



Regione Toscana



UNIVERSITÀ DI PISA



Scuola Superiore  
Sant'Anna  
di Studi Universitari e di Perfezionamento

## Facoltà di Ingegneria



### **Progetto H<sub>2</sub> Filiera Idrogeno :**

Tecnologie e materiali per la  
produzione e la distribuzione  
dell'Idrogeno



Leonardo Tognotti



## *Tecnologie e sistemi per la produzione di idrogeno - WP2-*

*E.Biagini, M.Simone, C.Nicolella, L.Tognotti*

*Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica industriale e Scienza dei  
Materiali*

## *Aspetti metallurgici e strutturali per lo sviluppo di veicoli a idrogeno - WP3- WP4.3-*

*M.Beghini, L.Bertini, F.Frendo, C.Santus, R.Valentini*

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica. Nucleare e della Produzione  
Dipartimento di Ingegneria Chimica , Chimica Industriale e Scienza dei  
Materiali*

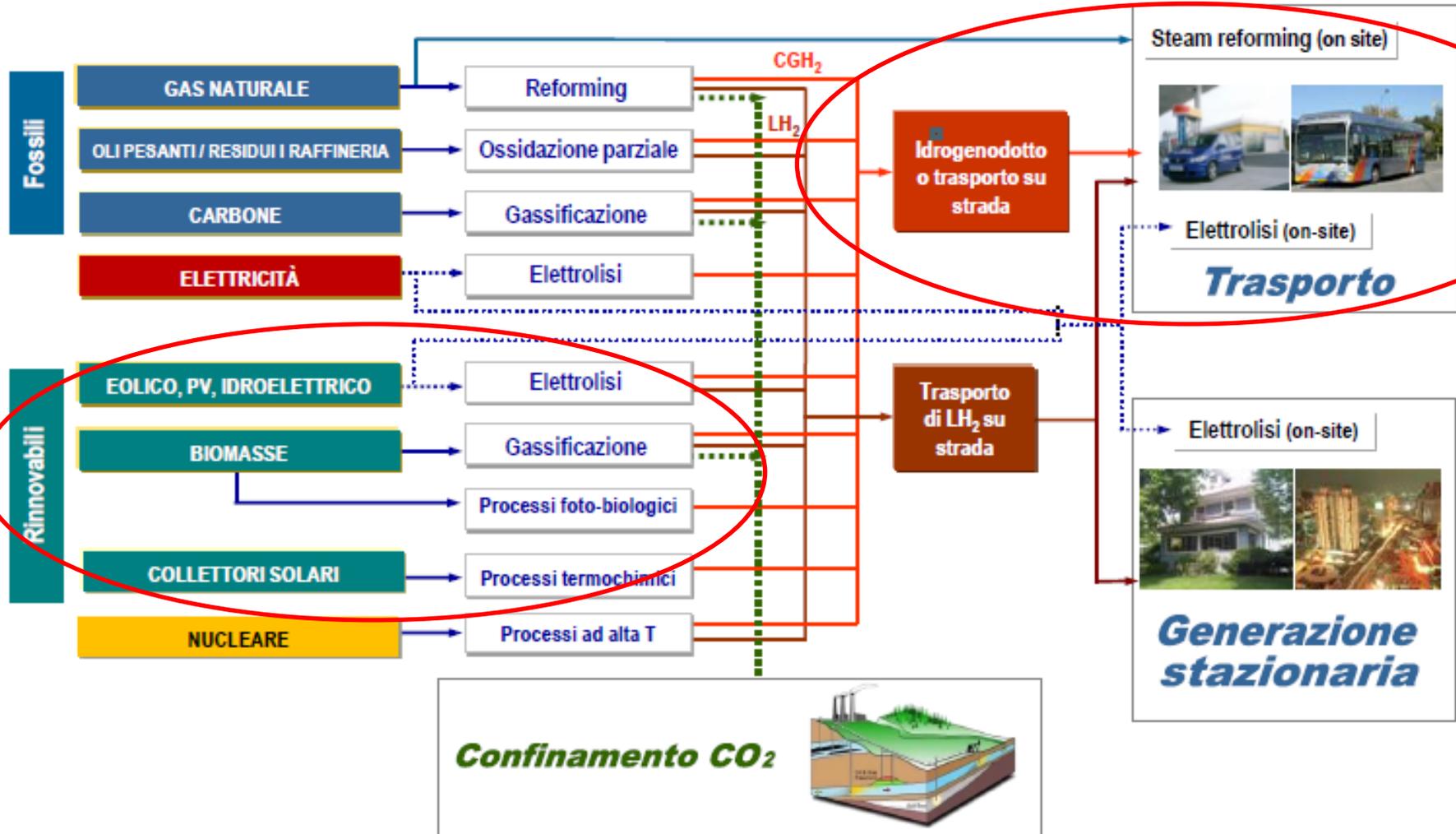


# Tecnologie e sistemi per la produzione di idrogeno

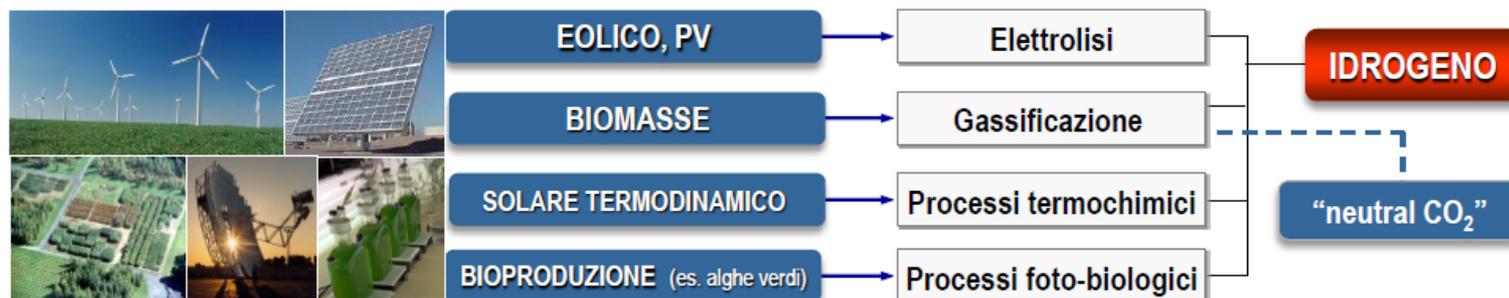
- L'idrogeno non esiste in natura nella sua forma elementare ma deve essere separato da altri componenti o prodotto ex novo.
- Attualmente le infrastrutture necessarie per realizzare una economia basata sull'idrogeno non esistono.
- Necessità di valutare con approccio scientifico rigoroso le risorse materiali ed energetiche spese in ogni processo:
  - **produzione**
  - stoccaggio
  - distribuzione
  - rifornimento



# Ciclo dell'idrogeno



# Produzione da rinnovabili (fonte ENEA)



## NECESSITÀ DI R&S

### ◆ ELETTROLISI

- Miglioramento dell'efficienza del processo
- Sviluppo materiali e processi per elettrolisi ad alta temperatura
- Riduzione dei costi del sistema (attraverso miglioramenti dei processi di fabbricazione, semplificazione dell'ingegneria d'impianto)

### ◆ GASSIFICAZIONE BIOMASSE

- Ottimizzazione dell'affidabilità, rese e costi del processo
- Nuove configurazioni d'impianto per integrazione con processi di separazione CO<sub>2</sub>
- Preparazione e logistica delle materie prime

### ◆ PROCESSI TERMOCHIMICI

- Dimostrazione dei cicli termochimici più promettenti su scala pilota
- Messa a punto di processi di separazione idrogeno/ossigeno

### ◆ PRODUZIONE DA SORGENTI BIOLOGICHE

- Studio dei processi con selezione delle specie organiche (microrganismi, alghe) coinvolte
- Dimostrazione su scala pilota



# Scopi della ricerca

1. studio di filiera (risorsa, trasformazione, stoccaggio)
2. potenzialità di produzione di idrogeno in Toscana (risorsa → H<sub>2</sub>)
3. studio di processi integrati: fattibilità e bilanci *tecnico-economici*
  - *individuare i sistemi più idonei per attivare circuiti virtuosi che coinvolgano le PMI sul territorio*
  - *valutare i contesti in cui far sorgere l'opportunità della produzione di idrogeno da fonti di energia rinnovabile*

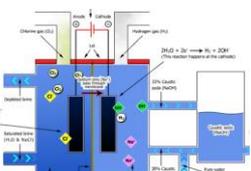


Purificazione gas geotermico

Raffineria

**IDROGENO**  
elevata purezza  
(utilizzo in celle a combustibile)

trasporto o stoccaggio



Processi elettrolitici (cloro-soda)

**impianti esistenti**

**IDROGENO**  
alta purezza  
(utilizzo in motori combustione interna)

conversione separazione

1. studio di filiera:

approvvigionamento risorsa rinnovabile: *eolico, solare, biomasse, geotermico, cascami* (idrogeno come sottoprodotto di processi esistenti)

gas di sintesi

Gassificazione

elettrolisi

energia elettrica

**energie rinnovabili**

Idroelettrico



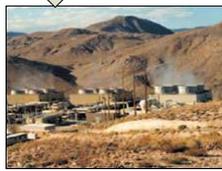
Eolico



Solare PV



Geotermico



Combustione

**Biomasse**

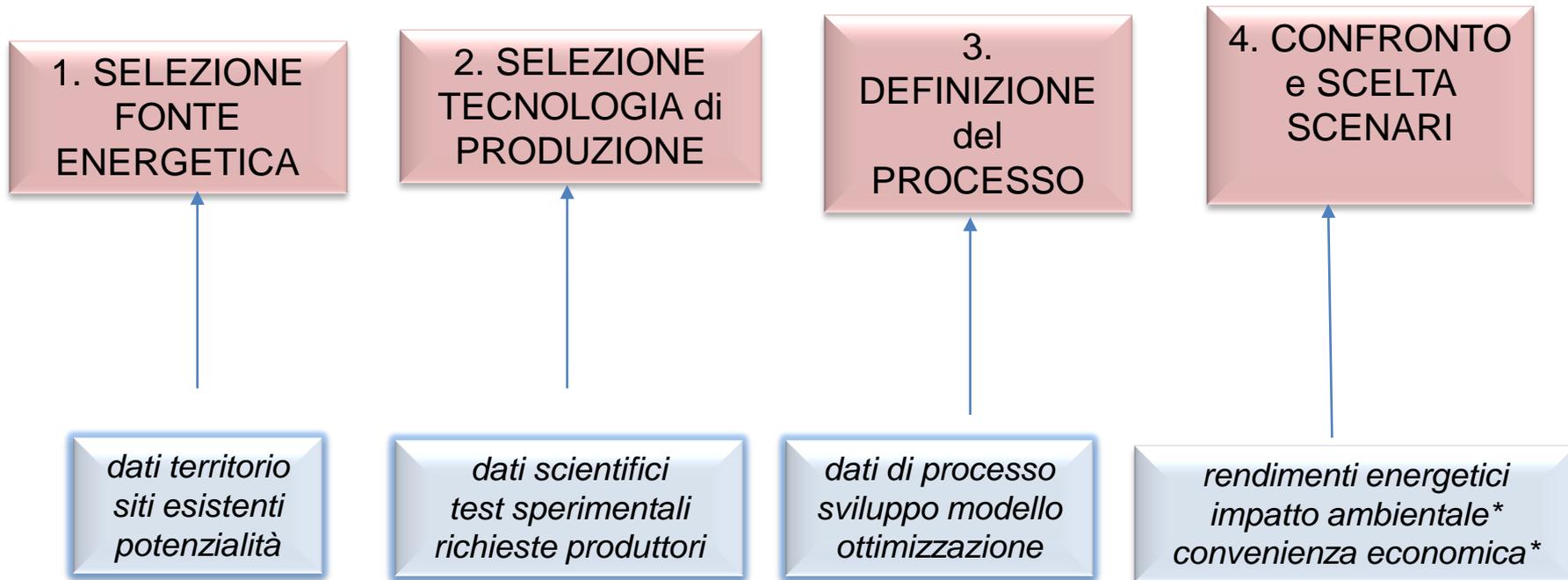


studio dei processi di conversione: (gassificazione, elettrolisi) e di separazione

# Produzione di idrogeno da fonti energetiche rinnovabili

## Metodo di analisi:

definizione degli *steps* di analisi e dei *needs*



\* in seguito ad analisi  
LCA e LCC in WP8



# Sinergie con altri progetti ed iniziative in atto

*Sistemi Integrati di Produzione di Idrogeno e sua Utilizzazione nella Generazione Distribuita*

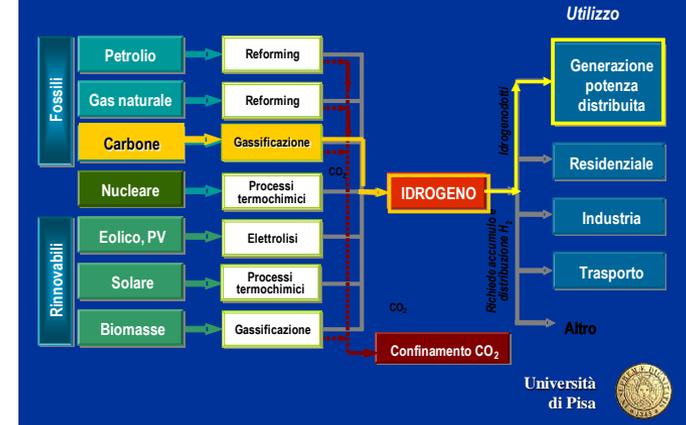
(FISR-2006-2010)-

Coordinamento CPR-UNIFI

**Focus:**

*Separazione H<sub>2</sub> da miscele di gas*

Progetto FISR: Sistemi Integrati di Produzione di Idrogeno e sua Utilizzazione nella Generazione Distribuita



*Sviluppo di cicli “zero emission”*

*a combustione di idrogeno*

(MATT Regione Veneto)-

Capofila ENEL (2007-2009 e 2011-2012)

**Focus: combustione H<sub>2</sub>**



**C.R.I.B.E. : varie iniziative e progetti:**

- La fattoria dell’Energia (ENEL)
- Sviluppo di una bio-raffineria integrata
- (Fondazione Cassa di Risparmio PI, altri )

**Focus: biomasse per l’energia**



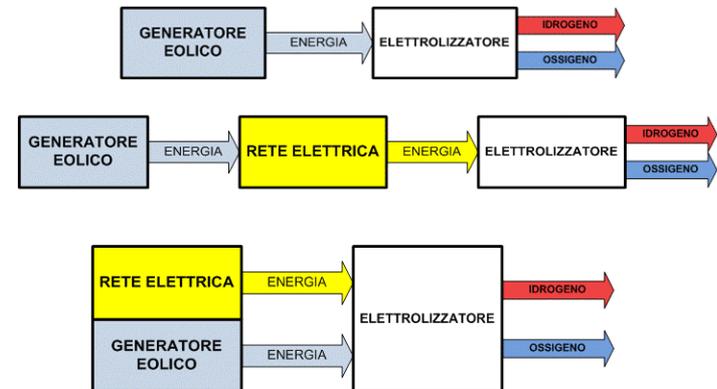
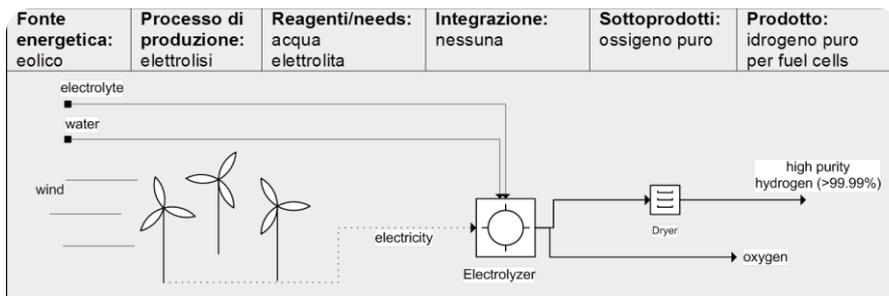
Sinergie con il Centro Ricerca Interuniversitario  
per le **Bio Energie** – CRIBE  
Impianto di Bioraffineria  
San Piero a Grado, Pisa





# Esempi di filiere studiate

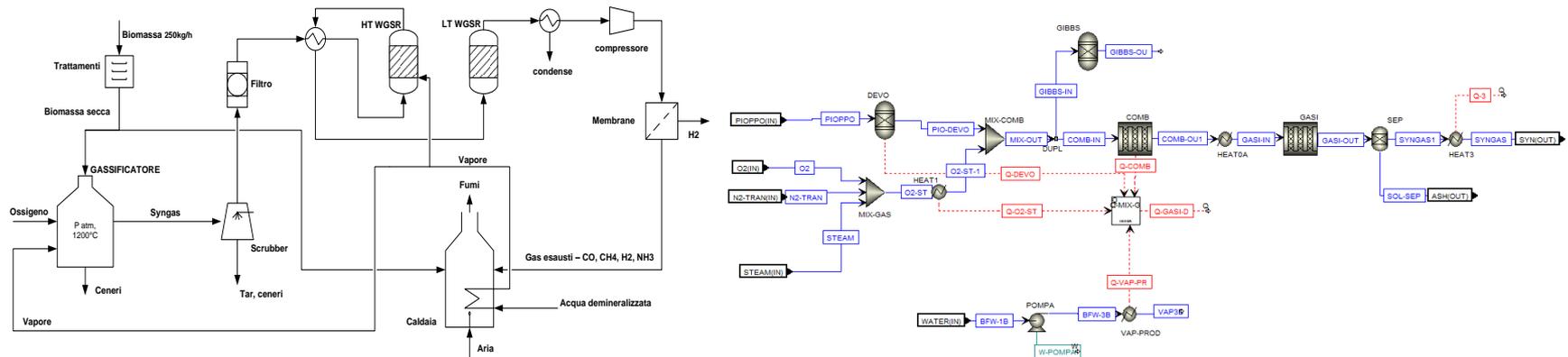
- **biomassa** in combustione diretta per produrre **energia elettrica** - > idrogeno per **elettrolisi**;
- **biomassa** convertita in **syngas**, a sua volta utilizzato per produrre **energia elettrica** > idrogeno per **elettrolisi**;
- **biomassa** convertita in **syngas**, purificato e opportunamente **separato** per dare direttamente idrogeno;
- **energia eolica** utilizzata per produrre **energia elettrica** -> idrogeno per **elettrolisi**;
- **gas geotermici** trattati per **separare** idrogeno.



# Metodologia: analisi ed ottimizzazione di processo

Per ogni scenario sono stati condotti bilanci di massa e di energia tramite lo sviluppo di modelli di processo (con codici di calcolo commerciali, con *subroutine* sviluppate *ad hoc*) con dati di input realistici e uniformi per ogni operazione;

- il grado di dettaglio in ogni processo è stato tale da permettere di valutare l'effetto delle condizioni operative sulle efficienze del processo;



# Metodologia: analisi ed ottimizzazione di processo

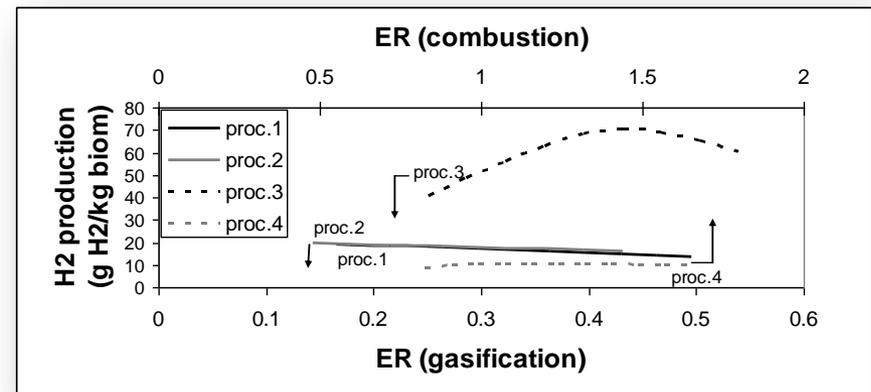
E' stata condotta un'analisi parametrica per ogni processo per individuare le condizioni ottimali; Si sono confrontati diversi scenari dal punto di vista della produzione di idrogeno e della convenienza energetica;

è stato costruito un **database** per i diversi scenari da utilizzare come input (*produzione*) nell'analisi economico-ambientale del WP8 (studio del ciclo di vita (LCA));

Gassificazione biomassa / combustione syngas / elettrolisi	Alimentazione		Consumi		Prodotti			
	biomassa tipo	biomassa totale kg/h	aria totale kg/h	acqua totale kg/h	reagenti o KOH kg/h	consumi elettricità kW	er prodotto idrogeno kg/h	sottoprodotto ossigeno kg/h
<input type="checkbox"/> pioppo	40	323.2106	2006.283	2.403311	1.507481	0.722486	2.889884	
<input type="checkbox"/> sansa	250	2020.066	12542.3	16.02207	9.186209	4.81664	19.26656	
	500	4040.132	25090.67	34.04489	17.91311	10.23536	40.94144	
	1000	8080.264	50193.48	72.09933	34.93056	21.57488	86.69533	
	40	281.0196	1801.945	2.032573	1.333831	0.611043	2.444171	
	250	1756.373	11264.72	13.55048	8.126034	4.073618	16.29447	
	500	3512.745	22534.57	28.79478	15.84967	8.856439	34.62576	
	1000	7025.491	45079.41	60.97718	30.90685	16.33128	73.32513	

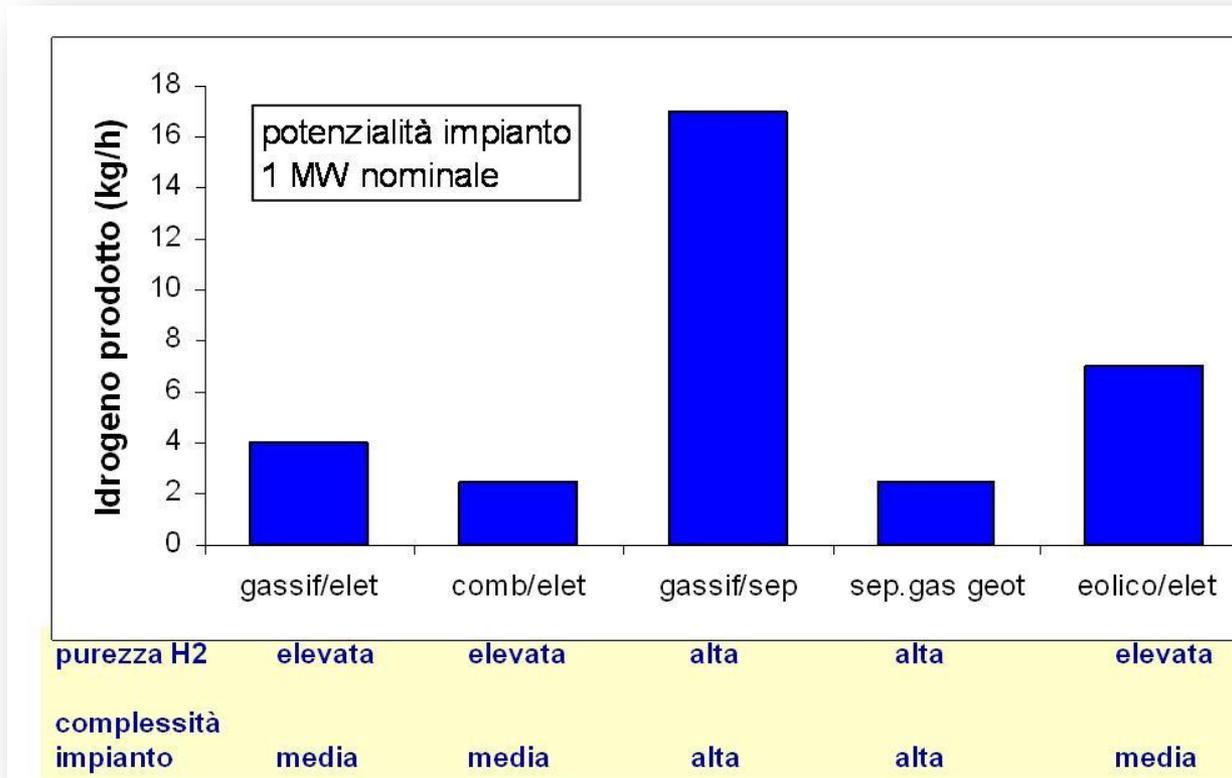
  

Gassificazione biomassa / conversione syngas / separazione	Alimentazione		Prodotti			
	biomassa tipo	biomassa totale kg/h	portata ossigeno kg/h	vapore totale kg/h	consumi elettricità kW	er prodotto idrogeno kg/h
<input type="checkbox"/> pioppo	250	123.75	301.1944	80.4677	18.31082	
<input type="checkbox"/> sansa	250	123.75	335.7747	77.47048	17.32208	
	250	101.25	217.3392	69.80481	15.14159	
	250	112.5	235.9851	74.51205	16.79351	
	250	135	357.693	68.22379	14.68685	
	500	225	570.1571	148.4743	33.69656	
	500	247.5	802.3888	158.5858	36.82185	
	500	202.5	434.8784	135.8364	30.28318	
	500	270	864.231	144.8796	33.80149	
	1000	495	1204.778	304.9302	73.24329	
	1000	405	943.3249	282.7159	64.71448	
	1000	450	1021.355	301.9318	71.82975	
	1000	540	1555.588	295.5755	70.25103	



Il database contiene i risultati delle simulazioni dei modelli di processo (quantificazione di input e output materiali ed energetici, quali per es. emissioni gassose) per tutti i processi considerati al variare di parametri operativi (tipo di biomassa alimentata, taglia dell'impianto, ecc.).

# Risultati: confronto dei processi studiati



🌍 E. Biagini, L. Masoni, L. Tognotti.

**Comparative study of thermochemical processes for hydrogen production from biomass . Bioresource Technology 101, 6381-6388 (2010)**



# Scopi della ricerca

1. studio di filiera (risorsa, trasformazione, stoccaggio)
2. potenzialità di produzione di idrogeno in Toscana (risorsa → H<sub>2</sub>)
  - survey delle risorse rinnovabili disponibili
  - definizione delle filiere di produzione più promettenti
  - valutazione della potenzialità di produzione di idrogeno in Toscana



## EOLICO

★ 5 parchi  
30 turbine  
45 MW installati

★ +11 parchi al 2020  
100 turbine  
200 MW in progetto



★  
3-4.5 kg/h H<sub>2</sub>  
per MW installato  
H<sub>2</sub> elevata purezza



EOLICO



SOLARE



classe 1 (1-3 kW)  
6400 impianti (17 MW)

classe 2 (3-20 kW)  
8800 impianti (75 MW)

 classe 3 (20-200 kW)  
1450 impianti (120 MW)

classe 4 (200-1000 kW)  
280 impianti (177 MW)

classe 5 (1-5 MW)  
25 impianti (44 MW)

classe 6 (>5 MW)  
4 impianti (85 MW)

**TOTALE: 515 MW**

 2.6-3 kg/h H2  
per MW installato  
elevata purezza



 **EOLICO**

## IDROELETTRICO



360 MW installati



 **SOLARE**

4.5-5 kg/h H<sub>2</sub>  
per MW installato  
elevata purezza



**TOSCANA**



EOLICO

IDROELETTRICO



SOLARE



TOSCANA



GEOTERMICO



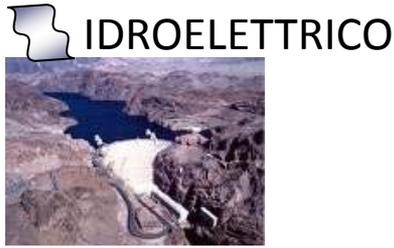
32 impianti  
810 MW installati



15 kg/h H<sub>2</sub>  
per MW installato  
elevata purezza



**EOLICO**



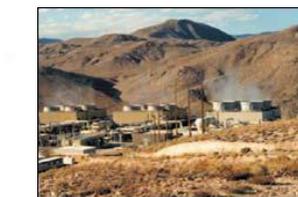
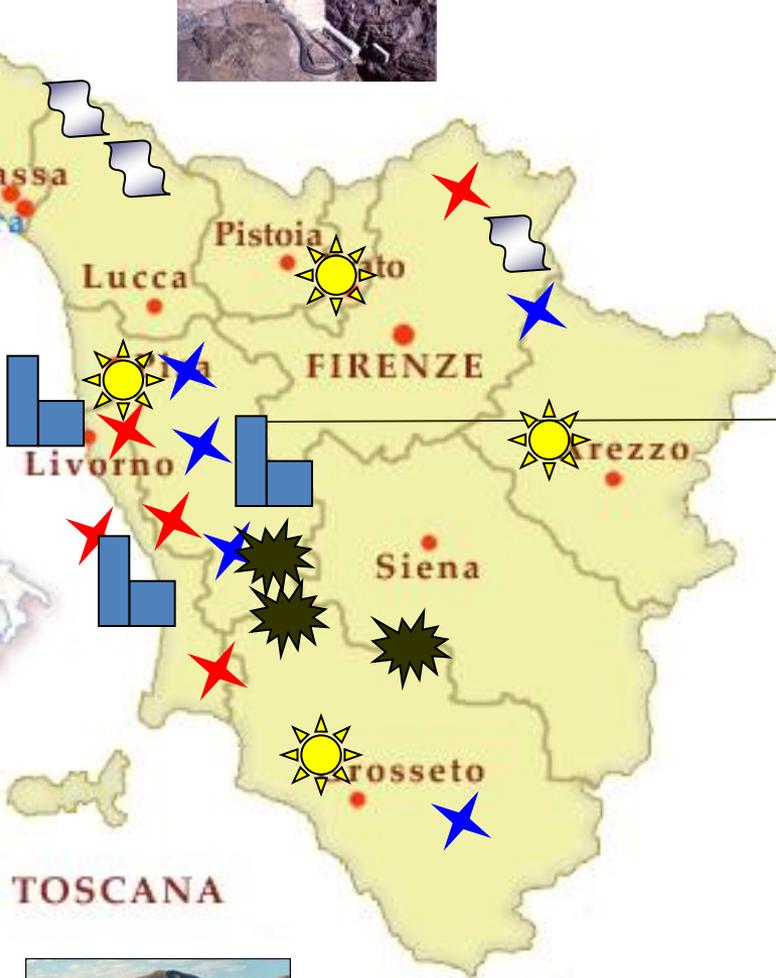
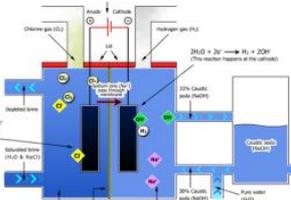
**IDROELETTRICO**



**SOLARE**



**IMPIANTI ESISTENTI**



**GEOTERMICO**

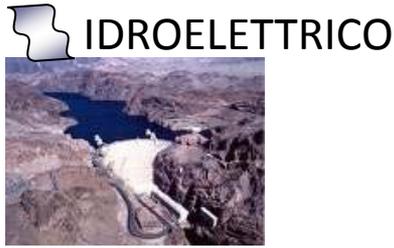
1 raffineria (LI):  
20-25000 Nm3/h  
H2 media purezza

1 cloro-soda (LI):  
6600 Nm3/h  
H2 elevata purezza

1 cloro-potassa (PI):  
1200 Nm3/h  
H2 elevata purezza



EOLICO



IDROELETTRICO

aree potenzialmente ottime

aree potenzialmente buone

totale: 320.000 ha

colture energetiche:  
pioppo SRF  
arundo  
miscanto  
cardo

+ residui forestali, boschivi,  
agroalimentari

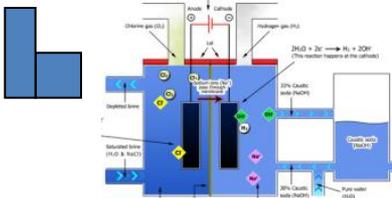
impianto di  
gassificazione:  
16-18 kg/h H2  
per Mw di  
potenza termica  
alta purezza



SOLARE



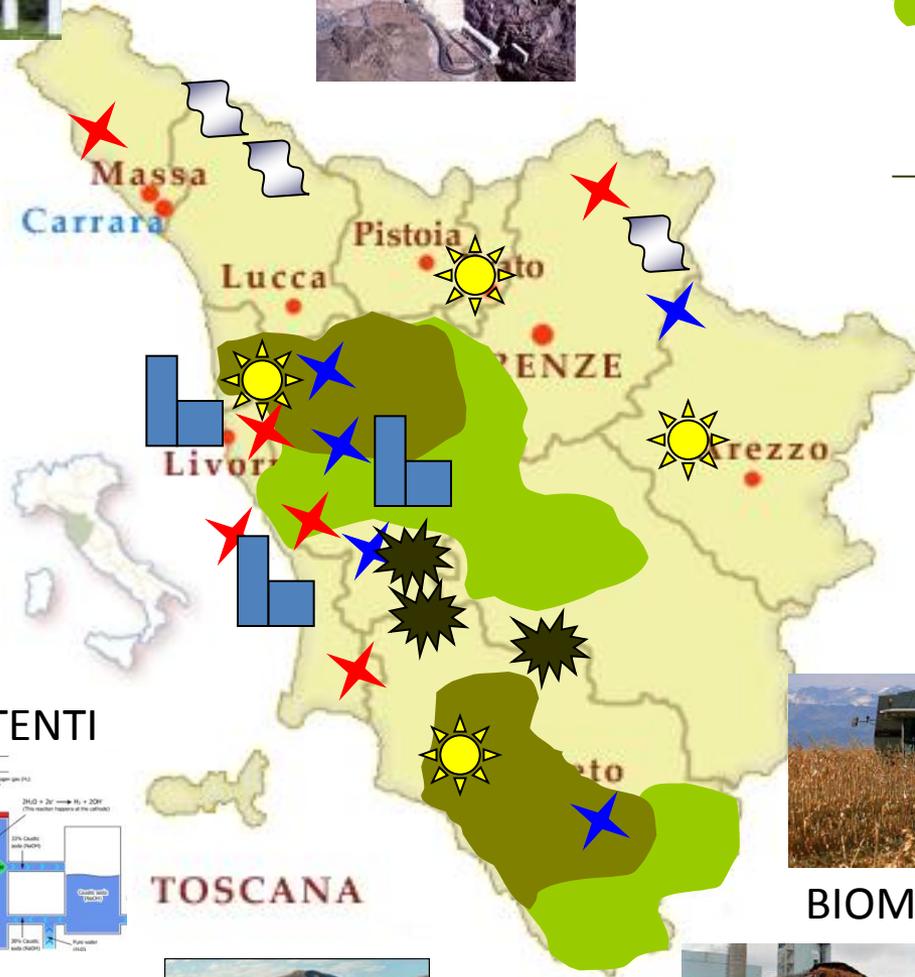
IMPIANTI ESISTENTI



GEOTERMICO



BIOMASSE

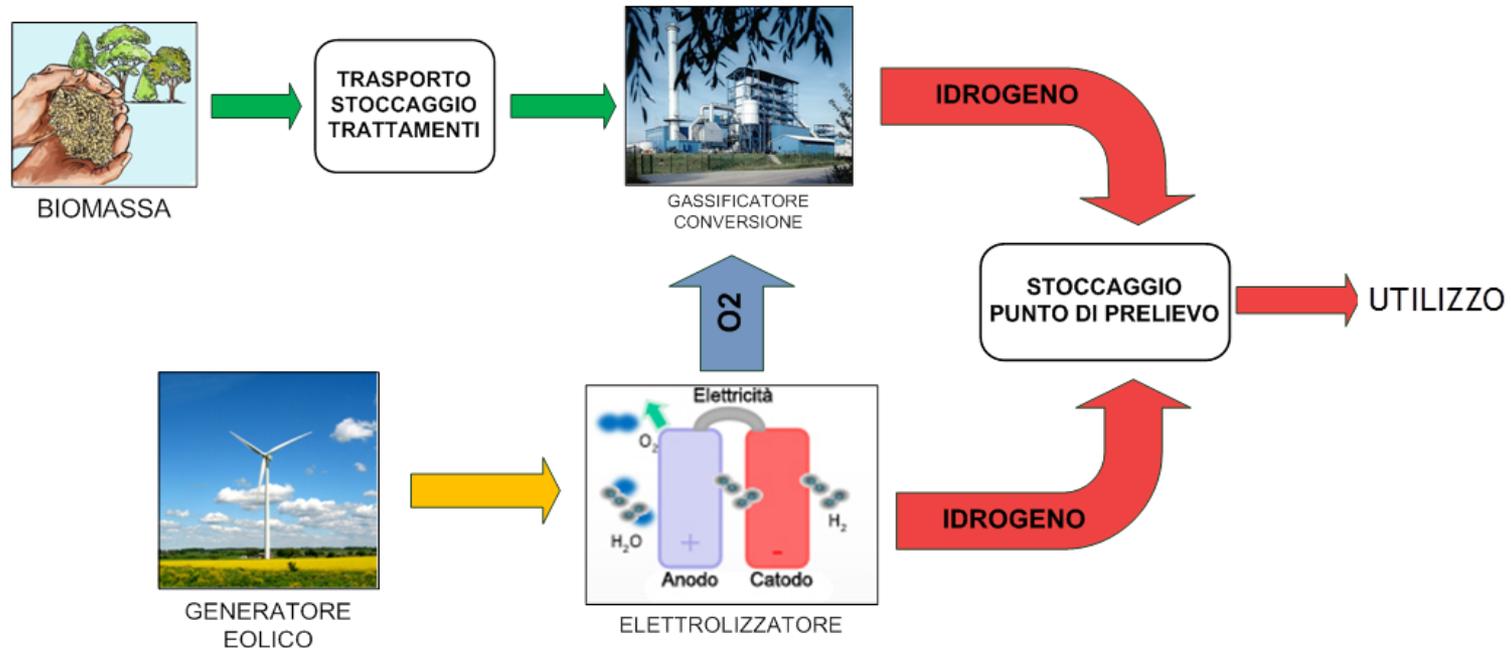




# Scopi della ricerca

1. studio di filiera (risorsa, trasformazione, stoccaggio)
2. potenzialità di produzione di idrogeno in Toscana (risorsa → H<sub>2</sub>)
3. studio di processi integrati: fattibilità e bilanci *tecnico-economici*
  - necessità di definire processi integrati per utilizzo di sottoprodotti, cascami termici e **diminuire i costi di filiera**
  - studio di alcuni processi integrati per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili (**filiera corta**)
  - analisi preliminare dei **costi di produzione di idrogeno** per alcuni impianti integrati

# Integrazione processo di gassificazione biomasse con eolico/elettrolisi.



Opzioni:

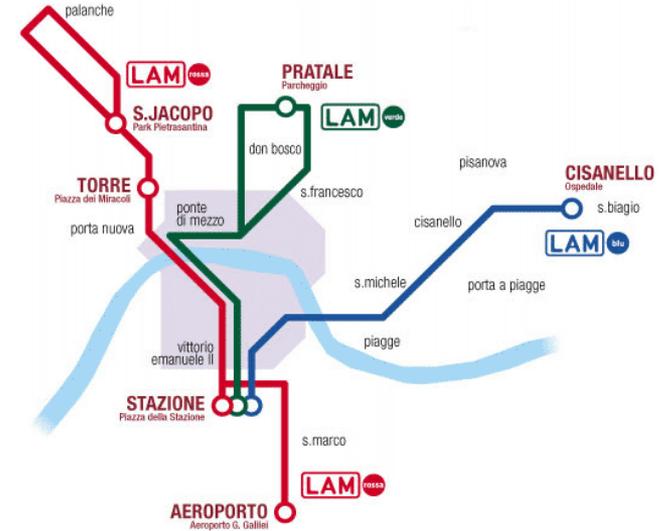
- filiera corta: localizzazione dell'impianto a "piè di campo" (distanza media per colture dedicate 7 km, raggio max per residui 40 km)
- ossigeno prodotto da elettrolisi inviato alla gassificazione
- vapore necessario prodotto da caldaia a biomassa
- essiccamento della biomassa da cascami termici dell'impianto



# Scenario di utilizzo

*LAM (Linee Alta Mobilità) città di Pisa:*

- 13 autobus (6 LAM Rossa, 4 LAM Verde, 3 LAM Blu)
- 37540 km, percorrenza media annua per autobus
- H2 da elettrolisi → celle a combustibile
  - richiesti 17.1 kg/h di idrogeno (5700 h di funzionamento dell'impianto)
- H2 da gassificazione → motore combustione interna
  - richiesti 15.4 kg/h di idrogeno (721 h di funzionamento dell'impianto)



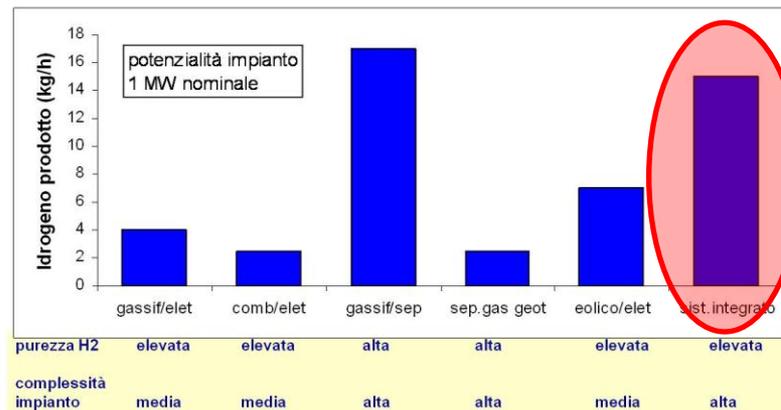
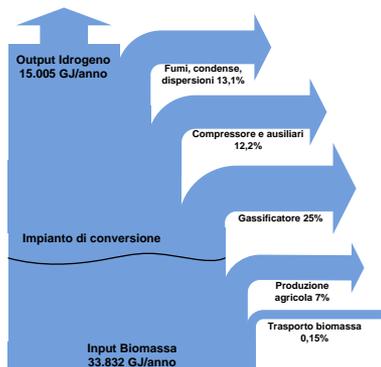
**C'E' UN NUOVO MODO DI MUOVERSI**





# Analisi filiera integrata

Biomassa richiesta	280 kg/h	2200 t/anno
Estensione	175 ha (filiera corta) max distanza 7 km	15 ha per arundo 20 ha per sorgo 140 ha per pioppo SRF 40 km di raggio per la sansa
Potenziale termico biomassa	1.3 MW	37000 GJ/y
Spesa energetica produzione biomassa (coltivazione, raccolta, trattamenti)		2400 GJ/y
Spesa energetica trasporto		50 GJ/y
Pale eoliche (Pontedera?)	8 MW nominali	4 turbine
Produzione parco eolico	1200 h/y (ore equivalenti)	35000 GJ/y
H2 prodotto da gassificatore	15.6 kg/h	125 t/y
H2 prodotto da elettrolizzatore	15.3 kg/h	122.5 t/y
Potenziale termico H2 totale	1.03 MW	29700 GJ/y
Rendimento	44%	





# Analisi dei costi di filiera (produzione)

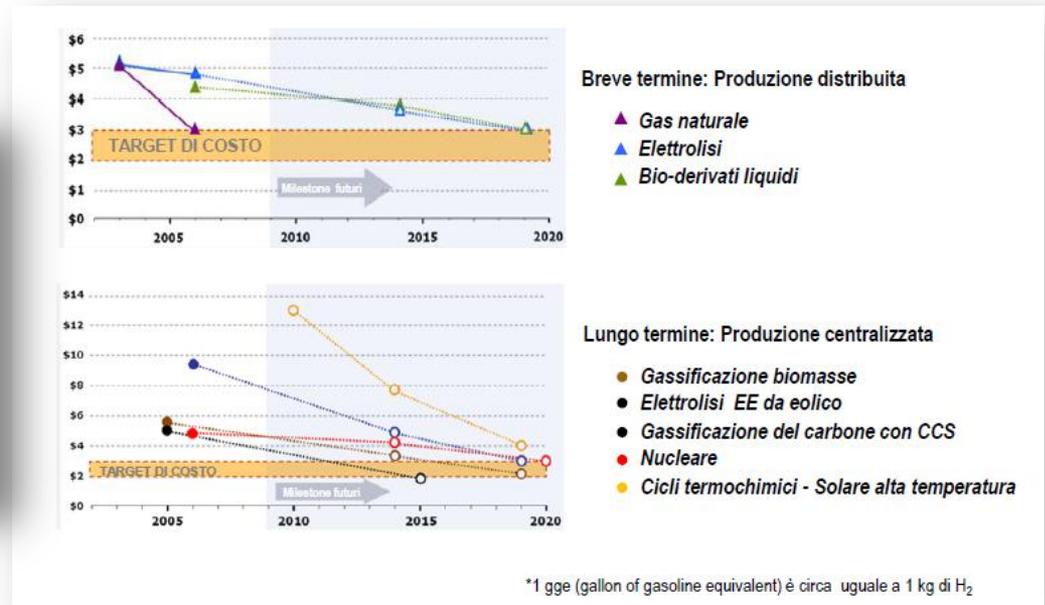
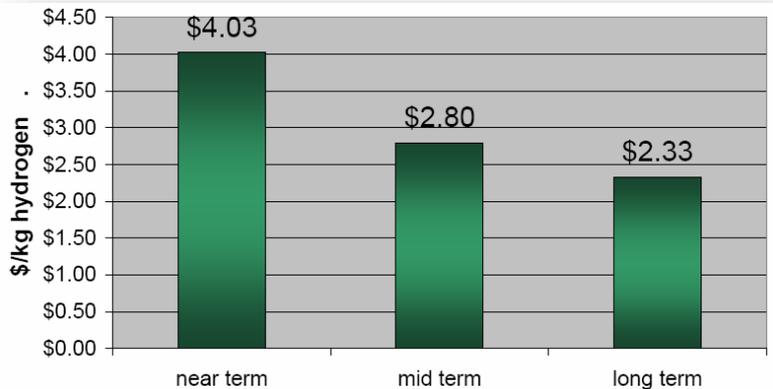
- Ipotesi e assunzioni:
  - costi agricoli (aratura, fertilizzazione, talee, diserbo, irrigazione, potatura, raccolta, trattamenti)
  - trasporto e stoccaggio biomassa
  - costi d'impianto:
    - investimento (capitale e di manutenzione)
    - di esercizio
  - vendita di energia elettrica con ritiro dedicato:
    - analisi dei dati di vento, confronto con prezzi e fasce orarie
  - certificati verdi:
    - 86 €/MWh al 2010, 65% di collocamento

## Costo dell'idrogeno

- 36 €/GJ      **4.3 €/kg**

## Forbice di costo per varie opzioni

- 28-42 €/GJ      **3.4-5.0 €/kg**



# Principali prodotti della ricerca

D.2.1 Analisi dei processi produttivi e delle fonti energetiche di interesse per la produzione di idrogeno sul territorio regionale- - Database

*D.2.2 Monografia:* Studio comparativo di processi per la produzione di idrogeno a partire da biomasse

*D.2.3 Studio di fattibilità tecnico-economica* di un processo integrato per la produzione di idrogeno per le conversioni energetiche di bordo ed il trasporto

- *Sviluppo di metodologie sperimentali per lo studio della gassificazione delle biomasse*
- *Sviluppo di strumenti software dedicati per la ottimizzazione di processi industriali*
- Dodici tesi di laurea (triennale e magistrale)
- Una borsa post-doc
- Due dottorandi hanno collaborato alle attività
- **Publicazioni: 5 su rivista, 12 a convegno, 1 monografia, possibile brevetto**



UNIVERSITÀ DI PISA



REGIONE  
TOSCANA



# ***Progetto H<sub>2</sub> Filiera Idrogeno***

## **Aspetti metallurgici e strutturali per lo sviluppo di veicoli a idrogeno**

*M.Beghini, L.Bertini, F.Frendo, C.Santus, R.Valentini*

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione  
Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza  
dei Materiali*

L'idrogeno è attualmente distribuito in **forma liquida** e come **gas compresso**, utilizzando carri bombolai o idrogenodotti.

## Bombole



Capacità 10 Nm<sup>3</sup>, 200 bar



## Trasporto su strada



Tube trailer (1.000-6.000 Nm<sup>3</sup> CH<sub>2</sub>)

I tube trailers possono essere utilizzati come sistemi di accumulo presso l'utente o alla stazione di servizio



Carri bombolai (39.000 Nm<sup>3</sup>)

## Idrogenodotti



- Rete di 720 km in USA e 1500 km in Europa
- I gasdotti utilizzati sono costruiti in acciaio ed operano a pressioni di 10-20 bar, con un diametro di 25-30 cm

## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz.  
effetto H su  
materiali  
(D3.1, D3.2,  
D3.3)

Sviluppo  
tecniche FEM  
per analisi  
diffusione  
(D4.3.1, D3.4)

Sviluppo  
tecniche misura  
autotensioni  
(D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni  
componenti per impianti  
distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout  
impianti H su  
veicoli  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Verifiche  
strutturali  
veicoli con  
impianti H  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Sistemi  
innovativi  
recupero  
energia  
(D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a  
basso impatto ambientale

## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz. effetto H su materiali (D3.1, D3.2, D3.3)

Sviluppo tecniche FEM per analisi diffusione (D4.3.1, D3.4)

Sviluppo tecniche misura autotensioni (D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni componenti per impianti distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout impianti H su veicoli (D4.3.3.1, D4.3.3.2)

Verifiche strutturali veicoli con impianti H (D4.3.3.1, D4.3.3.2)

Sistemi innovativi recupero energia (D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a basso impatto ambientale

# Caratterizzazione della suscettività all'idrogeno dei materiali impiegabili nel sistema di compressione e distribuzione dell'Idrogeno

## Bombole di idrogeno compresso per il sistema di stoccaggio



### Tipiche bombole per H<sub>2</sub>:

- **Bassa resistenza meccanica**
- **Elevati spessori**
- **Elevato peso**
- **API X52**



### Bombole per CH<sub>4</sub>:

- **Maggiore resistenza meccanica**
- **Spessori inferiori**
- **Peso inferiore**
- **1.12Cr0.25Mo**

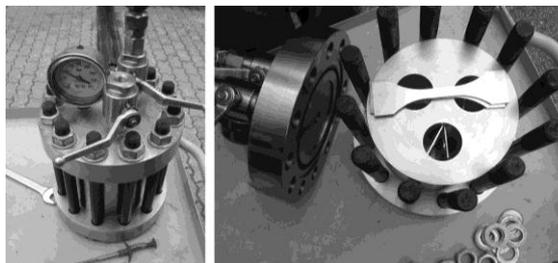
## D3.2 Prove di qualificazione statiche

Caricamento  
elettrochimico

Prove SSRT

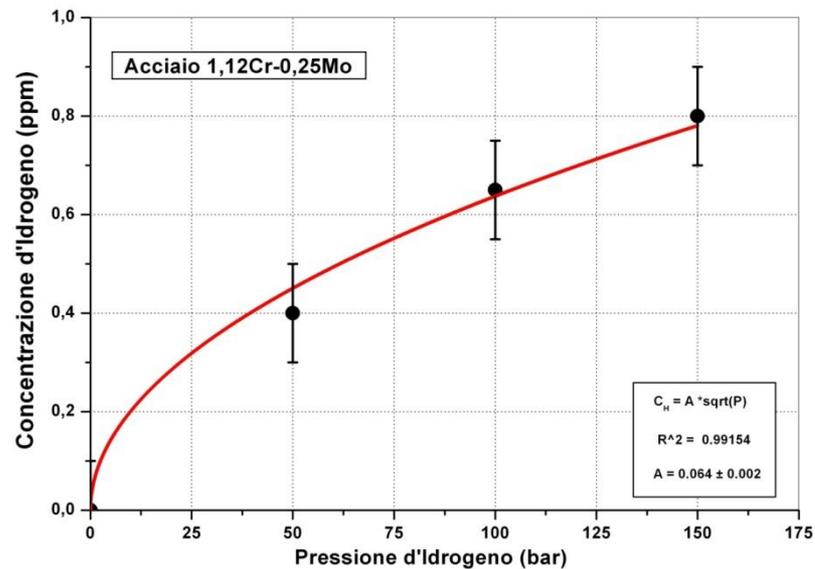
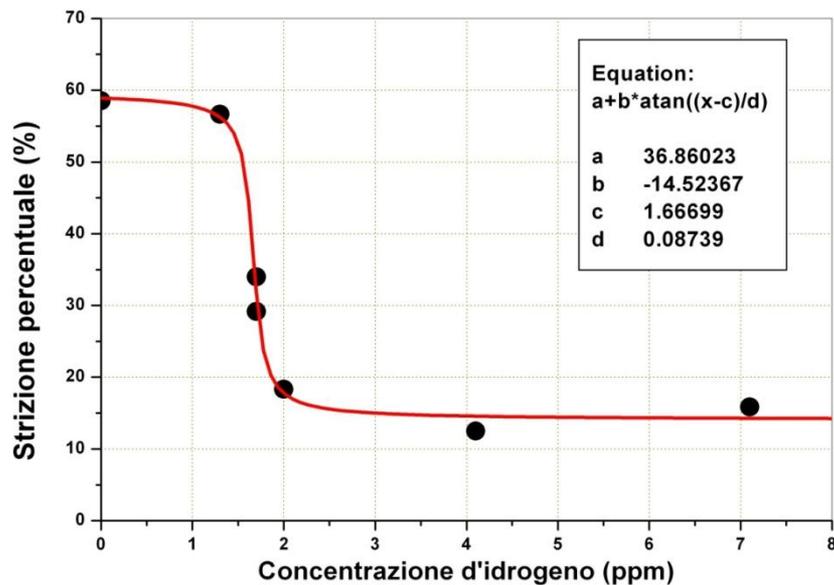
Concentrazione  
critica

D3.1 Messa a punto del  
sistema di caricamento  
mediante autoclave



Caricamento  
in autoclave

Curva  
concentrazione-  
Pressione  
parziale H





## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz.  
effetto H su  
materiali  
(D3.1, D3.2,  
D3.3)

Sviluppo  
tecniche FEM  
per analisi  
diffusione  
(D4.3.1, D3.4)

Sviluppo  
tecniche misura  
autotensioni  
(D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni  
componenti per impianti  
distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout  
impianti H su  
veicoli  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

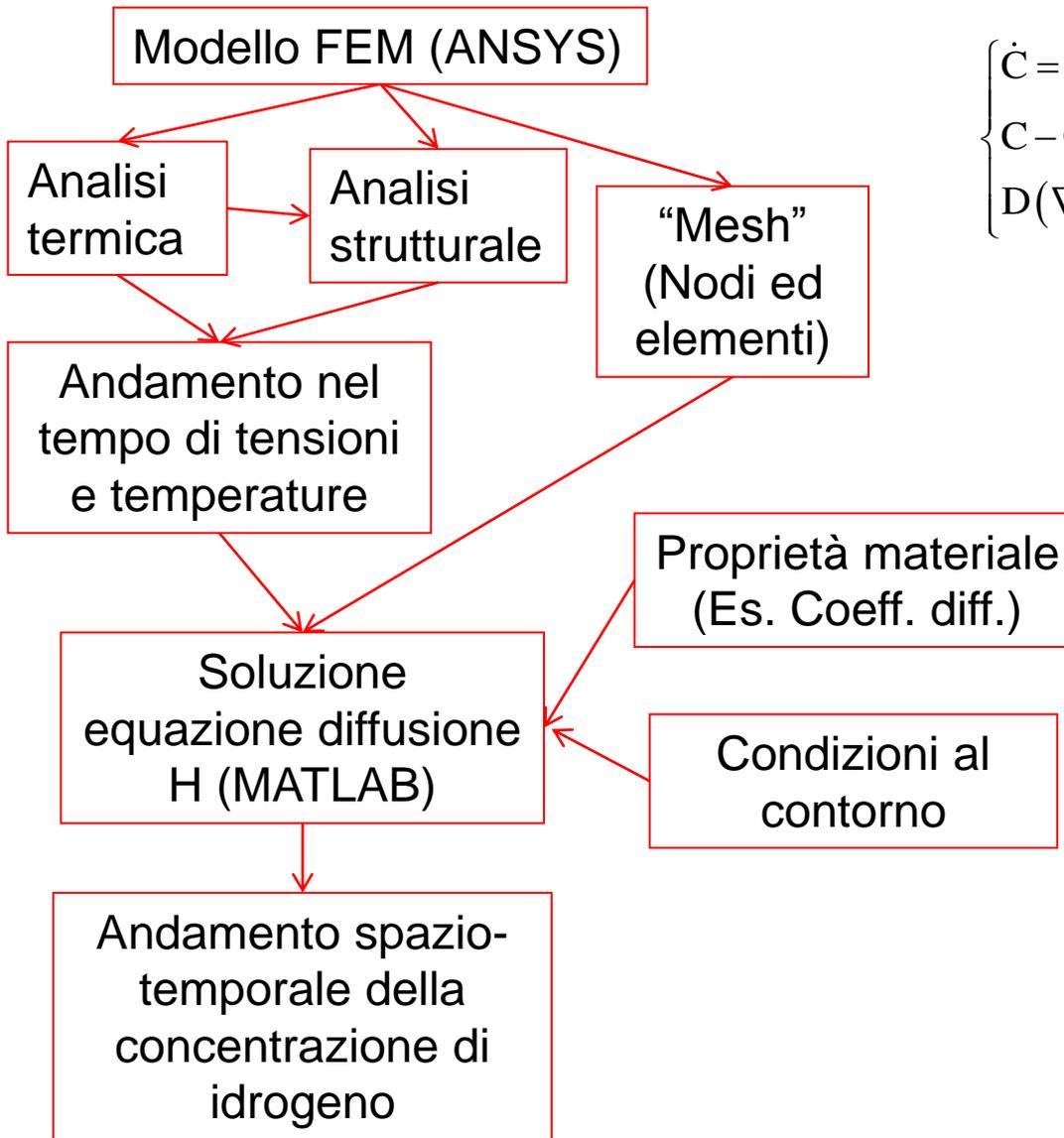
Verifiche  
strutturali  
veicoli con  
impianti H  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Sistemi  
innovativi  
recupero  
energia  
(D.4.3.4)

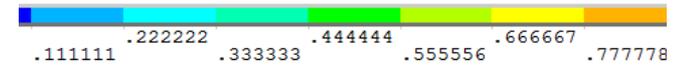
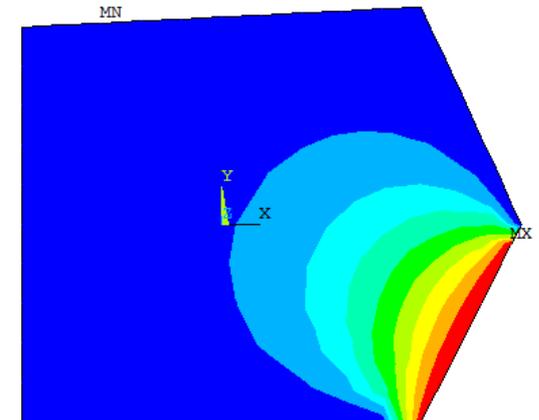
Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a  
basso impatto ambientale

### D3.3 Procedura per simulazione FEM del processo di diffusione dell'idrogeno



$$\begin{cases} \dot{C} = D\nabla^2 C + H\nabla(\nabla \text{tr} \mathbf{T}) \\ C - \tilde{C} = 0 & \text{su } S_C \\ D(\nabla C \cdot \mathbf{n}) + HC(\nabla \text{tr} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}) + \varphi = 0 & \text{su } S_n \end{cases}$$



## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz. effetto H su materiali (D3.1, D3.2, D3.3)

Sviluppo tecniche FEM per analisi diffusione (D4.3.1, D3.4)

Sviluppo tecniche misura autotensioni (D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni componenti per impianti distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout impianti H su veicoli (D4.3.3.1, D4.3.3.2)

Verifiche strutturali veicoli con impianti H (D4.3.3.1, D4.3.3.2)

Sistemi innovativi recupero energia (D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a basso impatto ambientale

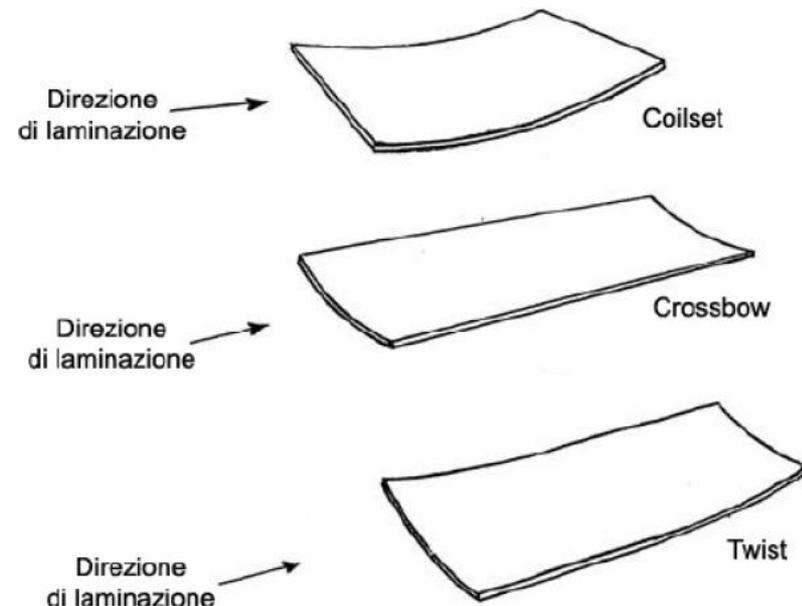
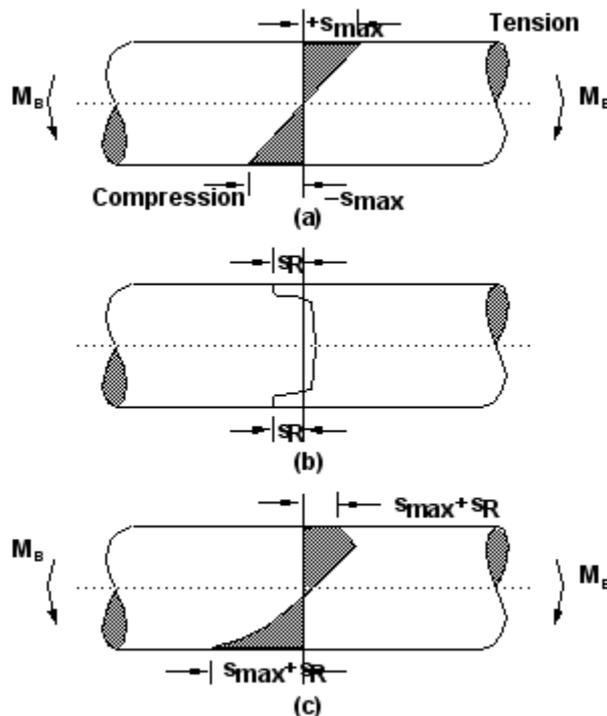
## D4.3.2 Sviluppo tecniche per la misura delle autotensioni

Stato di tensione pre-esistente all'azione di carichi esterni  
In molti casi valori elevati

**Dannose** tensioni residue di trazione

**Benefiche** tensioni residue di compressione, in particolare a fatica

Deformazioni di rilascio significative su componenti di ridotti spessore/rigidezza



# Tensioni residue - processi tecnologici, ad es. saldatura

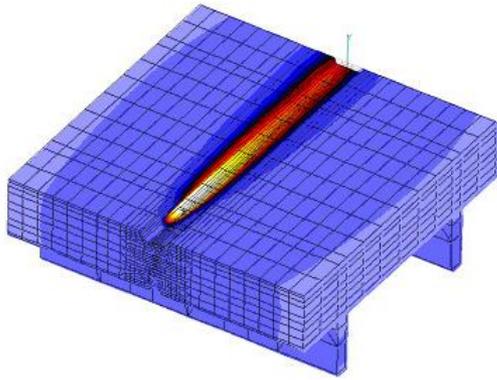
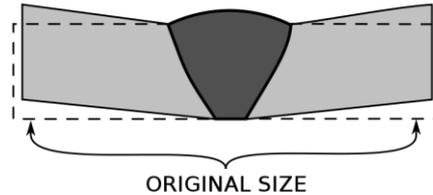


Fig.1 Welding simulation

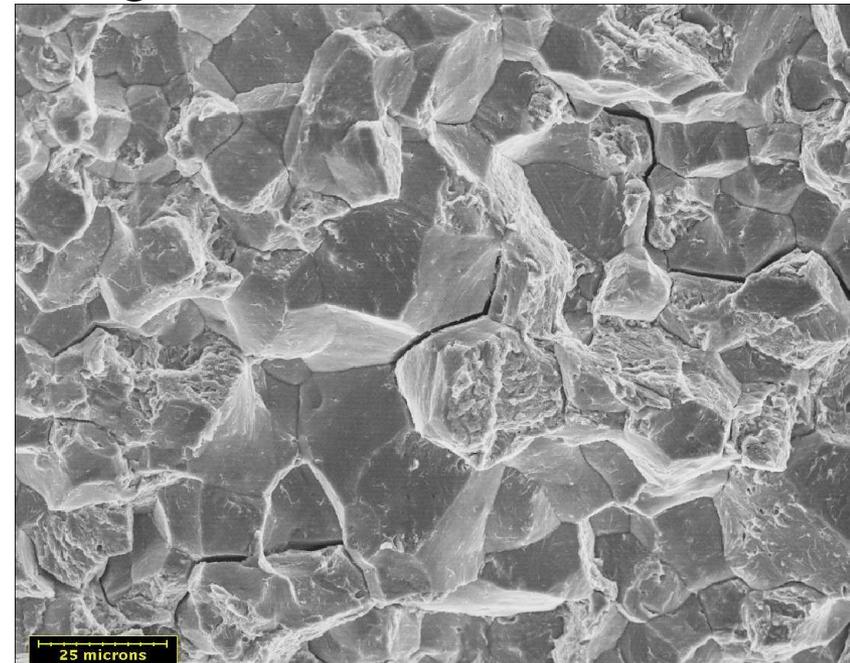


Frattura causata da tensioni residue, anche in assenza di carichi esterni



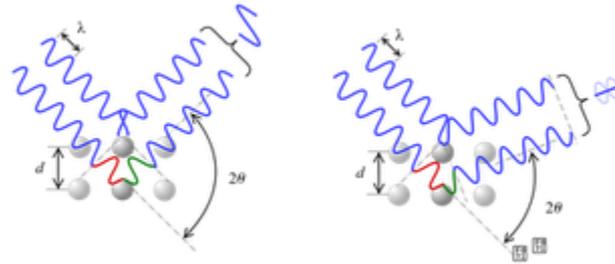
## Tensioni residue – Infragilimento da Idrogeno

- Tensione di **trazione** (residua) favorisce:
- (1) frattura fragile
  - (2) concentrazione di idrogeno → frattura fragile

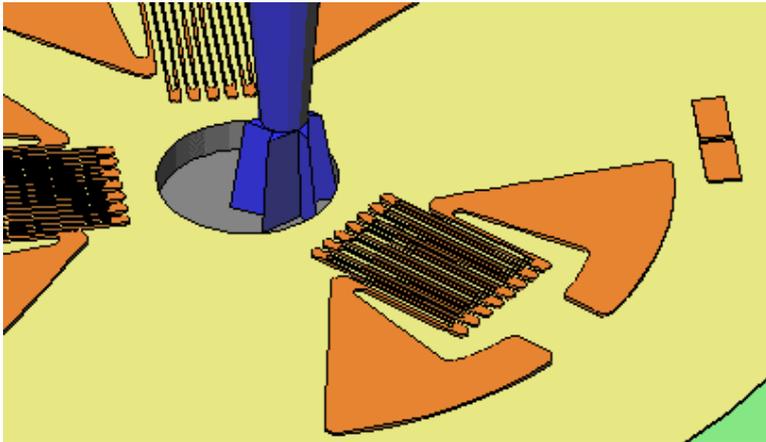


# Misura delle tensioni residue

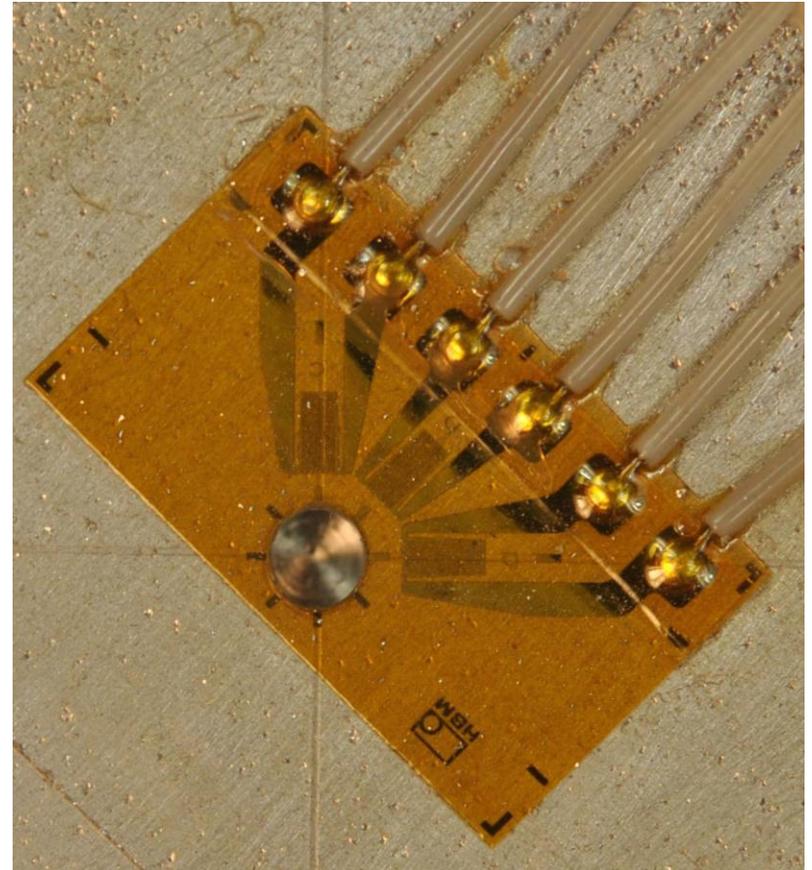
Metodo raggi X  
(X-Ray Diffraction, XRD)



Metodo del foro  
(Hole Drilling Method, HDM)



Foro concentrico con rosetta estensimetrica.  
Tensioni residue valutate a partire dalla  
misura delle deformazioni “rilassate” a  
seguito del foro.



# Attrezzatura acquisita – Metodo del foro



RESTAN – MTS 3000

Fornitore:

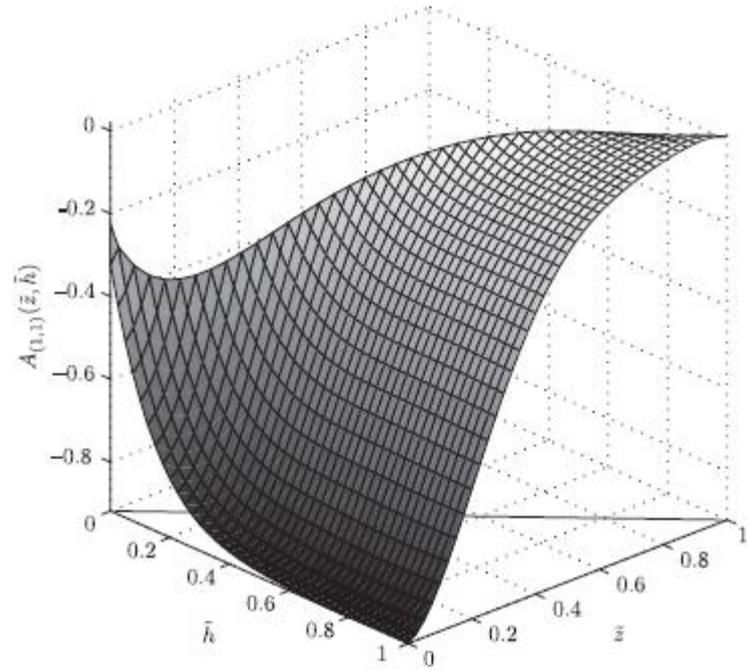
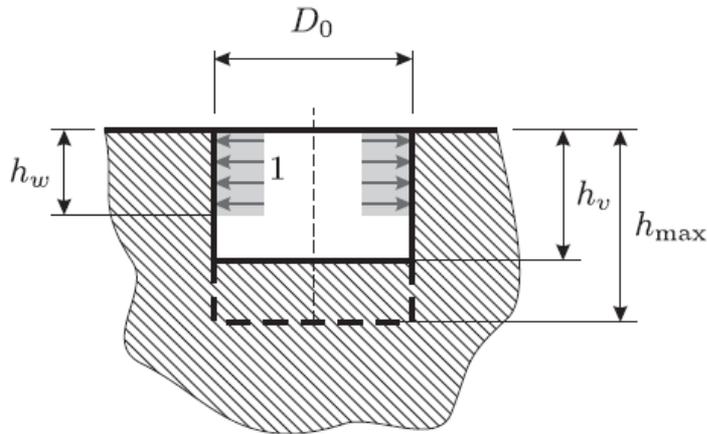
SINT Technology, Firenze / HBM

Caratteristiche:

- esecuzione automatica del metodo
- correzione ottica dell'eccentricità
- acquisizione in tempo reale misure  
estensimetriche, def. rilassate
- turbina a aria compressa, 350 000 g/min
- foro diametro 1.8 mm
- profondità 2 mm
- risoluzione profondità 0.010 mm

# Attività di ricerca sul metodo del foro

Sviluppo tecnica analitica/numerica, originale, basata su funzioni di influenza



M. Beghini, L. Bertini, L.F. Mori. Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part I & PartII. Strain 2010

## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz.  
effetto H su  
materiali  
(D3.1, D3.2,  
D3.3)

Sviluppo  
tecniche FEM  
per analisi  
diffusione  
(D4.3.1, D3.4)

Sviluppo  
tecniche misura  
autotensioni  
(D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni  
componenti per impianti  
distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout  
impianti H su  
veicoli  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Verifiche  
strutturali  
veicoli con  
impianti H  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Sistemi  
innovativi  
recupero  
energia  
(D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a  
basso impatto ambientale

### *D3.5 Analisi del comportamento di alcuni componenti del sistema di immagazzinamento e distribuzione.*

**Scopo dell'analisi** : dimostrazione delle tecniche messe a punto

#### **Componenti selezionati:**

- fasce elastiche compressori alternativi
- serbatoi di immagazzinamento

### *D3.5 Analisi del comportamento di alcuni componenti del sistema di immagazzinamento e distribuzione.*

**Scopo dell'analisi :** verifica della potenziale utilizzabilità delle attuali bombole per metano per autotrazione ad essere parzialmente riempite con idrogeno

**Condizione analizzata:** bombola contenente il difetto di riferimento proponibile per le bombole di gas metano (vedi ISO 11439 App. B-D)

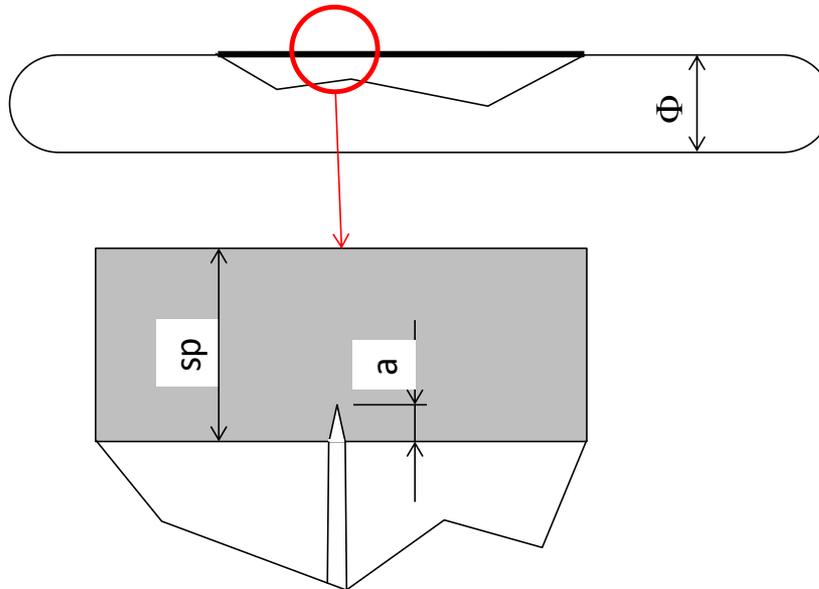
#### **Geometria analizzata**

Diametro esterno ( $\Phi$ ) = 316 mm

Spessore (sp) = 8 mm

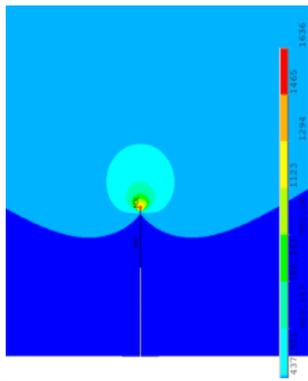
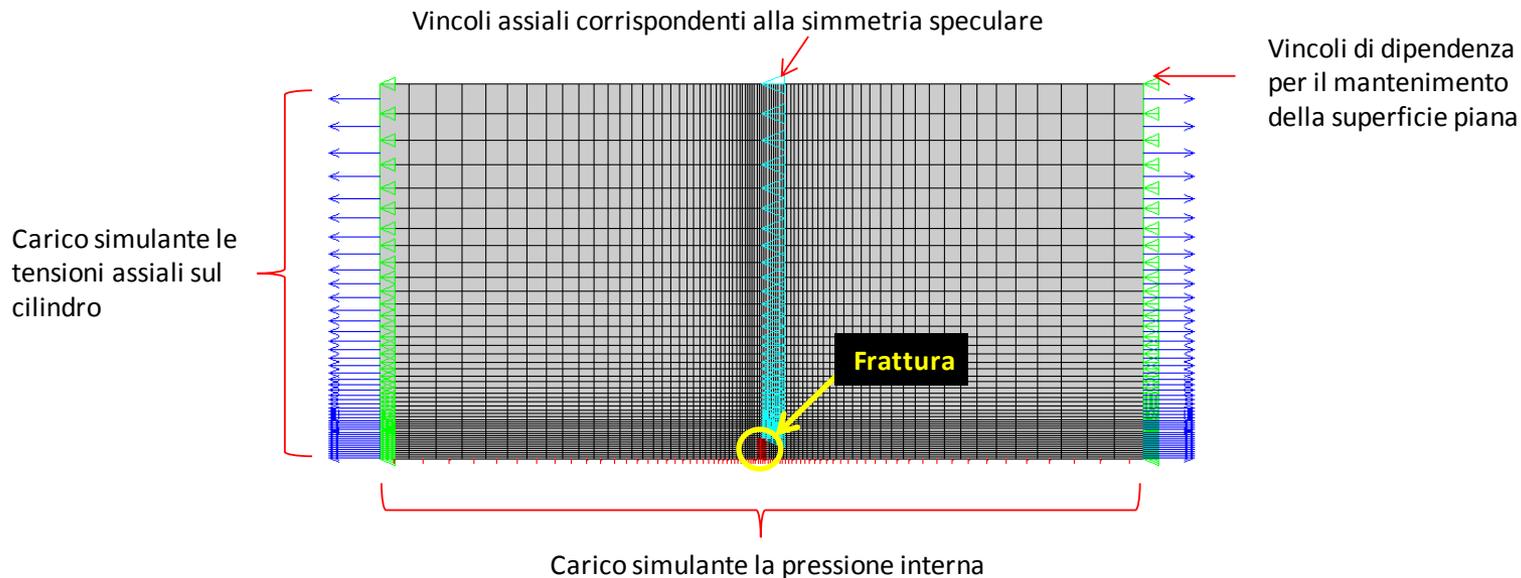
Pressione di collaudo = 300 bar

Difetto: frattura circonferenziale di profondità pari al 5.75 % dello spessore (circa 0.5 mm).

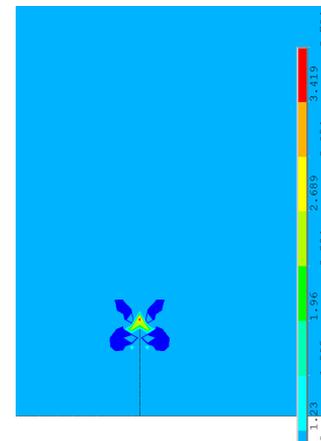


## D3.5 Analisi del comportamento di alcuni componenti del sistema di immagazzinamento e distribuzione.

### Modello FEM per l'analisi delle tensioni

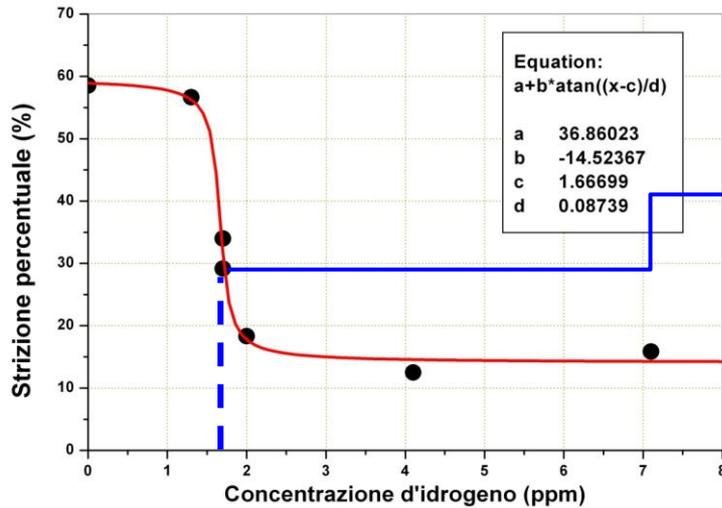


**Distribuzione componente idrostatica del tensore delle tensioni**

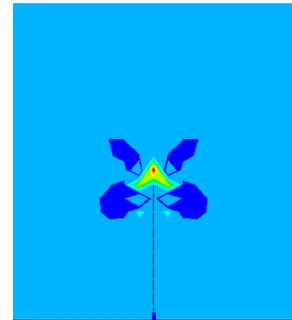


**Andamento concentrazione idrogeno**

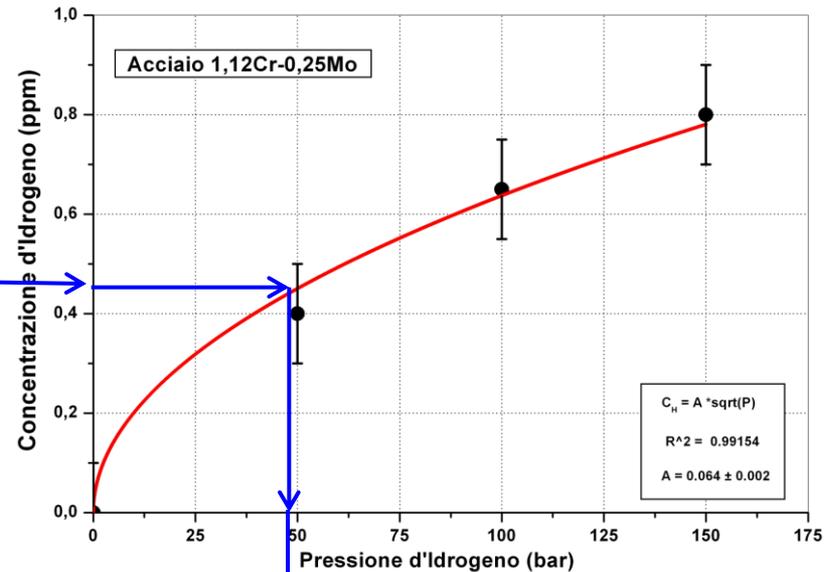
## D3.5 Analisi del comportamento di alcuni componenti del sistema di immagazzinamento e distribuzione.



$$C_{int,cr} = \frac{C_{cr}}{3.784} = 0.449 \text{ ppm}$$



$$P_{H,cr} = \left( \frac{C_{int,cr}}{A} \right)^2 = 49.2 \text{ bar}$$



## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz.  
effetto H su  
materiali  
(D3.1, D3.2,  
D3.3)

Sviluppo  
tecniche FEM  
per analisi  
diffusione  
(D4.3.1, D3.4)

Sviluppo  
tecniche misura  
autotensioni  
(D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni  
componenti per impianti  
distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout  
impianti H su  
veicoli  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Verifiche  
strutturali  
veicoli con  
impianti H  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

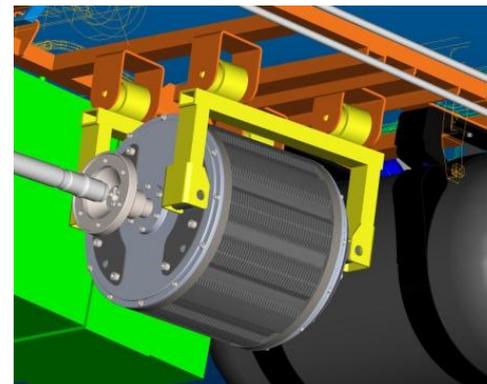
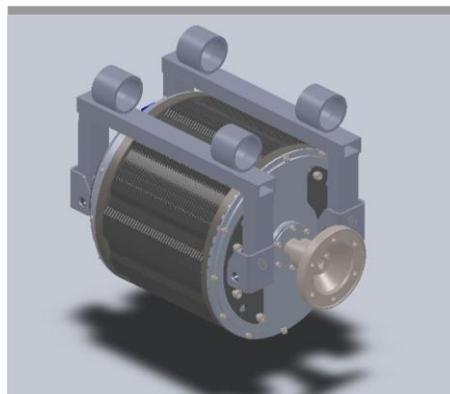
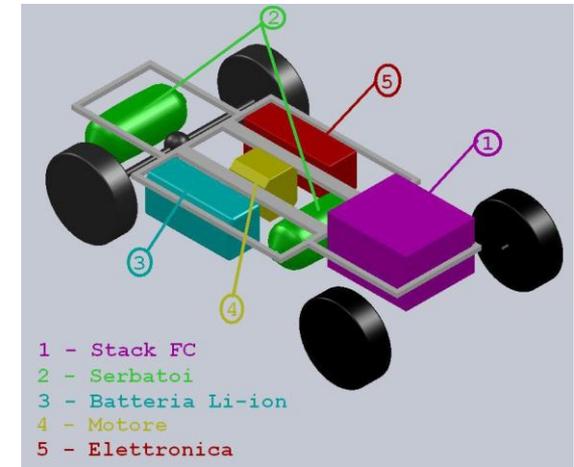
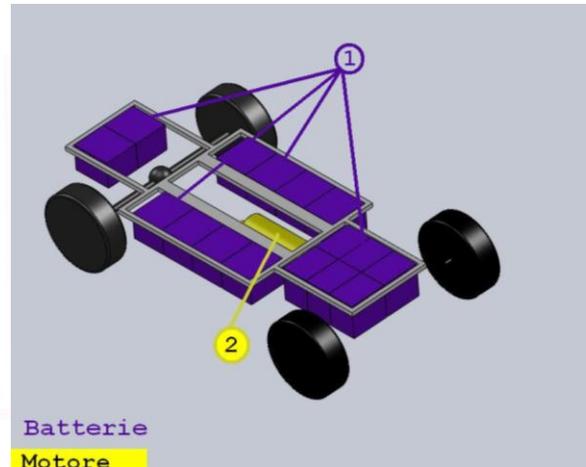
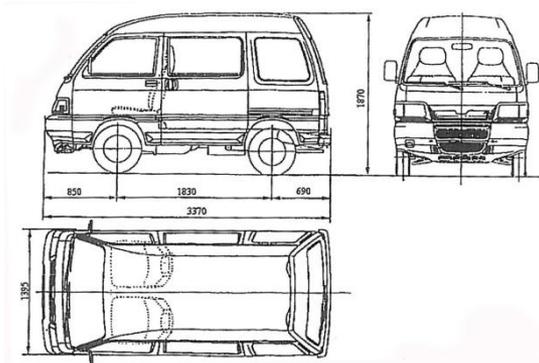
Sistemi  
innovativi  
recupero  
energia  
(D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a  
basso impatto ambientale

# Conversione di un veicolo Piaggio Porter elettrico in Porter HFC

- studio layout veicolo (in collaborazione con DSEA e EDI)  
dimensionamento/verifica di alcuni componenti
- Valutazione delle variazioni delle proprietà di inerzia del veicolo (massa e momenti di inerzia) – effetti sulla dinamica trascurabili



## Sistemi e materiali per componenti impianti distribuzione H "on board"

Caratterizz.  
effetto H su  
materiali  
(D3.1, D3.2,  
D3.3)

Sviluppo  
tecniche FEM  
per analisi  
diffusione  
(D4.3.1, D3.4)

Sviluppo  
tecniche misura  
autotensioni  
(D4.3.2)

Analisi strutturale di alcuni  
componenti per impianti  
distribuzione H su veicoli (D3.5)

## Strutturazione impianti "on board" per veicoli a basso impatto

Analisi layout  
impianti H su  
veicoli  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

Verifiche  
strutturali  
veicoli con  
impianti H  
(D4.3.3.1,  
D4.3.3.2)

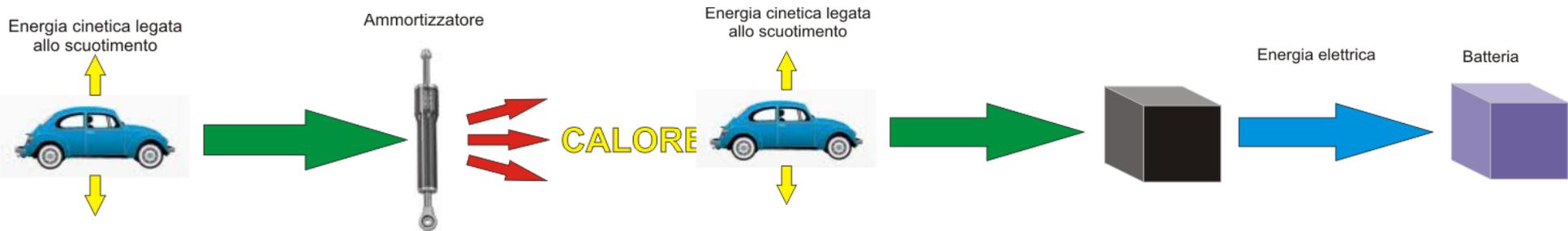
Sistemi  
innovativi  
recupero  
energia  
(D.4.3.4)

Sistemi per veicoli alimentati ad H

Verso lo sviluppo di veicoli a  
basso impatto ambientale

## D4.3.4 Sistemi innovativi recupero energia

### Attività di innovazione – Studio di fattibilità di un sistema per il recupero dell'energia dal moto delle sospensioni



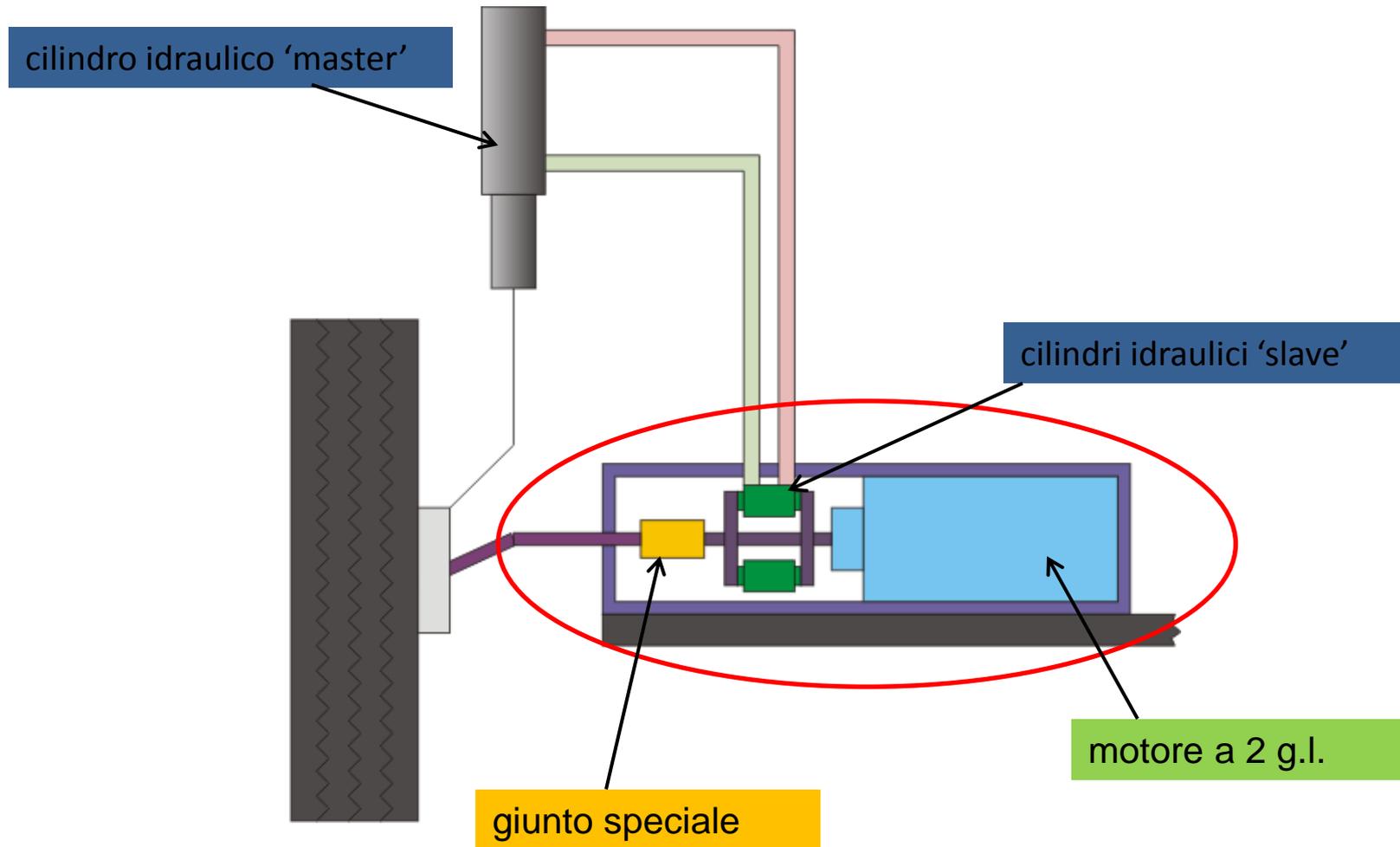
Tre brevetti US patent (2005,2005) l'ultimo:

Larry D. Armstrong, *Vehicle suspension kinetic energy recovery system*. **U.S. Patent**, (12,172,569), 2010.

(ammortizzatore pneumatico, o con solenoide, od attuatore elettrico lineare)

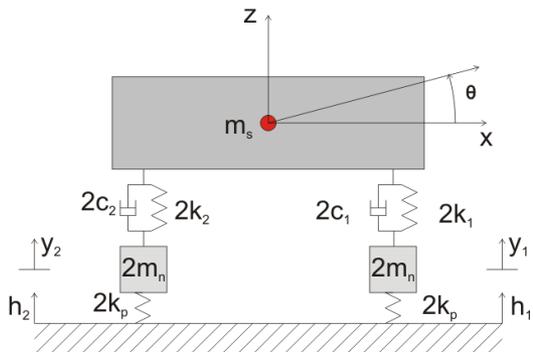
Impiego di un azionamento, sviluppato presso il DESE, avente due gradi di libertà (rotazione # trazione e traslazione # recupero dell'energia)

# Progetto: principio di funzionamento



# SIMULAZIONI EFFETTUATE CON TRE MODELLI NUMERICI DI VEICOLO E ALCUNI PERCORSI ELEMENTARI

## Modello Simulink



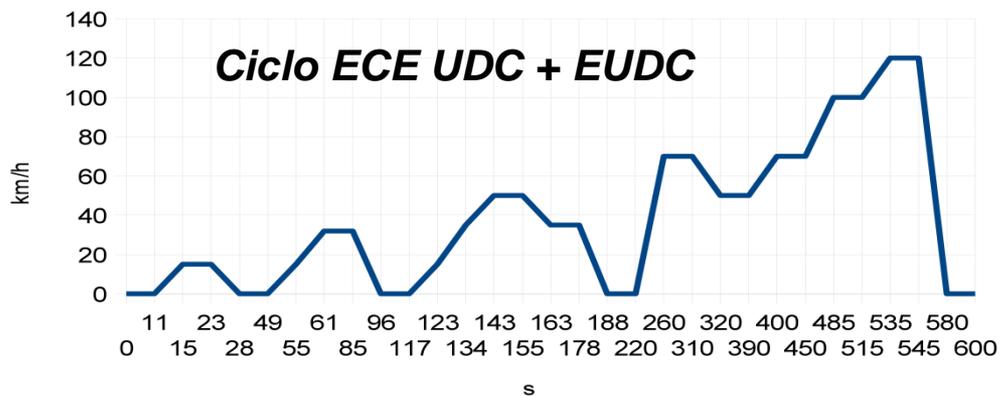
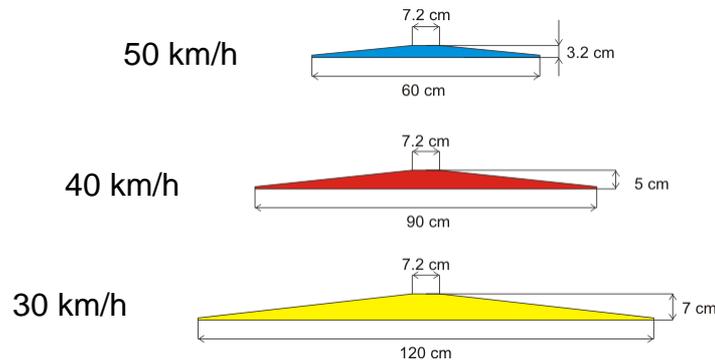
**CarSim**



**Simulatore di guida**



## dissuasori



## Percorso urbano



## RISULTATI: Energie modeste, ma disponibili in maniera continuativa

asperità

Prova	Stima energia recuperabile		
	Carsim	Simulink	Simulatore
Rugosità 3mm (J/km)	50km/h		4.6
	70km/h		4.2
	90km/h		4.1
Rugosità 5mm (J/km)	50km/h		16.9
	70km/h		13
	90km/h		21.3
Rugosità 10mm (J/km)	50km/h		244.2
	70km/h		90.5
	90km/h		44.7
Dosso (J)	3cm	541.9	301.4
	5cm	847.5	403.3
	7cm	932.2	376
Buca (J)	50km/h	62	
	70km/h	32.8	
	90km/h	20.2	
Accelerazione-frenatura (J)		53.7	3.5
Ciclo urbano (J/km)			19
Ciclo ECE (J/km)		22.8	
Strada curvilinea (J/km)	40km/h	20	
	50km/h	62	
	60km/h	173.1	

**100-200 J/km**

eventi singoli

cicli

# Principali prodotti della ricerca

- Database di curve di resistenza a fatica per acciai in presenza di idrogeno
  - Sviluppo di una tecnica sperimentale per la misura delle tensioni residue
  - Strumento software per il calcolo della concentrazione dell'idrogeno in componenti strutturali, in presenza di uno stato di sollecitazione che potrà essere impiegato anche in altri settori (es.: energia, petrolchimico)
  - Esame di fattibilità per alimentare l'attuale parco auto a metano con una miscela metano-idrogeno, con riduzione delle emissioni
  - Fattibilità di sistema e progetto di massima per il recupero dell'energia dal moto delle sospensioni
- 
- Dieci tesi di laurea (triennale e magistrale)
  - Una borsa post-doc
  - Due dottorandi hanno collaborato alle attività
  - Pubblicazioni: 5 su rivista, 6 a convegno, 1 monografia, possibile brevetto





# Criticità

- studi di filiera (analisi dei costi di dettaglio, fattori di scala, coinvolgimento stakeholders locali)
- rivalutazione agricoltura (v. anche recupero terreni abbandonati) per fini energetici (2a generazione)
- Necessità di impianti dimostrativi
- Necessità di versatilità del processo (es. produzione di cippato o pellets, vendita di energia elettrica)
- Problema distribuzione
- Figura imprenditoriale “nuova” e operante su più settori (agricoltura, impiantistica)

# IL MERCATO ATTUALE DELL'IDROGENO (miliardi di m<sup>3</sup>/anno)

	"Captive"	"Merchant"	Totale
<b>USA</b>	<b>78,69</b>	<b>10,74</b>	<b>89,43</b>
Produzione di ammoniaca	33,54	24,7	
Raffinerie	32,95	21,79	
Produzione di metanolo	8,57	4,6	
Altri	3,62	8,5	
<b>EUROPA OCCIDENTALE</b>	<b>60,58</b>	<b>5,17</b>	<b>65,75</b>
Produzione di ammoniaca	27,7		
Raffinerie	21,79		
Produzione di metanolo	4,6		
Altri	8,5		
<b>GIAPPONE</b>	<b>16,8</b>	<b>0,24</b>	<b>17,04</b>
<b>RESTO DEL MONDO</b>	<b>276,95</b>	<b>/</b>	<b>276,95</b>
	<b>416,22</b>	<b>15,91</b>	<b>449,17</b>

**CAPTIVE** : Produzione di H<sub>2</sub> interna al processo che lo utilizza (grandi impianti inseriti nelle raffinerie e nella produzione di ammoniaca).

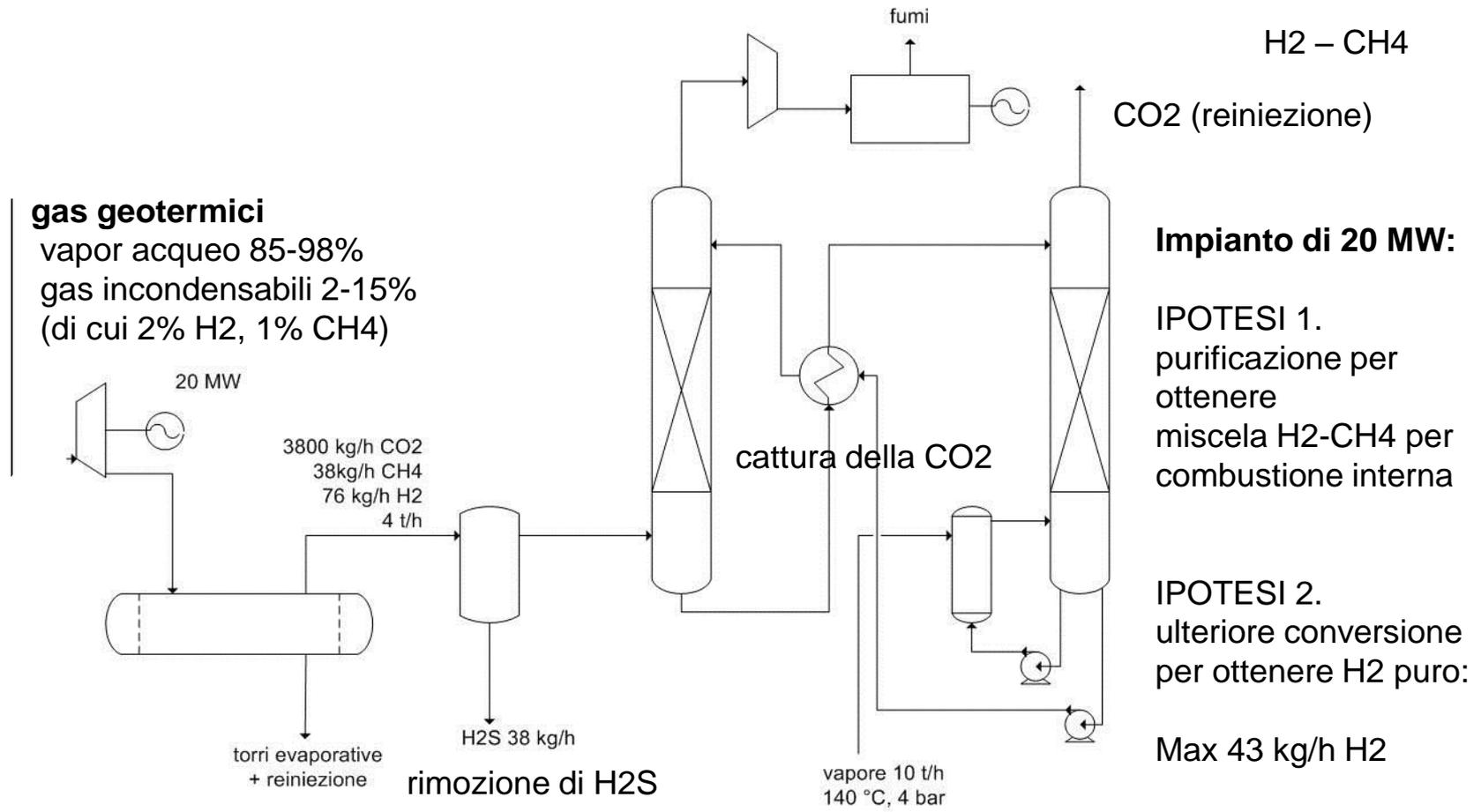
**MERCHANT** : Produzione di H<sub>2</sub> per utenti esterni.

Il suo impiego nel mondo annualmente ammonta a circa 500 miliardi di Nm<sup>3</sup>:

- ❖ il 40% utilizzato nelle raffinerie (processi di desolforazione, di raffinazione di prodotti petrolchimici, ecc.);
- ❖ il 59% dall'industria chimica per la formazione di ammoniaca e metanolo;
- ❖ l'1% per applicazioni dell'industria elettronica, metallurgica, alimentare e spaziale.

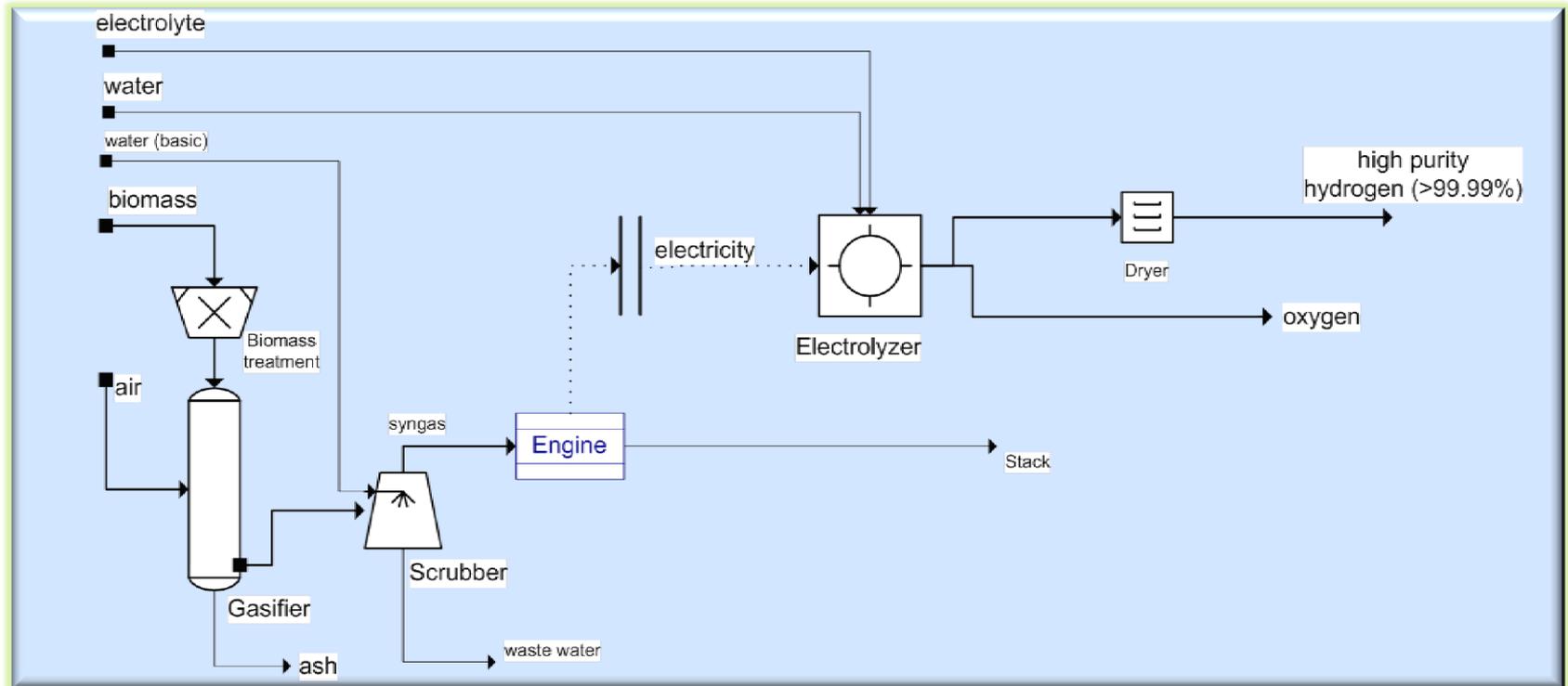
## (ii) Caso b: Idrogeno separato da gas geotermici. Esempio: Larderello (PI)

Potenzialità su tutti gli impianti esistenti in Toscana: 9000 t H<sub>2</sub>/anno



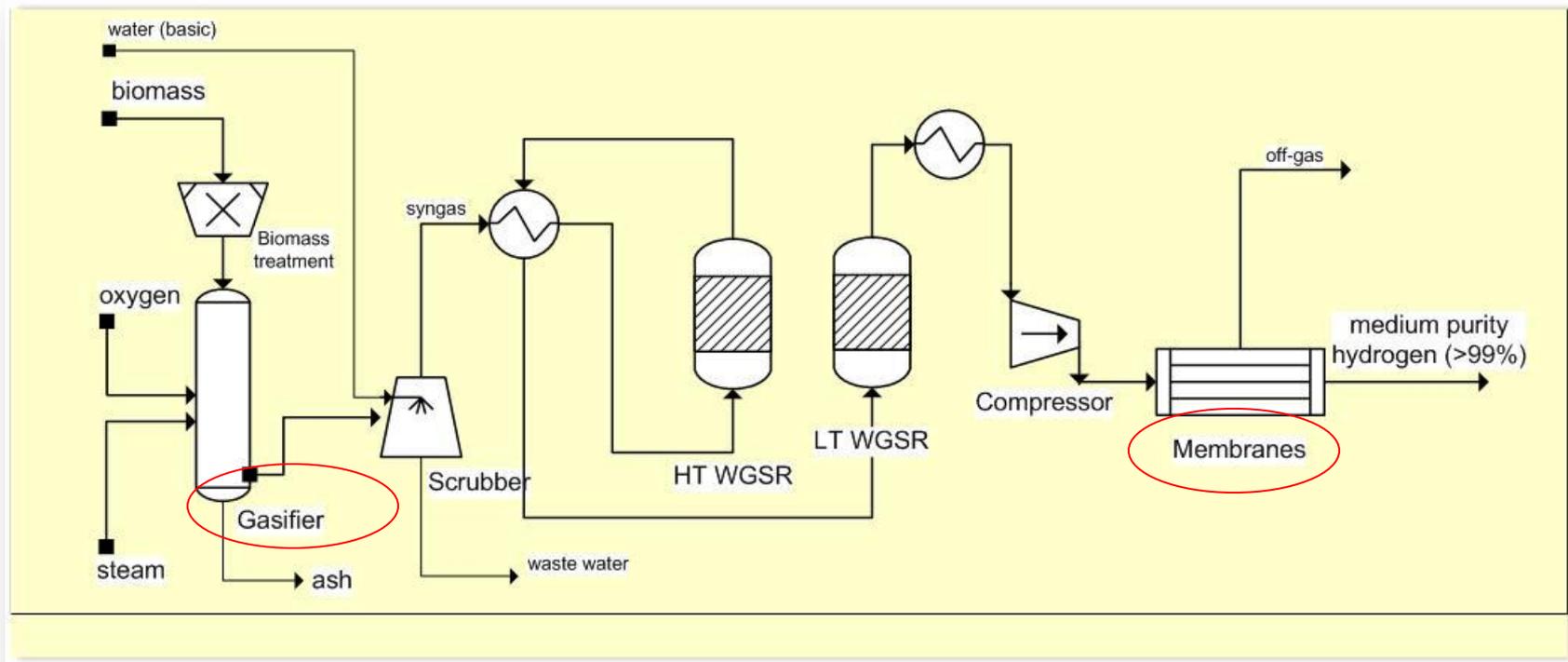
*Risultati da studio di processo: entrambe le configurazioni risultano non convenienti energeticamente*

# Studio del processo: gassificazione + elettrolisi



*Schema semplificato del processo di produzione di idrogeno da gassificazione di biomassa ed elettrolisi*

# Studio del processo: gassificazione + separazione



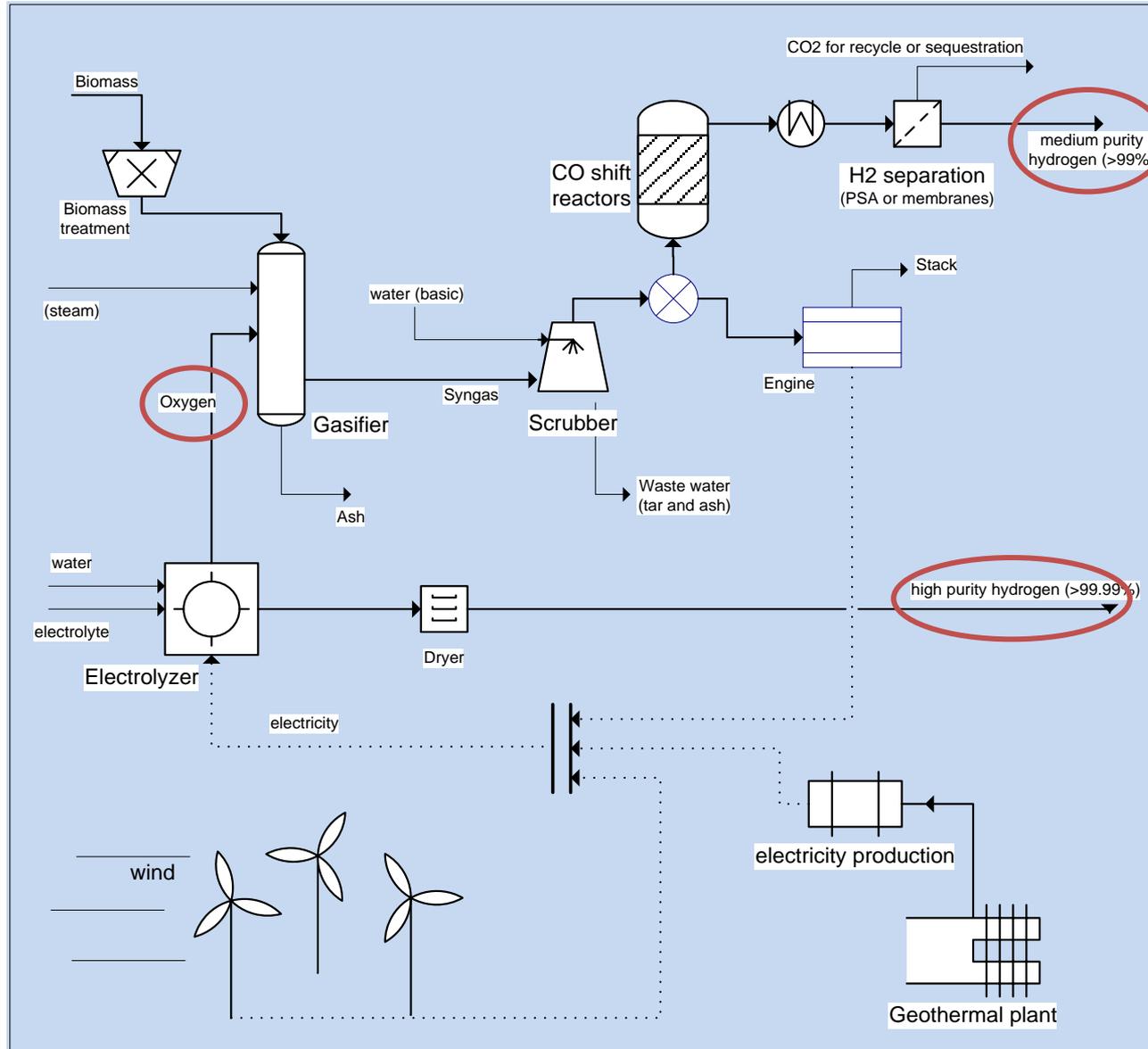
Il processo di gassificazione in generale converte un combustibile solido in gas di sintesi (che contiene principalmente CO e H<sub>2</sub>).

Il syngas deve essere purificato, convertito e separato

La resa del processo dipende dalla biomassa di partenza, dalla configurazione e potenzialità del reattore di gassificazione, dalle condizioni operative, dai sistemi di pulizia e recuperi termici.

*Rispetto al caso precedente si richiede maggior complessità di impianto ed è necessario ossigeno puro*

# Studio di un processo integrato per la produzione di idrogeno

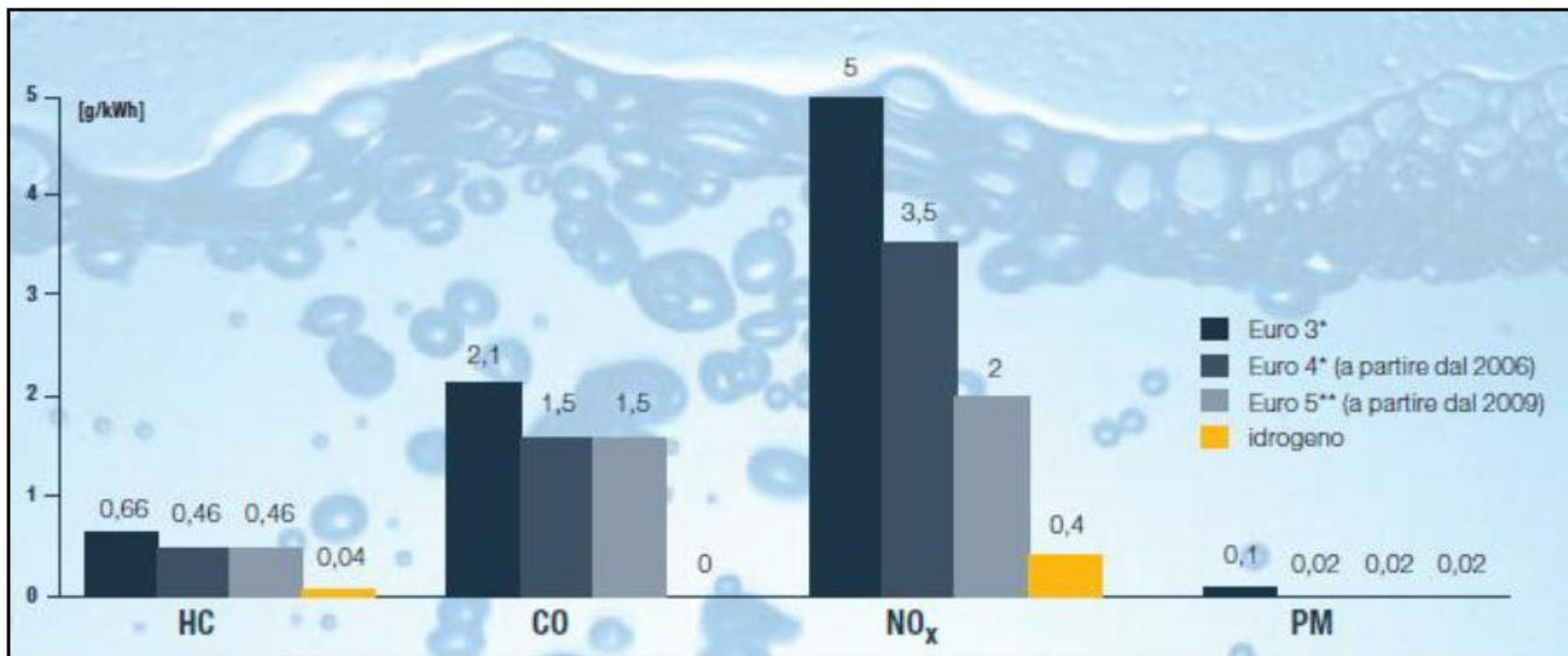


il processo di elettrolisi utilizza energie rinnovabili (per es. quella eolica) e produce idrogeno di elevata purezza e (come sottoprodotto) ossigeno che è utilizzato nel processo di gassificazione delle biomasse che a sua volta produce altro idrogeno (generalmente di purezza inferiore). Altre integrazioni sono possibili (per es. recupero di calore)



# Biomasse – potenzialità in Toscana

Qualità	Periodo di raccolta	Produttività del terreno	Rese	Vantaggi	Svantaggi
<b>Arundo</b>	febbraio-marzo	40.000 piante/ha	25-30 t s.s./ha	<ul style="list-style-type: none"> <li>•specie poliennale longeva</li> <li>•grande adattabilità</li> <li>•protegge il terreno dall'erosione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•specie invasiva</li> <li>•elevato contenuto in ceneri</li> </ul>
<b>Pioppo da SRF</b>	novembre-marzo	8.000-12.000 piante/ha	11 - 22 t s.s./ha - ceduzione biennale o triennale	<ul style="list-style-type: none"> <li>•alta qualità del combustibile (alto potere calorifico, basso contenuto in ceneri)</li> <li>•usi alternativi della biomassa (cellulosa, truciolati)</li> <li>•protegge il terreno dall'erosione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•costi alti per l'impianto e la raccolta</li> <li>•richiesti macchinari specifici (ma in continua evoluzione)</li> <li>•logistica (trasporti e stoccaggi onerosi)</li> </ul>
<b>Sorgo</b>	agosto-settembre	60.000 piante/ha	20-30 t s.s./ha	<ul style="list-style-type: none"> <li>•operazioni colturali semplici</li> <li>•ciclo annuale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•alto contenuto in ceneri</li> <li>•alta umidità alla raccolta</li> </ul>
<b>scarti forestali</b>	tutto l'anno	-	3.3 t/ha anno		
<b>Sansa d'oliva</b>	periodo invernale	-	3500 t/anno	<ul style="list-style-type: none"> <li>•alto potere calorifico</li> <li>•bassa umidità (non occorre essiccamento)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•produttività variabile</li> <li>•contenuto medio di ceneri</li> </ul>





# Analisi (preliminare) dei costi di filiera (produzione)

- Costi fissi -

Apparecchiatura/costi	costo d'investimento (k€)	costo capitale (k€)
Gassificatore	660	130
Unità di conversione/separazione	50	9
Caldaia	400	85
Eolico	8000	1500
Elettrolizzatore	480	85
Stoccaggio H2	570	105
Terreni (acquisto)	2250	
Allacciamento rete	2000	



# Analisi (preliminare) dei costi di filiera (produzione) - Costi operativi -

Apparecchiatura/costi	costo (k€/y)
Gestione/esercizio parco eolico	175
Costi annui fissi di O&M	100
Costi variabili di O&M	50
Oneri annui sui ricavi	16
Costi agricoli	62
Trasporto biomassa	27
Carburante	3
Consumo acqua	15
Energia elettrolisi	206
Costo di produzione della biomassa	37.6 €/t



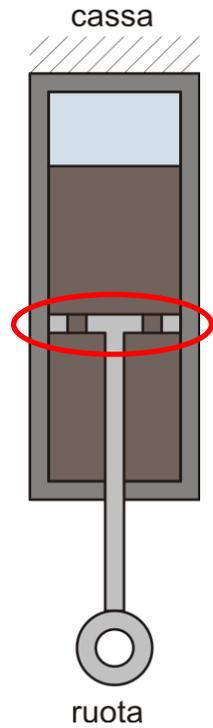
# Analisi (preliminare) dei costi di filiera (produzione)

- Costo idrogeno -

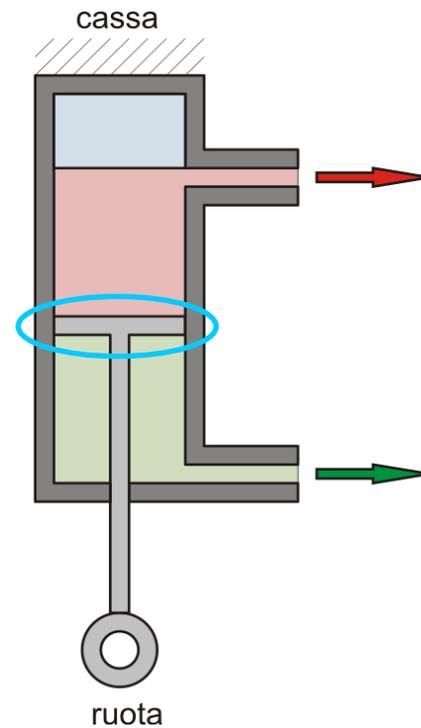
Voci	
Uscita di cassa	2400 k€
Ricavi dall'eolico	1500 k€
Vendita energia elettrica	700 k€
Certificati verdi	800 k€
Vita utile dell'impianto	20 y
Tasso attualizzazione	4%
Costo dell'idrogeno	36 €/GJ
	4.3 €/kg
Forbice di costo per varie opzioni	28-42 €/GJ
	3.4-5.0 €/kg

# Progetto: principio di funzionamento

ammortizzatore



cilindro a doppio effetto



# Progetto – dimensionamento dei principali componenti

motore a 2 g.l.

cilindri idraulici 'slave'

giunto speciale

