strato | 9 | 10 | 9 | 10 |

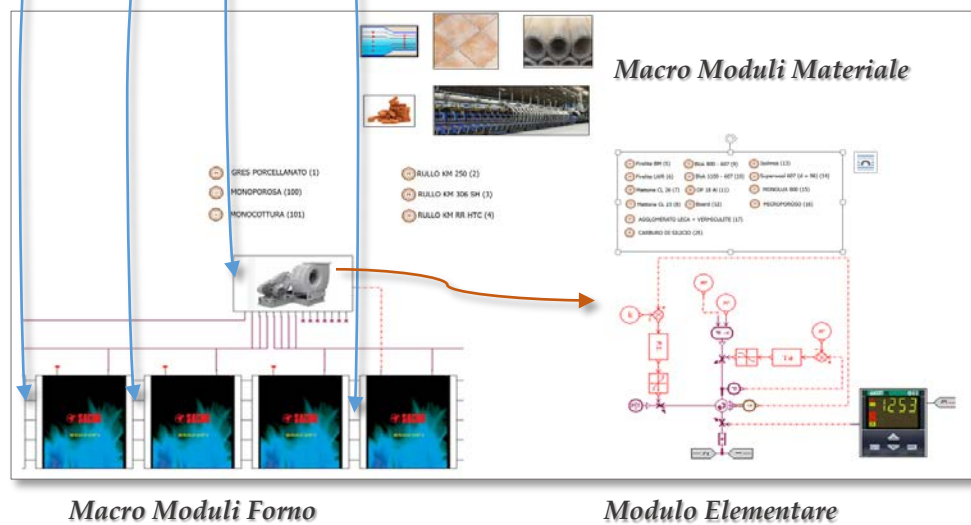
Isolamento volta e suolo

| Descrizione voce | Riferimento | Spessore (mm) | Riferimento | Spessore (mm) |
|---|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Primo strato il più esterno (faccia fredda) | 11 | 25 | 11 | 25 |
| Secondo strato | 11 | 25 | 11 | 25 |
| Terzo strato | 10 | 20 | 13 | 34 |
| Quarto strato | 10 | 20 | 13 | 30 |

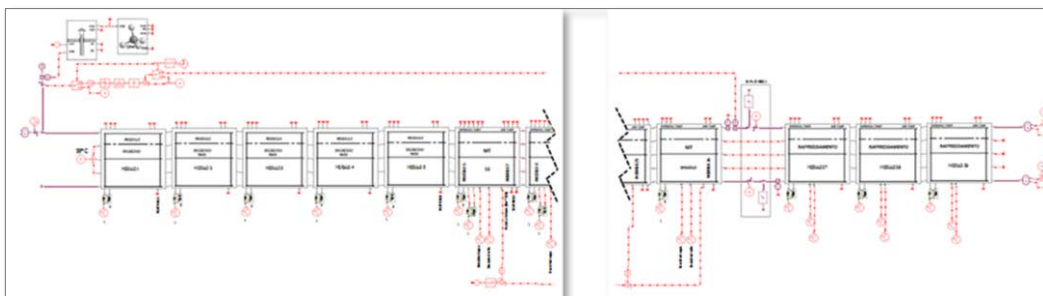
Modello Fisico



Interfaccia principale – Composizione dei “macro moduli”



Composizione funzionale dei “macro moduli forno”.

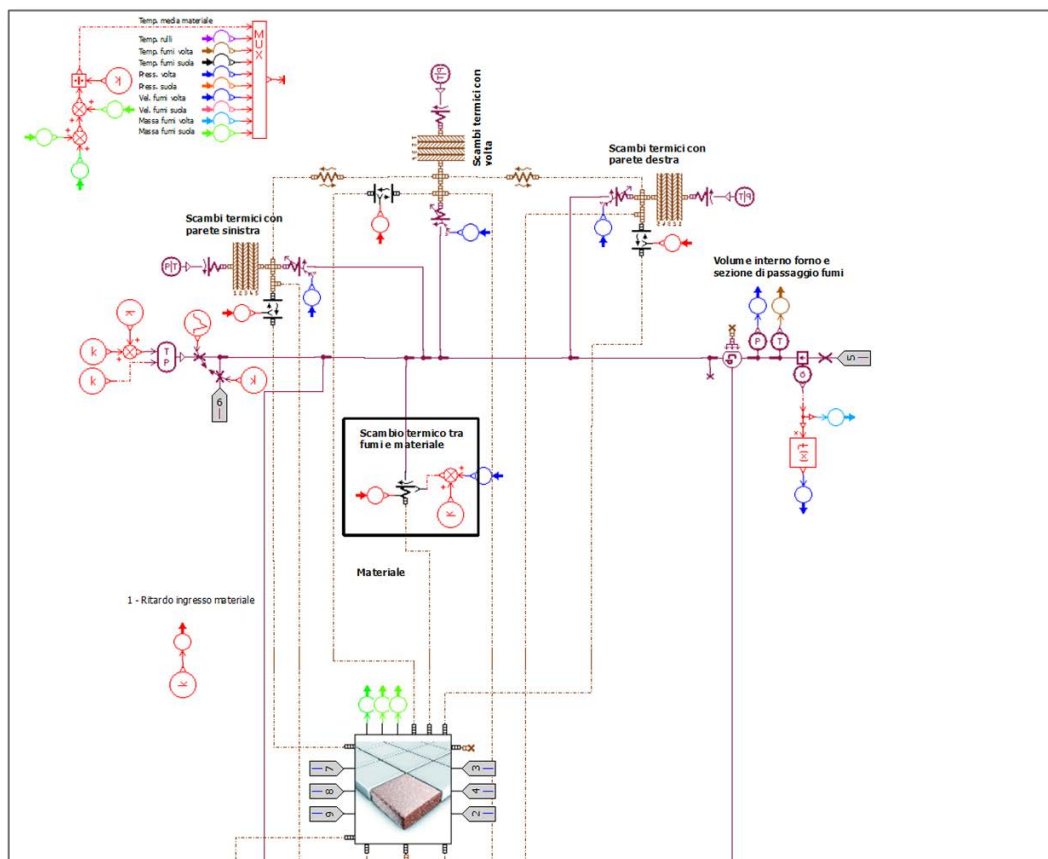


Lo stesso materiale da cuocere è un “macro modulo” il quale, una volta caratterizzato, interagisce con i moduli forno fornendo i valori per calcolare gli scambi termici. Secondo questo approccio, se si volesse ad esempio variare la curva di raffreddamento della zona finale, sarebbe sufficiente intervenire autonomamente solo sui moduli 3.a. 3.b. e 3.c., visto che ognuno di essi pre-

vede la regolazione indipendente dei parametri operativi dei ventilatori, oppure anche sostituire il solo “Modulo elementare” rappresentante il ventilatore.

All'interno del macro modulo vengono inoltre definite le catene di regolazione e controllo: impostando, per esempio, una temperatura obiettivo, il sistema provvederà a gestire la simulazione in funzione di essa, valutando il comportamento globale del modulo con tutte le interazioni interne ed esterne (es., scambio termico in funzione del tipo di materiale).

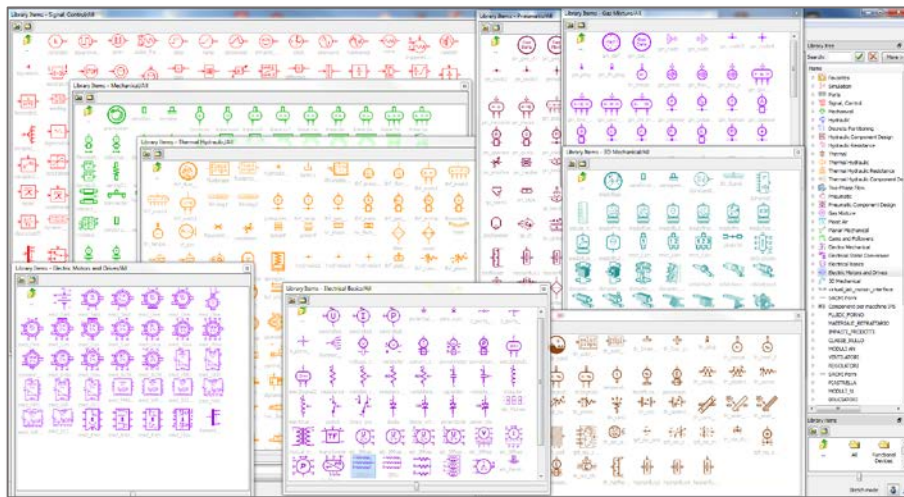
Struttura interna di un Macro Modulo Forno



A completamento dell'analisi del modello 1D, meritano attenzione anche tutti i componenti presenti nelle librerie disponibili con Amesim: il loro numero è decisamente elevato e sono in grado di coprire una molteplicità impressionante di aspetti dei problemi fisici. Si parte dalla meccanica piana arrivando a quella tridimensionale, passando per oleodinamica, pneumatica e trasmissione del calore sia tramite liquidi che tramite fluidi polifasici. Anche tutto il mondo dell'analisi dei segnali, digitali ed analogici in unione con le

tecnologie di costruzione dei controlli automatici è stato inserito all'interno di una libreria.

Breve panoramica di librerie disponibili con Amesim



Tale disponibilità è una caratteristica saliente di Amesim, che lo posizione ai vertici del mercato di questo tipo di software. Nulla però viene tolto alla possibilità di sviluppare moduli personalizzati, o componendo i blocchi di libreria come ad esempio i già citati “Macro moduli” e “Moduli elementari”, o creando blocchi completamente nuovi in grado di trattare relazioni fisiche non presenti, costruendoli utilizzando il “linguaggio di modellazione” Modelica⁷², cuore pulsante del software.

Esempio di codice Modelica

```

1 model Mixer
2 //simulation of mixing of two streams at constant temperature and pressure
3 //Component1 = Water
4 //Component2 = Ethanol
5 parameter Chemsep_Database.General_Properties Comp[NOC]=(w,e);
6 parameter Chemsep_Database.Water w;
7 parameter Chemsep_Database.Ethanol e;
8 parameter Integer NOC = 2 "No of Components";
9 parameter Integer str = 2 "No of streams";
10 parameter Real W[str] (unit = "kg/h") = (300,500) "Mass flowrate of input streams";
11 parameter Real x[str,NOC] (unit = "--") = {{(0.3,0.7), (0.6,0.4)}};
12 parameter Real T (unit = "K") = 298.15 "Temperature of Input Streams";
13 parameter Real P (unit = "Pa") = 101325 "Pressure of input Streams";
14 Real X_out[NOC] (unit = "--") "Mass fraction of components in output stream";
15 Real W_out (unit = "kg/h") "Mass flowrate of output stream";
16 Real M[str] (unit = "kmol/h") "Molar flowrate of input streams";
17 Real n[str,NOC] (unit = "--") "Mol fraction of input streams";
18 Real MW[NOC] "Molecular weight of individual components";
19 Real M_out (unit = "kmol/h") "Molar flowrate of output stream";
20 Real N_out[NOC] (unit = "--") "Mol fraction of components in output stream";
21 Real MW_in[str] (unit = "kg/kmol") "Molecular weight of input streams";
22 Real MW_out (unit = "kg/kmol") "molecular weight of output stream";
23 equation
24 sum(W) = W_out "Overall material balance";
25 MW[:] = (w.MW,e.MW) "To get the molecular weight of the components";
26 M[:] = (W[1,:].x[1,:]./MW[1])+(M[1,:].x[1,:]./MW[2]) "Calculation of molar flowrate of input streams";
27 n[1,:] = (((x[1,:].*W[1])./MW[1])./M[1]),(((x[2,:].*W[2])./MW[2])./M[2]) "Calculation of mol fraction of input streams";
28 MW_in[:] = W[1,:]./M[1] "Calculation of molecular weight of input streams";
29 W[1]*x[1,:] + W[2]*x[2,:] = W_out*X_out[:] "Material balance around individual components";
30 M_out = sum(X_out[:].*W_out)./MW[:] "Calculation of molar flowrate of output stream";
31 N_out[:] = (X_out[:].*W_out)./MW[1:] "Calculation of mol fraction of components in output stream";
32 MW_out = W_out/M_out "Calculation of molecular weight of output stream";
33 end Mixer;

```

⁷² Immagine tratta da <http://om.fossee.in/> - Creative Common License

Ovviamente quest'ultimo livello di personalizzazione richiede la conoscenza di tale "linguaggio di modellazione" (nota bene, non di "programmazione" ma di "Modellazione").

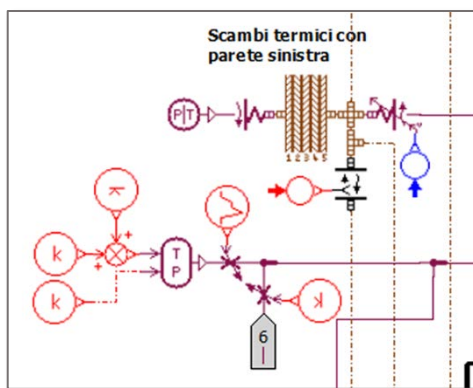
In breve, la differenza sta nel fatto che mentre un classico linguaggio di programmazione come il C implementa funzioni elementari studiate per svolgere assegnazioni di valori alle variabili, analisi condizionali di tali valori, definizione di cicli di operazioni elementari, Modelica è strutturato in modo da rendere facile la soluzione di equazioni, senza preoccuparsi di scrivere l'algoritmo necessario per farlo. Per inciso, tali algoritmi sono perlopiù noti e ripetitivi.

Quindi, se per esempio in C è necessario scrivere l'algoritmo per la soluzione dell'equazione del moto di un corpo, in Modelica basta averne l'equazione. Sarà poi il suo substrato che si occuperà della creazione del codice Assembler da fare eseguire al microprocessore. L'equazione diventa quindi un "Oggetto" raggruppabile in famiglie parametrizzate ed estremamente flessibili. I parametri possono essere interni e non modificabili o selezionabili in un elenco preimpostato, oppure completamente liberi ed agganciabili ad un'altra famiglia di Oggetti.

Ne risulta una flessibilità enorme.

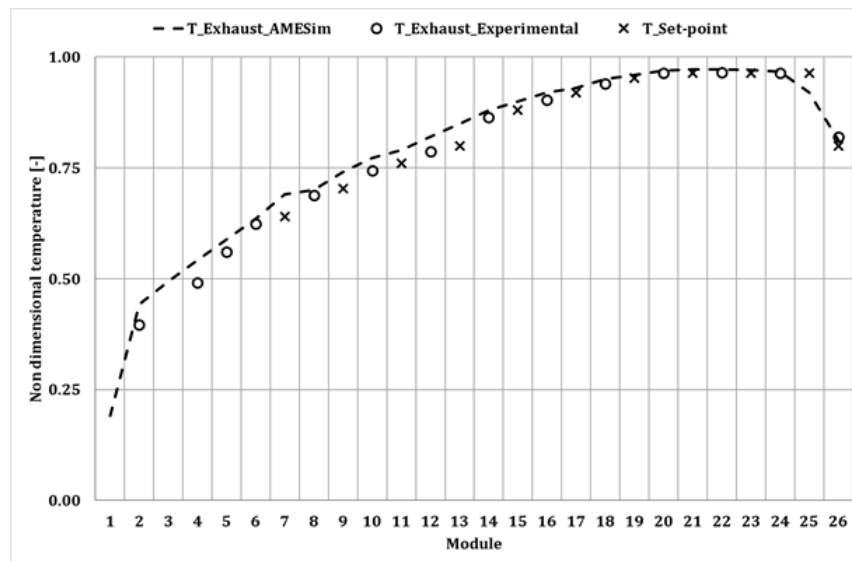
Nell'esempio sotto riportato è presente una porzione del Macro Modulo Forno: gli elementi rossi sono blocchi logici e di controllo automatico, il multistrato marrone rappresenta una parete del forno con i vari strati di materiale refrattario ed i rimanenti collegamenti sono relativi al flusso dei gas combustibili. Le varie interconnessioni possono trasferire i risultati di un blocco rendendoli condizioni iniziali di un altro (soluzione implicita) oppure, nel più performante dei casi, il substrato di Amesim crea, in modo nascosto all'utente, una unica equazione da risolvere esplicitamente per ogni istante temporale (soluzione esplicita). La scelta del metodo di soluzione è nella maggior parte dei casi effettuata automaticamente.

Dettaglio di un Macro Modulo Forno

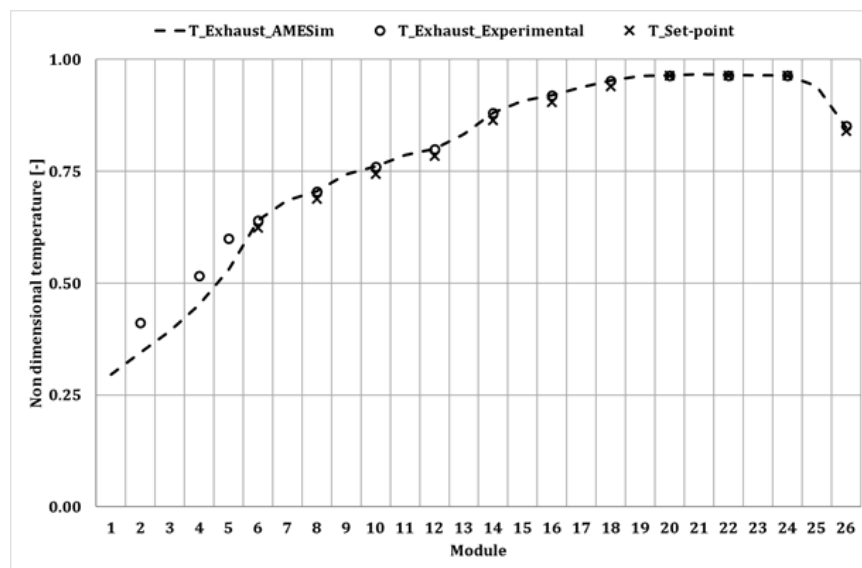


8.2 VALIDAZIONE NUMERICO - SPERIMENTALE MODELLO 1D

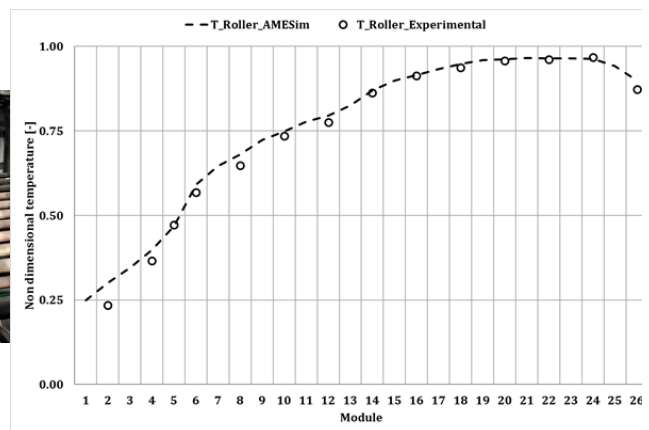
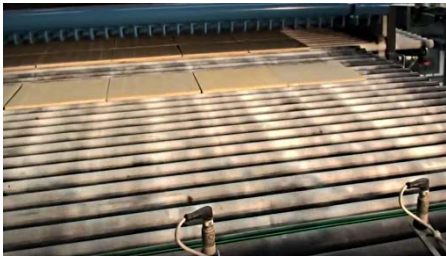
Andremo ora ad analizzare il confronto tra i dati sperimentali precedentemente raccolti ed i risultati provenienti dal modello monodimensionale completo:



Temperatura della camera e curva di fuoco VS. Modello numerico



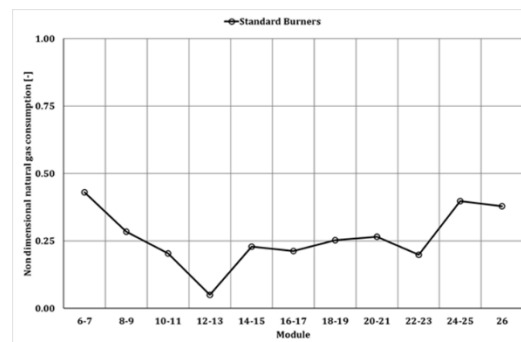
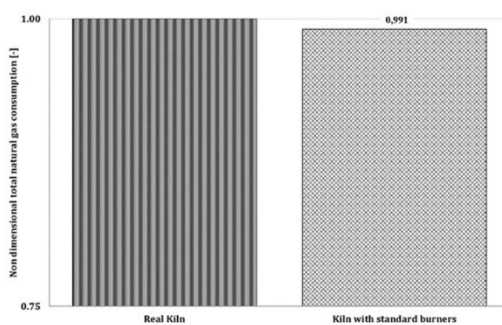
Temperatura della camera inferiore VS. Modello numerico



Rulli del forno

Temperatura dei rulli VS. Modello numerico

Di seguito sono riportate le differenze tra il consumo reale del forno durante la fase di produzione ed il relativo modello numerico:



$$\Delta < 1\%$$



Il consumo di metano VS. Modello numerico

8.3 MODELLO 1D INTEGRATO NEL PROCESSO

Dall'analisi dei risultati del modello 1D trattato, si evince una perfetta rispondenza con i modelli precedentemente utilizzati ed i dati sperimentali. Si nota

però che, per procedere con delle analisi accurate dei processi di metanazione, si valuterà anche un approccio “3D” per approfondire le evoluzioni dei flussi trasversali e per analizzare le ipotesi successive di mescolazione dei flussi per le reazioni di metanazione.

LMS Amesim è un piattaforma software nata per modellare e simulare le prestazioni dinamiche di sistemi multi-fisici (idraulica, meccanica, pneumatica, termica, elettrica ...) con i relativi controlli, in un’unica piattaforma. I componenti dei modelli vengono descritti utilizzando modelli analitici validati, completamente parametrici, che rappresentano il comportamento di ogni elemento del sistema. La simulazione 1D può essere utilizzata sia per fare simulazioni steady-state che dei transitori. Qualora la piattaforma Amesim venisse utilizzata come strumento di simulazione consolidato, è auspicabile l’estensione di utilizzo ai concetti di Hardware-in-the-loop⁷³ e Software-in-the-Loop⁷⁴ già facenti parte della piattaforma.

Va detto che l’utilizzo di tale approccio potrebbe fornire un immediato vantaggio sia dal punto di vista della progettazione che dell’integrazione con altri sistemi di simulazione (es. accoppiamento 1D-3D) ma anche per interagire direttamente con i sensori installati a bordo del sistema reale o come verifica delle logiche di funzionamento prima di realizzare il prototipo.

8.4 SIMULAZIONE 3D FORNO COMPLETO

Dopo aver validato i risultati dell’approccio monodimensionale, nel presente paragrafo andremo ad investigare gli approcci 3D da implementare per completare la ricerca.

Prima di addentrarci nello specifico, di seguito verrà motivata la scelta del software utilizzato. La piattaforma di calcolo 3D utilizzata è BarracudaVR⁷⁵. È uno strumento di analisi termo-fluidodinamica multifase e chimica tridimensionale, strutturato principalmente per lo studio di impianti chimici. Le caratteristiche distintive di BarracudaVR sono:

- generazione di griglie prevalentemente cartesiane e relativamente “rade” per la descrizione generale dell’impianto;

⁷³Vedi appendice.

⁷⁴ Vedi appendice.

⁷⁵ <http://cpfd-software.com/barracuda-vr-solutions/barracuda-basic>

- disponibilità di condizioni al contorno dinamiche semplificate per la gestione di problemi multiscala;
- solutore transitorio con determinazione automatica dell'intervallo di tempo;
- determinazione automatica delle impostazioni numeriche (rilassamento, schemi di discretizzazione, modello di turbolenza, etc.);
- modello multifase lagrangiano statistico (proprietario), specifico per la descrizione di sistemi ad alta densità di particelle;

La tecnologia introdotta da Barracuda è unica tra gli approcci CFD e per questa ragione viene definito come CPF⁷⁶ in quanto è stato progettato principalmente per lo scopo di modellare flussi di particelle solide in sistemi fluidi. Mentre i codici "general purpose" come ANSYS FLUENT[®], CD-Adapco STAR-CCM[®], OpenFoam sono nativi mono-fase e vengono addizionati di tecniche numeriche atte a modellare anche flussi multifase e particellari, il pacchetto software Barracuda[®] è stato costruito da zero, ed ha una descrizione nativa multifase-particelle. Un'altra novità introdotta da Barracuda è la possibilità "nativa" di parallelizzare i calcoli su GPU⁷⁷ anche di categoria consumer (es. GTX)⁷⁸. Questa potenzialità è molto importante per abbattere i costi ed i tempi computazionali in quanto attualmente le GPU sono notevolmente più economiche rispetto alle CPU. Per quanto riguarda i flussi in cui sono presenti particelle, per ridurre l'onere computazionale, nei codici tradizionali, si cercano degli escamotage numerici al fine di semplificarne la trattazione. Nel caso di Barracuda, le particelle vengono trattate nella loro completezza. Barracuda è stato quindi scelto per ridurre i tempi di preparazione dei modelli (pre-processing) e per poter usufruire di H/W a costi inferiori rispetto ai normali HPC.

Assodata la piattaforma di calcolo 3D, ci addentreremo ora nella trattazione del caso. Di seguito sono riportati i principali passaggi che definiranno l'approccio al problema e come poi è stato svolto passo dopo passo il caso.

In prima analisi, si era pensato di simulare la metanazione direttamente all'interno del forno, per ragioni di "ergonomia del processo". Approfondendo

⁷⁶ Computational Particle Fluid Dynamics

⁷⁷ Graphics Processing Unit. L'unità di elaborazione grafica (più nota come GPU, dall'inglese graphics processing unit) o unità di elaborazione visiva (VPU, dall'inglese visual processing unit) o processore grafico o processore visivo è una tipologia particolare di coprocessore che si contraddistingue per essere specializzata nel rendering di immagini grafiche.

⁷⁸ <http://www.nvidia.it/object/geforce-family-it.html>

le valutazioni sulle reazioni, si è notato che essendo esotermiche non avrebbero necessitato di temperature elevate e soprattutto poteva interferire con reazioni chimiche stocastiche poco controllabili all'interno del forno stesso. Tale affermazione deriva da un'analisi congiunta avvenuta insieme ai tecnici impiantisti. L'idea iniziale scaturiva dalla volontà di sfruttare la zona finale del forno in cui era prevista una temperatura idonea, minimizzando gli spazi inserendo la griglia di catalizzatore ed i punti di iniezione dell'idrogeno direttamente all'interno del forno.

Oltre ai dubbi sulle eventuali reazioni chimiche non prevedibili, si è abbandonata l'idea anche per le perdite di carico introdotte dalla presenza della griglia di catalizzatore che necessariamente doveva essere attraversata dal flusso dei fumi.

Le modifiche all'interno del forno, oltre ai costi aggiuntivi, avrebbero potuto variare la qualità del prodotto, cosa assolutamente non accettabile. Completamente diverso lo scenario relativo all'introduzione del reattore a valle del camino, in quanto non comporterebbe nessuna variazione dell'attuale configurazione del forno.

Grazie al modello di calcolo, si è potuto constatare che anche dall'uscita del camino, tale temperatura potrà essere garantita. Si nota inoltre che per ragioni di normative, i fumi devono essere abbassati a 250 gradi, cioè raffreddati e quindi evitando questa fase di raffreddamento, si potranno immettere direttamente nel reattore i fumi alla temperatura idonea per la reazione di metanazione. Da tale ipotesi si è quindi proceduto con gli affinamenti del modello di miscelazione dell'idrogeno nelle zone limitrofe al catalizzatore per valutare l'efficienza di reazione.

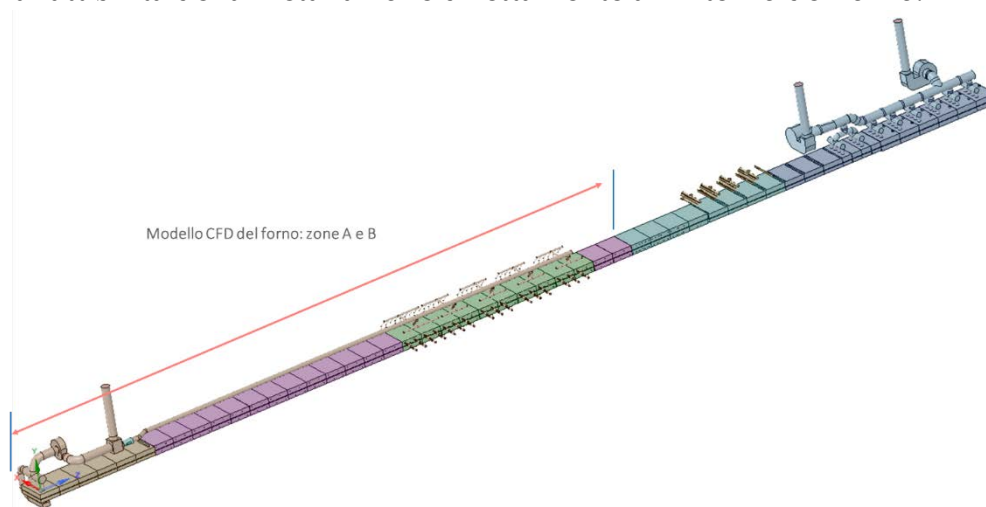
Il grande vantaggio di agire *"impiantisticamente"* parlando direttamente sul camino, senza interferire minimamente con ciò che avviene all'interno del forno, potrà dare in futuro l'opportunità di applicare il sistema anche su forni esistenti e non solo su eventuali nuovi sistemi con tecnologia avanzata. In un'ottica ancor più lungimirante, si potrebbe ipotizzare di estendere il concetto del reattore/catalizzatore così configurato anche ad altri settori industriali oltre a quello ceramico.

Le fasi di calcolo si suddivideranno come segue:

- Impostazione del modello di forno in BarracudaVR
- Caso Termo-fluidodinamico con Metanazione all'interno del Forno
- Caso Termo-fluidodinamico con Metanazione nel Camino del Forno

8.5 SIMULAZIONE CINETICA CHIMICA 3D METANAZIONE FORNO COMPLETO.

La simulazione è stata svolta limitando il dominio di calcolo alle zone A e B del forno, in quanto non è stato ritenuto necessario considerare la zona di raffreddamento delle piastrelle (a valle dei bruciatori) perché non significativa per la prima fase di calcolo in cui si vuole verificare macroscopicamente la fattibilità della metanazione direttamente all'interno del forno.

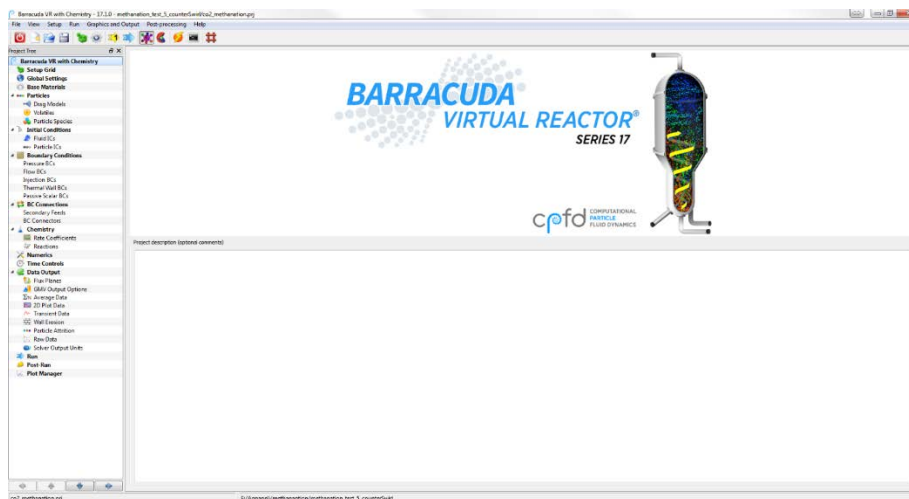


Modello 3D Forno con specificate zone di interesse per calcolo 3D

Le condizioni al contorno del modello termo-fluidodinamico tridimensionale sono state definite sfruttando il modello energetico mono-dimensionale sviluppato con Amesim e descritto nei capitoli precedenti. A tal proposito si è valutato di operare alcune semplificazioni. Nel dettaglio sono stati trascurati dal dominio di calcolo i rulli di trasporto, il movimento traslatorio del tappeto di piastrelle, la modellazione dettagliata dei bruciatori, che sono invece trattati come sorgenti puntuali di portata. Questo modello discretizza il forno in direzione longitudinale in 34 moduli, ciascuno dei quali è caratterizzato da una temperatura media costante e da una potenza richiesta. Sulla base di detta potenza, vengono determinate le portate emesse dai bruciatori nel modulo stesso.

Il modello CAD è stato appositamente semplificato per poter comprendere nella griglia solo le zone significative, quali le zone "A" e "B" precedentemente descritte, le piastrelle sono considerate come una intercapedine statica ma termicamente attiva, i rulli sono stati trascurati in prima approssimazione in quanto superflui ai fini del calcolo. Possono essere introdotti in un secondo

tempo, eventualmente, e descritti come baffles “gridless” senza un appesantimento del modello in termini di densità di griglia. La geometria CAD è stata importata in formato stl in BVR, impostando un numero di celle per il blocco di 5.000.000, di cui 75.000 come celle fluide.



Interfaccia grafica di Barracuda

Setup Grid

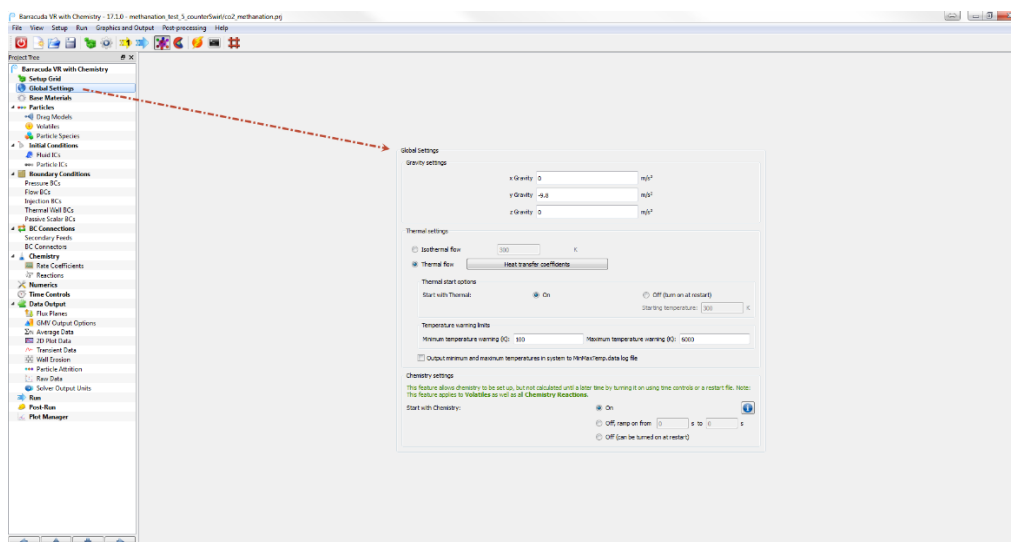
Il posizionamento manuale di alcune grid-lines, è necessario per consentire al generatore di griglia di catturare alcuni dettagli geometrici specifici quali in particolare il volume delle piastrelle e per definire correttamente la superficie di pressione costante all’uscita del camino



Impostazione della Griglia

Global Setting

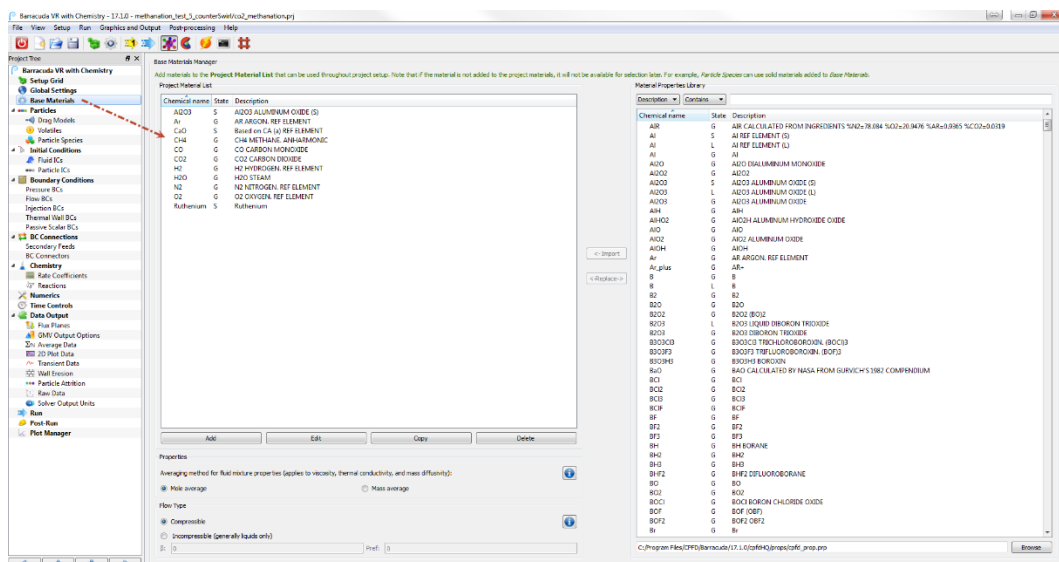
Dal pannello Global Settings consente si definiscono i parametri generali del problema: Gravità, Navier-Stokes (quantità di moto), Flusso Termico (cioè la risoluzione dell’equazione di conservazione dell’energia è attivata) e Flusso con Reazioni Chimiche.



Pannello Global Setting

Base Materials

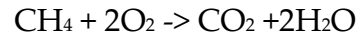
Definizione caratteristica del fluido: in questa fase vengono definiti tutti i materiali (solidi, liquidi o gassosi) che saranno utilizzati nel calcolo. Nel primo modello, si sono impostati solo i prodotti della combustione del metano, che risultano emessi dai bruciatori. Sono stati definiti, anche materiali che verranno utilizzati nella fase di metanazione.



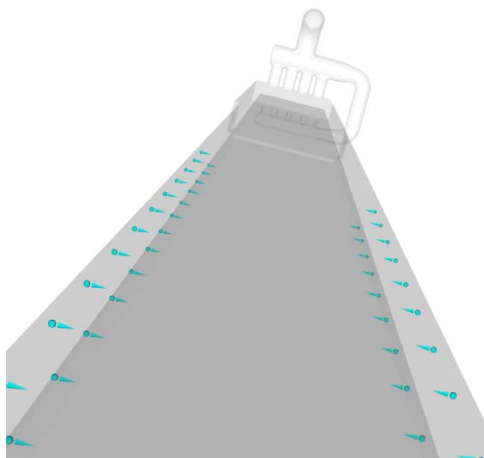
Interfaccia per scelta dei "materiali"

L'approccio globale adottato per la modellazione del forno intero prevede che i bruciatori siano considerati come dei iniettori puntiformi di gas. Questi sono quindi considerati come Injection points, dai quali si inietta nel dominio una

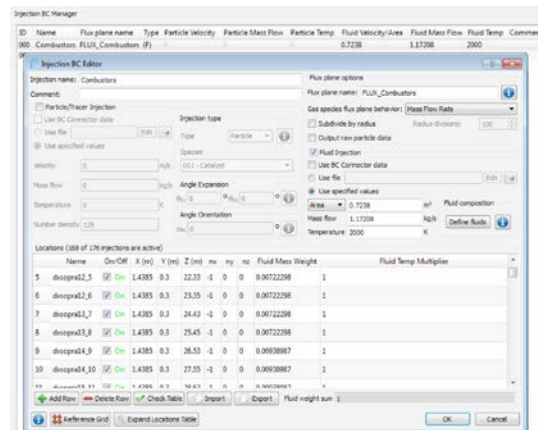
portata assegnata. In prima approssimazione, si è considerato che la combustione nei bruciatori sia una reazione “perfetta”:



Nel forno vengono quindi rilasciate quantità di CO_2 e H_2O in rapporto stechiometrico ed in funzione delle portate assegnate ai vari bruciatori. Viene poi considerato un surplus del 20% di O_2 (incombusto) in quanto la miscela di combustione è ricca in aria. Infine viene considerata la presenza di N_2 come composto neutro non-reagente, risultante dalla miscelazione aria-metano



Schematizzazione bruciatori



Injection point bruciatori

La portata iniettata da ciascun Injection point (bruciatore) è definita in base alle valutazioni energetiche del modello mono-dimensionale del forno precedentemente trattato. Per la temperatura di iniezione dei gas provenienti dal bruciatore si è adottata una temperatura costante vicina alla temperatura adiabatica di fiamma (2000 K).

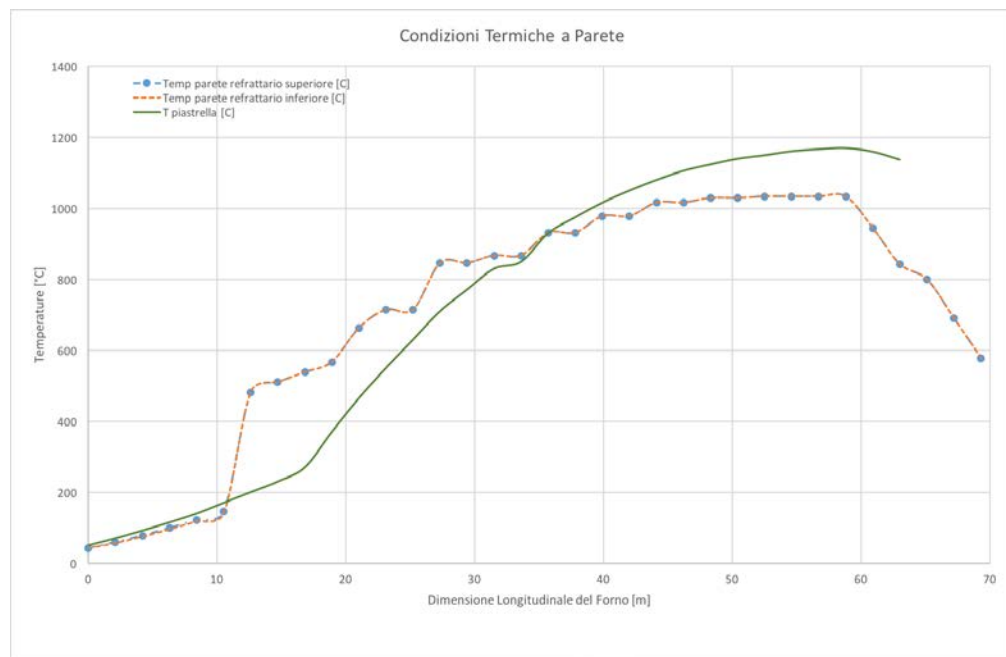
Boundary Conditions

Alle estremità del dominio di calcolo sono state applicate le *Boundary Conditions*: condizione di pressione costante al camino di ingresso e condizione di portata assegnata (in ingresso) in corrispondenza del modulo 32, equivalente alla portata aspirata dal camino fumi (= 240 kg/h).



Boundary Conditions

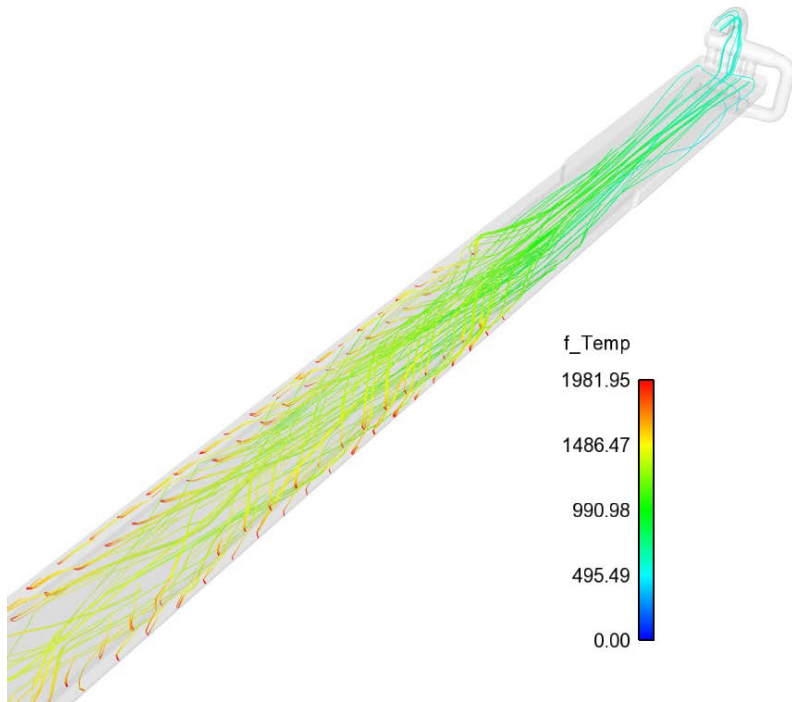
Nel modello termico di BarracudaVR, è possibile imporre delle temperature alle pareti e di conseguenza calcolare il flusso termico. E' anche possibile prevedere un flusso da adattare per esempio alla temperatura media alle pareti in modo parametrico al variare delle condizioni locali interne. In prima approssimazione, si sono utilizzate le temperature calcolate con il codice monodimensionale al fine di snellire il calcolo. Si è stimata una temperatura a parete fissa considerata pari all'85% della temperatura interna a ciascun modulo, considerando che il materiale refrattario delle pareti limita notevolmente lo scambio termico con l'esterno.



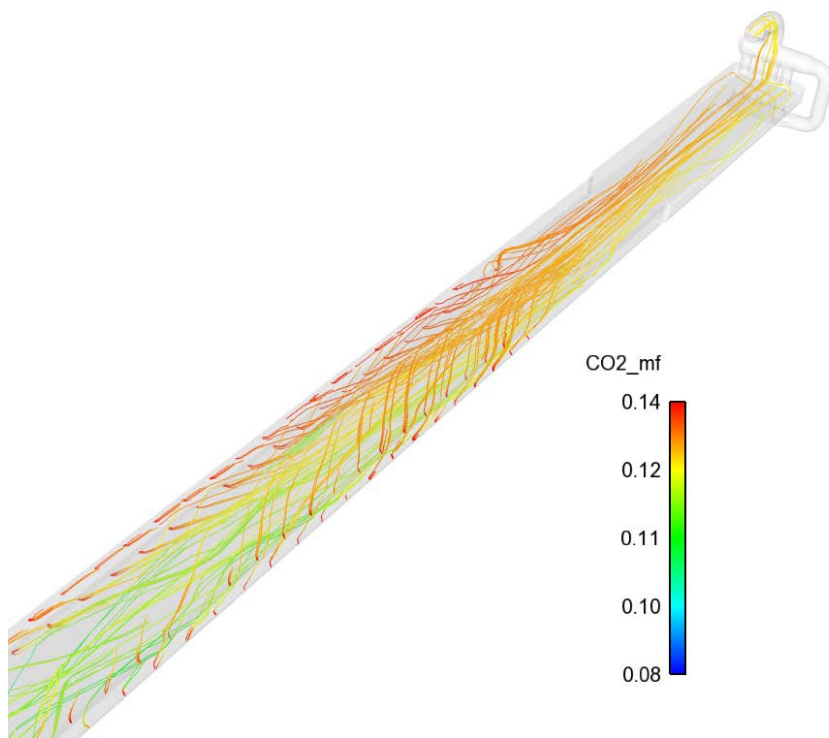
Condizioni termiche a parete

Data Output

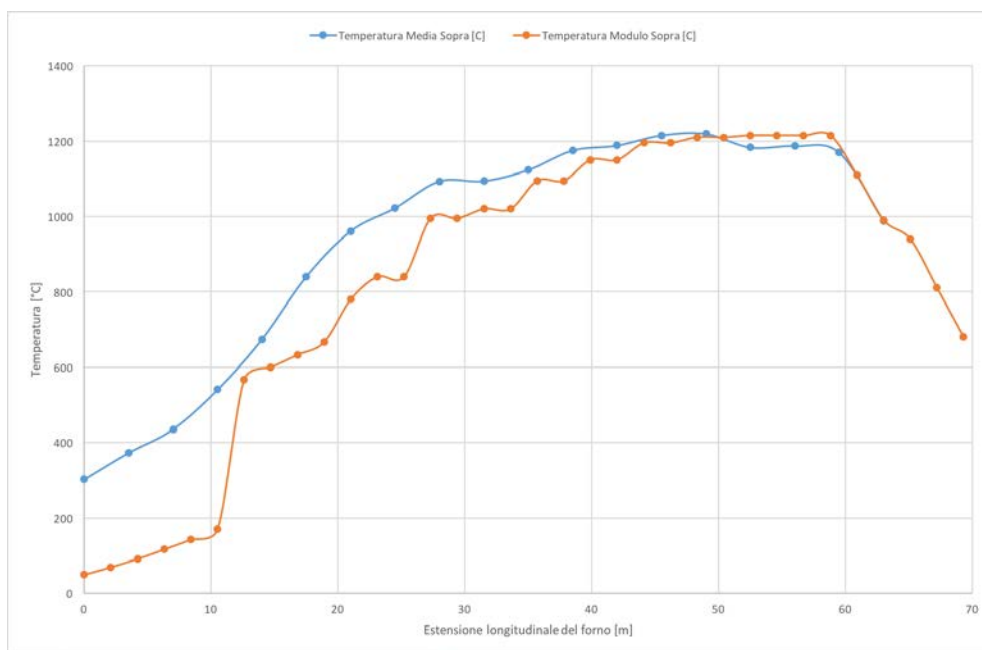
BarracudaVR prevede diverse soluzioni di output dei risultati: campi tridimensionali di variabili, campi bidimensionali di variabili su piani predefiniti, quantità integrali in funzione del tempo.



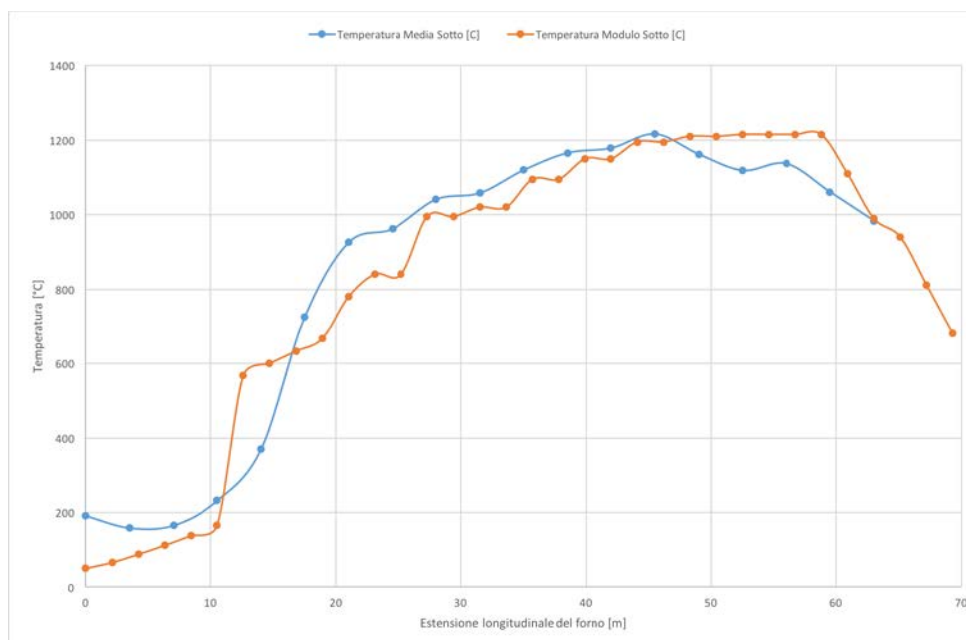
Campo di Temperatura



Frazione Massica di CO₂



Confronto Temperature con il modello mono-dimensionale – zona sopra rulli



Confronto Temperature con il modello mono-dimensionale - zona sotto rulli

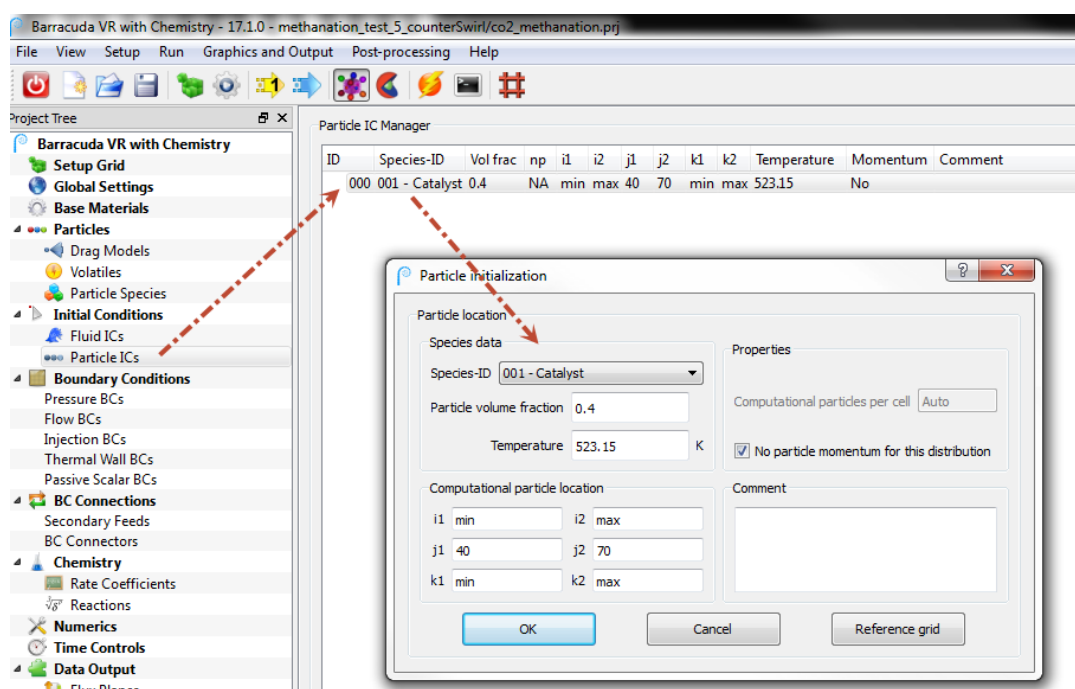
Ipotesi 1a: conversione della CO₂ e Metanazione all'interno del forno

Una volta validato il modello termo-fluidodinamico confrontando i risultati con i modelli 1D ed i dati sperimentali, si è deciso di procedere studiando il processo di metanazione applicato direttamente all'interno del forno preso in esame. Si ipotizza quindi di collocare la griglia di catalizzatore nella zona

a bassa temperatura (<500 °C) insieme agli iniettori di H₂. La reazione di metanazione si ipotizza che avvenga in quanto i fumi contenenti CO₂ investiranno direttamente la griglia di catalizzatore nella zona del forno in cui la temperatura sarà idonea per il raggiungimento della reazione.

Riferimenti per la cinetica chimica

Per il modello test di riconversione della CO₂ in metano, si è fatto riferimento alla reazione standard. Si è adottato uno schema cinetico da bibliografia⁷⁹ atto a definire la reazione in condizioni di pressione atmosferica e temperatura di circa 200 °C. Il catalizzatore utilizzato è il Rutenio⁸⁰.

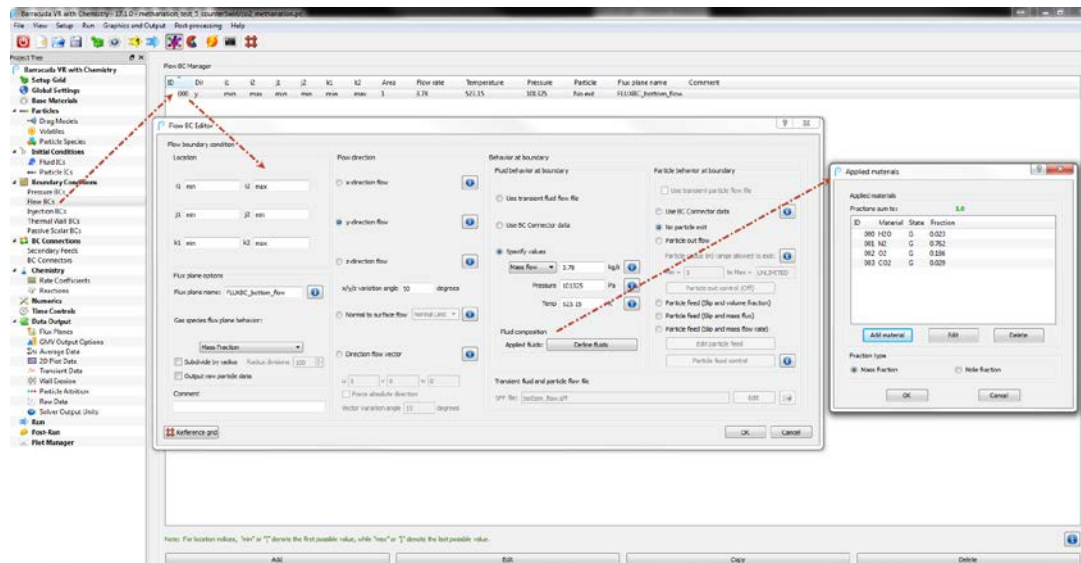


Generazione "griglia" fissa catalizzatore

La griglia fissa, viene modellizzata con lo "stratagemma" di creare una griglia di particelle fisse (con una spaziatura analoga a quella che si realizzerà)

⁷⁹ "A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization" by Melis S Duyar. (<http://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac%3A188052>), riportata la sintesi in appendice.

⁸⁰ Il rutenio è l'elemento chimico di numero atomico 44. Il suo simbolo è Ru. È un raro metallo di transizione del gruppo del ferro; si trova nei minerali del platino ed in lega con esso viene usato come catalizzatore. Per esempio, l'acido solfidrico può essere decomposto dalla luce usando una sospensione acquosa di particelle di solfuro di cadmio e diossido di rutenio. Il rutenio viene inoltre utilizzato come catalizzatore per reazioni di idrogenazione, per le quali assicura un'efficienza catalitica maggiore del rodio.



Composizione chimica dei fumi del forno che entrano nel reattore e viaggiano dal basso verso l'alto:
 è stata impostata una portata in massa di 3.78 kg/s ed una temperatura di ingresso di 250°C.

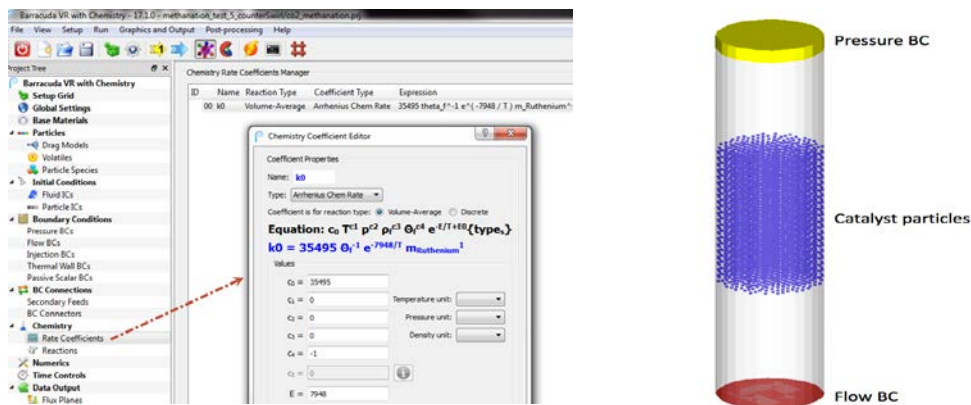
Impostazione modello metanazione

Al fine di verificare il funzionamento del modello di calcolo, si è costruito un modello semplificato compreso da un cilindro contenente un letto di catalizzazione statico (assimilabile ad una griglia). Il sistema è a pressione atmosferica ed a temperatura iniziale di 200 °C. Il particolato catalizzatore ha la seguente composizione chimica:

5% Rutenio,
 10% CaO,
 85% Al₂O₃

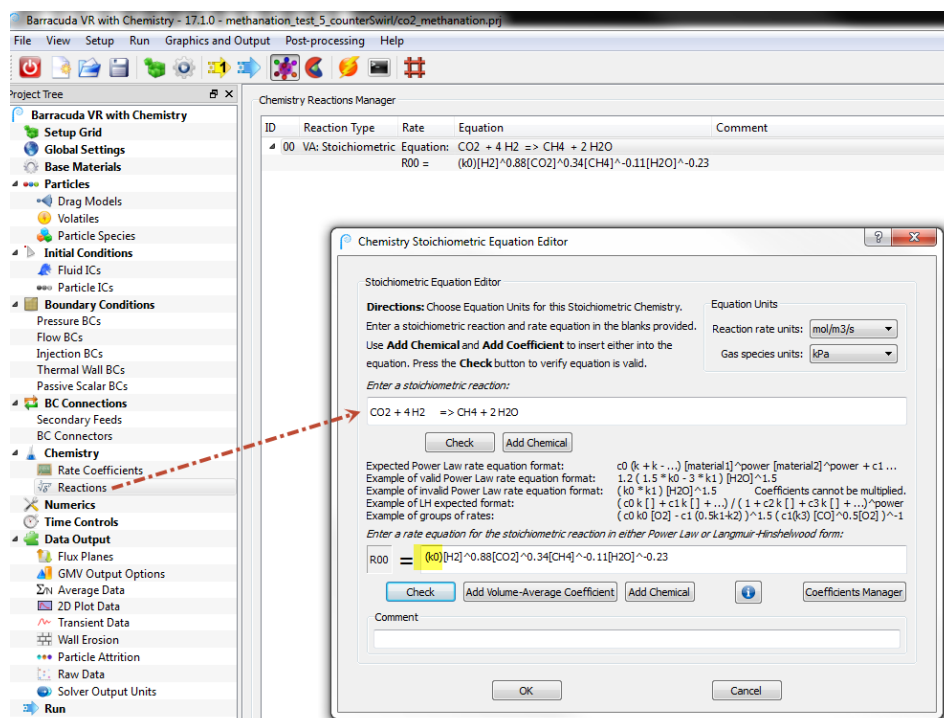
La velocità in ingresso è di 0.25 m/s con la seguente composizione:

0.35 - frazione molare di CO₂
 0.65 - frazione molare di H₂



Definizione del Rate Coefficient (coefficiente di reazione per la formazione di CH4)

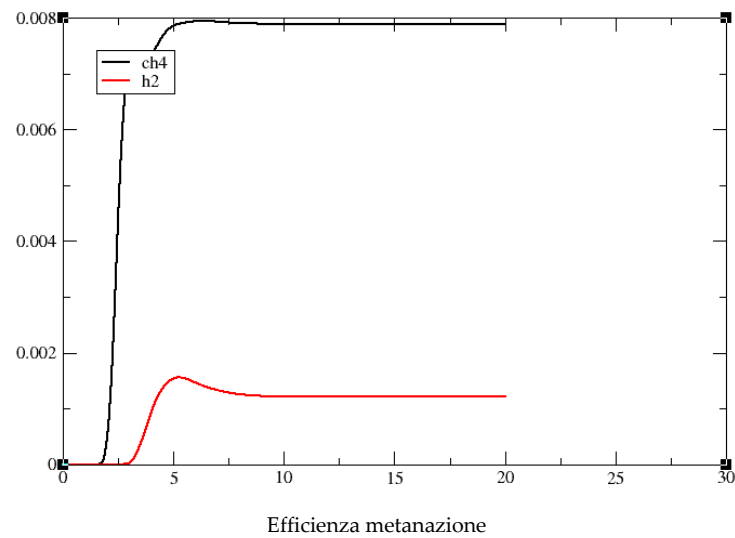
Viene definito il coefficiente di reazione che porta alla generazione di CH₄ a partire da H₂ e CO₂. Le costanti di reazione vengono definite a parte. Si noti in questo caso la dipendenza della k₀₀ dalla presenza di Rutenio (si esplicita in questo modo la dipendenza della reazione dal catalizzatore).



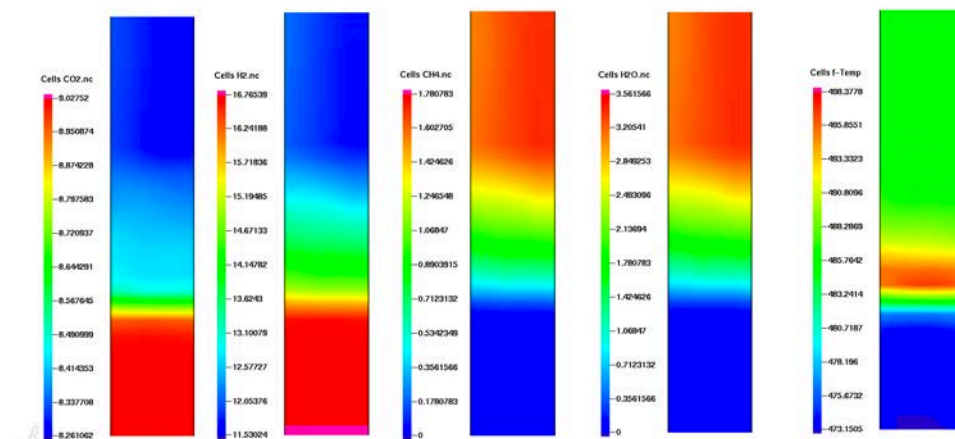
Definizione della reazione

Dove (k₀) dipende dalla sua velocità di reazione

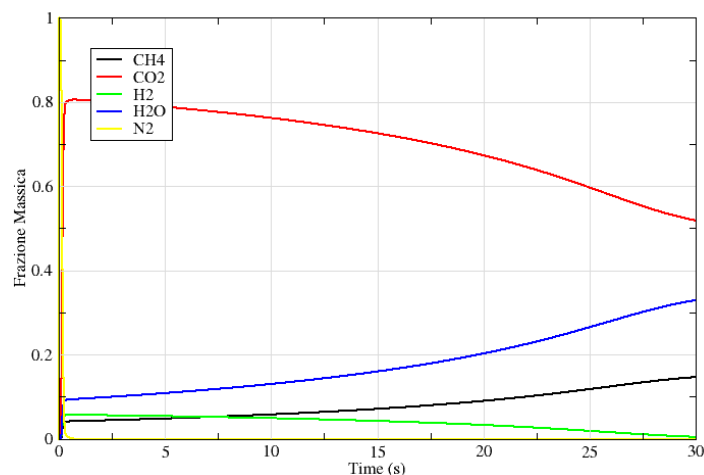
$$k_0 = 35495 \Theta_f^{-1} e^{-7948/T} m_{\text{Ruthenium}}^1$$



Nell'immagine precedente, relativa all'ipotesi di efficienza di metanazione, si nota la portata in massa di H₂ all'uscita del reattore. Se l'efficienza fosse massima, non ci sarebbero tracce di H₂ in quanto sarebbe stato tutto impiegato per convertire la CO₂ in CH₄. Quindi quello che rimane è frutto dell'inefficienza del sistema.



Risultati Metanazione



Plot composizione Gas in uscita

Dalle immagini soprariportate, si può valutare il raggiungimento dell'obiettivo prefissato. La reazione si attiva non appena il gas ha raggiunto il catalizzatore. Si nota inoltre che la temperatura del gas aumenta a valle del letto catalitico, in quanto la reazione è esotermica.

La reazione chimica non impone grandi aggravii ai tempi di calcolo che sono comunque di qualche ora (2-3) su una normale workstation.

Avendo testato e validato il codice su geometrie semplificate, si può ora procedere con la trattazione dell'ipotesi 1 sul caso reale.

Utilizzeremo ora BarracudaVR per studiare il sistema di riconversione della CO₂ all'interno del forno per piastrelle. Per procedere risulta necessario conoscere i seguenti punti:

- identificare la zona del forno termicamente compatibile ($100\text{ °C} < T < 300\text{ °C}$)
- ipotizzare un sistema di iniezione di H₂ e posizionarlo nella zona d'interesse
- definire la "strategia di catalizzazione" (ovvero griglia fissa o letto fluido) ed il suo posizionamento.

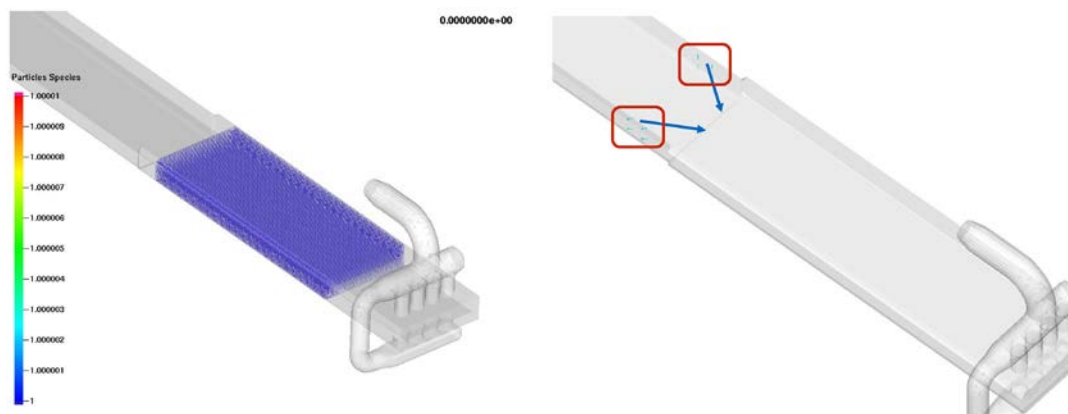
Una volta costruito, il modello di forno con reazione di metanazione potrà fornire anche le seguenti informazioni:

- verificare il grado di conversione della CO₂ in Metano.
- valutare diverse strategie per il posizionamento del catalizzatore.

- valutare diverse strategie per l'iniezione dell'idrogeno.

Il modello di calcolo comprenderà:

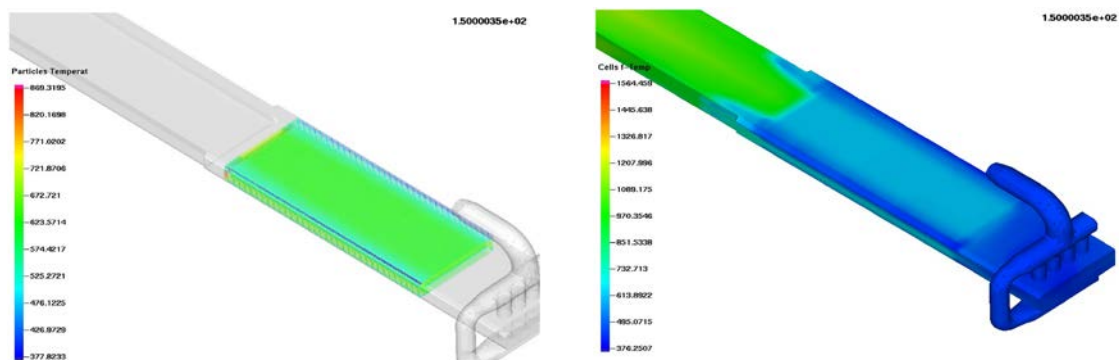
- iniezione di idrogeno mediante 8 iniettori posizionati sulle pareti laterali ed orientati a 45° in favore della corrente dei gas combusti.
- griglia fissa di particolato catalizzatore (a base di Rutenio) posizionata nella zona a bassa temperatura del forno.



Modello primo tentativo, posizione griglia catalizzatore e posizione iniettori H2

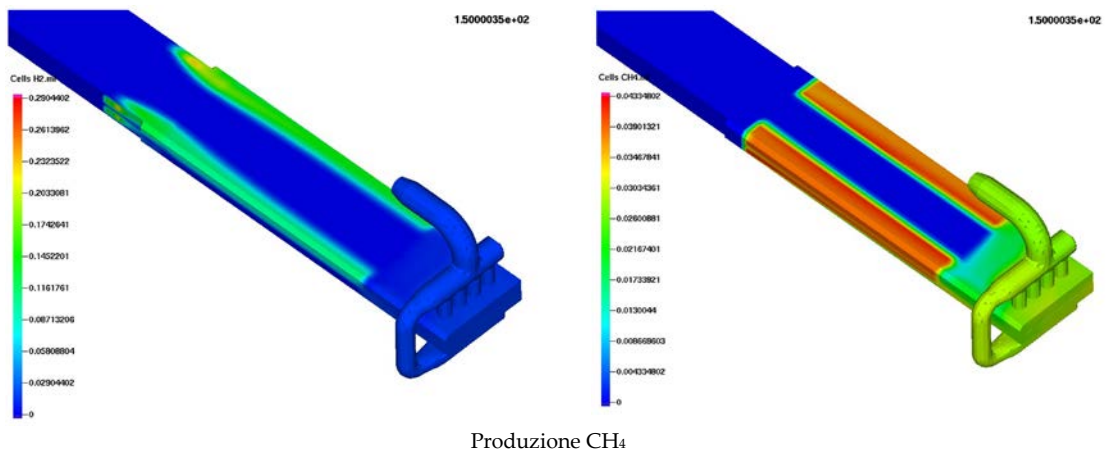
Va evidenziato che la presenza del catalizzatore e la stessa reazione di metanazione (moderatamente esotermica) hanno un impatto sulla termica complessiva del forno.

Da un lato infatti il catalizzatore tende a riscaldarsi, dall'altro il gas si raffredda maggiormente nel caso senza metanazione

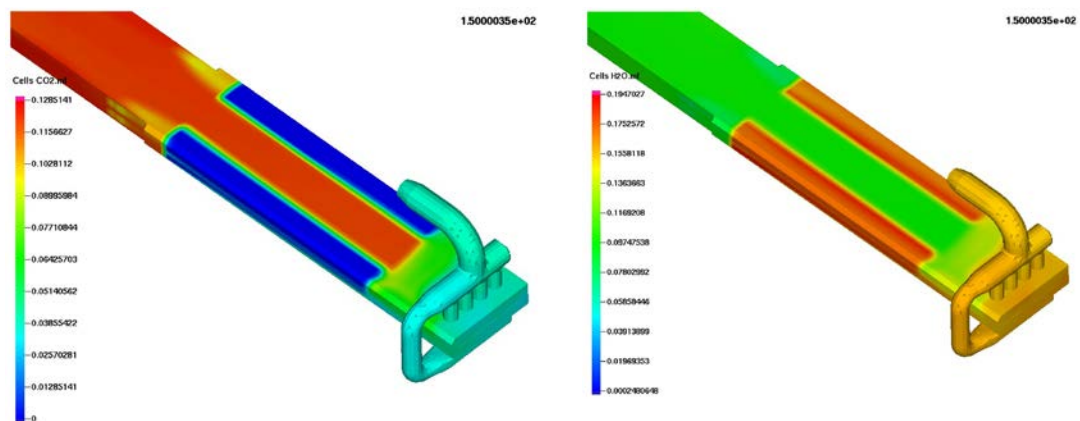


Distribuzione temperature

L'iniezione dai fianchi del forno non garantisce una distribuzione omogenea di H2 all'ingresso della griglia di catalizzazione. Questo implica che la reazione di metanazione avviene solo nelle zone laterali della griglia stessa.

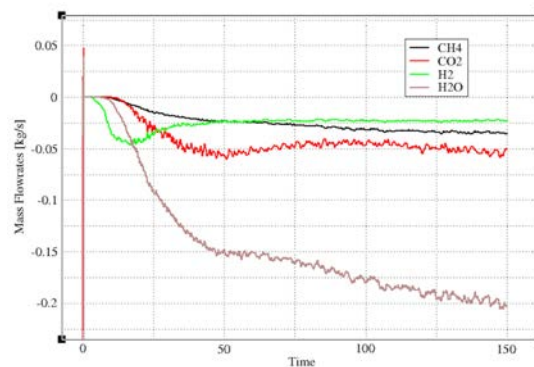


Come prevedibile, si riscontra una riduzione della concentrazione di CO₂ solo sui fianchi della zona catalizzata. Si noti anche che la concentrazione di H₂O aumenta localmente nella zona di reazione, essendo l'acqua l'altro prodotto della reazione.



Portate al camino

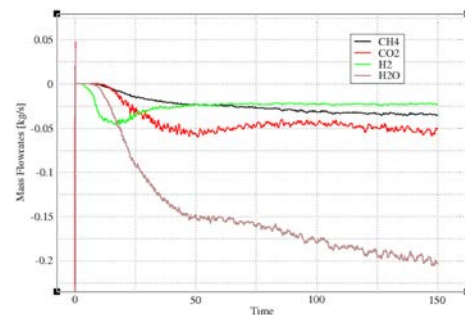
- Il grafico riporta le portate in kg/s dei vari componenti in funzione del tempo.
- Si nota che a partire dai 50s la portata di H₂ si stabilizza intorno ad un valore di circa 0.023 kg/s (ovvero circa il 57% del H₂ iniettato)



- Allo stesso tempo, la portata di CH_4 cresce e si stabilizza intorno a 0.035 Kg/s

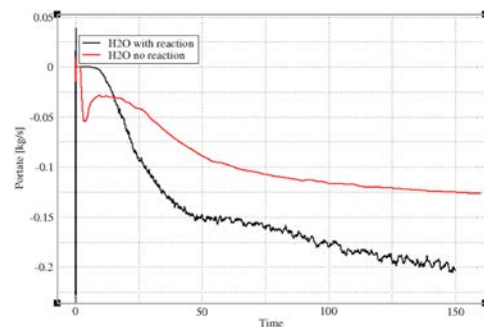
Grado di conversione

- Per valutare il grado di conversione della CO_2 , nel grafico sono rappresentate le portate di CO_2 con e senza reazione, per lo stesso modello di forno.
- si valuta in questo caso un grado di conversione del 67% circa.



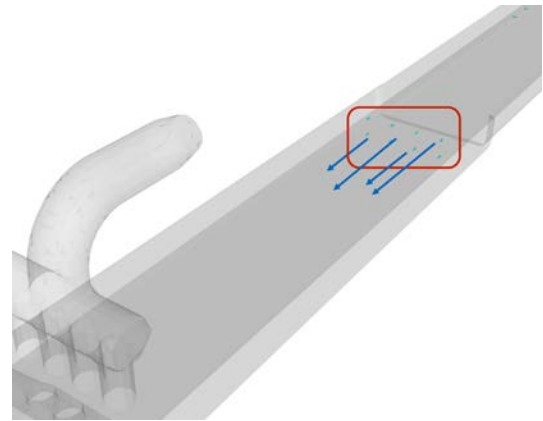
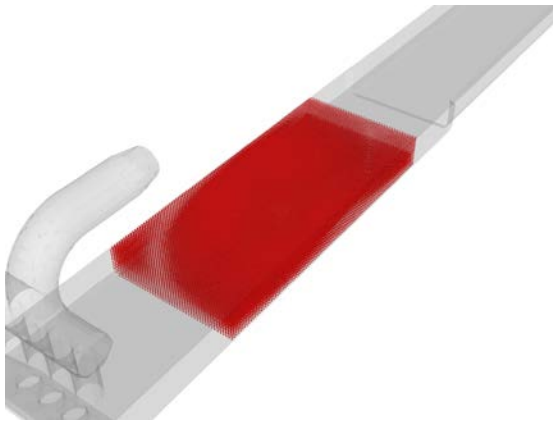
Produzione di H_2O

- Infine, va considerata anche la produzione di acqua che risulta sia dalla combustione dei bruciatori, sia dalla stessa reazione di metanazione.
- nel caso in esame, si vede che la portata di H_2O viene quasi raddoppiata dalla metanazione.



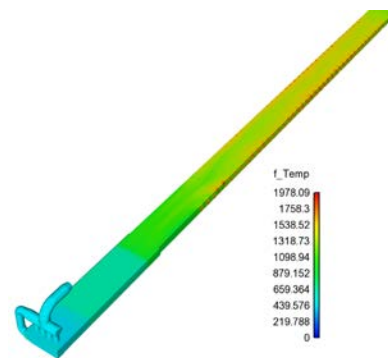
Ipotesi 1b: conversione della CO_2 e Metanazione all'interno del forno variando la posizione degli iniettori di H_2 rispetto a ipotesi 1a

Si è quindi costruito un secondo modello di calcolo, con la seguente modifica: iniezione di idrogeno mediante 8 iniettori posizionati all'interno del flusso e paralleli alla direzione dello stesso.



Temperature

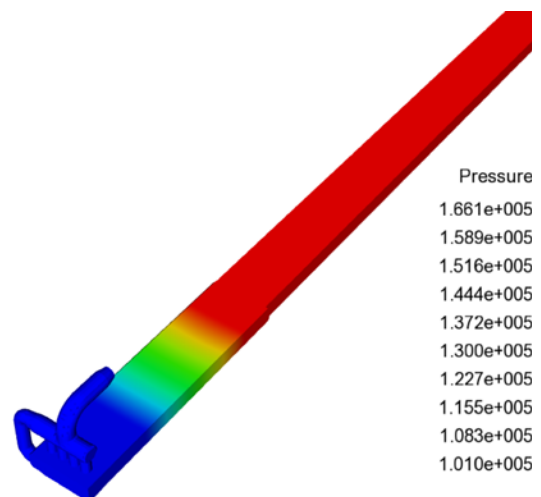
Dal punto di vista del campo di temperature, si nota che il nuovo sistema di iniezione dell'H₂ contribuisce a rendere più omogeneo il campo di temperature.



Pressioni

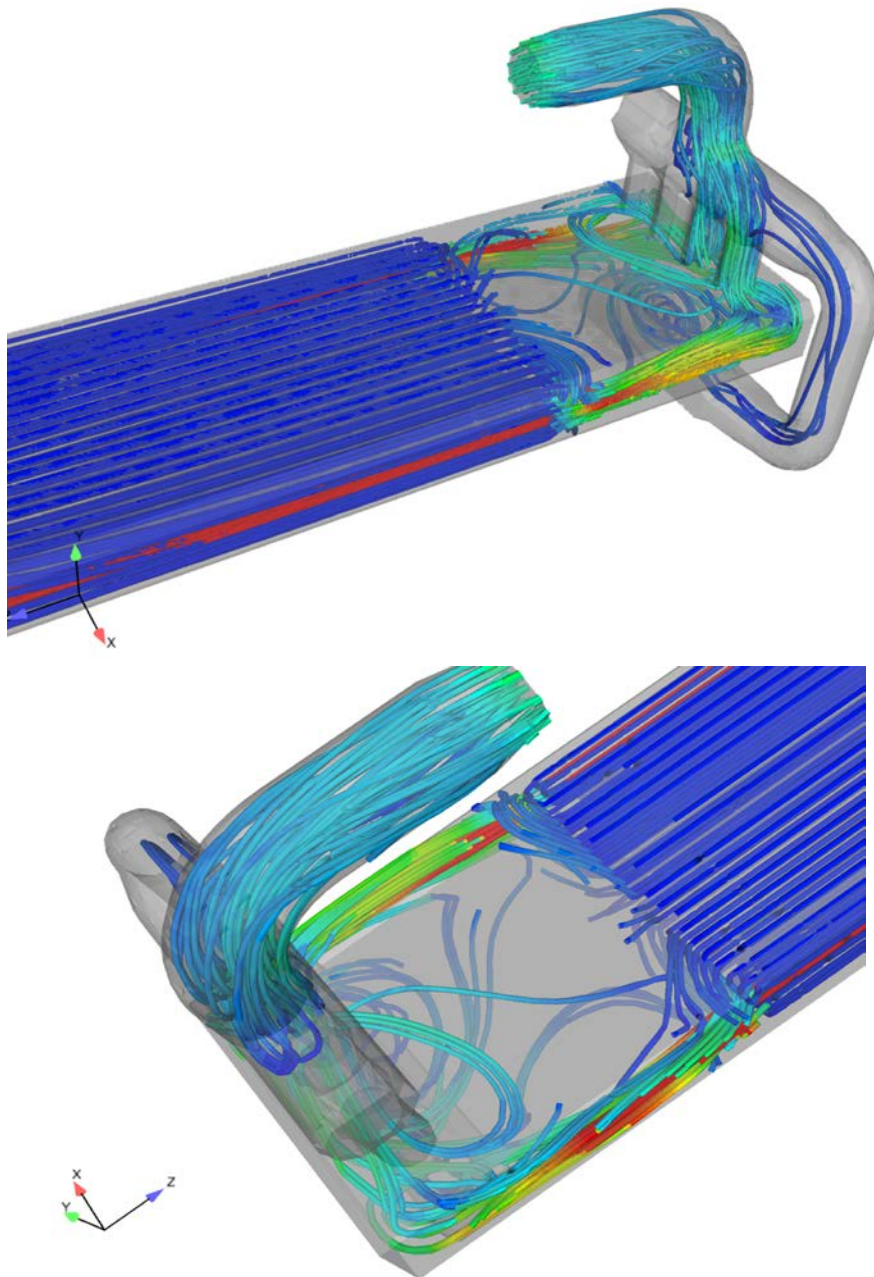
Dal punto di vista del campo di pressioni, va considerato che la griglia di particolato catalizzatore ha un rapporto pieno/vuoto di 0.4. Questo induce una caduta di pressione importante per il sistema forno, che andrebbe supportata con un potenziamento dei sistemi di movimentazione dell'aria.

Come ulteriore indirizzo di indagine, si può immaginare di impostare una campagna di analisi volta all'identificazione del rapporto pieno/vuoto ottimo rispetto alla perdite di pressione ed al grado di conversione della reazione di Metanazione.



Campi di velocità

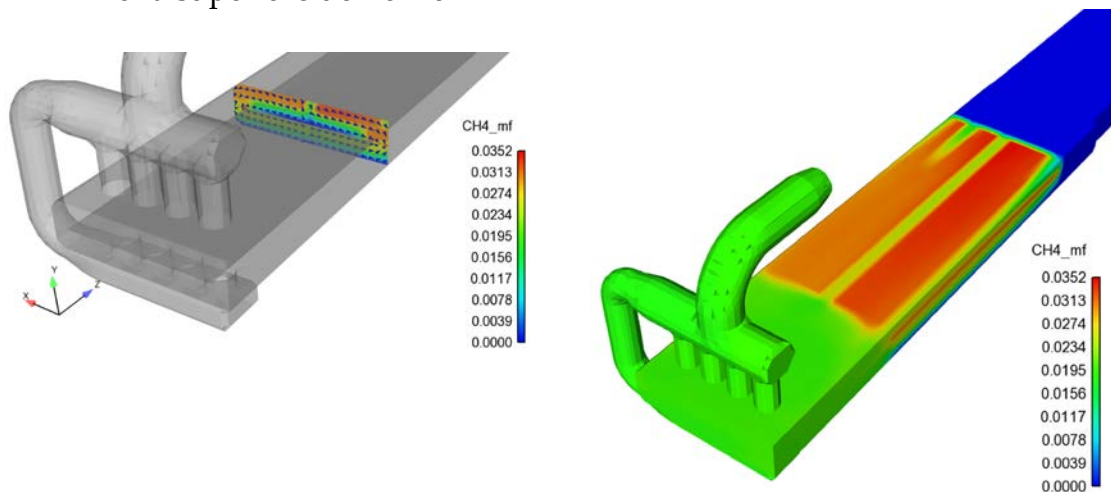
Si noti che l'inserimento della griglia di catalizzatore induce anche una modifica importante nella circolazione del forno creando una zona di ristagno a valle della griglia stessa



Produzione CH₄

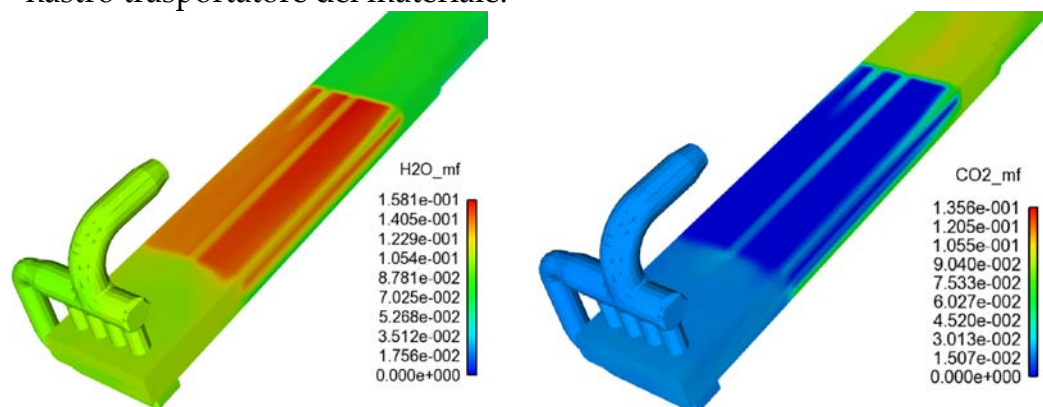
- La produzione del CH₄ risulta più omogenea che nel primo tentativo.
- Si noti comunque che a causa dell'asimmetria del condotto di estrazione, il flusso tende ad una asimmetria trasversale (asse X) ed anche verticale, come evidenziato dal campo di vettori sulle sezioni.

- Questo implica che la reazione avviene con maggiore intensità nella zona superiore del forno



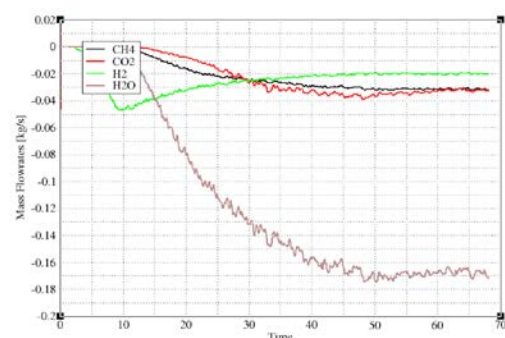
Riduzione CO2 e Produzione H2O

- Si nota innanzitutto che rispetto al primo tentativo la reazione avviene in modo più omogeneo sfruttando l'intera griglia di catalizzazione.
- Si noti comunque che come già rilevato precedentemente, la reazione avviene principalmente nella parte superiore del forno, al di sopra del nastro trasportatore del materiale.



Portate al camino

- Il grafico riporta le portate in kg/s dei vari componenti in funzione del tempo .
- Si nota che a partire dai 50s la portata di H2 si stabilizza intorno ad un valore di circa 0.02 kg/s (ovvero circa il 50% del H2 iniettato)

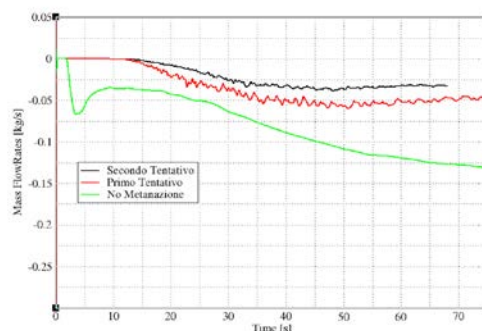


- Allo stesso tempo, la portata di CH₄ cresce e si stabilizza intorno a 0.032 Kg/s

Nota: la differenza tra il primo tentativo ed il secondo è dovuta alla migliore miscelazione

Grado di conversione

- Per valutare il grado di conversione, nel grafico sono rappresentate le portate di CO₂ con e senza reazione, per lo stesso modello di forno.
- Si nota che la modifica del sistema iniezione produce un miglioramento in termini di grado di conversione.
- Si valuta quindi in questo caso un grado di conversione del 78% circa rispetto alla portata di CO₂ nel caso senza reazione.



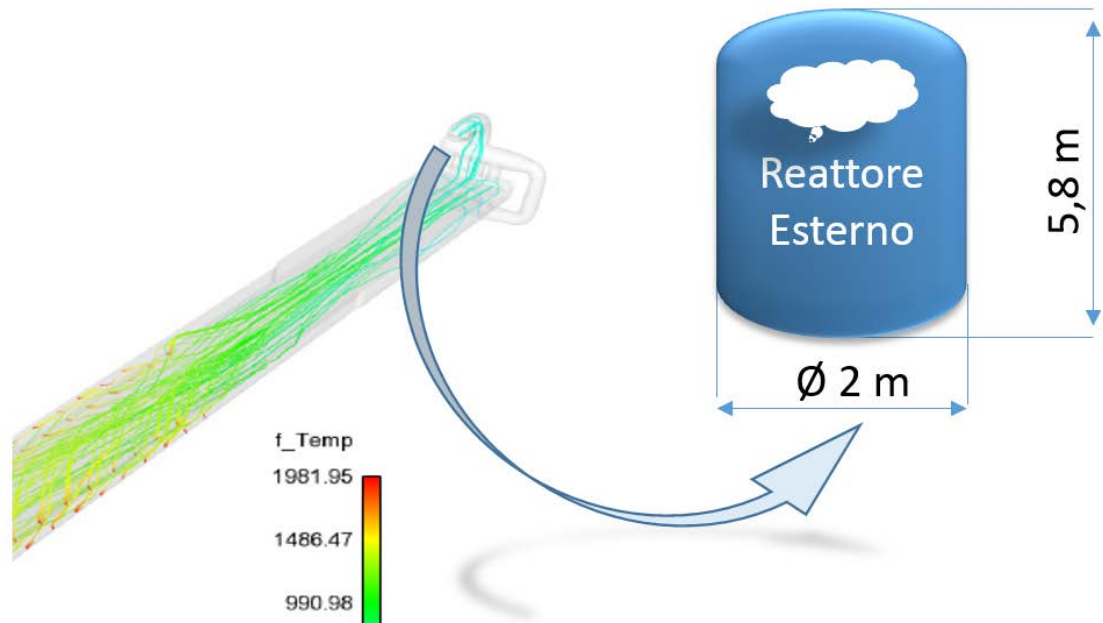
Ipotesi 2: conversione della CO₂ e Metanazione con Reattore Esterno

Nella seconda ipotesi si procederà investigando una soluzione di processo con un reattore per la metanazione collocato a valle del forno. All'interno del reattore verranno processati i fumi presi direttamente dal camino senza necessità di depurazione dei componenti idrosolubili che verranno processati all'uscita del reattore.

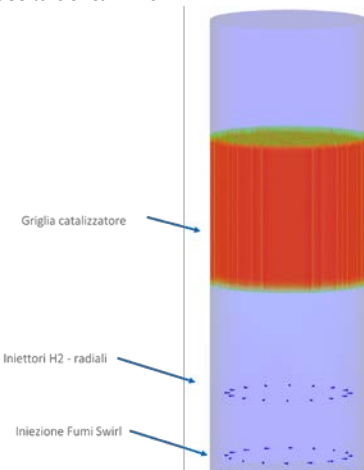
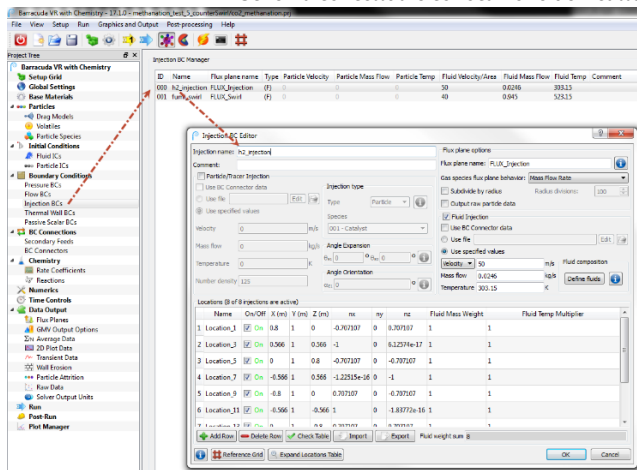
Nel reattore cilindrico, viene quindi inserita una griglia di catalizzazione (alta circa 2 metri) arricchita con il 5% in massa di Rutenio ed opportunamente iniettato H₂ in quantità stechiometrica rispetto al CO₂ presente nei fumi.

Il vantaggio di questo approccio è principalmente nel maggior controllo delle temperature dei gas e dell'evoluzione della reazione stessa.

Nello studio si è analizzato anche l'importanza del miscelamento sul grado di reazione, introducendo degli iniettori di Swirl (iniezione accessoria di fumi per favorire il miscelamento CO₂ - H₂ in prossimità del catalizzatore).



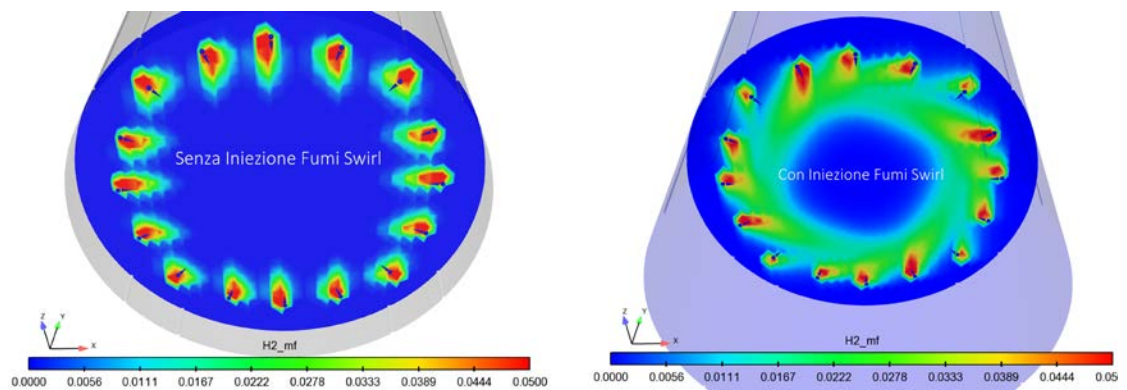
Schema concettuale collocazione del reattore all'uscita del camino



Settaggio posizione e inclinazione iniettori H2

Posizione griglia catalizzatore e posizione iniettori

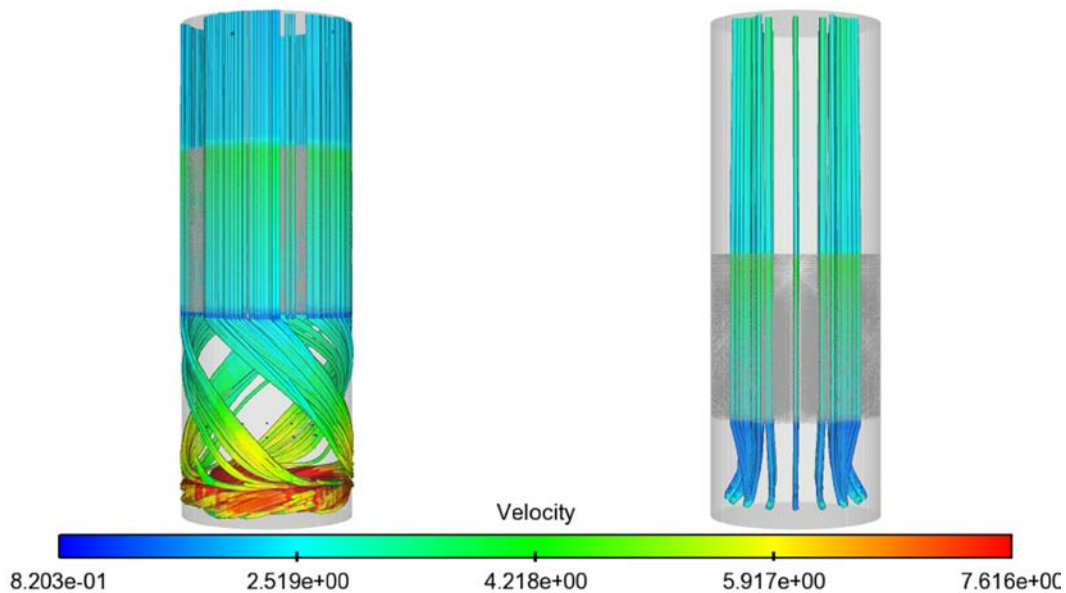
Iniezione di swirl - effetto sul miscelamento



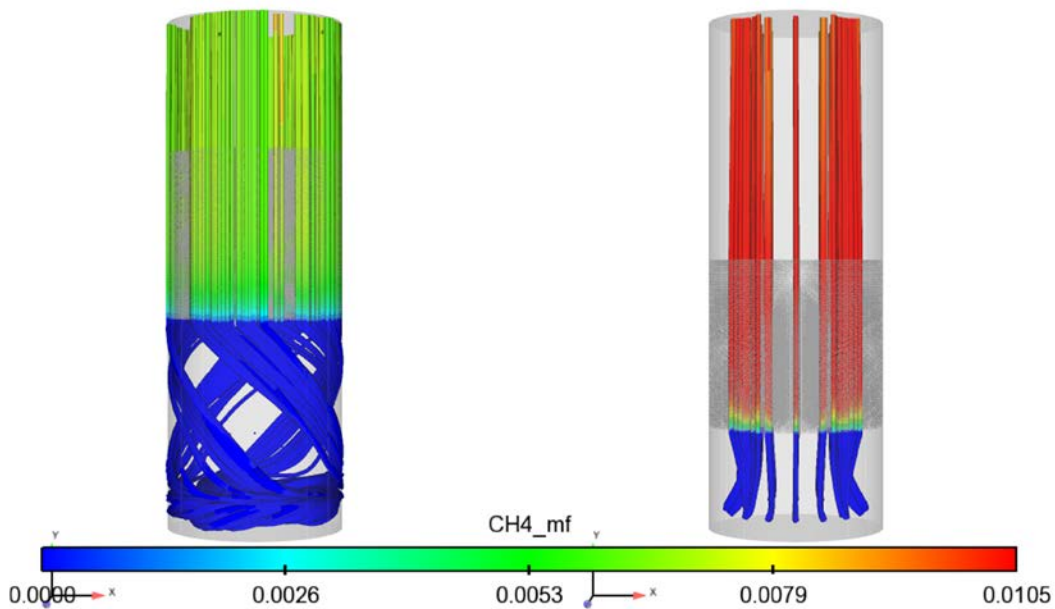
Plot Swirl Sezione inferiore

Campo di velocità con e senza swirl

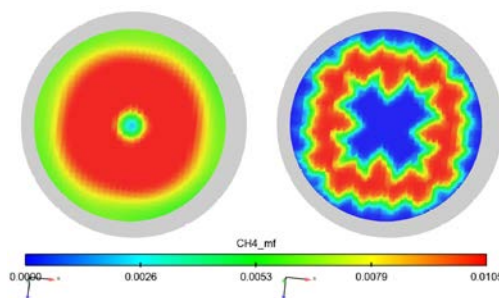
L'iniezione swirl crea un vortice nella parte bassa del reattore che estende la zona di miscelamento a tutto il reattore.



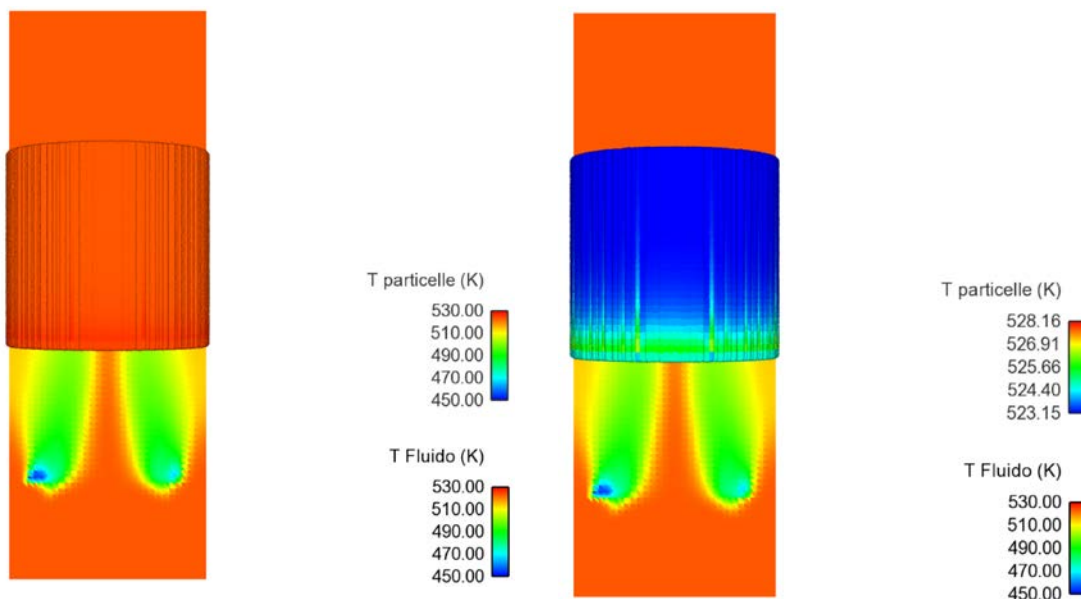
Plot Produzione di CH₄



L'effetto dello swirl è evidente in quanto rende più omogenea la reazione su tutta l'area del reattore.

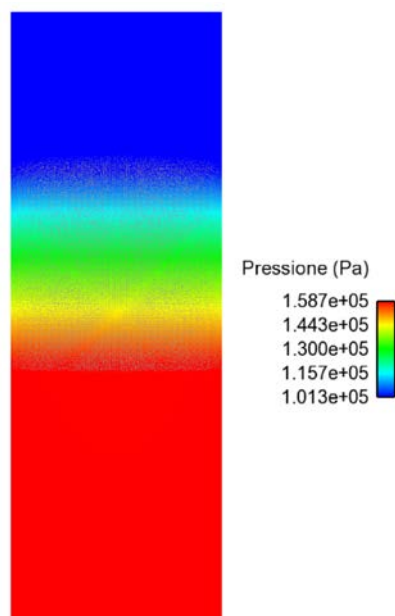


Caso con Swirl - Temperature

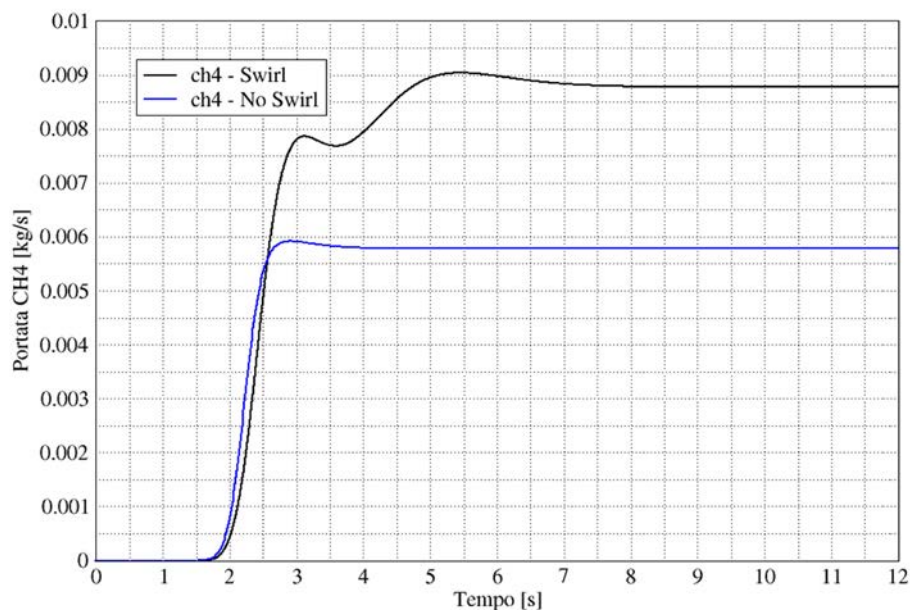


Caso con Swirl - Pressioni

Dal punto di vista del campo di pressioni, va considerato che la griglia di catalizzatore ha un rapporto pieno/vuoto di 0.4. Questo induce una caduta di pressione indicativa di 0.5 bar nel reattore. Dal punto di vista impiantistico, tale perdita di carico è troppo alta, si dovrà operare un'ottimizzazione in fase di industrializzazione del processo.

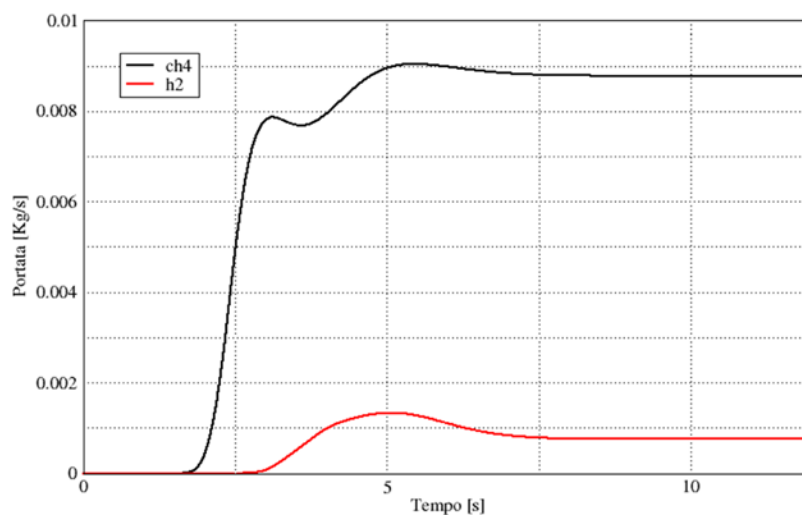


Produzione di CH₄ con e senza Swirl



- Il grafico riporta le portate in kg/s di CH₄ all'uscita del reattore per i casi con e senza iniezione di swirl.
- Emerge chiaramente che l'inserimento dello swirl ha un effetto benefico sulla produzione di CH₄.

Caso con Swirl - Portate in uscita



Il grafico sopra indica la portate in kg/s di CH₄ e H₂ per il caso con swirl. Si può notare che il valore di conversione supera l'80%. Nelle analisi future adotteremo un valore cautelativo pari al 70 %.

Caso con Swirl - Velocità di reazione

- Il grafico sotto riporta evidenza le velocità di reazione lungo la quota del reattore, vicino alla parete, nella fascia mediana e sull'asse di simmetria.
- Si venota che la gran parte della reazione avviene nella fascia cilindrica mediana.
- Questo risultato è confermato anche dalla distribuzione di CH_4 a valle della griglia di catalizzatore.

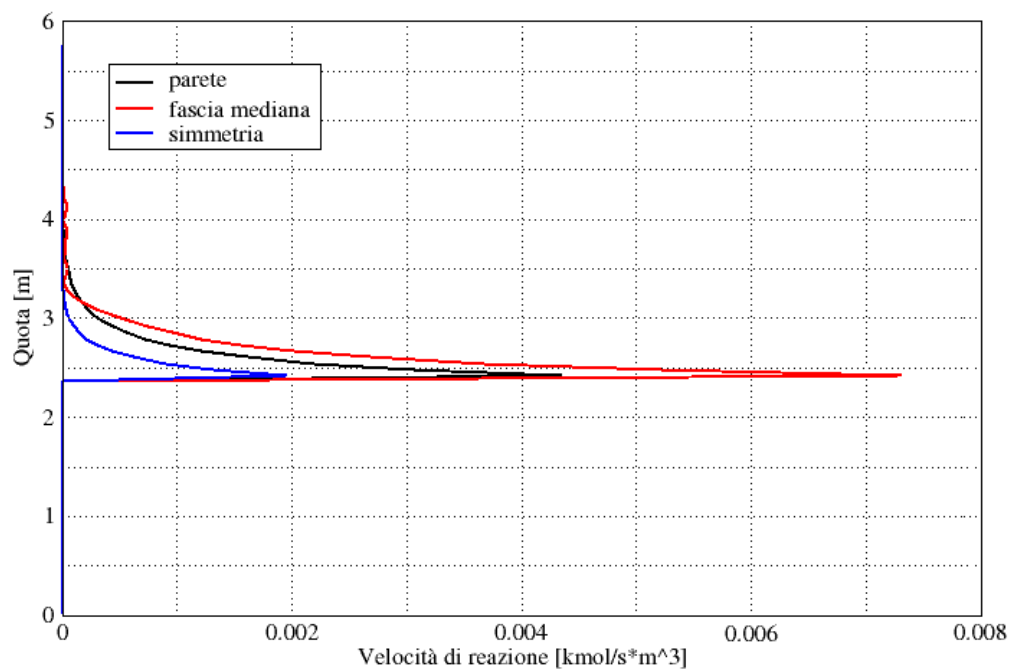
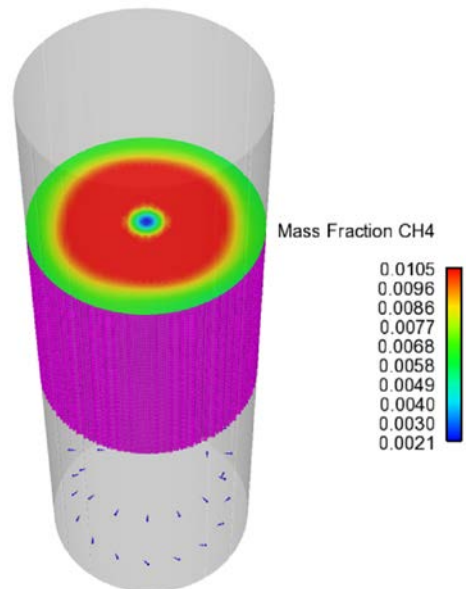
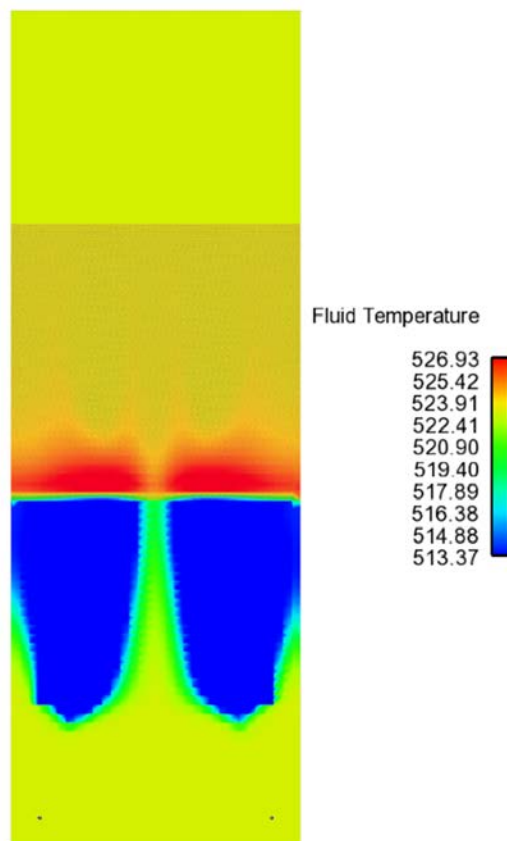


Grafico velocità di reazione lungo la quota del reattore

- Il grafico a fianco, riporta le velocità di reazione lungo la quota del reattore, rilevate vicino alla

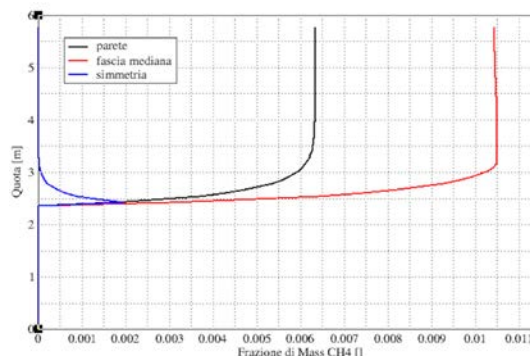
parete, nella fascia mediana e sull'asse di simmetria.

- Si nota anche che la velocità di reazione decade velocemente entro i 3 metri di quota reattore. Questo implica che la parte superiore della griglia di catalizzatore (circa il 50% della quota) non è utile alla reazione.
- questo risultato è confermato anche dal campo di temperature del gas. La reazione di metanazione è esotermica ed il riscaldamento avviene solo nella parte inferiore della griglia



Approfondimento produzione di CH₄ / perdite di carico

Esaminando la produzione di CH₄ lungo la quota del reattore, si desume che parte della griglia non collabora alla reazione, mentre costituisce sicuramente alle perdite di carico. In analisi future si dovrà migliorare la distribuzione della griglia anche per ridurre i costi del catalizzatore.



8.6 ANALISI E COMMENTI 1D – 3D

Nell'analisi delle configurazioni possibili per l'introduzione del processo di metanazione (e quindi di recupero della CO₂ prodotta dai bruciatori) nel forno per piastrelle, si è innanzitutto considerata la possibilità di avere la reazione all'interno del forno stesso.

Questo primo approccio si basa sulla considerazione che i fumi contenenti CO_2 in controcorrente al “flusso” delle piastrelle, potessero essere sfruttati, essendo già caldi, per la produzione del CH_4 .

Si è quindi costruito un modello di calcolo tridimensionale del forno comprendente un sistema di iniezione dell' H_2 ed una griglia di catalizzatore nella zona di temperature tra i 350° ed i 250° .

La simulazione 3D ha dimostrato che con questa impostazione si può ottenere un grado di conversione intorno al 75/80% del CO_2 in CH_4 .

Tuttavia, si è anche evidenziato che la presenza del catalizzatore e della reazione di metanazione costituisce una perturbazione non trascurabile del campo di pressioni e di temperature nel forno. Queste variazioni richiederebbero il potenziamento dei ventilatori che guidano la circolazione dei fumi nel forno. Soprattutto, la variazione del campo di temperature potrebbe condizionare o cambiare il processo di cottura delle piastrelle, questione che andrebbe approfondita con ulteriori analisi ed eventualmente test sperimentali. Si è anche considerato che i fumi che fluiscono nel forno sono miscele complesse e potenzialmente ancora reagenti alle temperature considerate. Di conseguenza, è presumibile che l'iniezione di H_2 comporti una cinetica più complessa e potenzialmente rischiosa rispetto alla sola reazione di metanazione considerata nel modello CFD.

Infine, si è considerato il problema della separazione del CH_4 prodotto a valle del forno. Questo processo non è immediato e potrebbe richiedere un impianto costituito da diversi componenti tra cui un desolfatore, un condensatore e un reattore a zeolite per la separazione del metano dalla CO_2 .

Si è allora ipotizzata un'architettura diversa per il processo. Si è cioè ipotizzato di impostare un sistema di trattamento dei fumi a valle del forno per separare la CO_2 dagli altri componenti (che sono in gran parte idrosolubili) e quindi di inviare la CO_2 estratta ad un reattore di metanazione.

Si è quindi costruito un modello CFD di questo reattore, sempre basato su una griglia statica di catalizzazione a base di Rutenio e con iniezione separata di H_2 .

Si sono studiate diverse soluzioni di iniezione per ottimizzare la miscelazione $\text{CO}_2\text{-H}_2$ e garantire un migliore grado di conversione che è equivalente a quello ottenuto nel primo approccio.

I risultati ottenuti e le considerazioni impiantistiche a cui si è fatto cenno, fanno preferire questa seconda soluzione per semplicità costruttiva e possibilità di gestione modulare dell'impianto.

Analizzando i risultati ottenuti con le simulazioni 3D introdotte da Barra-cuda, confrontate con le precedenti analisi monodimensionali, di cui sono stati utilizzati alcuni dati come input per quest'ultimo percorso, si può notare che è difficile studiare in modo accurato la reazione di metanazione con un codice 1D in quanto la reazione avviene all'interno di un volume in cui la tridimensionalità del flusso incide in modo fondamentale sulla miscelazione dei reagenti e quindi sul grado di conversione della reazione stessa.

Basti pensare le diverse rese delle reazioni di metanazione variando le disposizioni degli iniettori di H_2 . Per avvalorare maggiormente questo concetto, si è notata una diversa rispondenza sia osservando la reazione all'interno del forno, sia con l'inserimento degli iniettori di Swirl nel reattore esterno. Si è notato inoltre che modificando il miscelamento verranno favorite le reazioni con H_2 e CO_2 a monte del catalizzatore migliorando l'efficienza del sistema. In sintesi, laddove siano da inserire moti tridimensionali è auspicabile affrontare le simulazioni con l'apporto di un codice 3D eventualmente accoppiato ad un monodimensionale dove possibile.

Nella logica di perfezionamento si propenderà a sviluppare solo la parte del reattore in 3D per sviluppare modelli real time da integrare con le logiche H/D in The Loop S/W in the Loop. In ultimo ci si potrebbe ispirare all'automotive in cui anche i catalizzatori vengono caratterizzati e modellizzati con approcci 1D. Tale percorso potrà essere fatto solo dopo un'attenta e replicata validazione dei vari modelli menzionati e sviluppati fino ad ora

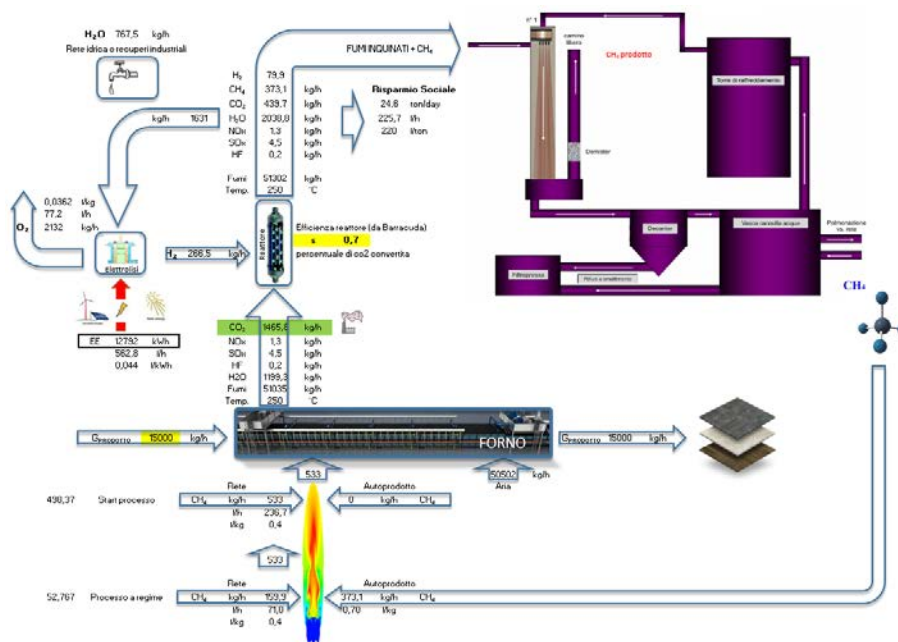
In ultimo è importante sottolineare che nel presente elaborato è stato considerato come catalizzatore il Rutenio, molto efficiente ma costoso. Consultando vari lavori presenti in bibliografia, sviluppati principalmente da un gruppo di ricerca dell'ENEA di Roma, si è notato che si potrebbe valutare la sostituzione del Rutenio con il Nichel, molto più economico. Lo svantaggio è nella velocità di reazione in funzione della superficie, in estrema sintesi se si volesse introdurre il Nichel, si dovrebbe ampliare la griglia di catalizzatore di circa le 4 volte. Dal punto di vista dei costi, sicuramente si migliorerebbe la situazione, ma dal punto di vista impiantistico sicuramente si peggiorerebbe. Non essendo lo scopo di questa ricerca ottimizzare l'impianto (da rimandare a ricerche future più accurate), ma quello di verificare se approcci di simulazione integrati possano dare un immediato riscontro anche su problematiche così complesse ed integrate, la risposta è quindi positiva, in quanto solo con l'accoppiamento di analisi monodimensionali parametriche accoppiate ad analisi 3D, si potrà ottenere il risultato ottimale da esportare come input per una progettazione puntuale ed integrata con il processo CAE.

8.7 IL PROCESSO DI METANAZIONE ED IL PANNELLO DI CONTROLLO

Analizzati i risultati dei modelli parametrici 1D accoppiati alla verifica delle reazioni chimiche svolte per la valutazione e l'ottimizzazione del processo di metanazione, siamo ora in grado di esportare tutte le informazioni relative all'impianto verso un modello semplificato, utile per visualizzare gli ordini di grandezza in gioco e per potere fare scelte strategiche.

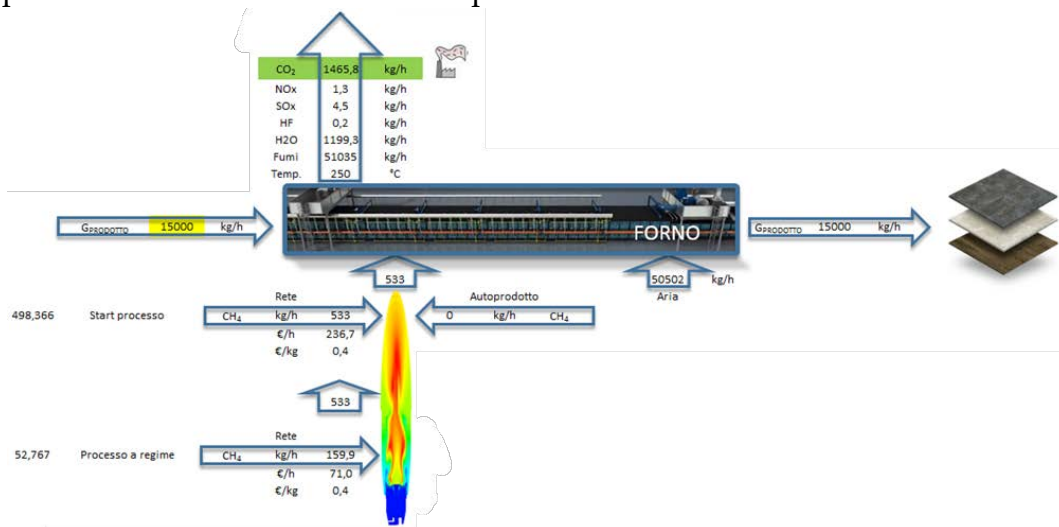
L'idea di sviluppare un "*pannello di controllo*" per sintetizzare e collegare tutti i risultati delle simulazioni numeriche con la logica d'impianto del forno ceramico, nasce dall'esigenza di visualizzare con una approssimazione dell'ordine di grandezza un riassunto significativo dell'enorme mole di dati, semplificato e fruibile senza l'utilizzo di software specifici. Sembra una contraddizione, ma non lo è proprio perché è stata messa a punto una piattaforma CAE solida: è ora possibile utilizzare un software generalista come Excel come interfaccia, valida per la visualizzazione dei dati prodotti da modelli di simulazione di fisiche complesse e validate sia sperimentalmente che con software altamente specializzati.

Non è Excel a eseguire i calcoli. Excel è solo il collettore dei dati provenienti dai molteplici modelli fisici impiegati! Il vantaggio nell'aver un foglio di calcolo unico comprensivo di tutte le grandezze in gioco deriva dal fatto che porsi le domande giuste è solo la prima parte della soluzione; bisogna poi sviluppare le tecniche e i concetti necessari per ottenere le risposte. Il foglio di calcolo aiuta nelle fasi iniziali di un progetto a fissare le idee individuando i principali aspetti di causa ed effetto. Lo studio prosegue con software più sofisticati e specializzati per poi concludere il lavoro su un foglio elettronico sul quale sintetizzare le conclusioni. Il foglio di calcolo sintetizza l'idea originale del progetto, nel caso specifico la riduzione delle emissioni prodotte dai forni utilizzati in ceramica, essendo gli specialisti del settore consapevoli della necessità di contribuire al rispetto della natura, senza con ciò precludersi lo sviluppo e il progresso. Aiutati dalla rappresentazione grafica funzionale, si pongono in relazione i diversi componenti dell'impianto. Nel foglio di calcolo di seguito descritto, appositamente realizzato con interfaccia grafica per migliorare la consultazione, è possibile trovare tutte le grandezze in entrata e quelle in uscita. Il tutto viene corredato da un'analisi economica necessaria per verificare la sostenibilità del progetto in funzione del costo dell'energia elettrica necessaria alla produzione di idrogeno.



Pannello di controllo Impianto

Al centro dell'illustrazione è presente il forno, componente principale, del quale si vuole limitare il carico inquinante verso l'ambiente.

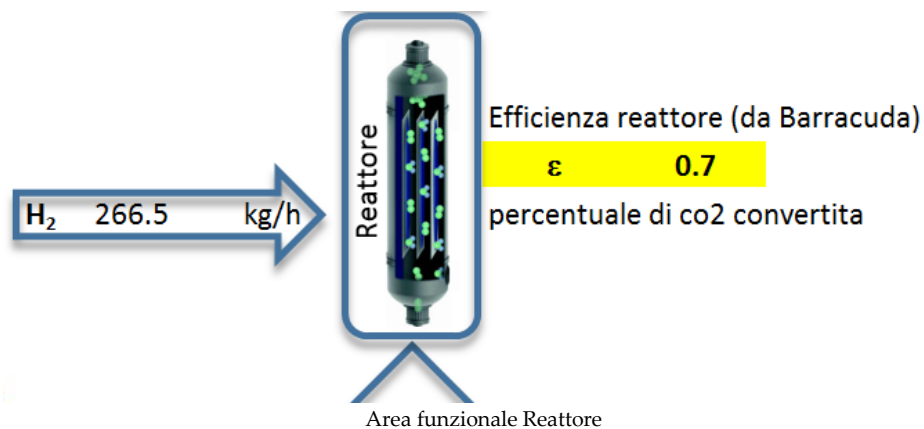


Area funzionale Forno

Nel forno si identificano tre punti:

- Il flusso produttivo in ingresso, espresso in unità di massa su unità di tempo, al variare di questo parametro si aggiornano gli altri parametri ad esso collegati direttamente ed indirettamente.
- Il flusso produttivo in uscita.
- La quantità di fumi esausti emessi attraverso il camino.

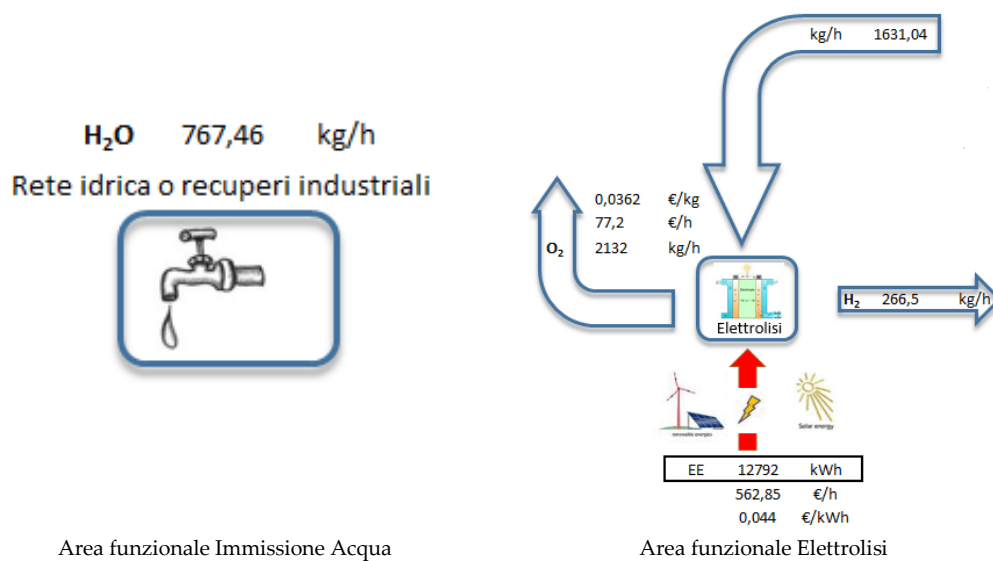
Il blocco funzionale che segue è il gruppo di intercettazione dei fumi. Il cuore di questo blocco è il rettore, anche in questo caso si individuano tre porte:



- Ingresso dei fumi esausti.
- Ingresso dell'idrogeno necessario alla trasformazione della CO_2 in CH_4 sintetico.
- Uscita dei fumi in parte trasformati nella loro composizione chimica, sostituendo parte della CO_2 con CH_4 e con incremento della H_2O .

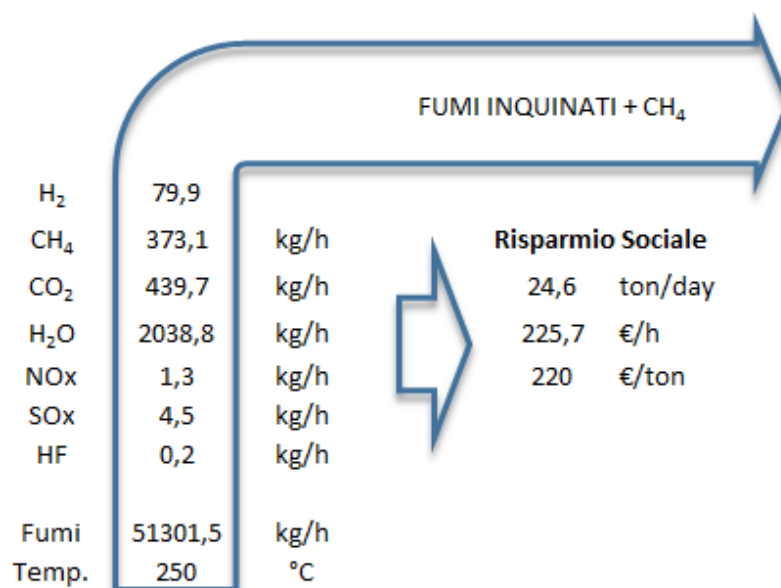
Si schematizza l'impianto di produzione per elettrolisi dell'idrogeno.

In questa rappresentazione si individuano:



- Ingresso acqua, proveniente da rete idrica o recuperi industriali.
- Uscita del gas d'Idrogeno.
- Uscita di gas d'ossigeno.

Fra i prodotti dell'elettrolisi non solo l'idrogeno, ma anche l'ossigeno, concorre nell'abbattimento degli inquinanti, infatti impiegando l'ossigeno in concorso con l'aria di combustione si riducono sensibilmente le emissioni di NO_x .



Area funzionale valutazione emissioni prima della separazione

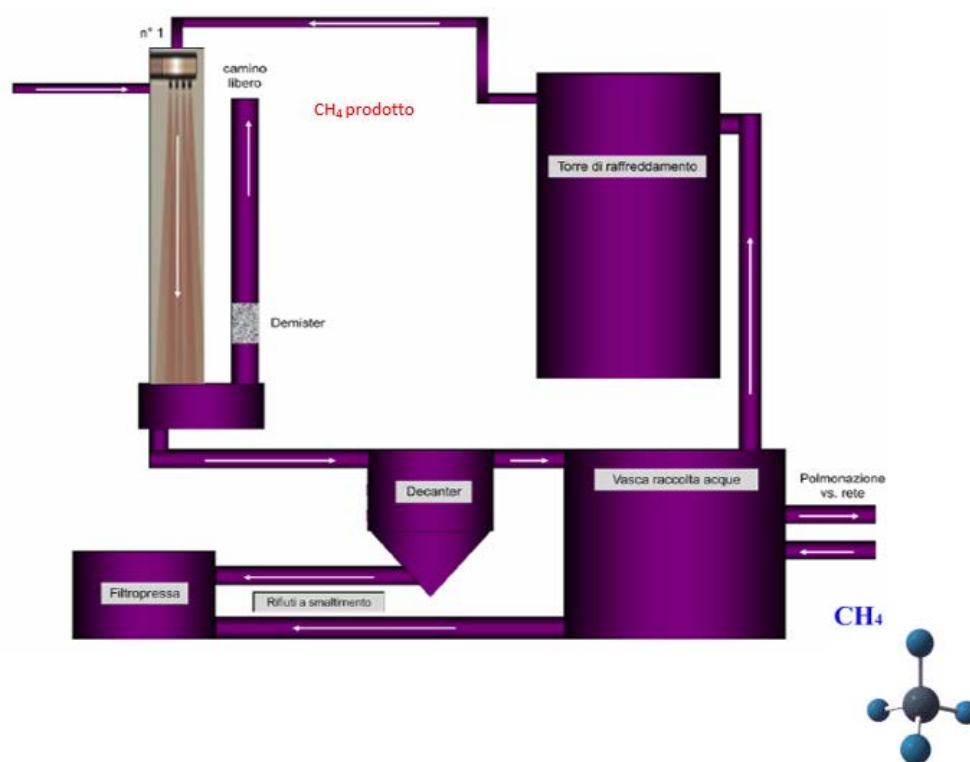
Fissati in maniera autonoma alcuni parametri, in particolare i costi specifici delle fonti energetiche, il parametro che scatena il calcolo è il flusso produttivo espresso in unità di massa su unità di tempo.

Il foglio di calcolo è suddiviso in aree funzionali e rappresentazioni delle leggi che le legano:

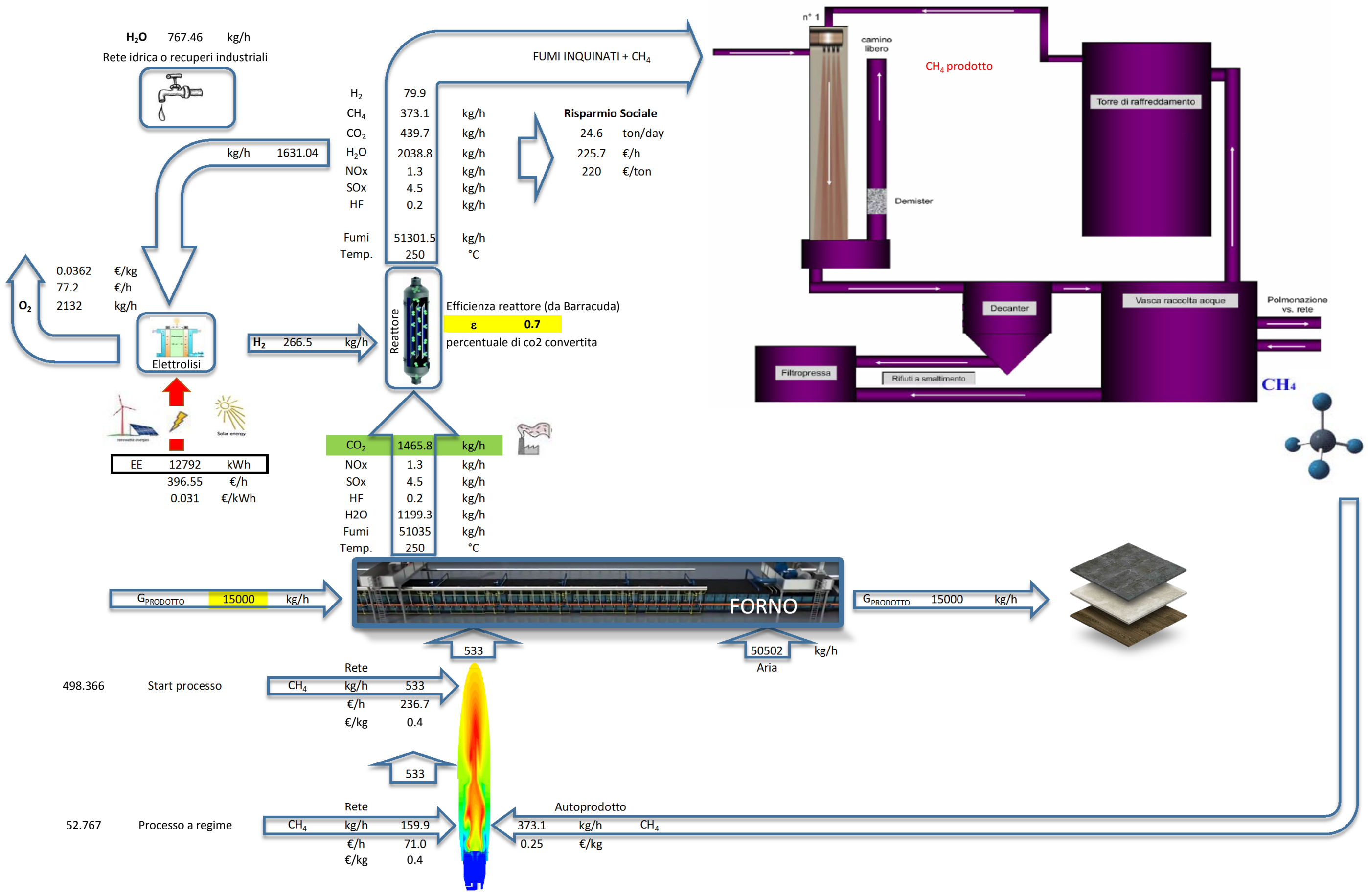
- Totale Impianto
- Area funzionale Forno
- Area funzionale Reattore
- Area funzionale Elettrolisi
- Area funzionale immissione acqua
- Area funzionale valutazione emissioni prima della separazione
- Area funzionale Scruber⁸¹

⁸¹ Gli "scrubbers" sono utilizzati per la rimozione di particolati e/o gas inquinanti da scarichi di impianti industriali. Tradizionalmente gli Scrubber sono stati intesi come dei sistemi di rimozione di inquinanti da correnti gassose per mezzo di getti o correnti liquide fatte interagire con la corrente gassosa.

Una più recente classe di applicazione di tali sistemi prevede l'utilizzo reagenti secchi (o di sospensioni in acqua di reagenti secchi) iniettati nella corrente gassosa al fine di rimuovere, per mezzo di una reazione chimica, eventuali inquinanti (tipicamente gas acidi) dalla corrente.

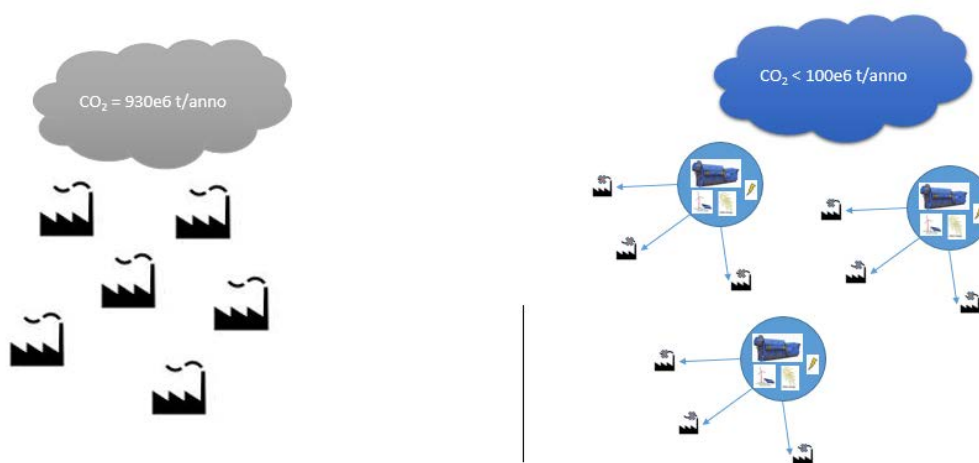


Area funzionale Scruber



8.8 IDEE PER IL FUTURO

Il concetto verte nella centralizzazione degli impianti sotto forma di “Cluster” di Ceramiche. Da una prima analisi, sembra che l’efficienza aumenti all’aumentare della taglia degli impianti di cogenerazione; si potrebbe pertanto ipotizzare in futuro (laddove la logistica lo permetta), di creare grandi impianti di cogenerazione, ad uso esclusivo dei complessi industriali, da cui si potrebbe ricavare ad esempio acqua calda per uso domestico, metano di sintesi e O₂.



Area funzionale ipotesi Cluster Ceramiche con cogeneratore

Per valutare se l’idea possa essere percorribile, abbiamo verificato come sono dislocate in Italia le aziende produttrici di piastrelle.

Di seguito, è riportata la tabella contenente i valori “riassuntivi” di produzione di gres porcellanato e delle relative emissioni di CO₂ trasformabili in CH₄. Si può notare che, nella zona di Sassuolo (RE), è concentrato quasi l’80 % dell’Industria Ceramica italiana⁸² con conseguente elevata produzione di inquinanti.

Appare di tutta evidenza che, riuscendo a trasformare la quasi totalità della CO₂ emessa dal polo industriale in materia prima fruibile per produrre metano di sintesi, ci troveremmo di fronte all’ipotesi di poter realisticamente pensare a una centralizzazione impiantistica integrata.

Sfruttando, infatti, il contesto ceramico di Sassuolo, si potrebbero sperimentare tecnologie impiantistiche di cattura e riconversione del diossido di carbonio con conseguente successivo utilizzo di tutti i sottoprodotti che si verrebbero a

⁸² Indagine Statistica Nazionale sulle Piastrelle di Ceramica - 2016, 36^a edizione, riferita all’anno 2015

generare (es.: O₂, acqua calda a costo 0, calore, ecc ...), da poter poi esportare su larga scala ad altri ambiti industriali. Pur essendo la nostra penisola di dimensioni ridotte, sono presenti contesti industriali fortemente energivori ed inquinanti. Basti pensare, per esempio, ai complessi siderurgici e petrolchimici, alle centrali termoelettriche e di teleriscaldamento, agli innumerevoli biodigestori, o ancora alle centrali geotermiche ad alta entalpia.

Sulla base di quanto poc' anzi illustrato si rende necessario quindi trasformare tale contesto industriale, giustamente in continua crescita per progresso tecnologico, in quella risorsa mancante che sta limitando la crescita italiana. La tecnologia deve venire in aiuto e non essere essa stessa causa di molteplici problemi riguardanti l'uomo o l'ambiente. Concetto ovvio, questo, ma non sempre rispettato negli ultimi 100 anni.

Occorre trasformare, grazie agli approcci matematici LCA, ciò che è dannoso in una risorsa. La logistica industriale italiana potrebbe contribuire in tal senso, data la presenza in spazi ridotti di industrie, agricoltura e centri abitati.

Ipotizziamo quindi di esportare a tutti i contesti produttivi che generano CO₂ la tecnologia impiantistica di cattura e conversione diretta del diossido di carbonio: si avrebbero contemporaneamente un abbattimento delle emissioni e produzione di combustibili facilmente stoccabili (metano e metanolo). L'auto-produzione di combustibili limiterebbe inoltre l'acquisto degli stessi da paesi esteri con immediate ricadute positive.

Concettualmente si farebbe un "balzo" indietro per avanzare, si eliminerebbero, cioè, gli oleodotti necessari per importare combustibile poiché si riuscirebbero a sfruttare le risorse della terra direttamente in loco.

Perché non usiamo il geotermico? Perché non utilizziamo l'idroelettrico diffuso? Perché abbiamo incentivato impianti fotovoltaici a terra su zone agricole e non su terreni non produttivi? Perché continuiamo a tenere le centrali a carbone a basso regime e acquistiamo a basso costo l'energia elettrica dall'estero?

Utilizzando l'energia elettrica per produrre idrogeno, potremmo massimizzare ed ottimizzare tutti questi approcci stoccando la stessa in energia chimica.

Ricordiamo che, pur non essendo ancora diffusa, è stata approvata già da qualche anno la legge che regola la produzione e la vendita di Biometano⁸³.

⁸³ Vedi Appendice Biogas

In futuro, la produzione di CH₄ sintetico potrebbe diventare un business oltre che un metodo per abbattere l'effetto serra in una logica di incentivi⁸⁴.

Oltre alle regolamentazioni sul Biogas, stanno aumentando le leggi atte a sensibilizzare il mondo industriale verso una sostenibilità maggiore. A tal proposito, va ricordato Il Sistema europeo di scambio di quote di emissione (EU ETS)⁸⁵ che sicuramente influenzerà sempre di più il mondo industriale.

In estrema sintesi, dalla ricerca in oggetto è emerso che la via per trasformare la CO₂ in risorsa esiste ed è applicabile senza stravolgere tecnologie già in uso. Nella ricerca e nei relativi modelli matematici, si è fatto uso di catalizzatori basati sul Rutenio, costosi ma consolidati e facilmente utilizzabili in futuro come riferimento per ottimizzare approcci più economici con altri catalizzatori (es. Nichel).

Perché non tentare di creare in forma numerica un modello che simuli l'utilizzo globale delle risorse al fine di appianare i contesti politici e gli interessi dei singoli?

Quella CO₂ considerata tanto dannosa per il nostro ambiente va direttamente stoccata insieme all'idrogeno, a sua volta prodotto utilizzando energie rinnovabili che sarebbero andate perse, per ricavarne combustibili facilmente stoccabili e riutilizzabili nel tempo, ma... poco per volta, con coscienza...E potremmo ancora farcela.

Nelle tabelle e nei grafici sotto riportati sono contenute le grandezze caratteristiche e le ipotesi che derivano dai modelli matematici assunti:

⁸⁴ Vedi Appendice Biogas - Tariffa onnicomprensiva

⁸⁵ Vedi Appendice EU ETS

| Tabella riassuntiva input/output Forno | | |
|---|----------|-----------------|
| Descrizione | Quantità | Unità di misura |
| Produzione annuale piastrelle - italiana | 6.62E+09 | kg/anno |
| Produzione annuale piastrelle - Provincie di Modena e Reggio Emilia | 5.23E+09 | kg/anno |
| Produzione annuale piastrelle - Resto d'Italia | 1.39E+09 | kg/anno |
| CH4 consumato dalle Ceramiche nelle Provincie di Modena e Reggio Emilia | 1.86E+08 | kg/anno |
| Emissione di CO ₂ nelle Provincie di Modena e Reggio Emilia | 5.12E+08 | kg/anno |
| Quantità di H2 necessaria per la produzione di CH4 di sintesi | 9.30E+07 | kg/anno |
| O2 Residuo disponibile dopo elettrolisi | 7.44E+08 | kg/anno |
| Energia elettrica necessaria per produzione H2 | 4.47E+09 | kWh |
| Quantità di CH4 ottenibili di sintesi | 1.86E+08 | kg/anno |

Tabella riassuntiva Input/Output

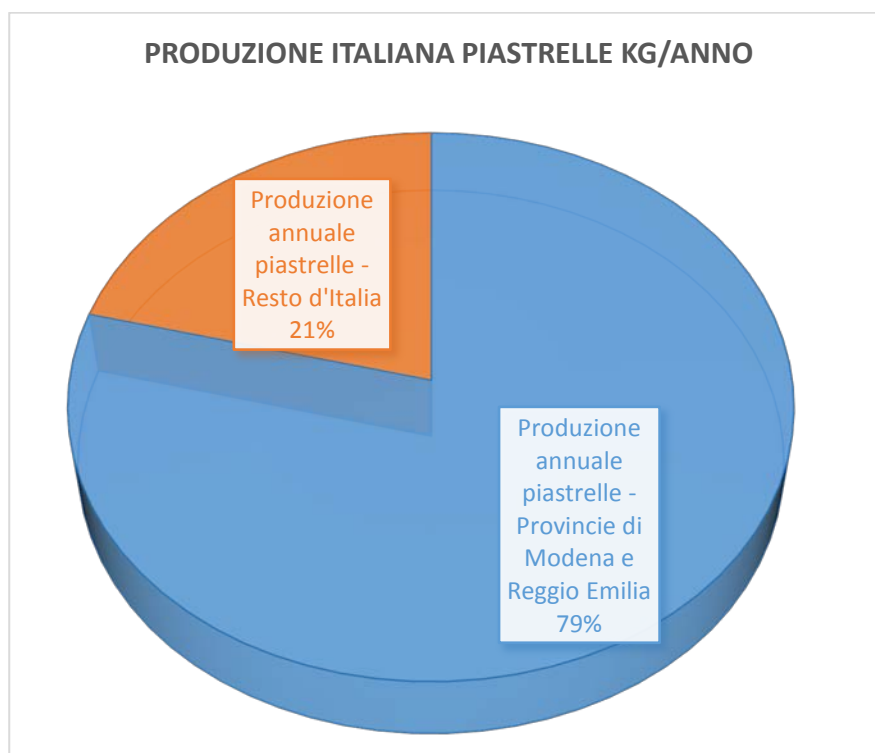
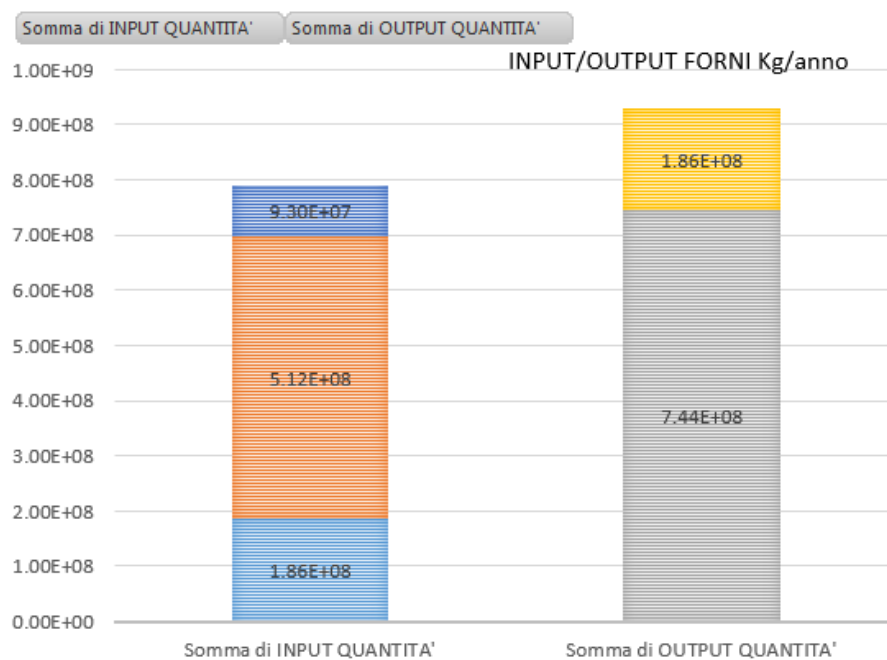


Grafico percentuale produzione piastrelle provincia RE Vs. Italia



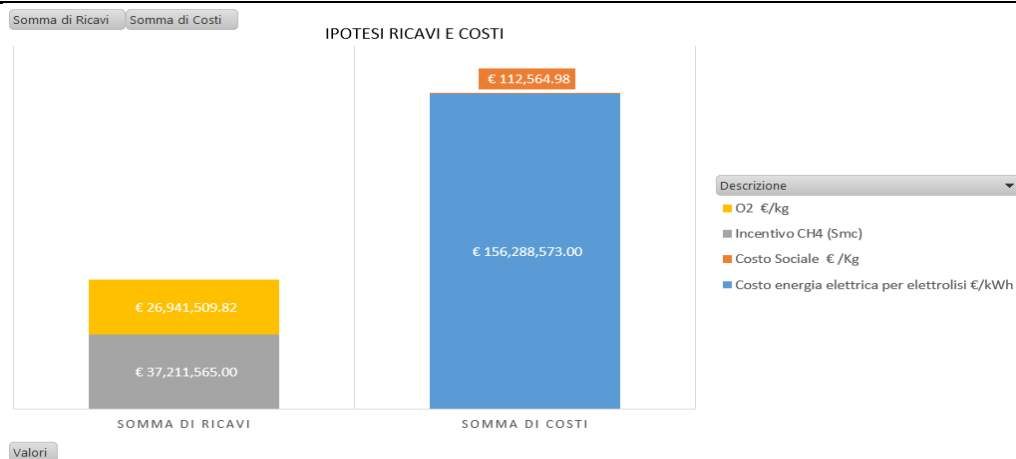
- Descrizione
- Quantità di H2 necessaria per la produzione di CH4 di sintesi
 - Quantità di CH4 ottenibili di sintesi
 - O2 Residuo disponibile dopo elettrolisi
 - Emissioni di CO2 nelle Provincie di Modena e Reggio Emilia
 - CH4 consumato dalle Ceramiche nelle Provincie di Modena e Reggio Emilia

Grafico riassuntivo Input/Output

| Tabella riassuntiva ipotesi produzione | | | |
|--|----------|---------|--|
| Acqua calda | | | |
| Descrizione | kg/anno | | |
| Metano equivalente | 2.15E+08 | kg/anno | metano necessario a scaldare H2O a 50 gradi per uso civile |
| Popolazione Provincia RE | 5.00E+05 | | |
| Metano consumato Provincia RE | 2.69E+07 | | kg/anno CH4 consumati provincia RE per dell'acqua calda uso civile |
| Delta metano consumato/equivalente | 1.88E+08 | | L'eccedenza di metano |

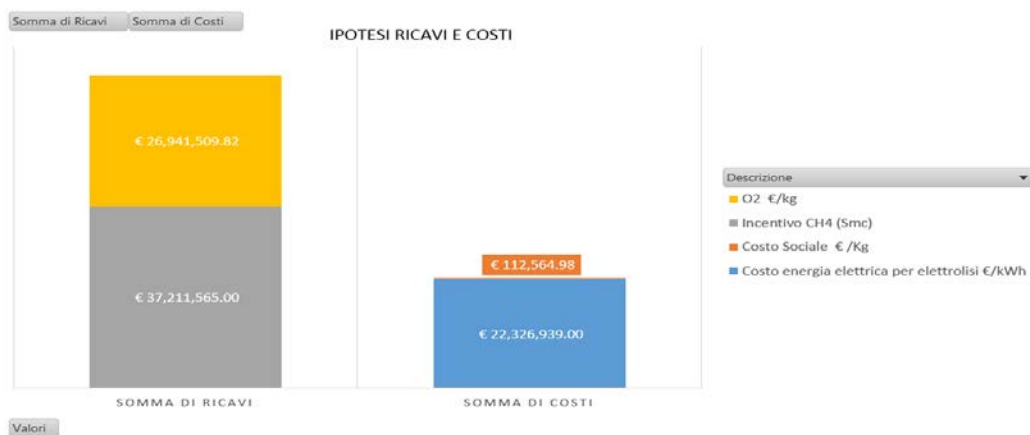
Nelle tabelle di seguito riportate, corredate di grafici, sono indicate le ipotesi di costi e ricavi variando il prezzo dell'energia elettrica. Nel primo caso è indicato il valore minimo reperito dal sito GME pari a 0,035 kWh, mentre nella seconda ipotesi si considera di ricavare l'energia da esuberanti, quindi quasi nullo.

| Tabella riassuntiva ipotesi ricavi | | |
|------------------------------------|---|----------------|
| €/anno | Descrizione | Costo unitario |
| € 112,564.98 | Costo Sociale € /Kg | 0.22 |
| € 156,288,573.00 | Costo energia elettrica per elettrolisi €/kWh | 0.035 |
| € 37,211,565.00 | Incentivo CH4 (Smc) | 0.2 |
| € 26,941,509.82 | O2 €/kg | 0.0362 |



Ipotesi 1 – costo energia elettrica pari a 0,035 €/kWh

| Tabella riassuntiva ipotesi ricavi | | |
|------------------------------------|---|----------------|
| €/anno | Descrizione | Costo unitario |
| € 112,564.98 | Costo Sociale € /Kg | 0.22 |
| € 22,326,939.00 | Costo energia elettrica per elettrolisi €/kWh | 0.005 |
| € 37,211,565.00 | Incentivo CH4 (Smc) | 0.2 |
| € 26,941,509.82 | O2 €/kg | 0.0362 |

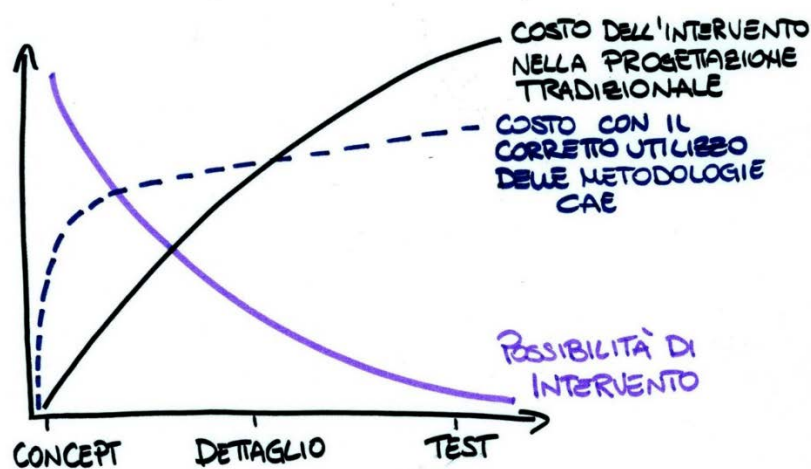


Ipotesi 1 – costo energia elettrica pari a 0,005 €/kWh

Ruolo della tecnologia all'interno di un'organizzazione

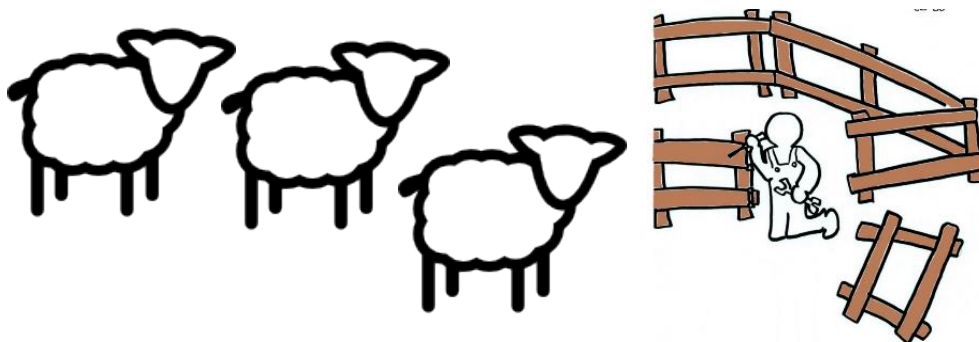
L'obiettivo della ricerca è stato quello di valutare congiuntamente ambiti approfonditi del Calcolo Scientifico calati in approcci industriali.

L'attuale metodo di progettazione si basa sul così detto *try and error*, ovvero sull'esperienza. Sembra impossibile ma è così. Parlare di CAE è ancora fantascienza, tutti sanno cosa siano le singole tecnologie (es. FEM, CFD, FSI, ecc. ecc.) ma solitamente si utilizzano solo quando "servono", cioè quando il progetto è stato già svolto.



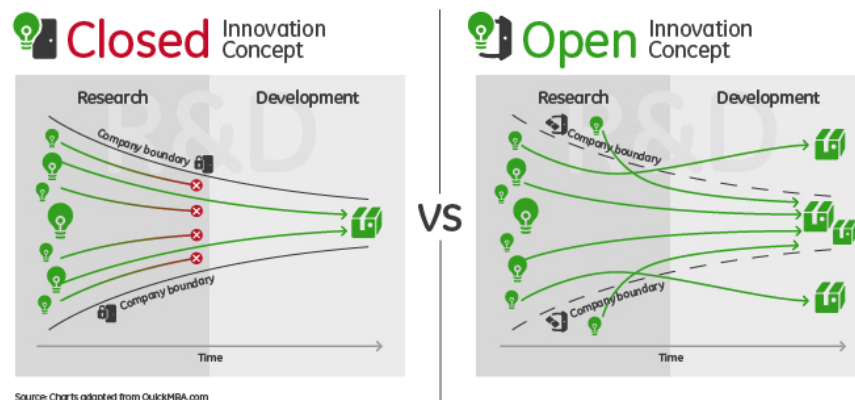
Schema concettuale "approccio" CAE

Ironicamente, spesso si eseguono i calcoli quando i prototipi sono al termine della progettazione... nella migliore delle ipotesi... ma spesso quando il prototipo è già costruito. Utilizzare il CAE sul prodotto finito, cioè quando si presentano problemi, è come "aggiustare" il recinto quando le pecore sono già scappate!



Quindi parlare di tecnologie integrate significa, parlare di competenze integrate e di gerarchie sfumate....

Nell'industria italiana, l'Open Innovation⁸⁶ è vista come un'opportunità solo di facciata, ma realisticamente molti continuano a non vedere di buon occhio i cambiamenti.



Schema Close Vs. Open Innovation

Il suggerimento del Sociologo contemporaneo Luhmann, qual era? ... era quello di suddividere i Mondi e la sua Complessità, di renderli più piccoli e in comunicazione tra loro per poterli osservare meglio e più approfonditamente; mai di isolarli.

Per citare un esempio pratico, chi fa calcoli 1D deve diventare super esperto, cioè aumentare la propria complessità, ma deve interagire con altri mondi tecnologici per non rischiare la sterile autoreferenzialità.

In linguaggio matematico, si potrebbe definire come l'ottimizzazione di un minimo locale, quando invece bisognerebbe solo guardare oltre.

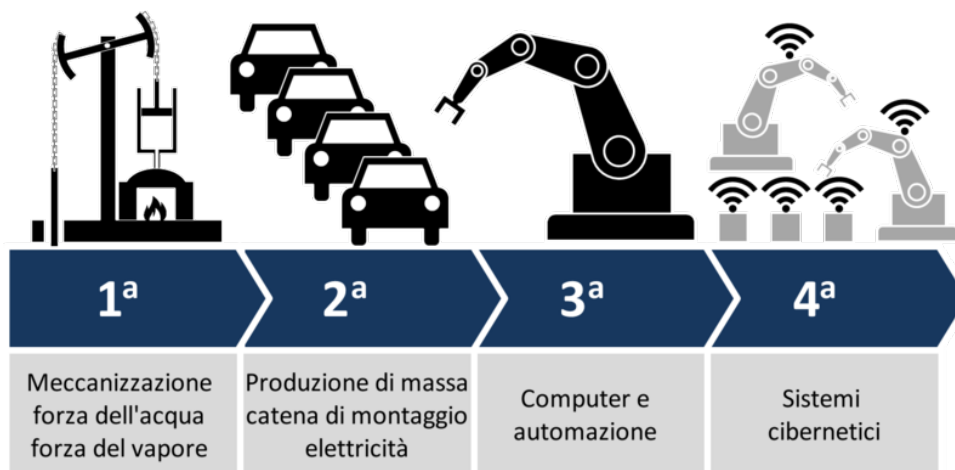
E quindi, prima di parlare di innovazione, bisognerebbe cercare di valutare se l'Uomo sarà poi in grado di cambiare l'approccio. Prototipazione virtuale non significa smettere di realizzare prototipi, ma semplicemente ridurne il numero lavorando in modo diverso.

⁸⁶ « L'open innovation è un paradigma che afferma che le imprese possono e debbono fare ricorso ad idee esterne, così come a quelle interne, ed accedere con percorsi interni ed esterni ai mercati se vogliono progredire nelle loro competenze tecnologiche. »
(Henry Chesbrough, 2006)

Tale approccio, costringerà in alcuni casi, a spostare le competenze “dall’officina”, a chi svolge “simulazioni virtuali”. In seguito, chi simula dovrà essere in grado di creare e utilizzare nuovi strumenti ... quindi anch’egli dovrà cambiare. Un “loop” virtuoso e ricco di cambiamenti, soggetto tuttavia alle ritrosie di ogni singolo attore...

Così come Luhmann propose di organizzare la Società quale somma di mondi e sistemi che, comunicando, interagiscono tra loro per ridurre problemi e trovare la strada dell’avanzamento (complessità e sua riduzione) interferendo sì, ma senza spegnersi, allo stesso modo, il sistema/ industria potrebbe accogliere il medesimo approccio per poter utilizzare tutte le competenze (Tecnè/mondo) senza perdersi nella tuttologia.

Si parla moltissimo di 4.0, di open innovation e di big data, ma sicuramente molto meno di quanto e come l’uomo agente e destinatario di tutto questo, sia aperto al cambiamento e di quanto riesca realmente a recepirlo.



Rivoluzioni Industriali

Non è possibile conoscere a fondo ogni strumento tecnologico esistente, ma il mondo esterno ci chiede di farlo. A fronte dei cambiamenti in atto, i nostri modelli organizzativi si sono adeguati?

Temo di no, siamo ancora tutti rigidamente gerarchici e ogni singola struttura tecnica difficilmente si apre all’innovazione con approcci diversi. Ci si trova spesso al lavoro in “emergenza”: ottimizzazione, riduzione dei costi, miglioramento di ... processi che a volte sono morti in partenza.

Il messaggio organizzativo legato a questa ricerca si può sintetizzare nel suggerimento di usare la tecnologia lasciandola in mano agli esperti “veri” integrandola puntualmente in modo “umile”, curioso e aperto a scenari veramente contestualizzati ai vantaggi futuri.

Nel mio percorso professionale, ho visto estremizzare ogni singola tecnologia e ascoltando i diretti interessati, ognuna di esse era la migliore ... ma in realtà il *goal* è ottenere l’ottimo da ogni singolo giocatore lasciandolo lavorare al top delle sue conoscenze e con gli strumenti più evoluti, per poi integrarli con gli altri, perché il fine ultimo è il risultato raggiunto dall’uomo, non la tecnologia stessa.

Un grande errore degli organigrammi, è di ragionare a settori, non a competenze. In tutte le aziende tradizionali, “l’ufficio tecnico progetta”, “l’ufficio calcoli calcola” ecc ecc ... ma in realtà spesso chi è preposto alle decisioni non può sapere che esistono nuove competenze o strumenti e non si avrà mai la visione dell’ottimo.

Quando parlo di umiltà, parlo di gruppi di lavoro, di reti di professionisti che chiedono aiuto in modo trasversale a chi è esperto di uno strumento, così da avere il top della tecnologia applicata, non l’improvvisazione condotta dalla sola voglia di fare.

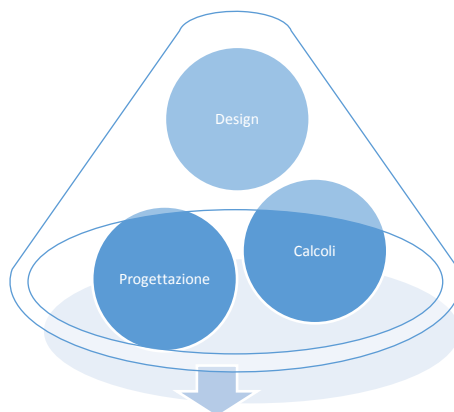
Tutti non possono fare tutto, ma tutti possono chiedere aiuto per evitare di chiudersi nell’autoreferenzialità.

Un problema che cogliamo nelle PMI⁸⁷ è proprio questo, abituati ad agire soli, hanno sbaragliato fino agli anni 90, ma crescendo la complessità, si trovano soli in quanto il loro contenuto non è più sufficiente. Mi piace ispirarmi a Luhmann per calarlo in un nuovo modello organizzativo che preveda esperti di processi, di Advanced Design, ma contornati da mondi tecnologici specializzati da integrare per crescere. Chi deve fare il prodotto avrà così le competenze e chi ha le competenze non diventa... un topo da biblioteca!.

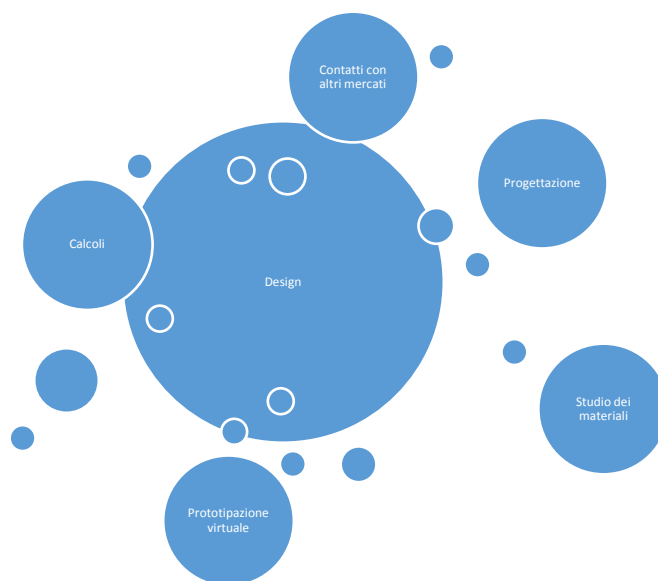
Però così cadranno i muri della gerarchia, tutti pari, tutti uguali, solo coordinatori che applicheranno insieme agli esperti le tecnologie per il risultato del

⁸⁷ Le piccole e medie imprese o PMI sono aziende le cui dimensioni rientrano entro certi limiti occupazionali e finanziari prefissati. Per questa ragione, e anche per le oggettive difficoltà di attrarre capitali, Stati e Regioni di solito mettono in atto politiche di sostegno verso la PMI. È importante considerare che le piccole e medie imprese si comportano talvolta in modo decisamente diverso da quelle di dimensioni maggiori, vuoi per la diversa tipologia di organizzazione (talvolta le PMI sono ancora gestite direttamente dal proprietario), vuoi per la limitata disponibilità di capitali e le conseguentemente differenti politiche gestionali.

progetto o meglio per il fine ultimo del progetto, cioè colui che lo utilizzerà...
L'uomo !.... E tutto torna....



Prototipo fisico



Flusso organizzativo attuale Vs. visione organizzativa "futura".

Conclusioni

Dal lavoro svolto si evince che il codice 1D consente una valutazione complessiva dell'impianto. I tempi di preparazione del modello possono essere relativamente lunghi ma i tempi di calcolo generalmente brevi. E' quindi possibile valutare velocemente l'impatto di modifiche o l'implementazione di soluzioni diverse in fase di progettazione/ottimizzazione. E' anche possibile utilizzare questo tipo di modello per fare "tuning" dell'impianto. Tuttavia è il codice 3D a consentire una migliore comprensione del comportamento dei componenti, specialmente quando si tratta di elementi il cui funzionamento è condizionato da effetti tridimensionali. I principali ostacoli dello strumento 3D sono però il tempo di calcolo ed il costo delle risorse H/W necessarie per la soluzione. Ecco che con Barracuda si può ovviare a queste due problematiche in quanto è possibile gestire anche problemi complessi con modelli relativamente semplici (poco pesanti in termini computazionali) ed in questo modo si possono ridurre in modo importante i tempi di calcolo. Risulta fattibile quindi studiare con un approccio 3D il comportamento di componenti e sotto sistemi con fisiche complesse (come il forno comprensivo di reazione chimiche), ottenendo comunque risposte in tempi "industriali" e utilizzando risorse H/W dal costo contenuto (workstation con GPU e non cluster).

La reazione di metanazione, nel caso in esame, non può essere studiata in modo accurato con il codice 1D, poiché essa avviene all'interno di un volume in cui la tridimensionalità del flusso incide in modo fondamentale sulla miscelazione dei reagenti e quindi sul grado di conversione della reazione stessa. È inoltre importante considerare come è stata realizzata una maggior efficienza variando le diverse disposizioni degli iniettori di H₂ nel forno, sia nel caso del reattore esterno, che nell'inserimento degli iniettori di Swirl che modificano e favoriscono il miscelamento di H₂ e CO₂ a monte del catalizzatore e producono un migliore grado di conversione. Si evince quindi che l'utilizzo di strumenti integrati sia la strada più promettente per sviluppare un engineering evoluto che porti ad abbattere i tempi di sviluppo di "gemelli digitali".

Ciò premesso e con questi strumenti, ritengo che, relativamente alla disamina sulla CO₂ e alle diverse reazioni che suscita (chi la considera veleno, chi la teme per l'aggravamento dell'effetto serra, chi la difende perchè parte preponderante del ciclo naturale (I Love CO₂⁸⁸)), ci possa essere anche un altro approccio, nuovo e percorribile.

⁸⁸ <http://www.iloveco2.com/>

Abbiamo estratto e bruciato risorse fossili prodotte dalla natura in milioni di anni in soli 150 anni... forse non è così immediato capire quali fonti energetiche siano realmente e stabilmente più sostenibili nel lungo periodo. Nell'immediato, a mio avviso, si potrebbe cominciare semplicemente a mitigare quanto avvenuto tra la seconda rivoluzione industriale e l'attuale quarta rivoluzione in corso, valutando, con modelli matematici innovativi, la trasformazione di emissioni a perdere (attualmente non riutilizzabili), come parti di sottoprodotti chimici per nuovi componenti. *"Nulla si crea e nulla si distrugge ma tutto si trasforma"*, così recita il secondo principio della termodinamica. Proprio partendo da tale inconfutabile concetto si è proceduto nella ricerca di un contesto industriale ben preciso, dove poter applicare su larga scala quanto ipotizzato. L'unica vera ragione per operare dei cambiamenti, in una situazione in cui difettano reali politiche energetiche globali, allo stadio, per ora, solo di meri tentativi, è il raggiungimento della sostenibilità economica.

Può un modello matematico, calato su un ben preciso contesto industriale, con validazioni numerico sperimentali ed economiche, essere poi esportato ad altri ambiti industriali?

In questo interrogativo è racchiuso il concetto che mi ha portato a sviluppare la ricerca in oggetto, utilizzare cioè un caso industriale ben preciso su cui validare un modello matematico da poter poi esportare ad altri contesti industriali. Tutto ciò senza dimenticare di verificarne i procedimenti e analizzando l'intera questione anche dal punto di vista della coerenza etico- sociale, storica e biologica chiaro ed imprescindibile riferimento alle mie radici umanistiche e al mio lavoro di tecnico ricercatore. Sono fermamente convinto che la parentesi sociologica di questa ricerca non tolga rigore alla dissertazione, ma anzi rappresenti un *quid pluris* in termini di profondità di contenuti.

Esistono diversi metodi per la cattura e l'utilizzo della CO₂ ma al momento non esiste un sistema unico atto a risolvere autonomamente il problema. È importante adottare un approccio di sistema, integrato su varie metodologie e che sia di interesse per le aziende che investiranno in tal senso.

La via più promettente per estendere su scala industriale l'approccio CCU è incentivare la produzione di combustibili di sintesi come Metano o Metanolo con il potenziale vantaggio di coinvolgere positivamente l'opinione pubblica. Se quest'ultima percepisce un beneficio dalla diretta trasformazione dei "rifiuti" in materie prime utili preservando la qualità della vita e al tempo stesso

l'ambiente, le probabilità per l'accettazione di nuove tecnologie saranno maggiori e potenzialmente in diminuzione sarà la dipendenza dalle fonti fossili.

Incentivando l'utilizzo degli esuberanti di energia elettrica da fonti rinnovabili, attualmente sottoutilizzati, si potrebbe giungere in un prossimo futuro alla parziale conversione della CO₂ in eccesso in combustibili stoccabili o sottoprodotti chimici.

Negli anni a venire si valuterà uno scenario completamente diverso. La CO₂ potrebbe essere considerata una risorsa Da "rifiuto nocivo" a materia prima per prodotti chimici o combustibili Le attuali fonti rinnovabili, come eolico e fotovoltaico, sono intermittenti e non esenti da nei; ipotizzando, ad esempio, in un'unica zona la presenza di un'elevata concentrazione di impianti, in particolari condizioni meteo possono verificarsi congestioni nelle reti di trasmissione ed inversioni di flusso nelle reti di distribuzione. Una criticità pesante che deve essere risolta. Esistono vari approcci per cercare di convertire l'eccesso di energia elettrica in metano; uno di questi è convertire l'energia elettrica in energia chimica e stoccarla o immetterla in rete. Se poi per l'idrogeno non esiste infrastruttura ed è problematico trasportarlo, con il metano ciò è possibile, utilizzando la rete di trasporto già diffusa capillarmente.

In estrema sintesi: si produce idrogeno (H₂) tramite elettrolisi utilizzando gli esuberanti di energie rinnovabili; si utilizza l'anidride carbonica catturata da processi industriali e lì si converte all'intero di un reattore (in presenza di un catalizzatore) direttamente in metano e acqua. QUESTA È L'IDEA, ED È POSSIBILE!

L'argomento CO₂, con le sue implicazioni sociali, industriali, ambientali, rende estremamente complesso il nostro orizzonte, ma in futuro la sua stessa complessità, in una visione sociologica, sarà essa stessa passepartout per il suo superamento ad un nuovo piano di complessità, per così dire, migliore e rassicurante. Ciò è reso possibile grazie ad una modalità di pensiero a cui io mi sono sempre ispirato e affidato anche in questo cammino, una modalità di pensiero che, mediante l'utilizzo di modelli matematici, traduce in numeri le idee e queste in risultati.

La complessità dell'"ambiente" industriale, sia nelle sue componenti intrinseche, sia nelle innumerevoli sollecitazioni cui è esposto, sia nelle aspettative cui è chiamato a rispondere, altro non è che un esempio concreto di quanto riportato nei capitoli iniziali della tesi dedicati alla Teoria dei Sistemi. Anch'esso è, infatti, un modello che, nato come strumento di osservazione e

azione all'interno dei sistemi sociali, si trova ad essere perfettamente calzante in un ambito in apparenza distante, non solo come strumento di comprensione dei fenomeni presi in esame, ma, soprattutto, come il mezzo che mi ha aiutato a ... *"unire i puntini"*.



Tratto dal sito Iloveco2

Appendice

A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization

Di seguito è riportato integralmente il capitolo della ricerca sopra menzionata relativo alla trattazione sull'efficienza dei catalizzatori nella reazione di metanazione. Da tale ricerca sono stati estrapolati i valori relativi al Rutenio utilizzato per le simulazioni 3D condotte con Barracuda⁸⁹.

Melis S. Duyar

*Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy
in the Graduate School of Arts and Sciences*

COLUMBIA UNIVERSITY

2015

Methanation activity of different metals

Precious and base metal catalysts were screened for their methanation activity and selectivity in a fixed bed flow reactor within a temperature range of 150-350°C. All catalyst metals were supported on γ -Al₂O₃ and were prepared via incipient wetness impregnation to reach a metal loading of 10% by weight. All catalysts

⁸⁹ Vedi Capitolo 8.4

were calcined at 500oC in air with the exception of Ru/ γ -Al₂O₃, which underwent a much lower temperature calcination step to prevent the formation of volatile oxides as is described in section 3.1. The catalyst weight was identical (0.1000 ± 0.0002 g) in all test runs and gas hourly space velocity (GHSV) was fixed at 4000 h⁻¹. Only base metal catalysts (Co/ γ -Al₂O₃ and Ni/ γ -Al₂O₃) received pre-reduction at the beginning of the test to ensure reduction of the metals to their active states. This pre-reduction was performed at 450oC for 3 hours in pure hydrogen. It was assumed based on experience with Ru/ γ -Al₂O₃ that the precious metal catalysts would be reduced during startup by the reactant feed, which contains 16% H₂.

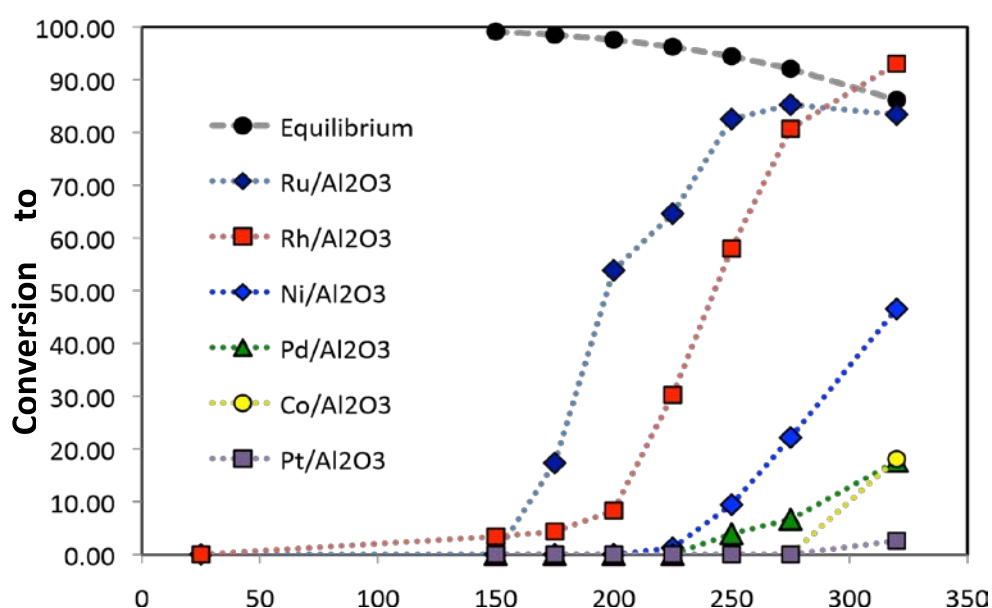


Figure: shows the variability in CO₂ conversion to methane with increasing temperature for all candidate hydrogenation catalysts, tested within the temperature range of interest (150-350oC). Rh/ γ -Al₂O₃ begins to show methanation activity at 150oC. However, in the temperature range of 175-250oC Ru/ γ -Al₂O₃, showed the highest methanation activity. In order to be consistent with previous experiments, the methanation activity at 320oC was compared and was found to follow the trend Rh>Ru>Ni>Pd>Co>Pt, although the lightoff temperature was best for Ru. Based on this study, Rh and Ni were identified as the leading candidates for methanation catalyst alternatives to Ru in dual function materials for CO₂ capture and methanation.

Please support the “Petition for Integration of renewable CCU in the RED”⁹⁰

Please support the “Petition for Integration of renewable CCU in the RED”⁹¹ - October 2016

Carbon Capture & Utilization (CCU) technologies will play a crucial role in the future renewable energy system and for climate protection. Carbon Dioxide (CO₂) is not just another raw material, intermediate or waste; in terms of volume, it is the most important greenhouse gas. When being processed with renewable energy, CO₂ is an infinite resource for producing fuels and chemicals with a high potential for climate protection. When speaking about this combination of CCU with renewable energy as the only energy source to reduce CO₂, the term renewable CCU or rCCU has recently been coined. The most important role of rCCU is the ability to store renewable electricity over a long time without losses and to convert fluctuating renewable electricity into fuels (for transport and for reconversion into electricity) and chemicals. Therefore, rCCU is systemically important for the liberalized electricity market, since it offers the much-needed possibility to increase the flexibility of the grid and by this, to increase the share of renewables in the European electricity mix. The European Union cannot afford to miss or to delay the deployment of this new option to utilize and store renewable electricity, which is to extend the applications for renewable energy to renewable fuels and sustainable chemistry. The European Union should become the leader in rCCU, not only in research and development, but especially in applying and fully utilizing the potential. The ongoing development of the 2030 Climate and Energy Framework and a reform of the Renewable Energy Directive (RED) is a unique opportunity to establish a regulatory framework in which rCCU is fully integrated. This opportunity should not be missed. Therefore the authors of the petition ask decision makers involved in the revision of the Renewable Package to include six crucial mechanisms in the legislation. The relevance of the rCCU concept and its potential are not yet fully understood by most of the policy makers and stakeholders. The rCCU sector does not yet have a lobby, which is normal for a new sector consisting only of pilot plants. These

⁹⁰ <http://co2-chemistry.eu/CCU-petition/wp-content/uploads/2016/10/16-10-25-Petition-for-Integration-of-renewable-CCU-in-the-RED.pdf>

⁹¹ <http://news.bio-based.eu/der-kommissionsvorschlag-zur-neufassung-der-erneuerbare-energien-richtlinie-red-ii-auswirkungen-auf-bio-basierte-werkstoffe-und-co2-nutzung/>

are the reasons why we want to give rCCU a strong voice. Please support this petition with your signature, please add your comments and ideas! Please send this petition to your business and social networks.

Petition for Integration of renewable CCU in the RED

to those revising and extending the “Renewable Energy Directive (RED) in the 2030 Climate and Energy Framework” in the European Commission, European Parliament and the Member States

Authors and initiators of the petition

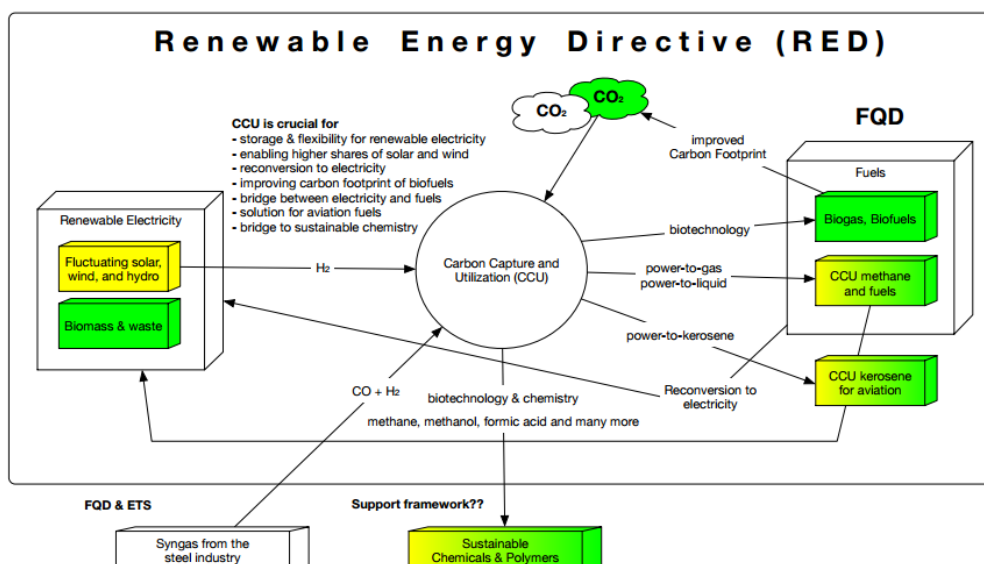
Michael Carus, Achim Raschka and Lara Dammer, nova-Institut GmbH, Hürth (Germany), Christian Schweitzer and Sten Wranik, bse Engineering Leipzig GmbH (Germany), Stephan Rieke, ETOGAS GmbH, Stuttgart (Germany)

Signatories: Every person can sign this petition and give additional input on the discussion of CCU integration in the RED at: www.co2-chemistry.eu/CCU-petition

The petition, additional ideas from the signatories and the feedback from the policy will be presented and discussed at the huge conference on CCU in December: **5th Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Fuels, Chemistry and Polymers**, 6-7 December 2016, Maternushaus, Cologne, Germany (www.co2-chemistry.eu).

Responsible under press legislation (V.i.S.d.P.): Michael Carus, nova-Institut GmbH, Industriestraße 300, 50354 Hürth, Germany, michael.carus@nova-institut.de, www.nova-institute.eu

The comprehensive benefits of rCCU



Emissioni di CO₂ e costo dell'impatto "Sociale"

Un recente studio realizzato dal governo degli Stati Uniti ha calcolato, utilizzando tre modelli economici molto diffusi, in 37 \$ il costo cosiddetto "sociale" per ogni nuova tonnellata di CO₂ prodotta nel 2015. L'EPA (Environmental Protection Agency) statunitense utilizza questo valore come riferimento per le norme in tema di gestione energetica, delle emissioni e per le azioni di mitigazione.⁹²

Uno studio uscito recentemente sulla rivista *Nature Climate Change*⁹³, realizzato da un gruppo di scienziati di Stanford⁹⁴, afferma che i costi potrebbero essere molto più elevati, fino ad arrivare a 220 \$ per tonnellata di CO₂ prodotta. Una cifra ben più considerevole. Si parla dei costi che comporterebbe ad esempio una minore produttività dei lavoratori e ovviamente i costi per la salute umana e per riparare ai disastri ambientali causati dal surriscaldamento del clima. Il Dipartimento di Management Science and Engineering presso la Scuola di Ingegneria di Stanford, che hanno condotto lo studio, sono partite dai modelli di valutazione integrata (IAM) utilizzati finora per calcolare l'impatto economico dei cambiamenti climatici, e li hanno integrati con recenti risultati empirici che suggeriscono che il cambiamento climatico potrebbe rallentare notevolmente i tassi di crescita economica, soprattutto nei Paesi poveri. In particolare hanno utilizzato il Dynamic Integrated Climate-Economy (DICE) e lo hanno modificato ammettendo l'influenza del global warming sul cambiamento del tasso di crescita dell'economia, tenendo conto dell'adattamento a questi cambiamenti e dividendo poi il modello in due regioni che rappresentino i Paesi ricchi da una parte e quelli poveri dall'altra.

Finora molte misure di mitigazione imponenti e costose non sono state utilizzate perché il gioco non valeva la candela, ma ora la prospettiva potrebbe cambiare completamente, rendendo più conveniente intervenire.

Anche questo modello ha però dei limiti, in quanto il modello DICE non tiene conto dei tempi lunghi richiesti dalle energie rinnovabili, ad esempio, per il loro sviluppo e la loro diffusione, così come non tiene conto dell'impatto sulla crescita dovuto agli sforzi per la mitigazione.

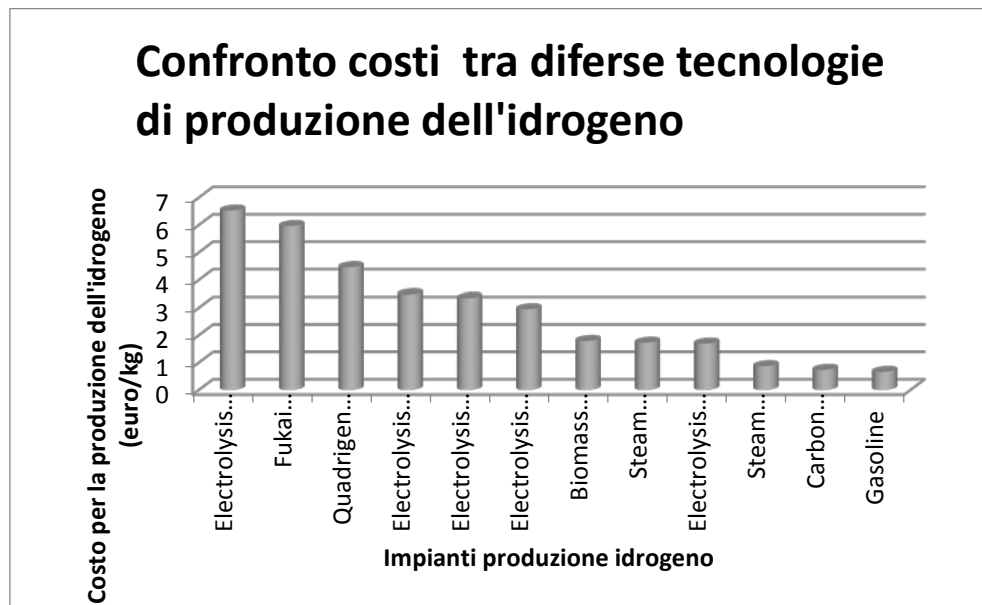
⁹² <http://news.stanford.edu/2015/01/12/emissions-social-costs-011215/>

⁹³ <http://yale.universitypressscholarship.com/view/10.12987/yale/9780300198812.001.0001/upso-9780300198812-chapter-008>

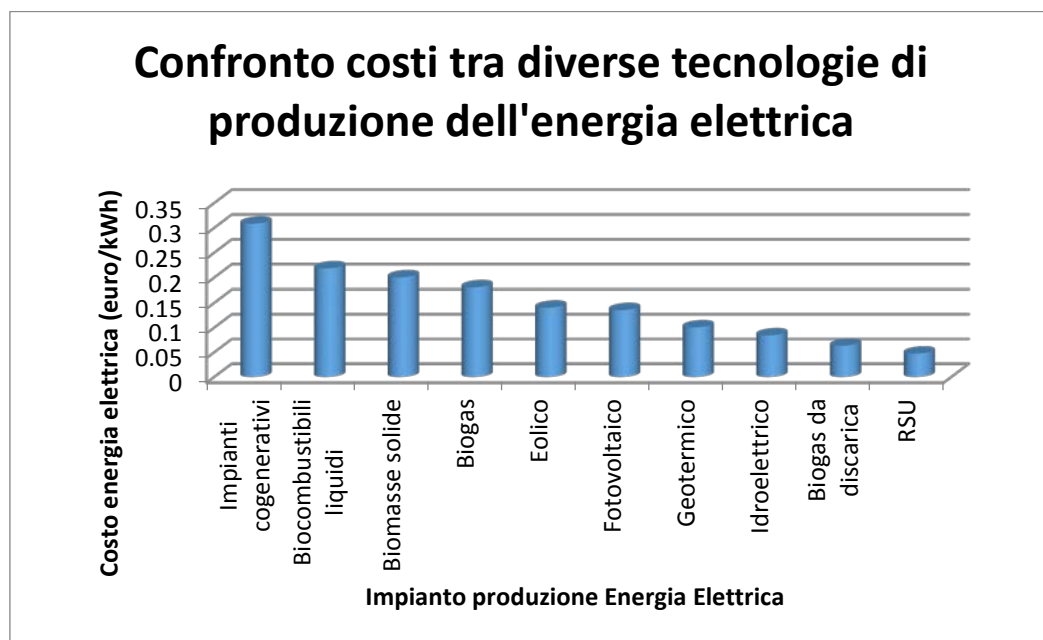
⁹⁴ <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n2/full/nclimate2481.html>

Valutazione sulla convenienza di far reagire la CO₂ con H₂ per ottenere CH₄

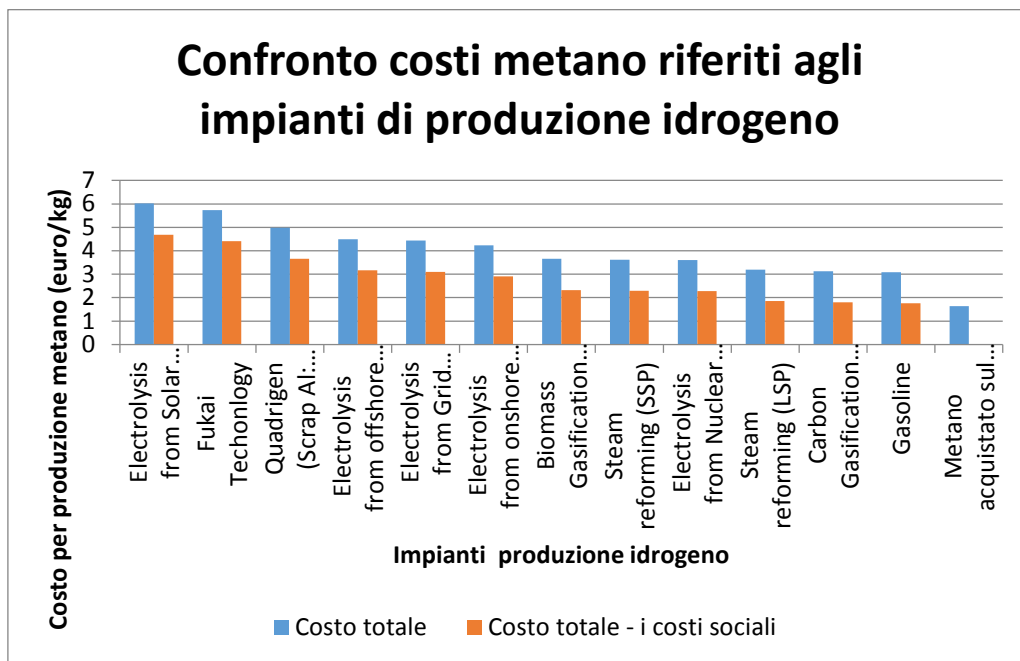
Costi totali da sostenere per produrre idrogeno, comprensivi di ammortamento impianto, gestione e oneri finanziari.



Costi totali da sostenere per produrre energia elettrica, comprensivi di ammortamento impianto, gestione e oneri finanziari.



Costi totali da sostenere per produrre metano. Si considera che l'energia elettrica necessaria a fornire l'energia necessaria alla reazione di Sabatier sia prodotta a 0,05 euro/kWh.



CCU: alcuni progetti in corso

<http://www.iloveco2.com/>

Sono un'associazione senza scopo di lucro che si occupano di divulgare informazioni sulla CO₂ ed i suoi effetti in quanto sostengono che la scienza sia inquinata dalla politica e che siano costantemente divulgare informazioni errate sui cambiamenti climatici.

"Carbon is the building block for all life on earth. It provides all of the food and most the energy for the human race. Carbon dioxide is a tiny part of the atmosphere, yet it sustains all life on earth. It is NOT a pollutant. To be anti-carbon is to be anti-life and anti-human." - Viv Forbes, Pasture Manager, Soil Scientist and Geologist

<http://co2-chemistry.eu/>

Organizzatori della conferenza internazionale "5th Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Fuels, Chemistry and Polymers" e sostenitori della petizione "Petition for Integration of renewable CCU in the RED"

<http://www.wplgroup.com/aci/event/co2/>

Serie di congressi atti a presentare gli sviluppi in corso di implementazione sulla trasformazione delle missioni di CO₂ in opportunità economiche con approfondimenti da parte dei principali operatori del settore.

<http://www.covestro.com/>

Covestro è un fornitore leader a livello mondiale di materiali polimerici ad alta tecnologia, hanno sviluppato un processo atto ad utilizzare la CO₂ per produrre materie plastiche di alta qualità. È un'innovazione che permetterà di ridurre il consumo di petrolio per la produzione di materiali polimerici.

<https://www.spire2030.eu/mefco2>

Progetto europeo in corso per la sintetizzazione di Metanolo utilizzando emissioni industriali di CO₂ e fonti rinnovabili per la produzione dell'idrogeno.

<http://www.fresme.eu/>

Progetto europeo in corso collegato al precedente

<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/03/23/joule-says-will-go-commercial-in-2017-solar-fuels-on-the-way/>

<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/03/23/joule-says-will-go-commercial-in-2017-solar-fuels-on-the-way/>

Joule Unlimited⁹⁵, collegata ad AUDI⁹⁶ per un progetto di sviluppo di biocarburanti. E' un produttore di tecnologie energetiche alternative con sede a Bedford, Massachusetts. L'azienda ha sviluppato un processo per la generazione di carburanti a base di idrocarburi combinando acqua non di rete, nutrienti, cianobatteri, anidride carbonica e luce solare. L'Helioculture utilizza organismi fotosintetici, ma è diverso dai normali processi di produzione di biomassa algale. Normalmente, Gli oli di alghe dovranno essere raffinati in carburante in seguito ad un processo a batch, mentre l'Helioculture produce direttamente combustibili senza necessità di raffinazioni successive. Il processo di Helioculture non produce anche biomassa. Questo processo è abilitato dalla scoperta di geni unici che codificano meccanismi enzimatici che consentono la sintesi diretta di alcune molecole chiave. Helioculture consente l'uso di acqua salmastra o acqua grigia, acqua di scarico non industriale da fonti quali bagni e lavatrici, mentre i biocarburanti tradizionali come l'etanolo cellulosico richiedono acqua dolce.

<http://newco2fuels.co.il/>

“Turning CO2 From Liability to Opportunity”: Azienda israeliana specializzata nella progettazione e produzione di impianti per la produzione di combustibili sintetici da CO2, ad alta temperatura. Una nota distintiva rispetto ad altri in quanto hanno ideato un sistema a “cluster” atto ad essere scalabile.

<https://www.globalco2initiative.org/>

⁹⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_Unlimited

⁹⁶ Vedi paragrafo 6.4

CO2 Sciences is a research and development platform built to accelerate the commercialization of products created through the capture and use of CO2 (CCU). Estimates put the annual market for CCU products at \$800 billion - \$1.1 trillion by 2030 with potential annual reduction of carbon in the range of two to three gigatons, the equivalent of over 1.2 billion garbage trucks.

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/lce-prize-co2reuse-01-2016.html>

Preventing dangerous climate change is a key priority for the European Union. Europe is working hard to cut its greenhouse gas emissions substantially while encouraging other nations and regions to do likewise. One way to help these efforts is to make use of the CO2 by integrating it in consumer products. CO2 re-use technologies however are still facing a number of technical, commercial and/or financial barriers

Modalità di gestione delle energie rinnovabili (GME)

Quando parliamo di rinnovabili, attualmente in Italia, non vi è energia persa in quanto hanno priorità di dispacciamento. Questo significa che entrano nell'asta del giorno prima a prezzo zero e prendono i compensi del bilancio tra domanda e offerta secondo il diagrammino di seguito riportato. L'energia extra da fonti rinnovabili, viene fornita da fonti programmabili (centrali termoelettriche), ovvero generano l'energia che serve regolando la potenza delle turbine, motori ecc. Il problema attuale è che spesso queste centrali lavorano a basse potenze, rendendole antieconomiche in quanto lavorano a regimi non efficienti. In Europa la situazione è diversa, Olanda e Danimarca ad esempio, hanno spesso sovra-produzione di energie rinnovabili, per questo motivo lavorano coi prezzi negativi (anche verso l'estero – Francia, Germania) quando c'è molta energia disponibile. Da 10 anni, si parla di mercato unico dell'energia, ma siamo lontani anni luce dall'averlo veramente.

Biometano⁹⁷



Incentivazione del biometano

Il biometano è un gas che contiene almeno il 95% di metano ed è prodotto da fonti rinnovabili. Deriva dal biogas prodotto dalla digestione anaerobica di biomasse in ambiente controllato (digestore) o in discarica, in seguito alla decomposizione dei rifiuti, o dal gas derivante dalla gassificazione delle biomasse. Sottoposto a un processo di purificazione e di upgrading, raggiunge la qualità del gas naturale e, rispettando le caratteristiche chimico-fisiche previste nelle direttive dell'AEEGSI, è idoneo alla successiva fase di compressione per l'immissione nella rete del gas naturale.

⁹⁷ <http://www.gse.it/it/Gas%20e%20servizi%20energetici/Biometano/Pagine/default.aspx>

Attualmente l'incentivazione del biometano è disciplinata dal DM 5 dicembre 2013 che, in attuazione del Dlgs 28/2011, completa il quadro normativo-regolamentare in tema di promozione dell'energia da fonti rinnovabili derivante dal recepimento della direttiva 2009/28/CE. Il Decreto prevede tre tipologie di incentivazione per il biometano immesso nella rete del gas naturale, a seconda della sua destinazione d'uso:

- un incentivo monetario per il biometano immesso nella rete di trasporto o di distribuzione del gas naturale, senza specifica destinazione d'uso;
- il rilascio di Certificati di Immissione in Consumo (CIC) per il biometano immesso nella rete del gas naturale con destinazione specifica per i trasporti;
- un incentivo monetario per il biometano immesso nella rete del gas naturale e utilizzato in impianti di cogenerazione ad alto rendimento.

Per rete del gas naturale vanno intese:

- le reti di trasporto e distribuzione del gas naturale in concessione;
- le altre reti di trasporto (reti private);
- i sistemi di trasporto mediante carri bombolai;
- i distributori di carburanti per autotrazione sia stradali sia a uso privato, compreso l'uso agricolo, anche non connessi alle reti di trasporto e distribuzione.

Ambito di applicazione

Il DM 5 dicembre 2013 si applica:

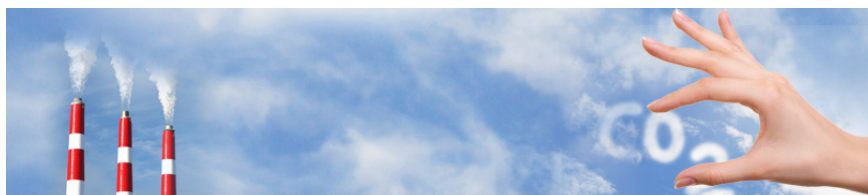
- ai nuovi impianti realizzati sul territorio nazionale entrati in esercizio successivamente al 18 dicembre 2013 e non oltre i cinque anni successivi a tale data;
- agli impianti esistenti per la produzione e utilizzazione di biogas (o gas da discarica/depurazione fanghi o syngas), realizzati sul territorio nazionale, che successivamente al 18 dicembre 2013 e non oltre i cinque anni successivi siano stati convertiti, parzialmente o totalmente, alla produzione di biometano.

Biometano senza specifica destinazione d'uso

L'incentivo per il biometano immesso nelle reti di trasporto e distribuzione del gas naturale, senza specifica destinazione d'uso, è calcolato sulla base della quantità di biometano immesso in rete, al netto dei consumi energetici dei processi di produzione del biometano e di compressione dello stesso ai fini dell'immissione in rete.

Se il produttore vende il gas direttamente sul mercato, il beneficio spettante, espresso in €/MWh, è riconosciuto per un periodo di 20 anni a partire dalla data di entrata in esercizio dell'impianto, ed è pari alla differenza tra il doppio del prezzo medio annuale del gas naturale, riscontrato nel 2012 nel mercato di bilanciamento del gas naturale gestito dal Gestore dei Mercati Energetici (GME), e il prezzo medio mensile del gas naturale nel medesimo mercato, riscontrato in ciascun mese di immissione del biometano nella rete. Tali valori, espressi in €/MWh, vengono pubblicati dal Gestore dei Mercati Energetici sul proprio sito Internet.

Il sistema EU ETS⁹⁸



Ultime novità

Nel 2016 sono proseguiti i negoziati per la riforma della direttiva ETS in Parlamento e Consiglio dell'Unione europea. Il 15 febbraio 2017, il Parlamento si è espresso in plenaria, in prima lettura, mentre i lavori in Consiglio sono confluiti nel general approach del 28 febbraio 2017.

Per approfondimenti si rimanda al Rapporto GSE sulle Aste - 2016 disponibile nel box "Risultati e Rapporti" della pagina Aste CO₂.

Cos'è

Il Sistema europeo di scambio di quote di emissione (EU ETS) è il principale strumento adottato dall'Unione europea, in attuazione del Protocollo di Kyoto, per ridurre le emissioni di gas a effetto serra nei settori energivori.

Il Sistema è stato istituito dalla Direttiva 2003/87/CE (Direttiva ETS) e istituisce un meccanismo di "cap&trade" in Europa per gli impianti industriali, per il settore della produzione di energia elettrica e termica e per gli operatori aerei.

L'EU ETS è un sistema "cap&trade" perché fissa un tetto massimo ("cap") al livello complessivo delle emissioni consentite a tutti i soggetti vincolati, ma permette ai partecipanti di acquistare e vendere sul mercato ("trade") diritti a emettere CO₂ ("quote") secondo le loro necessità, all'interno del limite stabilito. L'EU ETS coinvolge:

- a livello europeo, oltre 11.000 operatori, tra impianti termoelettrici, industriali nel campo della produzione di energia e della produzione manifatturiera (attività energetiche, produzione e trasformazione dei metalli, cemento, ceramica e laterizi, vetro, carta) e dal 2012 sono inoltre inclusi gli operatori aerei;
- dal 2013, gli impianti di produzione di alluminio, calce viva, acido nitrico, acido adipico, idrogeno, carbonato e bicarbonato di sodio e gli impianti per la cattura, il trasporto e lo stoccaggio di CO₂;

⁹⁸ <http://www.gse.it/it/Gas%20e%20servizi%20energetici/Aste%20CO2/SistemaEU-ETS/Pagine/default.aspx>

- ad oggi, circa 1.200 gli impianti italiani coinvolti, di cui il 71% circa nel settore manifatturiero.

Hanno potuto avvalersi della possibilità di esclusione dall'EU ETS ospedali e "Piccoli Emettitori", ovvero impianti con emissioni inferiori a 25.000 tonnellate di CO₂ equivalente e, nel caso di impianti di combustione, con potenza termica nominale inferiore a 35 MW, escluse le emissioni da biomassa.

Come funziona

La Direttiva ETS prevede che, dal primo gennaio 2005, gli impianti in Europa con elevati volumi di emissioni non possano funzionare senza un'autorizzazione ad emettere gas serra. Ogni impianto autorizzato deve monitorare annualmente le proprie emissioni e compensarle con quote di emissione europee (European Union Allowances, EUA e European Union Aviation Allowances, EUA A - equivalenti entrambi a 1 tonnellata di CO₂ eq.) che possono essere comprate e vendute sul mercato

Seppure in misura limitata (art. 11 bis della Direttiva ETS, Regolamento 550/2011, Regolamento 1123/2013 sull'uso di crediti internazionali), gli impianti possono utilizzare a questo scopo, ma solo fino al 2020 ed in determinate percentuali, anche crediti di emissione non europei, derivanti da progetti realizzati nell'ambito dei meccanismi di progetto del Protocollo di Kyoto (Clean Development Mechanism, CDM e Joint Implementation, JI). I gestori degli impianti possono, quindi, scegliere la combinazione economicamente più vantaggiosa tra investire per ridurre le proprie emissioni (con tecnologie a basso contenuto di carbonio, variazioni del mix energetico, misure di efficienza energetica) e acquistare quote.

L'assegnazione delle quote

Come criterio generale, gli Stati membri dell'UE assegnano a titolo oneroso le quote di emissione agli operatori attraverso aste pubbliche europee. Gli impianti manifatturieri, in particolare quelli esposti a rischio di delocalizzazione a causa dei costi del carbonio (rischio di carbon leakage diretto), ricevono una parte di quote a titolo gratuito in base a parametri di riferimento (benchmark). I benchmark generalmente espressi in termini di emissioni di CO₂ eq. per unità di prodotto, sono armonizzati a livello europeo e quantificati in base alla performance del 10% degli impianti più efficienti per ciascun settore industriale. Gli impianti possono comprare e vendere quote tra loro, attraverso accordi privati o rivolgendosi al mercato

secondario del carbonio. Le quote sono contabilizzate nel Registro unico dell'Unione europea, una banca dati in formato elettronico che tiene traccia di tutti i passaggi di proprietà delle quote e consente agli operatori di compensare, annualmente, le proprie emissioni restituendo le quote agli Stati membri. Il quantitativo totale delle quote in circolazione nel Sistema è fissato a livello europeo in funzione degli obiettivi UE al 2020 (-20% emissioni rispetto ai livelli del 1990). Il cap per il 2017 è 1,931 miliardi di quote e, nel periodo 2013-2020, è ridotto annualmente di un fattore lineare pari all'1,74% del quantitativo medio annuo totale di quote rilasciato dagli Stati membri nel periodo 2008-2012, e pari a oltre 38 milioni di quote (cfr. FAQ "EU ETS"). A partire dal 2021, conformemente alla proposta di riforma del luglio 2015 il fattore dovrebbe passare al 2,2% annuo, comportando una riduzione di circa 55 milioni di quote l'anno per rispettare un obiettivo di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del 40% al 2030.

Il ruolo del GSE

Il GSE è parte del Comitato ETS (Comitato nazionale per la gestione della direttiva 2003/87/CE e per il supporto nella gestione delle attività di progetto del Protocollo di Kyoto), organo interministeriale che assolve alla funzione di Autorità nazionale competente per la gestione della Direttiva ETS in Italia. Il Comitato ETS è presieduto dal Ministero dell'Ambiente, Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) mentre al Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) è riservata la vice Presidenza (D.lgs 30/2013 e s.m.i.).

Il GSE svolge un ruolo di supporto tecnico, anche attraverso il monitoraggio dello sviluppo della regolazione internazionale (inclusa la regolazione internazionale UNFCCC) ed europea di riferimento e nel suo recepimento nazionale, a beneficio dei Ministeri di riferimento - Economia e Finanze (MEF), MiSE, MATTM e Dipartimento Politiche Europee della Presidenza del Consiglio

18/4/2017

GME - Gestore dei Mercati Energetici SpA



GESTORE MERCATI ENERGETICI

cerca nel sito vai

nome
 password
 registrati login

Home English lavorare con noi bandi, avvisi e pubblicazioni società trasparente glossario links press room download ftp newsletter

GME-info societarie I mercati - market coupling Esiti dei mercati e statistiche Monitoraggio e Remit

NEWSLETTER del GME
 l'aggiornamento mensile sui principali trend del settore energetico

ULTIME PUBBLICAZIONI

Relazione annuale 2015

Bilancio d'esercizio 2015

Altre pubblicazioni >>

PRIMO PIANO

On line il numero 103 della Newsletter del GME

Consultazioni

EVENTI

AVVIO A REGIME DEL NUOVO SISTEMA DI BILANCIAMENTO DEL GAS - INCONTRO CON GLI OPERATORI
 On line le presentazioni

I MERCATI IN SINTESI

Sintesi e confronto dei dati storici, relativi ai risultati dei mercati gestiti dal GME

Vai alla sezione >>

News GME tutte le news

18/04/17 **NEW**
 Esiti dei mercati del gas. Settimana n° 15/2017

18/04/17 **NEW**
 Esiti dei mercati elettrici. Settimana n° 15/2017

13/04/17
 Dati di sintesi - Marzo 2017

13/04/17
 Dati di sintesi - Marzo 2017

13/04/17
 Numero 103 della Newsletter - Aprile 2017

10/04/17
 Esiti dei mercati del gas. Settimana n° 14/2017

10/04/17
 Esiti dei mercati elettrici. Settimana n° 14/2017

07/04/17
 Prezzo medio delibera AEEG 300/05 - Marzo 2017

05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

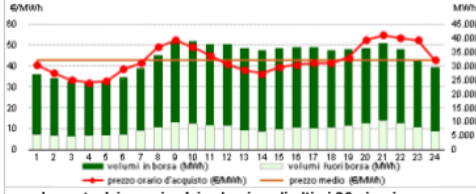
05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

05/04/17
 Prezzo medio mensile (Art. 3, c. 1, lettera b), dm 5 dicembre 2013) - Marzo 2017

Esiti Mercato Elettrico

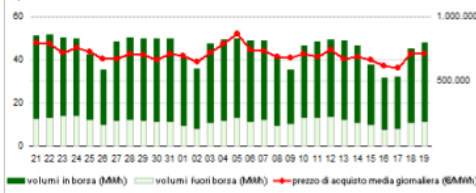
Mercato del Giorno Prima (MGP)

prezzi e volumi orari per il giorno di flusso 19/04/2017



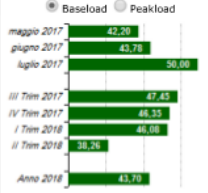
Gli esiti del mercato elettrico sono disponibili cliccando sulle voci:
 - PUN index
 - esiti del mercato elettrico
 - Statistiche e monitoraggio

andamento dei prezzi e dei volumi negli ultimi 30 giorni



Mercato a Termine (MTE)

prezzo di controllo (€/MWh)



Piattaforma Conti Energia a Termine (PCE)

transazioni con consegna/ritiro: 19/04/2017

| MWh | Transazioni registrate | | | | Totale | Posizione netta | Programmi registrati | Saldo programmi |
|-------------------|------------------------|-------|-----|----------|-----------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | PCE bilaterale | MTE | CDE | MPEG | | | | |
| Immissione | 532.264 | 1.404 | - | - | 534.668 | 440.158 | 184.430 | |
| Prelievi | 1.060.663 | 4.908 | - | 6684,000 | 1.072.255 | 440.158 | 334.446 | 150.016 |

MPEG

Differenziale unitario di prezzo

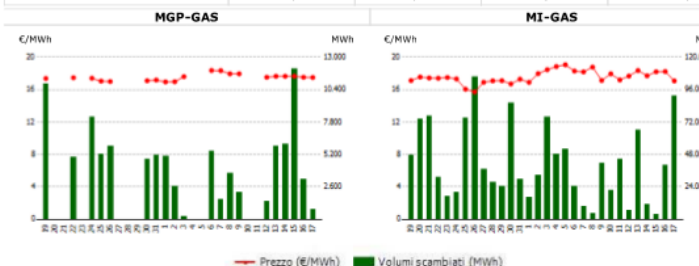
Giorno flusso: 18/04/2017

| Profilo | Prezzo €/MWh | Volumi MWh |
|-----------------|--------------|------------|
| Baseload | 0,26 | 8760 |
| Peakload | 0,28 | 312 |

Mercati del Gas

Mercato a pronti del Gas (MP-GAS)

| Mercato | Rifer. | Prezzo (€/MWh) | | Volumi (MWh) |
|----------------|--------|----------------|--------|--------------|
| | | Min | Max | |
| MGP-GAS | 17,500 | 17,500 | 17,500 | 820,000 |
| MI-GAS | 17,081 | 16,800 | 17,700 | 90.992,000 |



http://www.mercatoelettrico.org/it/

1/2

Tratto dal sito del GME – Borsa energia elettrica

Mercato elettrico verso i prezzi negativi, la consultazione Aeegsi

Tra le novità proposte dall'Autorità alcune potrebbero danneggiare le rinnovabili. Ad esempio si propone che agli impianti incentivati, nelle ore di prezzo negativo, non sia erogato l'incentivo, consentendone il recupero solo al termine del periodo di diritto. La scheda tecnica e il documento di consultazione.

Con il documento per la consultazione 605/2015/R/eel (allegato in basso), che si inquadra nell'ambito della formazione di provvedimenti per la riforma organica della regolazione del servizio di dispacciamento, l'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico illustra **i primi orientamenti in merito all'introduzione dei prezzi negativi** nel mercato elettrico italiano, in coerenza anche con quanto previsto dal regolamento UE n. 2015/1222, che prevede l'armonizzazione, a livello sovranazionale, dei prezzi di equilibrio massimi e minimi (cap e floor) per i mercati day ahead e intra day.

Tra le novità proposte dall'Autorità alcune che potrebbero non essere ben accolte dal mondo delle rinnovabili, come quella che **per gli impianti incentivati**, nelle ore nelle quali sul mercato dovesse formarsi un prezzo negativo, **non sia erogato l'incentivo**, consentendone il recupero solo al termine del periodo di diritto. Per il momento ci limitiamo a pubblicare la scheda tecnica e il dco, nei prossimi giorni faremo delle analisi più approfondite (*aggiornamento: qui [il commento di G.B. Zorzoli](#)*).

Considerando che la possibilità di presentare offerte con prezzi negativi consente di **affrontare condizioni di eccesso di offerta di energia elettrica a prezzo nullo** secondo criteri di merito economico, il documento illustra alcuni elementi che caratterizzano l'introduzione dei prezzi negativi nei diversi mercati (Mercato del Giorno Prima - MGP; Mercato Infragiornaliero - MI; Mercato per il servizio di dispacciamento - MSD; Mercato di Bilanciamento - MB; contratti bilaterali).

In particolare vengono avanzate considerazioni in merito **all'introduzione, nei soli mercati MGP ed MI, di un floor** (limite di offerta negativo dei prezzi) pari a **-500 €/MWh**, coerentemente con quanto già in essere nei mercati elettrici del centro e del nord Europa aderenti al progetto MRC - progetto di market coupling che vede coinvolti il maggior numero di Stati Membri e a cui anche l'Italia partecipa. L'ipotesi di ammettere prezzi negativi in questi due mercati implicherebbe la possibilità che anche i prezzi di sbilanciamento possano assumere valori negativi a prescindere dall'ammettere offerte di prezzo negative su MSD.

Viene, quindi, considerata anche la possibilità di introdurre **un floor negativo anche in MSD per le offerte a scendere** (caso in cui i soggetti abilitati presentano offerte di acquisto di energia precedentemente venduta nei mercati dell'energia) consentendo così agli operatori di formulare offerte di prezzo che meglio riflettono i loro costi, inclusi quelli di spegnimento (costo S), rendendo **più competitivi gli impianti di produzione maggiormente flessibili**. Posta la natura fissa del costo S e la possibilità di presentare offerte binomie su MSD, in tale mercato potrebbe essere previsto, alternativamente all'introduzione di un floor negativo per le offerte a scendere, un gettone volto a valorizzare il relativo costo opportunità.

Il documento 605/2015/R/eel considera, quindi, **gli effetti dell'introduzione dei prezzi negativi** sui contratti bilaterali registrati sulla Piattaforma Conti Energia (PCE), sulla disciplina degli impianti essenziali, che beneficiano della priorità di dispacciamento, e sulla generazione incentivata. **Per gli impianti incentivati**, l'Autorità suggerisce, che nelle ore nelle quali sul mercato dovesse formarsi un prezzo negativo, **non sia erogato l'incentivo**, consentendone però il recupero al termine del periodo di diritto, non distorcendo in tal modo la finalità dello strumento dei prezzi negativi e la finalità degli stessi incentivi.

Nel documento sono quindi riportate alcune **evidenze in termini di accadimento di prezzi pari a zero** nei diversi mercati (MB, MSD ex-ante, MI e MGP) negli anni 2013, 2014 e 2015 (periodo gennaio-agosto). Si ritiene, infatti, che tali valori possano essere assunti come proxy indicativa della frequenza di accadimento dei prezzi negativi, qualora fossero stati ammessi nel medesimo periodo. Sono anche riportati, a titolo comparativo, dati relativi alle frequenze storiche di accadimento dei prezzi negativi sui mercati day ahead, intraday e di bilanciamento in Germania, Francia e Belgio relativi al 2013.

Infine il documento riporta alcune considerazioni in merito all'**esercizio del potere di mercato**, che l'introduzione di prezzi negativi potrebbe favorire e per cui potrebbe essere richiesta maggiore trasparenza nella selezione delle offerte, monitoraggio nella formazione dei prezzi ed eventuale definizione di misure di mitigazione.

I soggetti interessati sono invitati a far pervenire all'Autorità le proprie osservazioni **entro il 15 febbraio 2016**.

Commenti sui prezzi negative dell'energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili.

Commissione Europea, dal 2013 ad oggi.

<http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2013/IT/1-2013-180-IT-F1-1.Pdf>

Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale e al Comitato delle Regioni, sul futuro della cattura e dello stoccaggio del carbonio in Europa

Attualmente, oltre l'80% del consumo globale di energia primaria utilizza combustibili fossili ai quali è imputabile l'85% dell'aumento del consumo di energia a livello mondiale nell'ultimo decennio. Le stime sul futuro consumo energetico in base alle politiche e agli sviluppi attuali indicano il persistere della dipendenza da questo tipo di combustibili⁹⁹. Si tratta di tendenze incongrue rispetto alla necessità di mitigare quei cambiamenti climatici che potrebbero portare a un aumento medio della temperatura globale di +3,6 o +4°C, secondo, rispettivamente, l'Agenzia internazionale dell'energia (AIE) e una relazione commissionata dalla Banca mondiale¹⁰⁰. Nella transizione verso un'economia integralmente a basse emissioni, le tecnologie per la cattura e lo stoccaggio del carbonio (CCS) rappresentano uno dei principali strumenti per conciliare l'aumento della domanda di combustibili fossili con la necessità di ridurre le emissioni di gas serra. Le tecnologie CCS sono probabilmente una necessità a livello mondiale se si intende contenere l'aumento della temperatura globale media al di sotto dei 2°C¹⁰¹. Le CCS sono altresì essenziali per conseguire gli obiettivi di riduzione dei gas a effetto serra dell'Unione e rappresentano un potenziale positivo per una reindustrializzazione a basse emissioni di carbonio delle industrie europee in declino. Tuttavia, ciò potrà avvenire

⁹⁹ Le stime dell'AIE, riportate nel *World Energy Outlook 2012*, indicano che il 59% della crescita nella domanda è soddisfatto da combustibili fossili e che nel 2035 tali combustibili costituiranno il 75% del mix energetico.

¹⁰⁰ "World Energy Outlook 2012", AIE, pagina 23; e "Turn down the heat" (Abbassa la temperatura) una relazione commissionata dalla Banca mondiale, disponibile all'indirizzo: <http://www.worldbank.org/en/news/2012/11/18/new-report-examines-risks-of-degree-hotter-world-by-end-of-century>.

¹⁰¹ La Commissione ha stimato che nel 2030, se s'interviene in modo appropriato a livello mondiale, il 18% della produzione di energia elettrica da combustibili fossili deriverà da tecnologie CCS, una cifra che sottolinea l'importanza futura di questa tecnologia per un percorso sostenibile in materia di emissioni di carbonio a livello mondiale e che dimostra la necessità di dare immediato avvio a programmi dimostrativi su grande scala. La stima è tratta da *Towards a comprehensive climate change agreement in Copenhagen. Extensive background information and analysis - PART 1* (Verso un accordo organico sui cambiamenti climatici a Copenaghen. Analisi e informazioni approfondite - PARTE 1) – disponibile al seguente indirizzo:

http://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/future/docs/sec_2009_101_part1_en.pdf

solo se le CCS saranno utilizzate come tecnologie ad ampio raggio, diffuse commercialmente su larga scala¹⁰².

Il comunicato procede descrivendo dettagliatamente le potenzialità dei metodi CCS in funzione dei possibili vantaggi per la riduzione del riscaldamento globale evidenziando però alcune problematiche intrinseche alla tecnologia.

Ma a distanza di 4 anni, si può notare l'orientamento dell'Europa verso i metodi di riutilizzo delle emissioni come la CO₂ (CCU), sullo sviluppo delle coltivazioni di biomasse algali, di prodotti chimici da scarti e da progetti di filiera. Di seguito è riportata la lista dei progetti usciti ad aprile 2017 (ELENCO CALL BIO-BASED INDUSTRIES 2017) e una sintesi dei due progetti più attinenti alla ricerca in oggetto.

ANNUAL WORK PLAN and Budget 2017 for the Bio-Based Industries Joint Undertaking

The identified priorities continue to build on those for 2016, but add emphasis on products with new functionalities, and on supporting actions to better realise the associated expected impacts. In addition, the emphasis on sustainability, addressing the environmental, social and economic dimension, is increased.

The strategic orientations for 2017 and 2018 are:

1. Fostering a sustainable biomass-feedstock supply to feed both existing and new value chains;
2. Optimising efficient processing for integrated biorefineries;
3. Developing innovative bio-based products for specific market applications;
4. Creating and accelerating the market uptake of bio-based products and applications.

Focus and impacts for 2017 to address the strategic orientations

¹⁰² La transizione verso regimi a più basse emissioni di carbonio può ovviamente avvenire anche grazie a una maggiore efficienza energetica, alle energie rinnovabili nonché a fonti energetiche senza emissioni di carbonio ma, in caso di continuo o accresciuto impiego dei combustibili fossili, le tecnologie CCS sono fondamentali perché rappresentano l'unica alternativa disponibile. Circa il 60% del consumo globale di energia primaria proviene attualmente dall'uso di combustibili fossili per applicazioni fisse. Altre opzioni di decarbonizzazione del sistema energetico: maggiore efficienza energetica, gestione della domanda e altre fonti energetiche a basse emissioni di carbonio, quali le fonti rinnovabili di energia e l'energia nucleare.

|  | | ELENCO CALL BIO-BASED INDUSTRIES 2017 | | |
|---|---|---------------------------------------|-------------|------|
| | TOPIC | TRL FINE PROGETTO | BUDGET | TIPO |
| 1 | BBI 2017.R1 – VALORISATION OF GASEOUS SIDE STREAMS FROM BIO-BASED OPERATIONS INTO CHEMICAL BUILDING BLOCKS | 5 | 2-5 milioni | RIA |
| 2 | BBI 2017.D1 – VALORISATION OF LIQUID AND SOLID SIDE STREAMS FROM BIO-BASED OPERATIONS INTO HIGH ADDED-VALUE PRODUCTS TO CREATE NEW FEEDSTOCK FOR BIO-BASED PRODUCTS | 6-7 | 7 milioni | IA |
| 3 | BBI 2017.D2 – INTEGRATED MULTI-VALORISATION OF ALGAE INTO ADVANCED MATERIALS AND HIGH ADDED-VALUE ADDITIVES | 6-7 | 7 milioni | IA |
| 4 | BBI 2017.R2 – INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR THE PRE-TREATMENT AND SEPARATION OF LIGNOCELLULOSIC FEEDSTOCK AND COMPLEX COMPOSITION STREAMS INTO VALUABLE FRACTIONS WHILE MAINTAINING KEY CHARACTERISTICS | 5 | 2-5 milioni | RIA |
| 5 | BBI 2017.R3 – EXPLOITING EXTREMOPHILES AND EXTREMOZYMES TO BROADEN THE PROCESSING CONDITIONS TO CONVERT BIOMASS INTO HIGH-VALUE BUILDING BLOCKS | 5 | 2-5 milioni | RIA |
| 6 | BBI 2017.F1 – INTEGRATED 'ZERO WASTE' BIOREFINERY UTILISING ALL FRACTIONS OF THE FEEDSTOCK FOR PRODUCTION OF CHEMICALS AND MATERIALS | 8 | 21 milioni | IA |
| 7 | BBI 2017.R4 – PROTEINS AND OTHER BIOACTIVE INGREDIENTS FROM SIDE STREAMS AND RESIDUES | 4-5 | 2-5 milioni | RIA |
| 8 | BBI 2017.R5 – NOVEL BIO-BASED CHEMICAL PRECURSORS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF MASS CONSUMPTION PRODUCTS | 5 | 2-5 milioni | RIA |
| 9 | BBI 2017.R6 – COMPETITIVE BIODEGRADABLE, COMPOSTABLE AND/OR RECYCLABLE BIO-BASED PLASTICS FOR A SUSTAINABLE END-OF-LIFE PHASE | 5 | 2-5 milioni | RIA |
| 10 | BBI 2017.R7 – NOVEL SECONDARY BIO-BASED CHEMICALS WITHOUT SIGNIFICANT FOSSIL-BASED COUNTERPARTS BUT WITH HIGH APPLICATION POTENTIAL | 4-5 | 2-5 milioni | RIA |
| 11 | BBI 2017.D3 – BREAKTHROUGH PRIMARY BIO-BASED CHEMICALS WITHOUT SIGNIFICANT FOSSIL-BASED COUNTERPARTS BUT WITH HIGH MARKETABILITY | 6-7 | 7 milioni | IA |
| 12 | BBI 2017.D4 – INNOVATIVE BIO-BASED FERTILISING PRODUCTS TO INCREASE THE SUSTAINABILITY OF FERTILISING PRACTICES IN AGRICULTURE | 6-7 | 7 milioni | IA |
| 13 | BBI 2017.D5 – ADVANCED BIO-BASED FIBRES AND MATERIALS FOR LARGE-VOLUME APPLICATIONS | 6-7 | 7 milioni | IA |
| 14 | BBI 2017.F2 – LARGE-SCALE PRODUCTION OF PROTEINS FOR FOOD AND FEED APPLICATIONS FROM ALTERNATIVE, SUSTAINABLE SOURCES | 8 | 21 milioni | IA |
| 15 | BBI 2017.S1 – ESTABLISH COOPERATION AND PARTNERSHIP WITH BRAND OWNERS AND CONSUMER REPRESENTATIVES TO IMPROVE THE MARKET ACCESS OF SUSTAINABLE BIO-BASED PRODUCTS | | 1 milione | CSA |
| 16 | BBI 2017.S2 – IDENTIFY OPPORTUNITIES FOR ICT TO INCREASE THE EFFICIENCY OF BIOMASS SUPPLY CHAINS FOR THE BIO-BASED INDUSTRY | | 1 milione | CSA |

THE 2017 CALL FOR PROPOSALS

Strategic Orientation 1 FEEDSTOCK

BBI 2017.R1 – VALORISATION OF GASEOUS SIDE STREAMS FROM BIO-BASED OPERATIONS INTO CHEMICAL BUILDING BLOCKS

Specific challenge:

Exhaust gases from bio-based operations (containing mainly CO₂) can serve as feedstock for different types of processing into valuable products. Integrating Carbon Capture and Utilisation (CCU) technologies within bio-based processes could minimise process efficiency losses, achieve a significant greenhouse gas emission reduction (potentially leading to negative emissions), and improve process economics by obtaining chemical building blocks for added-value products.

Technologies to convert gaseous feedstock have already reached a pilot and even an industrial scale in the petroleum and petrochemical industries. However, their use in biobased operations still requires further research for successful replication and scale-up. The specific challenge is to achieve sustainable and scalable conversion technologies for gaseous feedstock from bio-based operations into added-value products.

BBI 2017.D2 – INTEGRATED MULTI-VALORISATION OF ALGAE INTO ADVANCED MATERIALS AND HIGH ADDED-VALUE ADDITIVES

Specific challenge:

In a context of growing demand for resources, sustainably capturing the potential of the seas, oceans and inland waters is critical for Europe. Micro- and macro-algae represent an additional source of biomass that can be used for various applications. They also have the advantage of a low land requirement. The production of farmed aquatic plants, including mostly macro-algae, is presently estimated at 23.8 million tonnes (wet weight 2012) and growing.

Different cultivation systems to grow algae include open-sea, shallow-water, coastal areas and inland waters. There are specific systems for micro-algae like open ponds, photoreactors or bioreactors. Each system requires specific adaptation to its environment to maximise the biomass output, while minimising environmental impact (for example effluents, land use) and ensuring appropriate value chain logistics and conversion processes.

The specific challenge is to set up and operate a value chain for (micro- or macro-) algae production and logistics (harvest, transportation, storage) that can be used for their multivalorisation into added-value chemicals and materials, through a cascading approach where applicable.

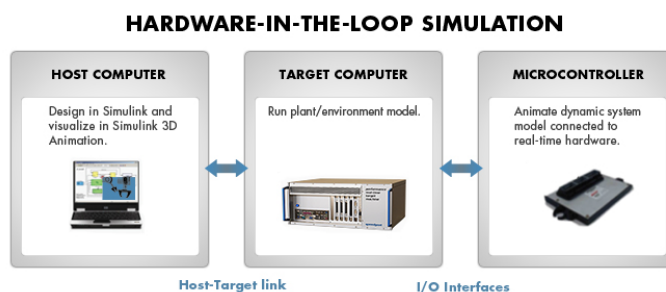
*Economia a Metanolo*¹⁰³

La recente proposta economia a metanolo è una possibile economia del futuro nella quale il metanolo sostituirebbe i comuni tipi di combustibile fossile come mezzo per l'accumulo di energia, sia come combustibile che come materia prima per la sintesi di idrocarburi e dei loro sottoprodotti. Si considera che possa offrire un'alternativa alla proposta dell'economia a idrogeno oppure all'economia a etanolo. Nel 2005 il premio Nobel George A. Olah auspicava la creazione di un'economia a metanolo nel saggio *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy* e nel 2006 assieme ad altri due coautori ha pubblicato un libro su questo tema. In questi libri, gli autori fanno un riassunto dello stato delle fonti di combustibile fossile ed altre fonti energetiche alternative, la loro disponibilità e le limitazioni prima di suggerire la sperimentazione della cosiddetta economia a metanolo. Il metanolo è un combustibile destinabile sia ai motori termici che alle pile a combustibile. Grazie al suo buon numero di ottano può essere usato direttamente come combustibile nelle auto (comprese auto ibride e modelli plug-in) utilizzando varie tipologie di motori a combustione interna già in uso. Il metanolo può anche essere utilizzato nella pila a combustibile, sia direttamente, nelle celle DMFC, sia indirettamente, dopo la sua trasformazione in idrogeno tramite il reforming. In condizioni normali, il metanolo è un liquido, cosa che gli consente di essere agevolmente immagazzinato, trasportato e distribuito, in modo simile a quanto si fa con la benzina e il gasolio. Chimicamente, può essere anche rapidamente trasformato per disidratazione in etere dimetilico, un sostituto del gasolio che possiede un numero di cetano pari a 55. Negli anni 2000, il metanolo viene utilizzato a larga scala (circa 37 milioni di tonnellate all'anno) come mattoncino chimico elementare per produrre numerosi prodotti chimici complessi e materiali polimerici. In aggiunta, può essere facilmente convertito tramite il processo "metanolo verso olefina" (MTO) in etilene e propilene, idrocarburi insaturi che possono essere impiegati per produrre idrocarburi sintetici di maggior peso molecolare ed altri loro derivati, che normalmente si ottengono dal petrolio e dal gas naturale.

¹⁰³ Fonte Wikipedia

Hardware in the loop (HIL)

Si indicano le tecniche di verifica (testing) di unità di controllo elettronico (ad esempio le centraline delle automobili) collegandole ad appositi banchi che riproducono in modo più o meno completo il sistema elettrico ed elettronico del sistema a cui sono destinate. Questi banchi sono apparati complessi che riproducono in tutto o in parte, fisicamente e/o in software, il prodotto a cui sono destinate le unità da verificare. Scopo delle prove HIL è di utilizzare i banchi per anticipare le verifiche su componenti, sottosistemi e sistemi già nella fase di progettazione e prototipazione, senza attendere la disponibilità del prodotto finale a cui sono destinate. Infatti, i componenti reali installati rispondono ai segnali simulati come se stessero operando in un ambiente reale, poiché non sono in grado di distinguere segnali provenienti da un ambiente fisico da quelli prodotti da modelli software. In questo modo il metodo HIL permette di riprodurre con i banchi le condizioni operative più diverse e osservando il comportamento del sistema e dei singoli elementi. Un frequente campo di applicazione dell'HIL è costituito dai test di robustezza rispetto ai malfunzionamenti, affidabilità e durata su nuovi componenti (ad es. verificare che il corretto comportamento di dispositivi di sicurezza come l'ABS nelle condizioni più estreme). Oltre alla possibilità di verificare con grande anticipo sistemi prototipali, un altro dei vantaggi dell'approccio HIL è la possibilità di automatizzare l'esecuzione di lunghe sequenze di test. Inoltre, considerando che il ciclo di sviluppo delle nuove componenti prevede la progettazione e realizzazione dei relativi modelli software, questi possono essere verificati già in questo stadio di sviluppo dopo averlo installato su apposite centraline riprogrammabili e prima ancora di avere un sistema fisico che lo implementi anche solo in forma prototipale.



Software-in-the-Loop (SIL)

Si indicano le tecniche di verifica (testing) di unità di controllo elettronico (ad esempio le cosiddette centraline degli autoveicoli) che utilizzano una emulazione completa via software del sistema a cui sono destinate. In pratica, secondo la metodologia SIL, il software di controllo da verificare viene fatto interagire direttamente con l'emulazione del sistema a cui è destinato per poterlo sollecitare come se fosse in condizioni operative. In questo modo è possibile effettuare una prima verifica già da quando sono disponibili i soli modelli software funzionanti, senza attendere la disponibilità di prototipi fisici. Il vantaggio di quest'approccio è dato dalla possibilità di disporre di ambienti virtuali per il test utilizzando hardware standard (ad es. PC) evitando il ricorso a costosi sistemi di simulazione fisici (come i banchi necessari per l'Hardware-in-the-loop) o a prototipi funzionanti.



Schema SIL / HIL

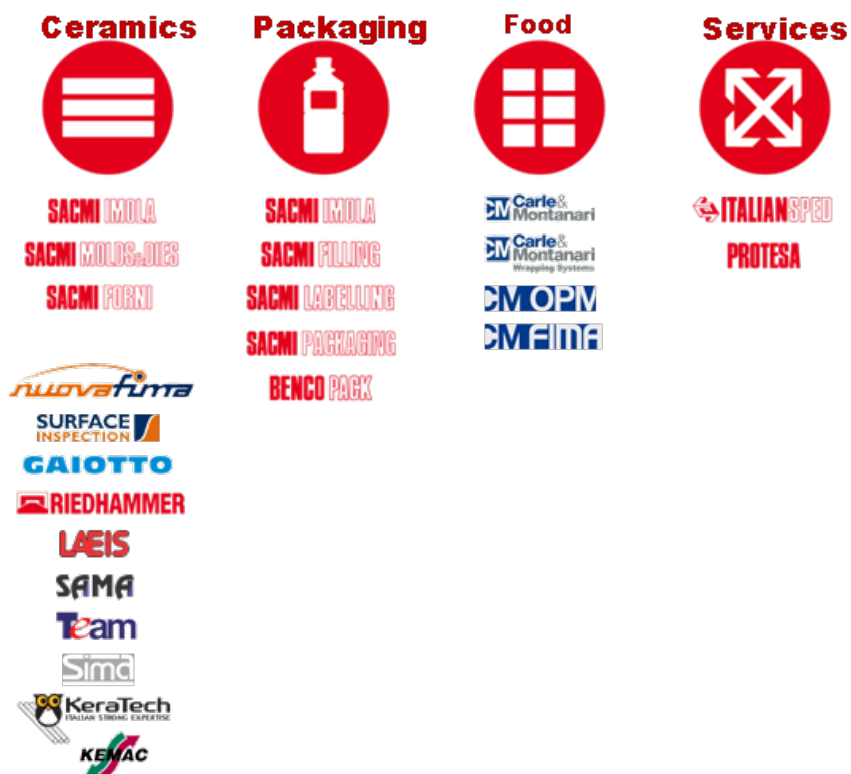
Descrizione Gruppo Sacmi

SACMI è un gruppo internazionale leader mondiale nei settori delle macchine per Ceramics, Packaging (inclusi Beverage e Closures&Containers), Food e Automation, grazie all'applicazione di tecnologie innovative, al forte posizionamento sul mercato mondiale e alla ricerca continua di alti standard qualitativi e servizio al cliente.

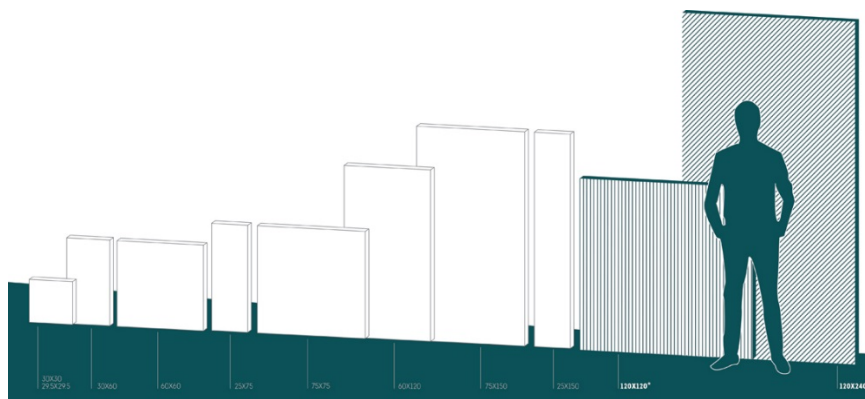
Sacmi Forni¹⁰⁴ fa parte dal 1985 di Sacmi, Gruppo. L'attività dell'azienda, iniziata nel ramo piastrelle, si è poi sviluppata in settori alternativi (estruso, laterizi, fusori, ceramici tecnici etc.). Il focus di Sacmi Forni oggi è la progettazione e la realizzazione di macchine termiche per l'industria ceramica. L'azienda si trova a Salvaterra di Casalgrande, nel comprensorio ceramico di Modena e Reggio Emilia.



¹⁰⁴ <http://www.sacmiforni.com/>



Schema dimensioni Lastre di grande formato



Esempi di dimensioni grandi lastre 120x120 e 120x240 in gres porcellanato

BIBLIOGRAFIA

- Niklas Luhmann - Potere e complessità sociale, Il Saggiatore, 2010
- Niklas Luhmann - Introduzione alla Teoria della Società- Pensa Multimedia Ed.,2014
- Niklas Luhmann - Raffaele De Giorgi-Teoria della Società- Franco Angeli Ed.,2003
- Niklas Luhmann - La riduzione di Complessità-,2015
- Niklas Luhmann- Società e Comunicazione- Rai Filosofia- www.filosofia.rai.it
- CROMER, A. L'eresia della scienza. Milano: Raffaello Cortina Editore, 1996.
- THOMAS S. KUHN – La struttura delle rivoluzioni scientifiche – Einaudi 1995

- A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization, Melis S Duyar.- 2015.
- Franzoni F, Milani M, Montorsi L. Cogeneration system based on the combustion of a metallic fuel - Italian patent MO2008A000249, Sept. 2008 - Extended to European patent PCT/EP2009/062334, Sept.2009.
- Franzoni F, Milani M, Montorsi M (DISMI-University of Modena and Reggio Emilia), Golovitchev V (Chalmers Univeristy of Technology). A novel concept for combined hydrogen production and power generation, SAE 2009-01-1946
- Franzoni F, Milani M, Montorsi M (DISMI-University of Modena and Reggio Emilia), Golovitchev V (Chalmers Univeristy of Technology). Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water: Analysis of the concept - International Journal of Hydrogen Energy 2010; 35:1548-59.
- Characterization and density separation of coal gasification residues generated from the Zecomix research infrastructure Milena Morone, Giulia Costa, Stefano Stendardo, Renato Baciocchi, Laboratory of Environmental Engineering, Dept. of Civil Engineering and Computer Science Engineering, University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy- ENEA Italian National Agency for New Technologies Energy and the Sustainable Economic Development-2015
- Carbonation of steel slags: testing of the wet route in a pilot-scale reactor, Renato Baciocchi, Giulia Costa, Paola Librandi, Stefano Stendardo - Laboratory of Environmental Engineering, Department of Civil Engineering and Information Technology Engineering, University of Rome "Tor Vergata" - 2013

- NewCO2Fuels Turning CO2 from Liability into Opportunity - 2015
- Capturing CO2 from Air - Climeworks AG - 2014
- Challenges of turning bioconversion of CO2 to chemicals into a robust technology at the Antwerp CCU-cluster - VITO, Mol, Belgium - 2014
- Power-to-X Using Reversible SOC Technology - Sunfire - 2015
- Solar energy for CO2 conversion into chemicals - Michele Aresta, Wojciech Macyk - 2015
- Applications of TiO2 nanotube arrays in environmental and energy fields - Qingxiang Zhou, Zhi Fang, Jing Li, Mengyun Wang - 2013
- Materiali funzionalizzanti potenzialmente idonei alla cattura della CO2 - D. Olevano, M. Tului - 2015
- Utilizzo della CO2 per produzione di combustibili - Vincenzo Barbarossa, Rosanna Viscardi - 2015
- Progetto Zecomix - Enea – 2011
- Conversione di CO2 in metano Vincenzo Barbarossa, Giuseppina Vanga Report RdS/2012/ 203
- Daniele Pernigotti, Carbon Footprint – Calcolare e comunicare l'impatto dei prodotti sul clima. Edizioni Ambiente, 2011.
- Luciani R., Masoni P., Santino D., 2011. Indicatori di sostenibilità ambientale: la carbon footprint. Energia, Ambiente e
- Innovazioni, vol. 3/2011. http://www.afs.enea.it/project/welfare/EAI/3_2011.pdf
- European Commission, Joint Research Center, 2007. Carbon Footprint - what it is and how to measure it.
- <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/Carbon-footprint.pdf>
- Carbon Footprint of Nations, <http://carbonfootprintofnations.com/>
- United Nations Environment Program, Climate Change <http://www.unep.org/climatechange/>
- The Guardian, The carbon footprint of everything <http://www.theguardian.com/environment/series/the-carbon-footprint-ofeverything>
- Hertwich E. and Peters G., 2009. Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 6414–6420
- Consumi e Clima, <http://www.consumieclima.org/link.html>
- One-step reduced kinetics for lean hydrogen–air deflagration - D. Fernández-Galisteo a, A.L. Sáncheza,*, A. Liñánb, F.A. Williams c – 2008
- World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050 – 2013
- CCU in the green economy report – 2001
- Using CO2 to Manage Algae Growth Wastewater as Biofuel, Frank Rogalla, Aqualia – 2014
- The marginal impacts of CO2, CH4 and SF6 emissions, Chris W. Hope - Pages 537-544 | Published online: 15 Jun 2011
- The Social Cost of CO2, Chris W. Hope - University of Cambridge – 2011

- A Study of Catalytic Carbon Dioxide Methanation Leading to the Development of Dual Function Materials for Carbon Capture and Utilization - Melis S. Duyar, COLUMBIA UNIVERSITY – 2015
- Studio numerico sperimentale di una tecnologia innovativa di upgrading del biogas in biometano, Università La Sapienza - Laura Di Biagio, 2014
- CO₂ conversion to CH₄ - Vincenzo Barbarossa, Claudia Bassano, Paolo Deiana, Giuseppina Vanga C. R. "Casaccia" – ENEA – via Anguillarese, 301 – 00123 S. M. Galeria-Roma (Italy) In book: CO₂: A Valuable Source of Carbon, Publisher: Springer-Verlag London, Editors: M. De Falco, G. Centi, G. Iaquaniello, pp.123-146 -2014
- Il riciclo delle batterie al litio un problema aperto, FONDAZIONE ONLUS Telios – 2014
- Life cycle assessment of CO₂ capture and utilization - Niklas von der Assen, Philip Voll, Martina Petersb and Andre' Bardow – 2013
- Non-Isothermal Flow of CO₂ in Injection Wells: Evaluation of Different Injection Modes - Orlando Silva – 2015
- State of the Art and Perspectives of CO₂ Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications - Manuel Götz, Amy McDaniel Koch, Frank Graf – 2014
- Accumulo di energia con produzione di metano e assorbimento di CO₂ – ENEA – 2009
- Studio numerico – sperimentale di una tecnologia innovativa di upgrading del biogas in biometano- Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica La Sapienza- Laura Di Biagio Anno accademico 2014/2015
- Turning CO₂ into Revenues, Turning - David Banitt - NewCO₂Fuels – 2015
- Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy di George A. Olah, Alain Goeppert, G. K. Surya – 2019.
- Superfici funzionalizzate con TiO₂ - CSM - Daniela Olevano, Rosanna Pileggi – 2014
- Advances in CO₂ capture technology – The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program Jose' D. Figueroa a, Timothy Fout, Sean Plaszynski, Howard McIlvried, Rameshwar D. Srivastava – 2007.
- The marginal impacts of CO₂, CH₄ and SF₆ emission - Chris W. Hope - Pages 537-544 Published online: 15 Jun 2011
<http://dx.doi.org/10.1080/14693062.2006.9685619>
- The Social Cost of CO₂ from the PAGE09 Model - Chris W. Hope - University of Cambridge - Discussion Paper - No. 2011-39 | September 15, 2011
- One-step reduced kinetics for lean hydrogen-air deflagration - D. Fernández-Galisteo a, A.L. Sáncheza,*, A. Liñánb, F.A. Williams c - 2008
- Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy - Frances C. Moore & Delavane B. Diaz – Affiliations Contributions Corresponding author - Nature Climate Change 5, 127–131 (2015)

- Ceramic sanitary wares:reverse engineering strategy for mould prototyping, R.Saponelli and Other.- 2014
 - CFD Analyses of Syngas-Fired Industrial Tiles Kiln Module, R.Saponelli and Other.- 2014
 - Ceramic sanitary wares: Prediction of the deformed shape after the production process, R.Saponelli and Other.- 2014
 - A numerical strategy for predicting the mould of ceramic sanitary wares, R. Saponelli and Other.- 2015
 - Sdewes – 11th Conference on Sustainable development of Energy Water and Environment System: Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement, Prof. L.Montorsi, Ing. M.Stefani, M.Lizzano, R. Saponelli - 2016
 - Star Conferance - Combined numerical approach for the energy efficiency analysis of a ceramic kiln under actual operating conditions, Prof. M.Milani, Prof. L.Montorsi, Ing. M.Stefani, M.Lizzano, R. Saponelli - 2017
-
- Baker N.R. e Webber A.N.. (1987) Interactions between photosystems. Advances in Botanical Research Incorporating Advances in Plant Pathology, Volume 13, pp. 1-66 Barbato F. (2009)
 - Tecniche di Coltura di Microalghe. ENEA/TB04/01/2009 www.enea.it. Becker E. Wolfgang (1994) Microalgae: biotechnology and microbiology. Cambridge University Press. pp. 293. Ben-Amotz A.,
 - Katz A. , Avron M. (1982) Accumulation of beta-carotene in halotolerant algae: purification and characterization of beta-carotene-rich globules from *Dunaliella bardawil* (Chlorophyceae). Journal of Phycology Volume 18, pp. 529–537.
 - Borowitzka Michael A., Huisman John M., Osborn A. (1991) Culture of the astaxanthin-producing green alga *Haematococcus pluvialis* 1. Effects of nutrients on growth and cell type. Journal of Applied Phycology. Volume 3, No. 4, pp. 295304.
 - Boussiba S., Fan L., e Vonshak A. (1992). Enhancement and Determination of Astaxanthin Accumulation in Green Alga *Haematococcus pluvialis*. Methods in Enzymology. Volume 213, pp. 386-391. Brennan L. e Owende P.
 - (2010). Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts. Renewable and Sustainable
 - The Biology of cyanobacteria. University of California Press. pp. 688. Cavalier-Smith T. (2002). Chloroplast Evolution: Secondary Symbiogenesis and Multiple Losses. Current Biology. Volume 12, pp. 62-64.

- Cheng L., Zhang L., Chen H., Gao C. (2006). Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. *Separation Purification Technology*. Volume 50, pp. 324-329.
- Di Termini I., A. Prassone, C. Cattaneo, M. Rovatti. (2011). On the nitrogen and phosphorous removal in algal photobioreactors. *Ecological Engineering*. Volume 37, No.6, pp. 976-980. Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. (1956).
- Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* Volume 28, pp. 350-356. Fauchot J., Gosselin M., Levasseur M., Mostajir B., Belzile C., Demers S., Roy S., Villegas P.Z. (2000).
- Influence of UV-B radiation on nitrogen utilization by a natural assemblage of phytoplankton. *Journal of Phycology*. Volume 36, No. 3, pp. 484-496. Figueroa F.L., Conde-Álvarez R., Gómez I. (2003).
- Relations between electron transport rates determined by pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence and oxygen evolution in macroalgae under different light conditions. *Photosynthesis Research*. Volume 75, No. 3, pp. 259-275. Fryer M. J., Andrews J. R., Oxborough K., Blowers D. A., Baker N. R. (1998).
- Relationship between CO₂ Assimilation, Photosynthetic Electron Transport, and Active O₂ Metabolism in Leaves of Maize in the Field during Periods of Low Temperature. *Plant Physiology*. Volume 116, No. 2, pp. 571-580.
- Use of photoacclimation in the design of novel photobioreactor to achieve high yields in algal mass cultivation. *Journal of Applied Phycology*. Volume 15, No. 2-3, pp. 121-126. Hélène C. e Janelle M. Curtis (1998).
- Chlorophyll extraction from microalgae: A review on the process engineering aspects. *International Journal of Chemical Engineering*. Vol. 2010, 11 pp.
- Jeon Y.C., Cho C.W., Yun Y.S. (2005). Measurement of microalgal photosynthetic activity depending on light intensity and quality. *Biochemical engineering journal*. Volume 27, pp. 127-131.
- Molina G.E., Fernández J., Acién Fernández F.G., Chisti Y. (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology*. Volume 92, pp. 113-131.
- Park J.B.K., Craggs R.J. e Shilton A.N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*. Volume 102, pp. 3542.
- Park J.B.K., Craggs, R.J. (2010). Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science and Technology*. Volume 61, pp. 633-639.
- Pearson H. (2003). Microbial interactions in facultative and maturation ponds. *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Volume 27, pp. 449-458. Pulz O. (2001).

- Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. Applied Microbiology and Biotechnology. Volume 57, pp. 287293.
- Zhekisheva M., Boussiba S., Khozin-Goldberg I., Zarka A., Cohen Z. (2002). Accumulation of oleic acid in *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae) under nitrogen starvation or high light is correlated with that of astaxanthin esters. Journal of Phycology. Volume 38, No. 2, pp. 325-331.
- Sfruttamento delle microalghe tra realtà e prospettive – Fabio Barbato ed al. Enea Roma n° 26 Aprile 2012
- Rodolfi L., Bassi N., Parente I., Padovani G., Bonini G., Chini Zittelli G., Biondi N., Tredici M. R. (2007) Lipid production from marine microalgae: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor cultivation in pilot photobioreactors. 8th Int. Marine Biotechnology Conference, Eilat (Israel), 11-16 March 2007.
- <http://www.scotese.com/climate.htm>
- <http://www.co2science.org/>
- Qualità delle microalghe e scelte tecnologiche alla base della coltivazione in fotobioreattori - L'Integratore Nutrizionale CEC Editore, R. Saponelli e altri – 2016
- Convegno Nutrizione 2.0 – Alghe e CO2 da fermentazione alcolica – A. Barbaresi UniBo – R.Saponelli – 2016

