

DOI: <http://dx.medra.org/10.17374/CI.2017.99.8.18>

### IDROGASSIFICAZIONE DI RIFIUTI

#### Metano da energie rinnovabili e combustibile derivato dai rifiuti: un'alternativa ai processi di incenerimento e termovalorizzazione

**Silvano Tosti<sup>1\*</sup>, Giuliano Buceti<sup>1</sup>, Alfonso Pozio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ENEA, Dipartimento FSN, C.R. Frascati, Frascati (RM)

<sup>2</sup>ENEA, Dipartimento DTE, C.R. Casaccia, S. Maria di Galeria (RM)

[silvano.tosti@enea.it](mailto:silvano.tosti@enea.it)

*La gassificazione con idrogeno (o idrogassificazione) del combustibile derivato dai rifiuti per produrre metano può ridurre drasticamente la formazione di composti tossici che invece caratterizza l'incenerimento e la termovalorizzazione.*

#### RDF Hydrogasification

Production of natural gas from RDF (Refuse Derived Fuel) via hydrogasification reduces dramatically the formation of toxic chemicals that are presently produced by the alternative waste treatments such as incineration and other waste-to-energy processes.

#### Introduzione

I processi di gassificazione sono utilizzati per produrre gas di sintesi (syngas) a partire da matrici organiche (ad esempio carbone, idrocarburi, alcoli e biomasse) attraverso reazioni di reforming ed ossidazione parziale. A sua volta il syngas, miscela di idrogeno e monossido di carbonio, può essere utilizzato per ricavare idrogeno o per produrre altri composti chimici come, ad esempio, idrocarburi liquidi.

Nella idrogassificazione, invece, è l'idrogeno a reagire con carbone od altre matrici organiche per produrre combustibili ed altri prodotti chimici. Nella pratica, i processi di idrogassificazione sono penalizzati dal costo elevato dell'idrogeno e la loro utilizzazione su larga scala è stata limitata a situazioni contingenti nelle quali i maggiori costi erano tollerati dalla scarsità di risorse alternative. Esempi sono la applicazione in Germania del processo Fischer-Tropsch durante la seconda guerra mondiale per produrre dal carbone i combustibili liquidi e la produzione nella Repubblica Sudafricana di carburanti ed altri prodotti chimici tramite idrogassificazione del carbone per aggirare il boicottaggio internazionale contro l'apartheid. Negli scenari energetici futuri la penetrazione delle rinnovabili e quindi la disponibilità di idrogeno a basso costo prodotto da queste fonti potrebbe rendere più convenienti i processi di idrogassificazione. In questa prospettiva, recenti studi hanno considerato la idrogassificazione condotta utilizzando idrogeno di basso costo ottenuto via elettrolisi da energia prodotta in eccesso da fonti rinnovabili, solare ed eolico [1,2,3,4,5]. Con tale processo, praticamente, si realizza l'immagazzinamento della energia da fonti rinnovabili intermittenti sotto forma di energia chimica (prima idrogeno e quindi metano). In particolare, questi studi hanno riguardato la produzione di gas naturale sintetico (o synthetic natural gas, SNG) mediante idrogassificazione di CO<sub>2</sub> e carbone.

Oltre il carbone, altre matrici organiche studiate per processi di idrogassificazione sono rappresentate da diversi tipi di biomassa quali i residui di legna ed il combustibile da rifiuti. Quest'ultimo è ottenuto da rifiuti solidi urbani e industriali mediante trattamento meccanico

biologico (TMB) applicato con lo scopo di permetterne una più efficace valorizzazione dal punto di vista energetico. Questo combustibile ha una composizione variabile essendo costituito principalmente da plastiche e sostanze biodegradabili ed ha un potere calorifico inferiore compreso tra 17 e 25 MJ/kg [6]. La normativa tiene conto delle differenti caratteristiche di questa matrice individuando diverse categorie commerciali alle quali corrispondono diverse possibilità di impiego o di smaltimento, come ad esempio riportato dalla classificazione EPA del Refuse Derived Fuel (RDF) [7]. In Italia, una classificazione di questo combustibile era contenuta nel Decreto Legislativo 152/2006 che definiva il CDR (combustibile da rifiuti) come recuperato dai rifiuti urbani e speciali non pericolosi mediante trattamenti finalizzati a garantire un potere calorifico adeguato al suo utilizzo. Il Decreto Legislativo 205/2010 ha aggiornato la normativa precedente introducendo per questo combustibile la definizione di CSS (combustibile solido secondario) pensato soprattutto per impieghi come combustibile nel settore industriale, in particolare nei cementifici e nelle centrali elettriche [6].

Generalmente, questo tipo di combustibile è in forma di piccoli fogli di materiale triturato, pressato a formare delle balle con peso da circa 500 a 1000 kg normalmente avvolte con una pellicola di polietilene. In alternativa, può essere in forma addensata ed in questo caso si può presentare in forma di pellets o grani. Le caratteristiche chimico-fisiche di questo combustibile possono variare molto a seconda delle matrici di provenienza e del tipo di pretrattamenti eseguiti.

Il combustibile derivato dalla lavorazione dei rifiuti viene utilizzato attraverso incenerimento (o termovalorizzazione) oppure mediante gassificazione. Negli inceneritori viene bruciato con aria per produrre anidride carbonica e calore che a sua volta può essere utilizzato per la produzione di elettricità e/o cogenerazione. In alternativa, può essere bruciato insieme al carbone nelle centrali termiche od utilizzato nei forni di combustione dei cementifici e di altri opifici. Il maggiore inconveniente dell'incenerimento risiede nella formazione di composti tossici che possono essere rilasciati nell'ambiente, principalmente diossine (polychlorinated dibenzo-para-dioxins o PCDDs) e furani (polychlorinated dibenzo-para-furans o PCDFs) [8]. Infatti, le diossine si formano nella combustione con ossigeno di plastiche ed altri composti clorurati (i.e. PVC) in presenza di particolati metallici che agiscono da catalizzatori. Nei processi di gassificazione, diversamente, questo tipo di combustibile viene trattato a temperature di 800-1000 °C usando aria e/o vapore e comunque operando con ossigeno sotto-stechiometrico [9]. In questo modo nella gassificazione rispetto all'incenerimento si ha una ridotta formazione di ossidi di zolfo, di azoto e di diossine. Il limite fissato in Europa (ed in Giappone) per le emissioni di diossina è pari a 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup>, dove I-TEQ (International Toxicity Equivalent) è un indice in grado di normalizzare il grado di tossicità delle diverse molecole di diossina. Questo limite è rispettato dagli impianti di gassificazione che operano in normali condizioni [10]. Nonostante ciò, in Italia questi impianti hanno un basso livello di accettazione da parte della opinione pubblica e una buona frazione del combustibile da rifiuti non è trattato e viene inviato all'estero.

Nei laboratori ENEA di Frascati e Casaccia è stato sviluppato un processo di idrogassificazione che attraverso un trattamento condotto in atmosfera riducente (solo idrogeno reagisce con il combustibile derivato dai rifiuti) permette di limitare drasticamente la formazione di composti tossici quali le diossine [11]. Inoltre, viene realizzato in condizioni operative moderate (temperature di circa 300 °C e pressioni operative tra 5 e 10 bar) e facilmente realizzabili nella pratica impiantistica. Il processo può essere applicato per produrre metano mediante idrogassificazione di combustibile ricavato dai rifiuti o, più in generale, di altre frazioni e derivati dei rifiuti solidi urbani (RSU) o municipal solid waste (MSW).

### Descrizione del processo

Il processo proposto utilizza una cella elettrolitica per la produzione di idrogeno ed un reattore per la produzione di metano. In questo reattore l'idrogeno reagisce con il carbonio presente nel combustibile derivato dai rifiuti.

Le reazioni coinvolte sono l'elettrolisi dell'acqua:



e la idrogassificazione del carbonio contenuto del combustibile derivato dai rifiuti:



Con riferimento alla stechiometria delle reazioni esposte e considerando l'impiego di una mole di carbonio, questo processo produce dalla elettrolisi di due moli di acqua una mole di metano ed una di ossigeno come rappresentato nello schema di processo, che possiamo considerare come versione "base", di Fig. 1.

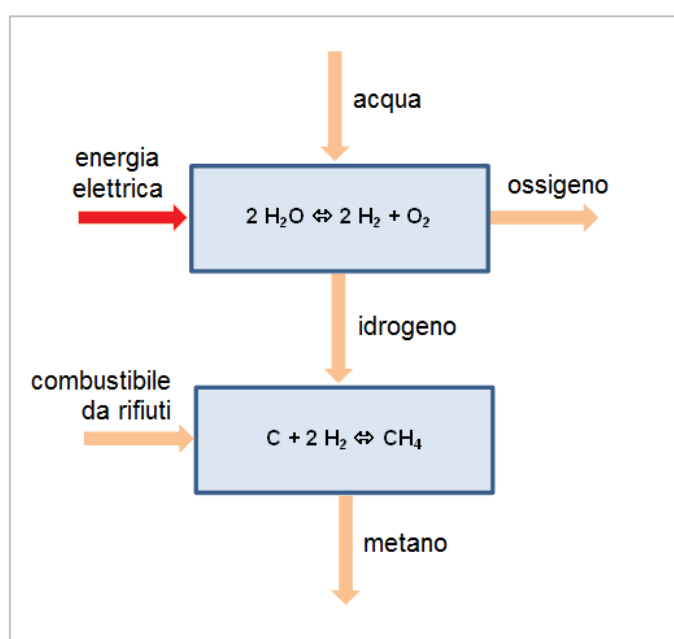


Fig. 1 - Schema del processo base di idrogassificazione studiato

L'elettrolisi produce ossigeno di elevata purezza e, complessivamente, il processo base produce la stessa quantità di ossigeno e di metano. Per valorizzare l'ossigeno prodotto dall'elettrolisi sono state prese in considerazione due varianti.

In una prima variante una frazione (circa il 50%) del combustibile da rifiuti è fatta reagire con l'ossigeno prodotto dall'elettrolisi per produrre monossido di carbonio:



Tale monossido è utilizzato, quindi, come altra fonte di produzione dell'idrogeno necessario alla idrogassificazione attraverso la reazione di water gas shift nella quale il monossido di carbonio è convertito in anidride carbonica:



Così, circa il 50% dell'idrogeno necessario all'idrogassificazione è prodotto con le reazioni di ossidazione parziale e water gas shift mentre il restante 50% è prodotto per via elettrolitica. In

sintesi, secondo la stechiometria delle reazioni, da una mole di carbonio e dall'elettrolisi di 0,5 moli di acqua si producono 0,5 moli di metano e come sottoprodotto si ottengono 0,5 moli di anidride carbonica. Rispetto al processo base, in pratica, dalla stessa quantità di combustibile da rifiuti si produce circa metà quantità di metano impiegando un quarto circa di energia elettrica. Lo schema di processo di questa variante è riportato nella Fig. 2 dove la stechiometria delle reazioni riferisce al trattamento complessivo di una mole di carbonio.

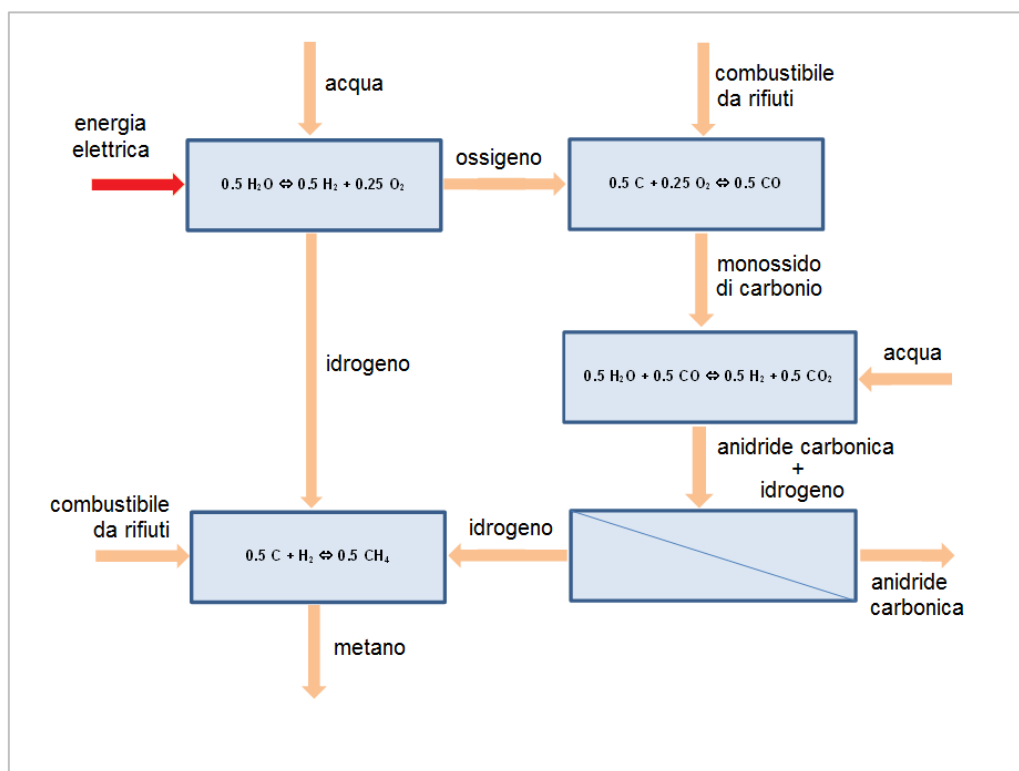


Fig. 2 - Schema del processo di idrogassificazione in combinazione con la reazione di water gas shift

Nella seconda variante l'ossigeno prodotto dalla elettrolisi viene utilizzato per l'ossi-combustione di una prima quantità di carbonio presente nel combustibile da rifiuti:



L'idrogeno prodotto dall'elettrolisi di una seconda quantità di acqua (2 moli) viene fatto reagire con l'anidride carbonica proveniente dall'ossi-combustione che produce ulteriore metano secondo la reazione di Sabatier:



Lo schema di processo di questa variante è riportato nella Fig. 3 dove la stechiometria delle reazioni come negli schemi precedenti riferisce al trattamento complessivo di una mole di carbonio. Come nel processo base, anche per questa variante con 1 mole di carbonio si producono 1 mole di metano ed 1 mole di ossigeno ma, in questo caso, è necessaria l'elettrolisi di 3 moli di acqua invece di 2, vale a dire che questa variante consuma circa il 50% in più di energia elettrica del processo base. Nella ipotesi di realizzare un impianto che combini i diversi processi proposti, questa seconda variante può essere attuata nelle fasi di eccesso di

produzione elettrica da rinnovabili quando il costo dell'idrogeno prodotto per via elettrochimica è più basso.

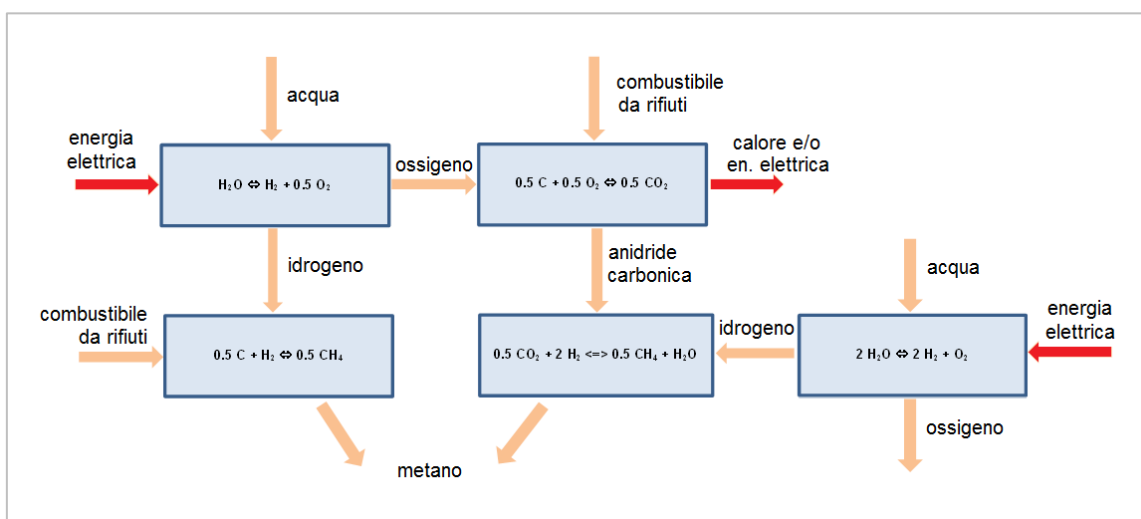


Fig. 3 - Schema del processo di idrogassificazione in combinazione con la reazione di ossi-combustione e reazione di Sabatier

### Ottimizzazione di processo

Al fine di individuare le condizioni operative migliori della reazione di idrogassificazione del combustibile da rifiuti è stato utilizzato il codice AsTher versione 7.12 [12]. Con questo software sono state in particolare calcolate le composizioni dei prodotti delle reazioni di idrogassificazione del combustibile da rifiuti con l'idrogeno in condizioni di equilibrio termodinamico.

La composizione elementare del combustibile derivato dai rifiuti può variare molto dipendentemente dalla matrice di provenienza utilizzata e dal tipo di pretrattamento eseguito. In questa analisi si farà riferimento alla composizione riportata in Tab. 1, che riguarda il combustibile da rifiuti di un impianto della società EPANA S.A. (Ano Liossia, Grecia) [13].

Tab. 1 - Composizione elementare del combustibile da rifiuti essiccato e privo di ceneri (dry ash free, d.a.f.)

	% in peso
C	55,26
H	7,21
N	1,32
S	0,25
O	35,53
Cl	0,43

Nello specifico, nell'analisi con il codice Aspen la composizione di ingresso al reattore è stata considerata a partire dai valori di Tab. 1 assumendo che in questa matrice organica gli elementi ossigeno, azoto, zolfo e cloro fossero tutti legati con l'idrogeno a formare  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$  ed  $HCl$ , rispettivamente. Ipotizzando di trattare 1 t di combustibile da rifiuti con 143,3 kg di idrogeno (rapporto H/C di alimentazione pari a 3,11) nel reattore di idrogassificazione sono state considerate le seguenti condizioni operative:

- i) a pressione di 10 bar variando la temperatura nell'intervallo 300-500 °C;
- ii) a temperatura di 300 °C variando la pressione nell'intervallo 1-50 bar.

I risultati delle analisi di simulazione hanno messo in evidenza la formazione di una corrente gassosa di prodotti di reazione costituita prevalentemente da metano con minori quantità di C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, N<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> oltre acqua.

Operando a 10 bar la resa in metano e la concentrazione di metano nella miscela gassosa prodotta diminuiscono con la temperatura. Come mostrato in Fig. 4, alla temperatura più bassa (300 °C) si ha il massimo valore di resa in metano che corrisponde a circa il 68% in peso (680 kg di metano prodotti per tonnellata di combustibile da rifiuti trattato). La composizione della corrente dei prodotti di reazione su base priva di acqua è riportata in Tab. 2. Etano e monossido di carbonio sono assenti o presenti in quantità trascurabili, mentre la concentrazione di idrogeno cresce con la temperatura raggiungendo il valore di circa il 9% a 500 °C.

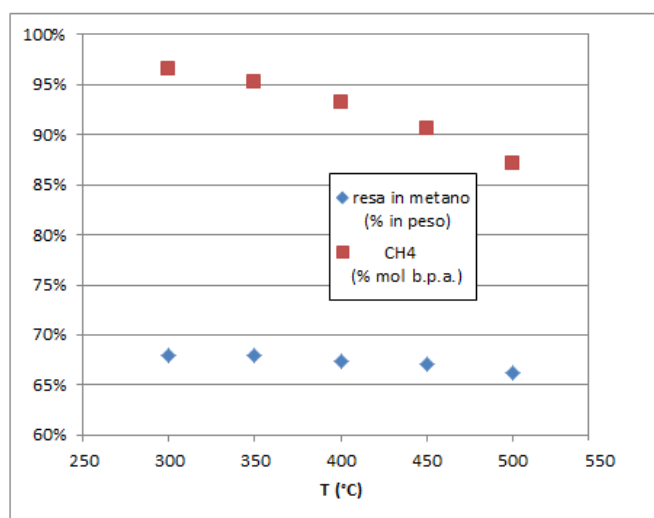


Fig. 4 - Resa in metano e concentrazione del metano su base priva di acqua (b.p.a.) nella corrente dei prodotti di reazione per diverse temperature alla pressione di 10 bar

**Tab. 2 - Composizione della corrente dei prodotti di reazione su base priva di acqua (b.p.a.) operando a 10 bar**

T °C	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> % mol	CH <sub>4</sub> % mol	CO % mol	CO <sub>2</sub> % mol	H <sub>2</sub> % mol	H <sub>2</sub> S % mol	HCl % mol	N <sub>2</sub> % mol	NH <sub>3</sub> % mol
300	0,00	96,54	0,00	0,75	1,16	0,18	0,28	1,04	0,06
350	0,00	95,24	0,00	0,99	2,22	0,17	0,27	1,03	0,06
400	0,01	93,25	0,01	1,37	3,85	0,17	0,27	1,01	0,07
450	0,01	90,64	0,03	1,52	6,32	0,17	0,26	0,98	0,08
500	0,01	87,10	0,09	2,01	9,33	0,16	0,26	0,96	0,08

I risultati dell'analisi che ha considerato l'effetto della pressione operando a 300 °C sono riportati in Fig. 5 che mostra un massimo della concentrazione del metano (circa 96%) intorno a 10 bar, mentre la resa in metano cresce sempre con la pressione raggiungendo il valore di circa 70% a 50 bar.

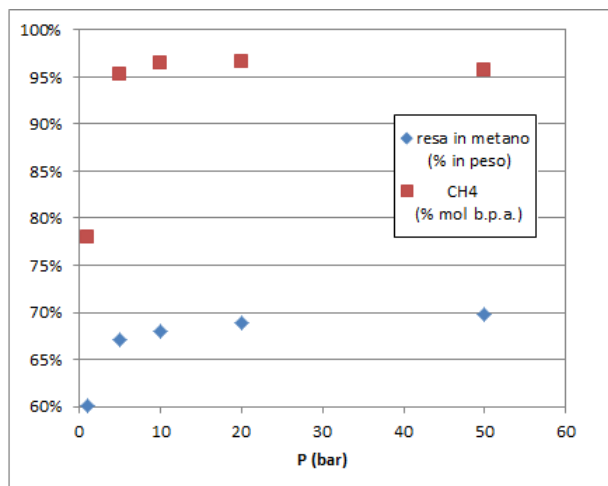


Fig. 5 - Resa in metano e concentrazione del metano su base priva di acqua (b.p.a.) nella corrente dei prodotti di reazione per diverse pressioni alla temperatura di 300 °C

La composizione della corrente dei prodotti di reazione su base priva di acqua al variare della pressione è riportata in Tab. 3. Anche in questo caso, alcuni gas (etano, CO ed ammoniaca) sono assenti o presenti in quantità trascurabili, mentre la concentrazione di idrogeno diminuisce con la pressione. La concentrazione della CO<sub>2</sub> cresce sempre con la pressione raggiungendo circa il 2,5% a 50 bar. È interessante notare che operando tra 5 e 10 bar la concentrazione di idrogeno varia da circa 3% a circa 1%: tali valori di concentrazione di idrogeno nel metano sono tollerati nelle reti di distribuzione così come in diverse applicazioni [14].

**Tab. 3 - Composizione della corrente dei prodotti di reazione su base priva di acqua (b.p.a.) operando a 300 °C**

P bar	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> % mol	CH <sub>4</sub> % mol	CO % mol	CO <sub>2</sub> % mol	H <sub>2</sub> % mol	H <sub>2</sub> S % mol	HCl % mol	N <sub>2</sub> % mol	NH <sub>3</sub> % mol
1	0,00	78,05	0,00	0,05	20,49	0,16	0,25	0,96	0,04
5	0,00	95,23	0,00	0,30	2,92	0,18	0,27	1,04	0,06
10	0,00	96,54	0,00	0,75	1,16	0,18	0,28	1,04	0,06
20	0,01	96,57	0,00	1,41	0,48	0,17	0,27	1,03	0,06
50	0,02	95,77	0,00	2,55	0,16	0,17	0,26	1,00	0,07

Sulla base di questa analisi, le condizioni operative proposte per i processi di idrogassificazione del combustibile da rifiuti prevedono temperature di circa 300 °C e pressioni operative tra 5 e 10 bar. Si tratta di condizioni operative moderate, facilmente realizzabili nella pratica impiantistica e caratterizzate da basse dispersioni termiche. Intorno alla pressione di 5 bar la resa in metano non è massima, tuttavia il gas prodotto contiene quantità di idrogeno tali (3% circa) da essere ancora tollerate dalla massima parte degli utilizzatori mentre in contenuto di CO<sub>2</sub> non supera lo 0,3%. Contrariamente, operando a pressioni più alte si ottengono rese maggiori in metano, tuttavia il contenuto di CO<sub>2</sub> cresce a discapito di quello dell'idrogeno che si riduce quasi a zero a 50 bar.

### Analisi economica preliminare

La produzione annua di rifiuti urbani in Italia si aggira intorno a 32 Mt (dati 2009-2010) che corrispondono a circa 532 kg di rifiuti prodotti pro-capite [6, 15]. Gli impianti di valorizzazione termica hanno una capacità media nominale di trattamento che risulta di poco superiore alle 135 kt/a e nel 2010 hanno trattato complessivamente 4,7 milioni di tonnellate di rifiuti urbani.

Di queste, circa 0.8 milioni di tonnellate sono costituite da CSS (già CDR) mentre, per il resto, il CSS prodotto in Italia, oltre ad essere impiegato nei cementifici e negli impianti di produzione di energia elettrica in alternativa ai combustibili tradizionali, è stato spedito e trattato all'estero. Nel 2005 i flussi di esportazione superavano le 110 kt con un trend in aumento negli anni successivi [6]. Proprio queste difficoltà ad utilizzare il combustibile da rifiuti possono renderne vantaggioso l'utilizzo in un impianto di idrogassificazione per produrre metano.

Nella analisi economica riportata di seguito si fa l'ipotesi che le aziende che trattano i rifiuti urbani conferiscano il CSS agli impianti di idrogassificazione pagando loro una somma corrispondente ai costi evitati per il suo smaltimento (i.e. trasporto e trattamento all'estero).

Ci sono pochi dati ufficiali su questi costi: ad esempio, la società Sapna SpA ha sostenuto costi di smaltimento tra 124 e 138 €/t nel periodo 2014-2016, mentre una analisi economica riferita al caso di utilizzo del combustibile da rifiuti nei cementifici ha stimato che fino a 170 € per tonnellata di CSS possono essere risparmiate per non destinare in discarica i rifiuti urbani da cui è ricavato il combustibile da rifiuti [6]. Nella valutazione successiva è stato considerato in maniera conservativa un costo evitato di smaltimento di 80 €/t.

La convenienza economica della idrogassificazione del CSS è anche strettamente legata alla disponibilità di energia elettrica a basso costo per il processo di elettrolisi per cui verrà assunta l'ipotesi di utilizzare gli impianti nelle fasce orarie di basso costo.

Per riassumere, le principali ipotesi utilizzate nella analisi tecnico-economica preliminare basata sui soli costi operativi sono le seguenti:

- processo di idrogassificazione in combinazione con la reazione di water gas shift;
- bilanci di materia condotti considerando un contenuto in peso di carbonio del combustibile da rifiuti del 60% (contributo del carbonio più quello equivalente dell'idrogeno con riferimento alla Tab. 1);
- il trattamento di 110 kt/a di combustibile da rifiuti (circa il valore delle esportazioni 2005);
- costo dell'elettricità di 0,06 €/kWh;
- costo evitato per lo smaltimento del combustibile da rifiuti di 80 €/t;
- prezzo del metano di 0,30 €/Nm<sup>3</sup>;
- utilizzo di elettrolizzatori alcalini commerciali con consumo di 61,8 kWh/kgH<sub>2</sub> [16].

I risultati di questa analisi riferiti ad un anno di funzionamento dell'impianto sono riassunti in Tab. 4 che evidenzia un bilancio positivo con riferimento alle voci di spesa e di ricavo considerate. Ulteriori vantaggi economici potrebbero venire dagli incentivi che si applicano per la produzione e utilizzazione di biometano (o gas da discarica/depurazione fanghi o syngas) come regolamentato dalla recente normativa [17].

**Tab. 4 - Analisi dei costi riferita alla idrogassificazione di 110.000 t/a di combustibile da rifiuti**

consumo elettrico, kWh	metano prodotto, Nm <sup>3</sup>	costo elettricità, M€	costo evitato smaltimento CSS, M€	ricavo metano, M€	ricavi/costi
34,0 × 10 <sup>8</sup>	6,17 × 10 <sup>7</sup>	20,39	8,80	12,33	1,04

### Conclusioni

La idrogassificazione permette di trattare il combustibile da rifiuti in maniera pulita, producendo metano ed evitando emissioni nocive. Infatti, il processo proposto riduce la formazione di diossine e potrebbe ricevere un maggiore consenso sociale quando comparato ai processi in uso attualmente per il trattamento del combustibile da rifiuti (incenerimento e gassificazione).

Il processo è inoltre caratterizzato da un rendimento elevato e dall'utilizzo di tecnologie ben provate ed affidabili (elettrolisi dell'acqua, processo di idrogassificazione, water gas shift, ossi-



combustione). In particolare, l'idrogeno necessario al processo di gassificazione può essere prodotto mediante elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili (eolico o solare). In questo modo il metano prodotto nasce da una combinazione di energia "pulita" (eolico o solare) con un combustibile ricavato dai rifiuti (una fonte energetica potenzialmente più inquinante).

Le attività future riguarderanno la verifica sperimentale delle rese di reazione di idrogenazione su diverse matrici di combustibile da rifiuti, l'analisi della composizione del gas prodotto con particolare riferimento alla formazione di composti tossici ed una ottimizzazione di processo che consideri tutte le varianti proposte.

### BIBLIOGRAFIA

- <sup>1</sup>A. Capriccioli, S. Tosti, *La Chimica e l'Industria*, 2008, **90**(8), 42;  
[https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2008\\_8\\_42\\_ca.pdf](https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2008_8_42_ca.pdf)
- <sup>2</sup>S. Tosti, A. Pizzuto, A. Pozio, *La Chimica e l'Industria*, 2013, **95**(8), 126;  
[https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2013\\_8\\_126\\_ca.pdf](https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2013_8_126_ca.pdf)
- <sup>3</sup>S. Tosti *et al.*, *La Chimica e l'Industria WEB*, aprile 2015, <http://dx.medra.org/10.17374/CI.2015.2.4.1>
- <sup>4</sup>M. Minutillo, A. Perna, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2014, **39**, 5793;  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.155>
- <sup>5</sup>S. Tosti *et al.*, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, **16**, 43;  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.04.003>
- <sup>6</sup>Potenzialità e benefici dall'impiego dei Combustibili Solidi Secondari (CSS) nell'industria, A cura di NE Nomisma Energia, Dicembre 2011;  
[http://www.aitecweb.com/Portals/0/pubnoaut/NomismaEnergia\\_Potenzialita\\_e\\_benefici\\_impiego\\_combustibili\\_solidi\\_secondari.pdf](http://www.aitecweb.com/Portals/0/pubnoaut/NomismaEnergia_Potenzialita_e_benefici_impiego_combustibili_solidi_secondari.pdf)
- <sup>7</sup>Standard for the production and use of Refuse Derived Fuel, EPA Report, ISBN 978-1-921495-07-6, February 2010; [www.epa.sa.gov.au/files/4771351\\_standard\\_rdf.pdf](http://www.epa.sa.gov.au/files/4771351_standard_rdf.pdf)
- <sup>8</sup>G. McKay, *Chemical Engineering Journal*, 2002, **86**, 343;  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=B39A83525BB680F70AE3B57C88969975?doi=10.1.1.510.3944&rep=rep1&type=pdf>
- <sup>9</sup>B. Wilson, Comparative Assessment of Gasification and Incineration in Integrated Waste Management Systems; [http://www.eprenewable.com/uploads/files/63\\_5\\_Gasification\\_White\\_Paper\\_10-08-2014.pdf](http://www.eprenewable.com/uploads/files/63_5_Gasification_White_Paper_10-08-2014.pdf)
- <sup>10</sup>U. Arena, *Waste Management*, 2012, **32**, 625;  
[https://www.researchgate.net/publication/51755271\\_Process\\_and\\_technological\\_aspects\\_of\\_municipal\\_solid\\_waste\\_gasification\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/51755271_Process_and_technological_aspects_of_municipal_solid_waste_gasification_A_review)
- <sup>11</sup>S. Tosti, G. Buceti, A. Pozio, Processo e relativo impianto per la produzione di metano da combustibile derivato da rifiuti, Domanda di brevetto per invenzione industriale in Italia n. 102017000086210 depositata il 27.07.2017; <http://industria.enea.it/news/2017/nuovo-processo-per-produrre-metano-dai-rifiuti>
- <sup>12</sup><http://www.asther.de/>
- <sup>13</sup>P. Vounatsos *et al.*, Characterization and classification of Refuse Derived Fuel in the Materials Recovery - Facility of EPANA S.A.,  
[http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=E\\_NERGY\\_WASTE\\_CERTH\\_2012\\_pres.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=E_NERGY_WASTE_CERTH_2012_pres.pdf)
- <sup>14</sup>M.W. Melaina, O. Antonia, M. Penev, Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, Technical Report NREL/TP-5600-51995 March 2013;  
<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>
- <sup>15</sup>Rapporto sul recupero energetico da rifiuti urbani in Italia, ENEA-Federambiente Marzo 2012;  
<http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-volumi/v2012-recuperoenergeticorifiuti.pdf>
- <sup>16</sup><http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/industrial-hydrogen-generators-by-electrolysis/indoor-installation/hystat-trade-60>
- <sup>17</sup>[http://www.gse.it/it/Gas%20e%20servizi%20energetici/GSE\\_Documenti/Biometano/DM\\_5\\_12\\_2013\\_Bio\\_metano.pdf](http://www.gse.it/it/Gas%20e%20servizi%20energetici/GSE_Documenti/Biometano/DM_5_12_2013_Bio_metano.pdf)