

Produzione di green fuel gassoso e liquido attraverso termolisi a ciclo chiuso da residui derivanti dalla raccolta differenziata - Parte I: contesto e stato dell'arte

L'articolo analizza la termolisi come promettente alternativa per la valorizzazione di rifiuti organici e materiali di scarto, convertendoli in prodotti ad alto valore aggiunto. Il processo viene esaminato nei suoi principi fondamentali, variabili operative e principali applicazioni industriali. Vengono inoltre discusse le sfide tecnologiche e ambientali connesse, tra cui la gestione dei sottoprodotti e l'ottimizzazione dei parametri di processo per massimizzare il rendimento energetico.

PRODUCTION OF GASEOUS AND LIQUID GREEN FUEL THROUGH CLOSED-CYCLE THERMOLYSIS FROM RESIDUES DERIVED FROM SEPARATE WASTE COLLECTION. PART I: CONTEXT AND STATE OF THE ART

The article analyzes thermolysis as a promising alternative for the valorization of organic waste and discarded materials, converting them into high value-added products. The process is examined in terms of its fundamental principles, operational variables, and main industrial applications. Technological and environmental challenges are also discussed, including by-product management and the optimization of process parameters to maximize energy yield.

INTRODUZIONE

Nel contesto dell'applicazione del concetto di economia circolare e alla luce dei recenti aggiornamenti della tassonomia definita a livello Unione Europea in merito all'attrattività delle diverse soluzioni alla questione rifiuti [1] sta crescendo l'interesse per impianti che, con minimo impatto ambientale e a costi ampiamente superati dai ricavi, generano combustibile ecologico. Tale combustibile viene denominato green fuel, per evidenziare che deriva non dall'estrazione mineraria di idrocarburi, ma da materiale "di scarto" che deve essere smaltito, come nel caso dei residui derivanti dal trattamento dei materiali provenienti da raccolta differenziata. Premesso che il mancato ritrattamento della plastica da rifiuto a livello mondiale riveste enorme importanza, è da notare che, solo nel 2022, l'Unione Europea ha esportato oltre un milione di tonnellate di plastica verso paesi come Malaysia, Vietnam, Indonesia, Thailandia (complessivamente circa il 50%) e Turchia (circa 33%) dove le materie plastiche destinate al rifiuto vengono stoccate in discarica, abbandonate o bruciate a cielo aperto.

Le soluzioni tecnologiche in esame possono essere convenientemente impiegate anche utilizzando in ingresso altre tipologie di materiali da smaltire, come i residui delle lavorazioni tessili, i fanghi derivanti da depurazione sia di acque reflue sia da attività industriali o anche risorse primarie di basso valore quali il cippato o altri residui legnosi.

Al contempo, da alcuni dei processi usati per produrre combustibili verdi si possono, con opportune scelte dei parametri in gioco, produrre altre materie prime seconde tra le quali polimeri da cui ricavare plastiche, indistinguibili da quelle ricavate da idrocarburi estratti da giacimenti, o idrogeno.

UNA RASSEGNA SINTETICA A LIVELLO INTERNAZIONALE

Premessa sull'uso dei termini descrittivi dei processi termochimici di interesse

I termini che più comunemente si incontrano nella letteratura tecnico scientifica che studia le trasformazioni chimiche e fisiche in un contesto dove si produce e si assorbe calore (e quindi si hanno trasformazioni termochimiche oltre che trasformazioni fisiche di cambio di stato) sono: "pirolisi" e "gassificazione"; a volte appare anche il termine "termolisi". L'uso di questi termini non è del tutto uniforme tra i diversi documenti che trattano la materia, tanto meno lo è nella comunicazione nei media.

Premesso che non è da considerare per il processo qui proposto il termine "combustione" (in quanto non è rilevante la presenza di ossigeno al di sopra della concentrazione stechiometrica) si è fatto riferimento nel presente lavoro alle definizioni della Enciclopedia Treccani (considerata la sua diffusione anche tra i non esperti):

- Processo termochimico: partendo dalla definizione di termochimica come "branca della chimica che studia gli scambi di calore che accompagnano le reazioni chimiche" si definisce processo termochimico l'insieme delle trasformazioni in condizioni di scambio di calore generato dall'interno e/o proveniente dall'esterno.
- Termolisi: "in chimica, la dissociazione o decomposizione di un composto operata dal calore (pirolisi)".

L'indicazione tra parentesi del termine pirolisi potrebbe far ritenere a un lettore inesperto che pirolisi sia equivalente a termolisi, anche perché alla voce pirolisi si legge "pirolisi: metodo di decomposizione di un composto, in genere di complessità molecolare piuttosto elevata,

operata con mezzi termici, detto anche piroscissione". Però nella voce incenerimento si chiarisce inequivocabilmente che la pirolisi è caratterizzata dalla assenza o dalla forte carenza di ossigeno che ha effetti precisi su natura e quantità dei prodotti ottenuti.

Alla voce gassificazione si trova: "nella tecnica, il processo mediante il quale un combustibile, solido o liquido, viene trasformato in un gas o in una miscela di gas combustibili attraverso le operazioni di pirolisi (per es., nel cracking dei prodotti petroliferi o nella distillazione secca dei carboni fossili), di idrogenazione (per es., nella trasformazione del carbon fossile in idrocarburi gassosi e liquidi), o di ossidazione (con trasformazione del carbonio in ossido di carbonio, come nella produzione del gas d'aria e del gas d'acqua)."

Questa formulazione porta a considerare gassificazione come termine indicante un tipo di termolisi il cui prodotto è allo stato gassoso e senza il vincolo dell'assenza di ossigeno; mentre la pirolisi si viene a configurare come un caso particolare di gassificazione caratterizzato, come già detto, dal fatto che non si è in presenza di rilevanti quantità di ossigeno.

Il trattamento termico dei materiali poveri dal punto di vista delle strategie energetiche

Un primo segnale del rilievo assunto dal settore è stato esposto nella Conferenza di Berlino del 2015 tenuta in connessione con i lavori della Conferenza di Parigi COP 21 sui cambiamenti climatici [2]. I contenuti tecnici delle attività delle Task Force emersi nella Conferenza sono esposti nel rapporto annuale del 2015 della Task force IAEA sulla Bioenergia [3]. In particolare, il Task 36 mira ad approfondire quale ruolo può avere l'energia dai rifiuti e il riciclo dei materiali in un'economia circolare e a identificare le barriere tecniche e non tecniche e le opportunità da cogliere per realizzare questa visione. Secondo il Circularity Gap Report [4], globalmente solo l'8,6% del sistema economico è interessato all'economia circolare [5] il che lascia un ampio margine significativo a consumatori, imprese, città ed enti governativi per aumentare la circolarità riducendo l'estrazione di materiali vergini, promuovendo il recupero, il riutilizzo e il riciclo di quei materiali che sono già entrati nel sistema e generando energia. Il recupero dei materiali dai flussi di rifiuti è diventato un importante motore di questa transizione e in questa ottica il riuso delle plastiche è visto, non come rielaborazione meccanica delle stesse, ma come la produzione di materie prime seconde [6]. Il riciclo chimico delle plastiche porterebbe alla riduzione del loro impatto climatico e ambientale evitando l'incenerimento, lo smaltimento in discarica o addirittura la dispersione di questi materiali, e conduce a una diminuzione della dipendenza da fonti fossili per l'industria chimica. Tuttavia, la gassificazione da fossili su larga scala è consolidata, ma la pirolisi, in fase di sviluppo, necessita di maggiore scala e flessibilità per contribuire significativamente all'economia circolare.

Entro il 2050 si stima una produzione di 3,5 miliardi di tonnellate di rifiuti [6]. La gestione dei rifiuti è cruciale per l'Economia Circolare, ma mentre l'incenerimento (WtE), consolidato industrialmente, incontra opposizione ci si sta rivolgendo verso nuove tecnologie di recupero energia e materia, più in linea con i principi circolari. Con l'integrazione dell'economia circolare nelle politiche globali, si auspica che la gestione rifiuti prolunghi l'uso delle molecole, con la conversione

dei rifiuti in vettori energetici come carburanti o idrogeno.

Il rilievo economico e industriale oltre che tecnologico del comparto gassificazione a livello mondiale si comprende meglio considerando il rilievo rappresentato già oggi nel mondo dal settore syngas. Da sottolineare in particolare la flessibilità di impiego del green fuel derivante dalla gassificazione. Il prodotto condensato in forma liquida infatti è indistinguibile dal gasolio da raffinazione del petrolio, anzi è un additivo apprezzato perché ne migliora l'uso come carburante. Mentre il gas può essere utilizzato - direttamente o miscelato con gas naturale - sia da grandi consumatori (es. un'acciaieria), sia da una rete organizzata di consumatori civili e/o industriali (anche nella forma di comunità energetiche) o ancora può essere immesso, in opportuna frazione e con gli opportuni accorgimenti, nella rete nazionale del metano. Ma la considerazione più attuale e più significativa a favore della realizzazione di consistenti impianti di gassificazione o piro-gassificazione è che a partire dal 2021 si sono clamorosamente manifestate a livello internazionale le conseguenze - non solo sugli equilibri del conto economico delle aziende, ma anche sulla loro stessa sopravvivenza - di un vasto quadro di rialzo dei prezzi e di incertezza sulla disponibilità di gas naturale per comparti produttivi energivori.

Sono conseguentemente emersi i vantaggi, per alcuni di questi comparti, di una significativa autonomia dalle dinamiche negative sul mercato attraverso produzione di combustibili green, in particolare gas green fuel dalla gassificazione dei residui. Il crescente interesse per la produzione e l'utilizzo dell'idrogeno ha impartito un ulteriore impulso all'utilizzo di tecnologie di trattamento termico avanzato dei materiali poveri (tra i quali la gassificazione) per ricavarne idrogeno non proveniente da materiali fossili.

È per alcuni versi sorprendente che a fronte di un così significativo impegno internazionale e della rilevanza dei risultati acquisiti, siano presenti in ambito nazionale posizioni che si potrebbero definire addirittura discutibili sulle prospettive di sviluppo del settore anche per la valorizzazione di residui producendo materie seconde, tra le quali combustibili green. A tale proposito e a titolo di esempio si cita la mancata disanima del tema gassificazione dei residui nel Rapporto Decarbonizzazione dell'economia italiana e il catalogo delle tecnologie di gassificazione emergenti [7] che potrebbe essere interpretato come un indizio in tal senso. Fornire elementi concreti per superare queste perplessità nel contesto italiano è fra gli obiettivi del presente articolo, esponendo dati di fatto a favore della attrattività e della percorribilità di iniziative volte a realizzare impianti basati sulla termolisi, tanto più che la crisi di approvvigionamento di fonti energetiche - e in particolare del gas naturale - appena attraversata non è escluso possa ripetersi ciclicamente o addirittura divenire permanente.

Informazioni su processi e impianti attinenti alla termolisi

I prodotti principali di un generico processo di termolisi sono gas di sintesi (syngas), liquidi, cere e char. Il syngas contiene principalmente CO, H₂ e in misura minore CH₄ e altri idrocarburi volatili, mentre i liquidi possono essere assimilati a gasolio e oltre a essere utilizzati direttamente come carburante possono essere reimpiagati per produrre plastica ex-novo. Importante è il char (chiamato biochar

quando il processo riguarda solo vegetali) che può trovare differenti impieghi: precursore di carboni attivi, mezzo di filtrazione, filler per componenti plastici e compositi fibro-ceramici. Mentre il biochar è utile per migliorare il suolo, oppure additivo per i mangimi e può essere utilizzato come deposito di carbonio. È ovvio che tutti i prodotti della termolisi devono essere accuratamente purificati e condizionati per i successivi impieghi.

La non completa coerenza della terminologia rende poco significativa un'organizzazione della rassegna per tipo di tecnologie; pertanto, si adotta un ordinamento cronologico. Una prima ricognizione sulla tecnologia della termolisi a livello internazionale è riportata nel 1999 in [8], evidenziando come già a quella data i processi fossero consolidati. Nel 2013, un'analisi dettagliata delle soluzioni impiantistiche con dati tecnici e schemi funzionali è disponibile in [9] con oltre 170 riferimenti bibliografici. Nel 2014, l'articolo [10] esamina processi per la rimozione di catrame e la raffinazione del syngas, con focus sulla tecnologia Foster Wheeler (processo VESTA TM) e un elenco degli impianti operativi nel mondo. Nel 2015 il resoconto della Task

Force Pirolisi IEA [11] offre una panoramica delle iniziative impiantistiche inclusi risultati e standard introdotti nei paesi del TCP. Nel 2016 il quadro internazionale è trattato in [8], confrontando combustione, gassificazione, pirolisi e altre tecnologie, valutandone costi e impatti ambientali. Nel 2018, aggiornamenti sulle applicazioni della pirolisi, con valutazione di temperature, velocità di processo e reattori, sono forniti in [12]. Il lavoro di G. Lopez et al. [13] analizza il co-trattamento della plastica con biomassa come soluzione promettente. Nello stesso anno, Y. Yang et al. [14] approfondiscono la pirolisi a temperatura intermedia, elemento centrale di questo rapporto. Nel 2020, l'IEA, nel TCP Bioenergy, ha condotto una ricognizione sulla gassificazione, sia per biomasse sia per rifiuti, per la produzione di combustibili green [7]. Tra il 2021 e il 2022, numerosi rapporti nel contesto TCP IEA [15-18] offrono ulteriori approfondimenti e nel 2023 uno studio completo su gassificazione, concludendo che la commercializzazione della tecnologia di gassificazione dei rifiuti è una realtà, ma servono ulteriori sforzi per una sua diffusione effettiva. A livello nazionale, nel 2010, una concisa rassegna tassonomica delle tecnologie all'attenzione è presentata nella memoria di M. L.

TABELLA 1

Operatore	Tecnologia	Stadio di sviluppo
ENEA (Centro Ricerche di Trisaia)	Gassificazione a letto fluido per il trattamento di CSS con steam reforming e water gas shift	Impianto pilota, potenzialità di 10 kg/h CCS
	Pirolisi a letto fisso per scarti di compositi in fibra di carbonio impregnata con resine (500-600°C)	Impianto pilota
	Pirolisi e gassificazione SICAV (reattore a tamburo rotante + steam reformer) per produzione di carboni attivi e syngas da biomasse e pneumatici usati (PFU)	Impianto pilota, potenzialità 30 kg/h PFU
	Piattaforma integrata per la produzione di biocarburanti e green chemicals	Impianti da 300 kg/h (continuo) e 1 kg/ciclo (batch)
	Pirolisi/gassificazione con varie tecnologie e potenzialità per la conversione termochimica di rifiuti	Impianti da 30 kg/h (pneumatici e biomasse), 100 kg/ciclo (fibre di carbonio), 10 kg/h (CCS)
	Stazione sperimentale per la conversione termochimica di biomasse	Diversi tipi di gassificazione, fino a 1000 kWt
Maire Tecnimont Nextchem	Impianto idrolisi assistita da microonde (Chieti)	Riciclo chimico di PET e poliestere da tessuti
	Piro-ossidazione-syngas per produzione di etanolo e idrogeno (MyRechemical)	Impianto dimostrativo
	Impianto di riciclo della plastica (Bedizzole, BS)	40.000 t/anno
Versalis (ENI)	Hoop pirolisi di materie plastiche (Mantova, MN)	Impianto dimostrativo, 6000 t/anno, da plastiche miste
ITEA Sofinter - Ansaldo Caldaie	Isotherm flameless (Gioia Del Colle, BA)	Impianto dimostrativo, 5 t/giorno, 5 MW
Demont-Firmin	RI.PLA.ID (Lavis, TN) pirolisi catalitica materie plastiche	Progetto per impianto 5000 t/anno
SOTACARBO	Reattore di gassificazione a letto fisso up-draft	Impianto dimostrativo, 5 MWth
Pirox Italia Srl	Gassificatori a cippato up-draft	Impianti vari, 0,85-0,9 MW
Spanner Re2 GmbH	Gassificazione con motore endotermico	Impianti di piccola taglia 45 kW
Clean Carbon Conversion	Tecnologia UHTH idrolisi ad alta temperatura	Impianti UT5A (5 t/giorno), UT5B (25 t/giorno)

Mastellone e U. Arena [19]. Nel 2013, un rapporto ENEA [20] descrive la situazione delle tecnologie di gassificazione della biomassa in Italia, includendo una rassegna delle attività di ricerca nazionali. Nel 2017, il Rapporto ENEA, CNR e RSE [21] offre una panoramica delle esperienze acquisite in Italia, con informazioni dettagliate sulla gassificazione del carbone e del materiale cellulosico. Sebbene non approfondisca la gassificazione dei residui da raccolta differenziata, le competenze sviluppate risultano trasversali e applicabili alla trasformazione dei residui in carburanti. Il rapporto dettaglia inoltre lo stato dell'arte dei termovalorizzatori tradizionali.

Negli ultimi anni ha suscitato interesse la soluzione consistente nell'ottimizzare come scelta progettuale la combinazione di pirolisi e gassificazione. Si suggerisce di denominare impianti termolitici quegli impianti nei quali si mettono in atto accorgimenti tali da consentire sia di ottimizzare la fase preliminare di pirolisi, in modo che dia luogo a un prodotto intermedio adatto a migliorare le prestazioni della fase di gassificazione, sia di utilizzare il calore impiegato nella gassificazione per sostenere la termolisi. Questa ottimizzazione si può ottenere utilizzando un unico contenitore o, più agevolmente, utilizzando contenitori distinti che lavorano a temperatura diversa [22-24]. Per questi contenitori sono impiegati differenti materiali, ad esempio, la termolisi di seconda fase avviene in contenitori refrattari. Un approccio utile è quello di tendere ad ottimizzare ciascun processo e la loro combinazione per massimizzare il risultato finale, particolarmente proficuo nel trattamento di biomasse.

Alcuni esempi di impianti realizzati in Italia

Nella Tabella 1 sono elencate alcune delle iniziative in corso in Italia, indicando per ciascuna l'operatore, la tecnologia e lo stadio di sviluppo raggiunto [25].

CONCLUSIONI

La termolisi emerge come una tecnologia chiave nel panorama della gestione dei rifiuti e della transizione verso un'economia circolare. La sua capacità di convertire scarti organici e materiali non riciclabili in combustibili, intermedi chimici e materiali a valore aggiunto, operando in condizioni di ridotto impatto ambientale, la rende una soluzione promettente per affrontare le crescenti sfide legate all'accumulo di rifiuti e alla necessità di fonti energetiche sostenibili.

L'analisi dei principi fondamentali, delle variabili operative e delle applicazioni industriali evidenzia la versatilità della termolisi e il suo potenziale per essere integrata in diversi contesti. Tuttavia, la gestione efficace dei sottoprodotti e l'ottimizzazione dei parametri di processo rimangono aspetti cruciali per garantirne la sostenibilità economica e ambientale su larga scala.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano esprimere profonda gratitudine al prof. Fabio Pistella che li ha invitati a intraprendere tale studio a cui ha contribuito con preziosi suggerimenti.

RIFERIMENTI

1. Laboratorio Ref Ricerche. TAXO4: la Tassonomia UE si amplia, limiti e opportunità nella gestione dei rifiuti. 2023. <https://labo->

ratorioref.it/taxo4-la-tassonomia-ue-si-amplia-limiti-e-opportunita-nella-gestione-dei-rifiuti/. Ultimo accesso 23/05/2025.

2. IEA. Berlin Bioenergy Conference. Conclusions. 2015. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/iea-bioenergy-conference-2015-conclusions/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
3. IEA. Bioenergy Annual Report. 2015. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/iea-bioenergy-annual-report-2015/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
4. IEA. Bioenergy Material and Energy Valorisation of Waste in a Circular Economy. 2022. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/material-and-energy-valorisation-of-waste-in-a-circular-economy/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
5. G. Ciceri, D. Stapf. Material and Energy Valorization of Waste as Part of a Circular Model Special Feature Article for the IEA Bioenergy Annual Report. 2022. ISBN number: 979-12-80907-28-8.
6. IEA. Decarbonization of the Waste Sector. 2022. <https://task36.ieabioenergy.com/publications/workshop-report-decarbonisation-of-the-waste-sector-global-experiences/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
7. IEA. Emerging Gasification Technologies. 2020. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-emerging-gasification-technologies-for-waste-biomass/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
8. M. Patel, X. Zhang, A. Kumar. Techno-Economic and Life Cycle Assessment on Lignocellulosic Biomass Thermochemical Conversion Technologies: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486-1499. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.070>
9. D. Meier, B. van de B., A. V. Bridgwater, D. C. Elliott, A. Oasmaa, F. Preto. State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, Pages 619-641. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.061>.
10. R. Domenichini, G. Collodi, L. Mancuso, A. Hotta, J. Palonen. Biomass Gasification for the Production of Substitute Natural Gas (SNG). *L'impiantistica italiana Anno XXVII n° 3 maggio- giugno 2014*.
11. D. Elliot. Task 34 Pyrolysis Newsletter - PyNe 37. 2015 <https://task34.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/Pyne-Newsletter-37-FINAL.pdf>. Ultimo accesso 23/05/2025.
12. M.N. Uddin, K. Techato, J. Taweekun, M.M. Rahman, M.G. Rasul, T.M.I. Mahlia, S.M. Ashrafur. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies* 11, 3115. 2018. <https://doi.org/10.3390/en11113115>.
13. G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao, M. Olazar. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 1. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>.
14. Y. Yang, Y. Zhang, E. Omairey, J. Cai, F. Gu, A. V. Bridgwater. Intermediate pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste and rheological study of the pyrolysis oil for potential use as bio-bitumen. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187. Pages 390-399. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.205>.

15. IEA. Status Report on thermal gasification of biomass and waste. 2022. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/03/Status-Report2021_final.pdf. Ultimo accesso 23/05/2025.
16. IEA. Task 33: Gasification of Biogenic and Waste Feedstocks for a Sustainable Future. 2022. <https://www.ieabioenergy.com/blog/task/thermal-gasification-of-biomass/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
17. IEA. Gasification developments in Europe and the USA 2021. 2021. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/03/Hrbek-Gasification-developments-in-Europe-USA.pdf>. Ultimo accesso 23/05/2025.
18. IEA. Valuable products and by-products of biomass gasification. 2022. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/valuable-products-and-by-products-of-biomass-gasification-task-33-workshop-vienna-19-october-2022/>. Ultimo accesso 23/05/2025.
19. M. L. Mastellone e U. Arena (Seconda Univ. di Napoli). Pirolisi di rifiuti solidi: aspetti tecnologici e di processo. Memoria presentata al Convegno "Gassificazione e pirolisi tecnologie innovative per la valorizzazione energetica dei rifiuti". 2010. <https://www.regione.vda.it/allegato.aspx?pk=11008>. Ultimo accesso 23/05/2025.
20. D. Barisano, G. Canneto. ENEA. Gassificazione: opportunità e limiti. 2013. <https://www.ricercasistematica.enea.it/archivio-documenti/category/422-report-2013-progetto-b-1-1.html>. Ultimo accesso 23/05/2025.
21. A. Sanson, L.G. Giuffrida. Decarbonizzazione dell'economia italiana. Il Catalogo delle tecnologie energetiche. Ed. ENEA. 2017. ISBN: 978-88-8286-349-4.
22. C. Block, A. Ephraim, E. Weiss-Hortala. Co-pyrogasification of Plastics and Biomass, a Review. Waste Biomass Valor 10, 483-509. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0219-8>.
23. B. Ciuffi, D. Chiamonti, A.M. Rizzo, M. Frediani, L. Rosi. A Critical Review of SCWG in the Context of Available Gasification Technologies for Plastic Waste. Appl. Sci. 10, 6307. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10186307>
24. S. Ge, D. Chen, L. Yin, L. Hong, H. Zhou, Z. Huang. Municipal solid wastes pyro-gasification using high-temperature flue gas as heating resource and gasifying agent. Waste Management, Volume 149, Pages 114-123. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.010>.
25. Rivista Chimica e Industria online VI - N° 5. 2022. ISSN 2283-544X. Ultimo accesso 23/05/2025.



Nuova vita al tuo impianto di cogenerazione con benefici economici e di performance

- Riqualificazione e gestione degli impianti
- Garanzia del risultato
- Ottenimento e gestione incentivi (TEE)
- Gestione pratiche amministrative
- Finanziamento revamping impianto
- Accesso al mercato dispacciamento elettrico (Demand Response/MSD)

siram.veolia.it

SIRAM  VEOLIA