



PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI PROTOTIPI PER IL TRATTAMENTO DI RIFIUTI TECNOLOGICI

Un tema chiave ed estremamente attuale per lo sviluppo tecnologico sostenibile è quello del riciclo. La società Eco Recycling lavora nel settore del trattamento dei rifiuti tecnologici. In particolare, si occupa della progettazione e dello sviluppo di impianti in scala prototipo, pilota ed industriale. Due sono le applicazioni tecnologiche che qui verranno descritte: il riciclo dei pannelli fotovoltaici e delle batterie primarie al litio a fine vita.

Introduzione

Il mondo di oggi sta affrontando diverse sfide, tra queste emerge quella del riciclo, una sfida ambientalmente e tecnologicamente significativa: è di questo che la società Eco Recycling si occupa.

La Eco Recycling è nata nel 2008 quando il suo visionario fondatore, oggi presidente e pioniere di tutte le avventure e le sfide della Società, ha pensato che l'ingegneria chimica applicata al settore del riciclaggio dei rifiuti elettronici e degli scarti delle lavorazioni minerarie sarebbe stato il futuro, il tutto quando ancora economia circolare e green economy erano temi acerbi.

I primi progetti della Società sono stati piccoli come del resto lo era il suo esiguo team di lavoro oggi fulcro della Eco Recycling [1]. Attualmente, a meno di 15 anni dalla sua nascita, le cose sono significativamente cambiate: numerosi sono i progetti attivi e, con i suoi 10 dipendenti, la Eco Recycling si è affacciata nel panorama internazionale, ritagliandosi un ruolo importante nel settore del trasferimento tecnologico e, in particolare, per quanto riguarda la progettazione e la realizzazione di impianti prototipi, pilota ed industriali.

La carenza di risorse primarie spinge verso l'approvvigionamento di materie prime da risorse se-

condarie ma la strada è lunga da percorrere soprattutto perché i limiti normativi sono stringenti ed è difficile, se non impossibile, reimmettere sul mercato prodotti derivanti da un processo di riciclaggio. Il problema va affrontato per gradi, la strategia odierna è quella di impiegare i materiali ottenuti dai processi di riciclaggio nel medesimo ciclo produttivo dai quali provengono.

Due tra le tematiche maggiormente sviluppate dalla Eco Recycling, che ne ha curato principalmente gli aspetti ingegneristici legati agli impianti associati ai processi sono il riciclaggio dei pannelli fotovoltaici a fine vita (Progetto Photolife [2]) e delle batterie a base litio (Progetto Libat [3]).

Lo sviluppo di processo in scala di laboratorio riguardante il trattamento dei pannelli fotovoltaici è stato svolto dal centro di ricerca interuniversitario High Tech Recycling, mentre quello inerente le batterie a fine vita dal Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma "La Sapienza", gruppo di Teoria dello sviluppo dei processi chimici.

Per entrambi questi processi si è puntato all'impiego di tecnologie semplici ma al tempo stesso realizzate su misura con caratteristiche tecniche dedicate per rendere maggiormente efficienti le rese del processo e minimizzare scarti e consumi



Fig. 1 - Pannelli fotovoltaici a fine vita

energetici. La Comunità Europea è stata un grande sponsor di queste iniziative, co-finanziando i progetti che hanno aiutato la Eco Recycling nello sviluppo del suo consolidato know-how in questi due settori di punta.

Progetto Photolife

Durante il progetto Photolife [2] è stato definito un processo efficiente per il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita (Fig. 1); questo processo è in grado di valorizzare il rifiuto ed ottenere componenti reimpiegabili in diversi mercati di riferimento. È stato inoltre progettato e realizzato un prototipo per la sperimentazione di questo processo di trattamento innovativo.

Il prototipo

Il prototipo costruito nel progetto Photolife ha una potenzialità massima di 200 t/anno di pannelli trattati e permette di processare moduli di diversa tipologia. L'intero impianto è installato presso la sede operativa della Eco Recycling a Civita Castellana (VT).

L'impianto è stato costruito all'interno di due container, uno per la sezione di pretrattamento meccanico e l'altro per la sezione di trattamento fisico. L'unica operazione manuale svolta consiste nel disassemblaggio dei pannelli; in questa fase il pannello subisce una rimozione della cornice di alluminio (10% del peso totale del pannello) e della *junction box* e cavi posti sul retro, qualora presenti.

Sezione di trattamento meccanico

Trituratore: in seguito a varie campagne sperimentali volte all'ottimizzazione della distribuzione granulometrica del frantumato, è stato progettato e realizzato uno specifico trituratore alimentato con pannelli precedentemente sezionati, collocato nella sezione di trattamento meccanico (Fig. 2).

Vaglio e Coclea: i setacci vengono alimentati con il campione in uscita dal frantumatore e consistono in due vibrovagli posti in serie ed equipaggiati con griglie di apertura specifica. Il trasporto del solido da vagliare avviene tramite una coclea e l'operazione di setacciatura consente di separare tre frazioni distinte: una frazione grossolana, una fine ed una finissima da inviare a trattamenti a valle differenti.



Fig. 2 - Sezione trattamento meccanico



Fig. 3 - Reattore trattamento fisico

Sezione di trattamento fisico

La sezione di trattamento fisico è costituita da due aree separate: la prima, in cui sono installati il quadro elettrico e pneumatico ed il circuito di servizio dell'acqua di riscaldamento per il reattore; la seconda dove, invece, è ubicato il reattore insieme ai serbatoi di stoccaggio dei reagenti e al sistema di filtrazione a carboni attivi. Il reattore (Fig. 3) è impiegato per il distacco e la separazione del vetro dalla frazione polimerica: la frazione grossolana in uscita dal vaglio, viene inviata al reattore incamiciato ed agitato dove avviene il distacco del vetro dalla frazione polimerica attraverso l'impiego di un apposito reagente. Il reattore è dotato di dispositivi di misura della temperatura e della pressione che consentono un monitoraggio di tali parametri operativi.

La sezione di trattamento fisico comprende anche un parco serbatoi dei reagenti per la fase di distacco dell'etilene vinile acetato (EVA) dal vetro, una caldaia per produrre l'acqua di riscaldamento

da inviare alla camicia esterna del reattore ed il sistema di ventilazione forzata con un filtro a carboni attivi per condizionare in modo idoneo la camera operativa. La linea del reattore è, inoltre, provvista di un filtro a cestello per intercettare eventuali particelle solide trascinate dal reagente prima di essere reimpresso nel suo serbatoio di recupero e relative pompe, per i fluidi di processo trattati.

Risultati

Lo scopo del progetto Photolife è il recupero dei diversi componenti dei pannelli fotovoltaici in modo tale da rispettare le percentuali imposte dalla direttiva vigente. Nel corso del progetto sono state condotte diverse campagne sperimentali sul prototipo mirate all'ottimizzazione delle condizioni di processo; i risultati ottenuti come percentuali di recupero dei vari componenti, sono i seguenti:

- il 66% in peso del pannello recuperato come vetro;
- il 10% in peso del pannello come alluminio;
- il 6,5% in peso del pannello come frazione vetro-sa finissima;
- il 12% in peso come frazione polimerica (EVA + tedlar).

Il prototipo è stato implementato con un dispositivo per la selezione ottica in grado di distinguere i contaminanti dai frammenti di vetro. Il vetro così prodotto è adatto agli standard di mercato per i pannelli fotovoltaici. Nella Fig. 4 si riporta il risultato di un test di selezione eseguito su impianto pilota.

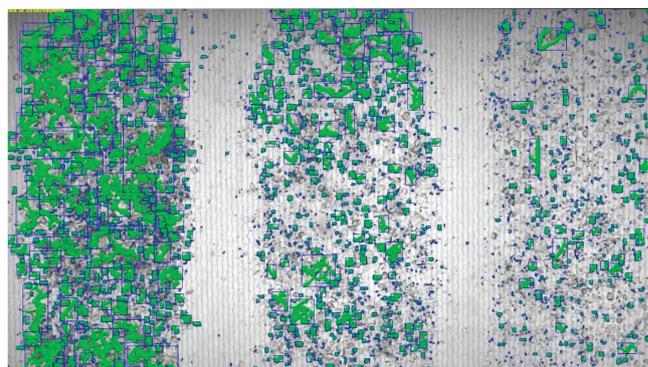
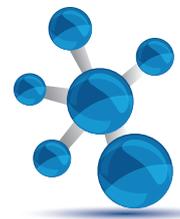


Fig. 4 - Riconoscimento ottico su frammenti di vetro

Progetto Life LiBat

Durante il progetto Life LiBat [3] è stato dimostrato in scala pilota un processo innovativo per il trattamento di batterie primarie al litio (Fig. 5), una tipolo-



gia particolarmente complessa da trattare. La tecnologia sviluppata integra un pretrattamento meccanico con un trattamento idrometallurgico per il recupero di acciaio, litio e manganese. In accordo con la Direttiva UE 2006/66/CE, è stata raggiunta una percentuale di riciclo maggiore del 50%. Rispetto alle tecnologie di riciclaggio alternative, il processo LiBat consente di recuperare i prodotti di litio e manganese. Oltre alla capofila Eco Recycling, i partner di questo progetto sono stati la SEVal ed il Dipartimento di Chimica dell'Università la Sapienza di Roma.

Il prototipo

L'impianto pilota, progettato dalla Eco Recycling, è stato installato presso la sede operativa della SEVal dello stabilimento di Colico (LC). L'impianto è suddiviso in due sezioni, una per il trattamento criomeccanico (Fig. 6) delle batterie e l'altra per il recupero per via chimica di litio e manganese (Fig. 7).

Sezione di trattamento meccanico

Un pretrattamento criogenico permette di stabilizzare le batterie e consentire la macinazione sicura nel mulino. Attraverso sistemi di separazione di-



Fig. 5 - Batterie Li(0)/MnO₂

mensionale e magnetica il materiale viene suddiviso in tre frazioni: acciaio, carta/plastica e polvere elettrodica (Fig. 8). Le frazioni separate vengono convogliate in tre diversi reattori di neutralizzazione, dove viene estratto il litio, e le frazioni recuperate vengono rese sicure da manipolare. La polvere elettrodica neutralizzata viene alimentata alla sezione di lisciviazione per il recupero del manganese. La soluzione ricca di litio viene

invece alimentata al reattore di recupero del litio. *Camera di pretrattamento:* le batterie Li(0) contengono solventi organici infiammabili e litio metallico, che è molto reattivo all'aria e all'acqua. L'unità di pretrattamento può stabilizzare termicamente le batterie ed effettuare la successiva macinazione in sicurezza.

Mulino: le batterie Li(0)/MnO₂ pretrattate vengono frantumate per consentire il rilascio della polvere elettrodica contenuta all'interno dell'involucro in acciaio, anch'esso recuperato. Le batterie macinate sono convogliate su un vibrovaglio.

Vibrovaglio e separatore magnetico: la frazione magnetica (acciaio) viene separata da un separatore magnetico, mentre il materiale rimanente viene diviso dal vibrovaglio in due frazioni a seconda della granulometria: polvere elettrodica e non magne-



Fig. 6 - Impianto prototipo LiBat: sezione meccanica



Fig. 7 - Impianto prototipo LiBat: sezione idrometallurgica



Fig. 8 - Frazioni recuperate da sx: polvere elettrodica, acciaio, carta e plastica; distribuzione delle frazioni

tico grossolano (carta e plastica). Tutte le frazioni contengono litio e vengono convogliate automaticamente ai tre rispettivi reattori di neutralizzazione (Fig. 6).

Reattori di neutralizzazione: i tre reattori sono dotati di speciali sistemi di recupero delle frazioni solide e sono precaricati con acqua per far reagire in ambiente controllato il litio contenuto nelle frazioni solide alimentate ai reattori. I solidi e le soluzioni sono recuperati aprendo il portello superiore dei reattori.

Sezione idrometallurgica

La polvere elettrodica neutralizzata viene trattata nel reattore di lisciviazione per solubilizzare il biossido di manganese. Le impurità come carbone e ferro vengono successivamente rimosse mediante filtrazione. Il manganese viene recuperato per precipitazione e filtrazione tramite filtropressa (Fig. 7). La soluzione di litio ottenuta dai reattori di neutralizzazione permette la precipitazione e il recupero del sale di litio, filtrato anch'esso tramite filtropressa.

La soluzione prodotta nelle vasche di neutralizzazione è ricca di litio e viene inviata al relativo reattore di precipitazione, dove il litio è recuperato per reazione con un opportuno agente chimico.

Reattore di lisciviazione e reattore di recupero del manganese: la polvere elettrodica neutralizzata, prodotta dalla sezione meccanica, è inviata alla sezione idrometallurgica dove il manganese in essa contenuto è solubilizzato per attacco acido. Dopo uno step di rimozione delle impurezze il manganese è precipitato con un opportuno agente chimico e recuperato.

Filtro per rimozione impurezze: la polvere elettrodica, oltre al manganese, contiene altri composti, quali ferro e carbone, che vengono rimossi selettivamente e filtrati per ottenere una soluzione purificata di manganese.

Filtropresse: la sezione idrometallurgica è dotata di

due filtropresse connesse al reattore uno, per la filtrazione del litio, e al reattore tre, per la filtrazione del manganese.

Impianto di abbattimento: l'impianto LiBat è equipaggiato con un sistema di abbattimento connesso alla sezione meccanica e a quella idrometallurgica. È composto da un filtro a maniche per l'abbattimento delle polveri derivanti dalla macinazione, uno scrubber per l'eliminazione dei vapori acidi generati dal *leaching* e da un'unità di carboni attivi per l'adsorbimento dei solventi organici liberati dalle batterie.

Risultati della campagna dimostrativa

La dimostrazione è stata conclusa con successo trattando circa 9.000 kg di batterie Li(O)/MnO₂ e producendo circa 200 kg di carbonato di litio ad elevata purezza (99,8%) e 600 kg di idrossido di manganese puro al 97,7% (Fig. 9 e 10).

Tutto questo ha permesso di convalidare il processo di laboratorio determinandone le rese.

La resa di riciclo complessiva del processo è del 65%, mentre la resa di recupero, che include anche la frazione di carta e plastica che può essere valorizzata termicamente, è del 70%.

Un impianto di questo tipo offre la possibilità di trattare anche le batterie agli ioni di litio, che sono il tipo di batterie ricaricabili portatili più diffuse sul mercato. Questo consente di recuperare anche una preziosa miscela di sali di nichel, cobalto e manganese, nonché grafite di purezza tale da essere reimpiegata per la produzione di nuove batterie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://ecorecycling.eu/>
 - [2] <http://www.photolifeproject.eu/>
 - [3] <http://www.lifelibat.eu/>
- Riciclo delle batterie al litio,*

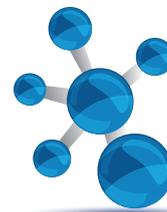


Fig. 9 - Idrossido di manganese recuperato



Fig. 10 - Carbonato di litio recuperato

pubblicazioni relative al progetto Life LiBat:

- L. Baldassari *et al.*, Proc. of Going Green - Care Innovation 2018, Vienna, Vienna: Care Electronics, ISBN: 978-3-200-05942-9 (available as proceeding of the conference: 28 November 2018).
- P.G. Schiavi *et al.*, *Electrochim. Acta*, 2019, **319**, 481.
- L. Baldassari *et al.*, Proc. of the XI International Scientific Seminar "Structure, properties and composition of concrete", Rivne (UA), 2020, **38**, 300.
- P.G. Schiavi *et al.*, *Energies*, 2020, **13**, 4004.
- P.G. Schiavi *et al.*, *Energies*, 2020, **13**, 4546.

Riciclo dei pannelli fotovoltaici,

pubblicazioni relative al progetto Photolife:

- F. Pagnanelli *et al.*, *J. Environ. Management*, 2019, **248**, 109313.
- F. Pagnanelli *et al.*, *Waste Management*, 2017, **59**, 422.
- F. Pagnanelli *et al.*, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C*, 2016, **125**, 221.

Proceedings:

- "First outcomes from Photolife Project: Process and automated pilot plant for simultaneous and integral recycling of different kinds of photovoltaic panels", F. Pagnanelli *et al.*, Proc. of the Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition (SIPS 2015), 4-9 October

2015, Antalya (TUR), vol. 11: Recycling & Environmental, pp. 67-80 (sips 15 7 48 FS), F. Kongoli, T. Havlik, F. Pagnanelli (Eds.), Publisher: Flogen Stars Outreach, December 2015, ISBN 978-1-987820-34-8 (CD), Metals and Materials Processing in a Clean Environment Series: ISSN 2291 1227 (CD).

- "Physical and chemical treatment of end of life Si-based and CdTe photovoltaic panels", F. Pagnanelli *et al.*, Proc. of the Shechtman International Symposium, 06-10 November 2016, Sustainable Industrial Processing Summit, vol. 10 (Battery, Recycling, Environmental, Mining), pp. 57-66, ISBN 978-1-987820-54-6, ISSN 2291-1227, F. Kongoli (Ed.).

Design and Construction of Prototypes for the Treatment of Technological Waste

A key and extremely current issue for a sustainable technological development is recycling. The Eco Recycling company deals with experimentation in the technological waste recycling sector. In particular, the design and development of prototype, pilot-scale and full-scale plants. There are two technological applications that will be described here: the recycling of photovoltaic panels and recycling of primary lithium batteries at the end of their life.