



Biotecnologie
per lo
sviluppo
Sostenibile

Applicazioni e Sicurezza

Pubblicazione realizzata da

INAIL

Settore Ricerca, Certificazione e Verifica
Dipartimento Processi Organizzativi
U.F. Comunicazione - Redazione

Progetto “Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile. Applicazioni e Sicurezza” realizzato con il supporto finanziario del Ministero della Salute - CCM 36/2011

AUTORI

Biancamaria Pietrangeli, Roberto Lauri, Daniele Salvatore Accardi
INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Inseidamenti Antropici

RESPONSABILI SCIENTIFICI

Biancamaria Pietrangeli
INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Inseidamenti Antropici

Aleandro Renzi
Ministero della Salute - Direzione generale, Prevenzione sanitaria

SEGRETERIA SCIENTIFICA

Roberto Lauri, Daniele Salvatore Accardi
INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Inseidamenti Antropici

COLLABORAZIONE REDAZIONALE E GRAFICA

Maria Castriotta, Tiziana Belli, Alessandro Di Pietro
INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Processi Organizzativi

CONTATTI

INAIL - Settore Ricerca, Certificazione e Verifica
Dipartimento Installazioni di Produzione ed Inseidamenti Antropici
Viale Stefano Gradi, 55 - Roma
b.pietrangeli@inail.it; r.lauri@inail.it
www.inail.it

© 2014 INAIL

ISBN 978-88-7484-385-5

La pubblicazione viene distribuita gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Tipolitografia INAIL - Milano, settembre 2014

INDICE

INTRODUZIONE

LE BIORAFFINERIE

- Le Bioraffinerie: un'opportunità di sviluppo per l'Italia 11
Biancamaria Pietrangeli, Daniele Salvatore Accardi
- Gestione della sicurezza e sostanze pericolose nel settore dei combustibili da fonte rinnovabile 30
Paolo Angelo Bragatto
- Produzione di bioetanolo nell'impianto di Crescentino (Gruppo M&G) ed aspetti di sicurezza 42
Biancamaria Pietrangeli, Roberto Lauri
- Aspetti di sicurezza nella produzione di bioplastiche nello stabilimento Novamont di Terni 80
Roberto Lauri, Biancamaria Pietrangeli
- Le nuove prospettive Eni per la produzione di biocarburanti: dalla *biorefinery* di Venezia alle microalghe 98
Andrea Amoroso, Felicia Massetti

IL SETTORE DEL BIOGAS IN ITALIA ED ASPETTI DI SICUREZZA

- Biogas: le opportunità di sviluppo per l'Italia 101
Ezio Veggia
- La valorizzazione delle biomasse attraverso la digestione anaerobica 104
Marco Boggetti
- La sicurezza ambientale ed occupazionale negli impianti di produzione del biogas 114
Biancamaria Pietrangeli, Roberto Lauri, Domenico Davolos, Paolo Angelo Bragatto
- Esposizione professionale a particolato sottile e bioaerosol in impianti di digestione anaerobica per la valorizzazione energetica di biomasse 151
Deborah Traversi, Riccardo Leinardi, Ilaria Gorrasi, Giorgio Gilli

LA RICERCA DI FRONTIERA NEL SETTORE

- Aspetti a confronto della produzione del butandiolo da petrolio e da biomasse 159
Luca Di Palma, Roberto Bubbico, Emanuela Capogrosso

- Processi innovativi per la produzione di polimeri biodegradabili a partire da scarichi municipali o industriali 167
Francesco Valentino, Marianna Villano, Sabrina Campanari, Mauro Majone

- Processi biotecnologici per la produzione di energia elettrica mediante sistemi biofotovoltaici (BPVs) 176
Antonella Di Battista, Paolo De Filippis

- ALLEGATO: *Check list* per la sicurezza degli impianti di produzione di biogas 185

INTRODUZIONE

Presentazione del Progetto CCM 36/2011 “Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile: applicazioni e sicurezza”

Biancamaria Pietrangeli

Referente Scientifico del Progetto - INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insediamenti Antropici, Roma

Premessa

L'esigenza di conciliare crescita economica ed equa distribuzione delle risorse in un nuovo modello di sviluppo ha iniziato a farsi strada a partire dagli anni Settanta, in seguito all'avvenuta presa di coscienza del fatto che il concetto di sviluppo classico, legato esclusivamente alla crescita economica, avrebbe causato entro breve il collasso dei sistemi naturali. La crescita economica di per sé non basta, lo sviluppo è reale solo se migliora la qualità della vita in modo duraturo. La definizione più diffusa di Sviluppo sostenibile è quella fornita nel 1987 dalla *World Commission on Environment and Development* delle Nazioni Unite secondo la quale: *“L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni dell'attuale generazione senza compromettere la capacità delle generazioni future di rispondere ai loro”*. L'elemento centrale di tale definizione è la necessità di cercare una equità di tipo intergenerazionale: le generazioni future hanno gli stessi diritti di quelle attuali [United Nation, 1987]. In tale contesto il ricorso alla cosiddetta *Green Economy* contribuisce in maniera incisiva a preservare o restaurare la qualità ambientale e rappresenta una strategia fondamentale per superare la crisi economica ed ambientale. In Europa la strategia 2020 punta a fare del binomio sostenibilità-occupazione la carta vincente dell'economia del prossimo decennio, prevedendo importanti obiettivi in materia di clima ed energia: riduzione del 20% delle emissioni di gas ad effetto serra, aumento fino al 20% del risparmio energetico ed aumento del 20% del consumo di energia da fonti rinnovabili [Unione europea, 2010]. Lo sfruttamento delle fonti rinnovabili negli ultimi anni è cresciuto come pochi altri comparti tecnologici e, anche se si è ancora lontani da una vera e propria transizione verso tale tipo di energia, questo indirizzo sta comportando variazioni nel mercato del lavoro. L'UNEP ha stimato nel 2008, a livello globale, 11 milioni di posti di *green jobs* che, in base a proiezioni statistiche, potrebbero diventare 20 milioni entro il 2030. In particolare, il solo settore delle energie rinnovabili ha creato 2,3 milioni di posti di lavoro soprattutto nel settore delle biomasse e del solare termico. Secondo l'UNEP nel 2010 in Europa nel settore si sono creati 950.000 posti di lavoro che saliranno a 1,4 milioni nel 2020. In Italia i *green jobs* impiegano tra gli 850.000 e i 950.000 lavoratori, che nel 2020 raggiungeranno una cifra compresa fra 1,3 e 1,5 milioni. Oltre ai Paesi industrializzati, l'aumento dei “lavori verdi” sta interessando alcuni Paesi emergenti, quali Cina e India [UNEP, 2008].

1. Il contributo delle biotecnologie industriali allo sviluppo sostenibile

Già nel 2001, l'OCSE, con la pubblicazione del Rapporto *The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability* [OECD, 2001], nel promuovere il concetto di "industrializzazione sostenibile" aveva individuato nelle biotecnologie la vera e propria chiave di volta per realizzare uno sviluppo industriale rispettoso dell'ambiente. Pur a fronte degli indubbi vantaggi economici e dell'ecosostenibilità dei bioprocessi, l'analisi OCSE dimostrava una sostanziale diffidenza nei confronti delle biotecnologie industriali da parte della chimica tradizionale, creando di fatto un *gap* conoscitivo che per anni ha impedito che questo settore esprimesse il suo reale potenziale. I trattamenti biotecnologici si sono dapprima affermati a valle dei cicli produttivi come tecnologie *end of pipe* per la rimozione del potenziale inquinante degli effluenti. Più recentemente, nel settore del risanamento ambientale, le tecnologie di *bioremediation* trovano sempre maggiore applicazione nella bonifica dei siti contaminati: da interventi che di fatto non fanno che trasferire gli inquinanti da una matrice ad un'altra, la domanda di bonifica si sta spostando verso tecnologie, come quelle biologiche, più naturali e meno costose, mirate al ripristino effettivo dei siti con maggiori garanzie di eco-compatibilità e sicurezza.

Nel panorama industriale sono sempre più numerose le aziende che, pur operando in settori "tradizionali" integrano prodotti e tecnologie *biotech* nei propri processi produttivi, al fine di migliorarne la qualità e la resa e/o di diminuirne l'impatto ambientale. Nessun processo produttivo risulta, infatti, meno invasivo sull'ambiente di quello dei processi naturali dai quali le biotecnologie originano. A titolo di esempio la produzione di antibiotici per via fermentativa ha ridotto del 50% il consumo di energia e del 65% le emissioni inquinanti [Assobiotec, 2012]. Nel prossimo futuro le biotecnologie industriali daranno un contributo fondamentale proprio nel settore energetico ed in quello della chimica fine, permettendo di ottenere prodotti ad alto valore aggiunto a partire da risorse rinnovabili come le biomasse. Queste applicazioni condividono un fondamento scientifico e tecnologico comune: partendo da materiali rinnovabili o di scarto come materia prima, utilizzano microrganismi, anche geneticamente modificati, ed i loro singoli componenti cellulari, come gli enzimi, per ottenere prodotti in modo sostenibile. Nasce così il concetto di bioraffineria: attraverso il *biotech* i processi chimici convenzionali potranno conoscere una profonda trasformazione risolvendo molte delle problematiche di pubblico interesse quali la gestione dei materiali di scarto, delle emissioni di CO₂ e delle risorse idriche ed energetiche, con un costo che potrebbe essere 40% in meno di quello dei processi convenzionali.

In Italia il Ministero dell'Ambiente e quello dello Sviluppo Economico hanno recentemente siglato il nuovo regolamento per la semplificazione delle procedure di autorizzazione delle bioraffinerie con l'obiettivo di promuovere tali produzioni sul territorio nazionale, facilitando gli investimenti nel settore, consentendo di estendere ad altri siti le esperienze costruttive e di esercizio acquisite in impianti già autorizzati. In Italia si sta infatti assistendo ad una riconversione dei principali stabilimenti industriali esistenti, dopo le opportune attività di bonifica, in impianti di bioraffineria. In questa ottica il sistema produttivo del nostro Paese deve mettere in campo azioni concrete sul territorio che vadano nella direzione di una progressiva riduzione degli impatti ambientali, investendo in tecnologie sempre più pulite per produrre beni sempre più innovativi e di elevata qualità ambientale. Solo così si potrà creare quell'auspicabile equilibrio tra ambiente, salute e lavoro che può dare una risposta ai bisogni di salute e di qualità dei territori e aprire una prospettiva concreta di lavoro e di sviluppo.

2. Lo studio della sicurezza nel settore delle biotecnologie industriali

Considerato il contributo che verrà dato all'industria chimica dai processi biotecnologici ed il quadro normativo che si sta sviluppando a supporto di tali applicazioni, deve essere parallelamente avviato lo studio della sicurezza di questi processi industriali. Vanno presi in esame i potenziali pericoli connessi alla sostanze prodotte (etanolo, biogas) o utilizzate nel ciclo produttivo (metanolo), alla manipolazione di materiali organici complessi (biomasse), quali residui agroindustriali, rifiuti organici, insilati, effluenti zootecnici, ecc., all'esposizione a polveri organiche (da cereali), polveri di legno e quelli connessi all'utilizzo in ambiente confinato (bioreattori) di microrganismi e/o enzimi. È necessario studiare la gestione della sicurezza relativa al rischio incidentale che include quello di natura esplosiva, per la natura di alcuni dei prodotti in fase di produzione e/o stoccaggio (biogas, bioetanolo, polveri organiche). Relativamente ai *chemicals*, anche se la quantità di reagenti pericolosi in un processo di bioraffineria è notevolmente ridotta rispetto agli impianti chimici tradizionali, l'impiego di alcune sostanze chimiche si rende comunque necessario. Nel caso della produzione di bioetanolo alcuni impianti utilizzano idrossido di sodio o acido solforico come agente disinfettante o nelle operazioni di pulizia, mentre nella produzione di biodiesel è comunemente utilizzato il metanolo.

La corretta progettazione e gestione degli impianti di bioraffineria è quindi condizione necessaria per garantire la tutela dell'ambiente e dei lavoratori ed il modo con cui l'industria risponderà all'esigenza di informazioni sulla sicurezza influenzerà il grado di accettabilità di questi nuovi processi industriali. Come noto sulla tematica della sicurezza c'è sempre una fortissima attenzione da parte di cittadini e lavoratori: se è giusto voler sapere tutto sui rischi, a maggior ragione sarebbe giusto essere sempre informati in modo analogo sulla "sicurezza", cioè su quanto viene fatto dalle aziende e dagli enti di controllo per prevenire e limitare i potenziali pericoli.

In un contesto socio-economico sempre più orientato a un concetto di sostenibilità, l'impulso che viene dato all'industria dai processi *biotech* deve costituire un elemento di innovazione non solo nella catena industriale, nel panorama della protezione dell'ambiente, ma anche nella gestione della sicurezza delle attività previste. Il Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insediamenti Antropici (DIPIA) dell'INAIL Settore Ricerca svolge da anni attività di ricerca sulla tematica dello sviluppo delle "Biotecnologie industriali e gli aspetti di sicurezza connessi" come documentato dalle Linee di ricerca dei Piani di Attività dell'Istituto, nell'ottica di rafforzare il principio che lo studio della sicurezza deve essere inserito a monte dello sviluppo industriale, fin dal progetto di ricerca stesso. Spesso, infatti, una delle principali criticità consiste nell'uso di criteri di valutazione della sicurezza "a valle del processo" e tale approccio non risulta appropriato. È indubbio che le biotecnologie presentano tutti i vantaggi propri di un "processo biologico" caratterizzato da: 1) ridotti consumi di energia ed acqua; 2) minore emissione di CO₂; 3) limitata produzione di scarti; 4) elevate caratteristiche di sicurezza dal momento che i processi avvengono a temperatura e pressione ambiente e non richiedendo l'utilizzo di prodotti chimici pericolosi. Pur tuttavia, tenuto conto del gran numero di diversi sistemi impiantistici a disposizione, è necessario stabilire i livelli di sicurezza per ciascun sistema, con un'analisi dei pericoli e dei punti critici con un processo di validazione, controllo e monitoraggio per la proposta di soluzioni di controllo dei rischi "su misura" in base alle dimensioni, tipologie delle aziende coinvolte e delle relative capacità organizzative/gestionali.

Nello specifico dei sistemi di gestione della sicurezza, INAIL da circa un decennio svolge un'attività di promozione, improntata sulla divulgazione di strumenti specifici e soprattutto, sull'utilizzo dell'incentivazione economica consistente in un sistema di importanti sconti tariffari.

Non vi è dubbio alcuno che le industrie hanno compiuto sforzi sostanziali in termini di metodologia e di organizzazione per lo sviluppo di efficienti sistemi di gestione del rischio e tali sforzi hanno permesso di ottenere considerevoli risultati e, quindi, di migliorare il livello globale della sicurezza. Rendere visibili tutte le attività svolte per la sicurezza è essenziale soprattutto dove esiste un problema di percezione negativa dell'attività industriale da parte della comunità locale. Spesso per i cittadini è più facile recepire la comunicazione dei rischi che non quella della sicurezza. Adottare una politica di trasparenza da parte delle aziende, favorire la collaborazione con gli enti di ricerca e quelli preposti al controllo permette di aumentare la propria credibilità da parte dell'opinione pubblica.

In questa ottica è stato proposto dal DIPIA - INAIL Settore Ricerca, il Progetto "Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile: applicazioni e sicurezza", finanziato dal Ministero della Salute nell'ambito del Programma del "Centro nazionale per la prevenzione e il controllo delle malattie" (CCM) del 2011. Il CCM nasce con Legge 26 maggio 2004, n. 138, come organismo di coordinamento tra le Istituzioni sanitarie centrali e quelle regionali per le attività di sorveglianza e prevenzione oltre che di risposta alle emergenze. Il CCM, dalla sua nascita ad oggi, si è sempre più orientato su un approccio globale ai temi della prevenzione delle malattie e della tutela della salute, nell'ambito della strategia che vede la "prevenzione come cultura", così come stabilisce il Piano Nazionale Prevenzione.

Al Progetto hanno partecipato 4 Unità operative con diversi obiettivi indicati nel prospetto seguente:

Responsabile Progetto: Biancamaria Pietrangeli		
UNITÀ OPERATIVE COINVOLTE		
Unità Operativa 1		Obiettivi
INAIL Settore Ricerca, DIPIA	<ul style="list-style-type: none"> • B. Pietrangeli • R. Lauri • P. A. Bragatto • D. S. Accardi • M. Castriotta 	Esame operazioni previste nei processi, analisi criticità; Sopralluoghi impianti, monitoraggi ambientali, stesura <i>check-list</i> , attività di coordinamento, preparazione materiale formativo, organizzazione workshop dedicato.
Unità Operativa 2		Obiettivi
ERAPRA Confagricoltura Piemonte	<ul style="list-style-type: none"> • M. Boggetti 	Contributo sulle potenzialità del Biogas in Italia; Informazioni sulle realtà presenti sul territorio nazionale.
Unità Operativa 3		Obiettivi
Dipartimento di Sanità Pubblica e Microbiologia, Università degli Studi di Torino	<ul style="list-style-type: none"> • G. Gilli • D. Traversi 	Sopralluoghi impianti, monitoraggi ed analisi delle polveri organiche, preparazione materiale formativo.
Unità Operativa 4		Obiettivi
Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente, Università "Sapienza" di Roma.	<ul style="list-style-type: none"> • L. Di Palma 	Valutazione di tecnologie disponibili e di fattibilità su scala nazionale, esame operazioni previste nei processi.

I risultati del progetto sono stati raggiunti grazie alla fattiva collaborazione di grandi aziende attive nel panorama nazionale e leader in Europa nel settore delle bioraffinerie, quali Novamont, Mossi & Ghisolfi, Maccarese SpA, l'impresa Marcopolo Environmental Group di Vignolo (Cuneo) e la Società Cooperativa Agricola Speranza di Candiolo (Torino) che hanno permesso incontri, sopralluoghi, monitoraggi ambientali, ed ampia disponibilità al fine di analizzare ed approfondire gli aspetti di sicurezza degli impianti e le condizioni di criticità a cui contrapporre concrete soluzioni tecniche, organizzative e procedurali in applicazione delle normative vigenti.

BIBLIOGRAFIA

- OECD 2001. The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability.
URL: www.oecd.org/sti/biotechnology.
- Assobiotec 2012. Rapporto sulle biotecnologie in Italia. Report, 2012.
- United Nation (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.
- Unione europea 2010. Comunicazione della Commissione. Europa 2020. Una strategia per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva. Bruxelles, 3 marzo 2010.
- United Nations Environment Programme 2008. Green jobs. Towards decent work in a sustainable, low-carbon world. Ed. 2008, pp 1-25.

LE BIORAFFINERIE

Le Bioraffinerie: un'opportunità di sviluppo per l'Italia

Biancamaria Pietrangeli¹, Daniele Salvatore Accardi^{1/2},

¹ INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insedimenti Antropici, Roma

² Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente, Roma

Introduzione

Il mondo si sta confrontando con importanti sfide, quali la crescita della popolazione e, quindi, la crescente domanda di cibo, di energia ed acqua, ed il cambiamento climatico che richiede una drastica riduzione dei gas serra. Su lungo periodo solo l'uso di nuove tecnologie permetterà di colmare il *gap* tra crescita economica e sostenibilità ambientale: in questa ottica le tecnologie che permettono l'ottimizzazione dello sfruttamento delle risorse all'interno di una definita filiera produttiva, concorrono al miglioramento sia del valore aggiunto complessivo che della qualità ambientale del processo industriale.

Le scelte di produzione e consumo energetico che in passato sono state guidate essenzialmente da parametri qualitativi valutabili in termini di trasportabilità, disponibilità e trasformabilità, hanno indotto a privilegiare l'uso di combustibili fossili quali fonti energetiche primarie. Ciò che invece si è a lungo trascurato è l'impatto ambientale di tali processi, elemento difficile da internalizzare nei costi di produzione, dovendo quantificare danni di natura immateriale come l'effetto serra, l'inquinamento, l'esaurimento delle risorse, le tensioni politiche e l'instabilità economica. Il paradigma dominante delle teorie di sviluppo ha a lungo concepito l'ambiente come "esternalità", assunto al pari di ogni altro fattore di produzione, e come tale trasformabile da parte di un sistema produttivo teso verso una crescita virtualmente illimitata. Tuttavia, già a partire dagli anni Settanta, il mito della crescita illimitata, si è scontrato con i limiti oggettivi dell'ambiente in termini di scarsità delle risorse e di capacità di ricarica, limiti che si sono tradotti in costi crescenti per il sistema economico. La disponibilità a costi sempre più bassi, grazie ai minori costi di estrazione e distribuzione, dei combustibili fossili ha di fatto distolto l'attenzione dalla necessità di ripensare ad un modello energetico sostenibile teso a minimizzare l'uso di fonti non rinnovabili privilegiando, piuttosto, l'uso di quelle rinnovabili e riducendo nel contempo gli sprechi.

Molto spesso le critiche mosse all'uso delle fonti rinnovabili sono in merito alla convenienza economica. In realtà si evidenzia come il costo delle energie rinnovabili risulterebbe già concorrenziale se si considerassero le esternalità negative da incorporare nel costo di produzione alle fonti fossili. È evidente, dunque, che la sfida tra fonti rinnovabili e non, in termini di competitività, si gioca sul piano tecnologico, dovendo puntare a soluzioni innovative che permettano di superare le criticità connesse all'uso di fonti energetiche rinnovabili, sia sul piano tecnico che economico. È altrettanto importante sottolineare che l'affermazione di un modello energetico alternativo deve passare soprattutto attraverso un radicale cambiamento culturale, giacché la scarsa informazione da parte dei consumatori non opportunamente sensibilizzati e la resistenza all'innovazione da parte di un certo mondo imprenditoriale, rende lento e difficoltoso questo passaggio.

1. Fonti di energia rinnovabili e contesto normativo di riferimento

Da anni si susseguono accordi e protocolli atti a ridurre l'emissione di elementi inquinanti ed aumentare l'incidenza delle fonti di energia rinnovabile, attraverso un coordinamento dei Paesi industrializzati: dal protocollo di Kyoto del 1997, con il quale venivano introdotti obiettivi quantitativi di riduzione di emissioni inquinanti da parte dei Paesi industrializzati, ai numerosi interventi dell'Unione Europea che vede nella bioeconomia la strada per lo sviluppo sostenibile [European Commission, 2012].

Gli obiettivi che quest'ultima ha fissato ai Paesi comunitari sono noti: ridurre, entro l'anno 2020, le emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990, avere un consumo energetico inferiore del 20% rispetto alle attuali previsioni e soprattutto incrementare l'utilizzo di energie rinnovabili, portandolo al 20% dei consumi energetici totali [Direttiva 2009/28/CE; D.Lgs. 28/2011]

In Italia, la recente Strategia Energetica Nazionale (SEN) approvata con il Decreto 8 marzo 2013 [Ministero dello sviluppo economico, 2013] punta al superamento degli obiettivi fissati dal Piano di Azione Nazionale (PAN) [Ministero dello Sviluppo Economico, 2010]. In particolare entro il 2020, attraverso le fonti di energia rinnovabili, si dovrebbe arrivare a soddisfare il 20% dei consumi finali lordi rispetto al precedente target che indicava il 17%.

2. Le biomasse e le bioraffinerie

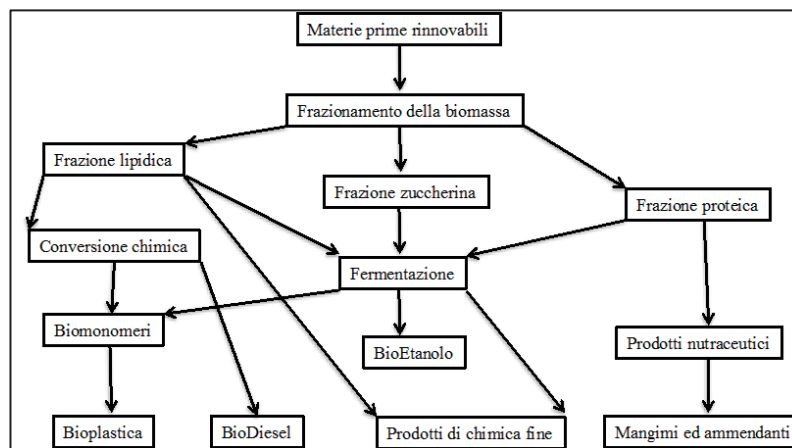
Tra le fonti di energia rinnovabili, la biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare: mediante il processo di fotosintesi, infatti, i vegetali sono in grado di convertire l'energia radiante in energia chimica e stoccarla sotto forma di molecole complesse ad elevato contenuto energetico. Per tale motivo la biomassa è considerata una risorsa rinnovabile e inesauribile se opportunamente utilizzata, ovvero se il ritmo di impiego della stessa non superi la capacità di rigenerazione delle formazioni vegetali stesse. Essa è considerata anche una fonte energetica neutrale ai fini dell'incremento delle emissioni di gas ad effetto serra. Infatti, durante il processo di crescita i vegetali, mediante la fotosintesi, contribuiscono alla sottrazione dell'anidride carbonica atmosferica ed alla fissazione del carbonio nei tessuti. A seguito della combustione della biomassa si generano emissioni di anidride carbonica, tuttavia la quantità emessa è pari a quella assorbita dalla pianta e rientra pertanto nel ciclo naturale.

La normativa nazionale di riferimento in materia, il D.Lgs. 387/2003 [D.Lgs. 387/2003], all'art. 2, comma 1, lettera a) definisce la biomassa come: *...“la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, compresa la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde urbano nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”...*

Una piattaforma tecnologica grazie alla quale le biomasse, intese anche come prodotti di scarto, vengono trasformate in combustibili, energia e prodotti chimici di base, di chimica fine, biopolimeri e bioplastiche, attraverso tecnologie e processi che producono minimi scarti ed hanno limitate ricadute sull'ambiente, è definita “bioraffineria”. Le biomasse infatti, come il petrolio, hanno una composizione complessa che richiede una idonea separazione in più gruppi di sostanze; il successivo trattamento e trasformazione di queste ultime, porta ad una varietà completa di prodotti. La petrolchimica si basa sul principio di generare prodotti chimici semplici e ben definiti, permettendo nelle raffinerie propriamente dette, la successiva costruzione di

famiglie di prodotti e di linee di produzione volte all'ottenimento di prodotti di base, di intermedi o di derivati a sempre più alto grado di complessità. Questo stesso criterio vale anche per le bioraffinerie: la trasformazione delle biomasse di origine agricola, industriale o naturale, come schematizzato in Figura 1, permette di ottenere sostanze utilizzabili come biocombustibili e prodotti chimici intermedi, che a loro volta possono essere trasformati in ulteriori prodotti, al pari di quanto succede con le fonti fossili.

Figura 1 - Rappresentazione schematica dei processi e dei prodotti da bioraffinerie



I materiali costituenti le biomasse possono avere provenienze diverse [STOA, 2013]:

- colture agricole normalmente destinate a produrre cibo o fibre;
- colture specifiche, specialmente se dedicate a sfruttare aree marginali;
- prodotti secondari o rifiuti dell'industria alimentare e dell'allevamento;
- biomasse di origine forestale o assimilabili (potature, manutenzione aree verdi);
- frazione organica da raccolta differenziata dei rifiuti urbani o scarti alimentari;
- biomasse ottenute mediante valorizzazioni di terreni marginali o non agricoli o in mare (alghe).

Varie sono anche le strategie per le produzioni di composti chimici da biomasse:

- impiego diretto delle biomasse (legno, paglia, sughero) o parti delle stesse (fibre, gomma naturale, amido, cellulosa, zuccheri, oli);
- trasformazione della biomassa in nuovi composti mediante processi fermentativi e processi chimici.

La destinazione delle biomasse alla produzione di prodotti chimici, in funzione delle potenzialità di valore aggiunto, può essere considerata prioritaria rispetto all'uso energetico diretto. Se l'utilizzo di biomasse per usi energetici può aver costituito un passaggio di rilievo nei processi di sostenibilità e di affrancamento dalle fonti non rinnovabili, il passo ulteriore deve essere quello di estrarre dalle biomasse tutto il valore aggiunto che le tecnologie attuali e le loro prospettive di sviluppo consentono [Star-Colibri, 2011].

In prima istanza potremmo raggruppare i bioprodotto in due categorie [Erickson et al., 2012]:

- prodotti che vanno a sostituire direttamente molecole esistenti di origine petrolchimica in processi produttivi già affermati (ad es. l'acido succinico per la produzione di poliestere o il bioetanolo per la produzione di polietilene);

- prodotti nuovi, che richiedono uno sforzo ulteriore di integrazione in processi produttivi esistenti o originano a loro volta nuove catene di valore industriale (ad es. i polimeri polilattici o i poliidrossialcanoati).

In Italia il Ministero dell'Ambiente e quello dello Sviluppo economico hanno proposto il nuovo regolamento per la semplificazione delle procedure di autorizzazione degli impianti di produzione di biocarburanti, le cosiddette "bioraffinerie" [Decreto 9 ottobre 2013, n. 139]. Il Decreto disciplina gli impianti di seconda e terza generazione per la produzione di biocarburanti, prodotti biochimici ad alto valore aggiunto e bioenergia, snellisce gli iter burocratici per queste centrali, col duplice scopo di promuovere le "bio-produzioni" in Italia e facilitare gli investimenti nel settore, consentendo di estendere ad altri siti le esperienze costruttive e di esercizio acquisite in impianti già autorizzati. Tra le nuove misure che l'Italia dovrà adottare c'è anche l'obbligo per il gestore dell'impianto di garantire la presenza costante di un sistema di tracciabilità delle materie prime e dei sottoprodotti. Inoltre entro sei mesi dalla data di entrata in vigore del Decreto (17 dicembre 2013), il Ministro dell'Ambiente dovrà adottare apposite linee guida recanti i limiti di emissione degli impianti di bioraffinazione, quale parametro di valutazione ai fini del controllo dei livelli delle emissioni.

Nel testo del decreto si definiscono le bioraffinerie di prima, seconda e terza generazione:

- "*bioraffinerie di prima generazione*: sistemi con capacità di processo fissa e privi di flessibilità con una filiera di produzione a partire da biomassa e prodotti di origine agricola o forestale e anche della filiera agricola convenzionale";
- "*bioraffinerie di seconda generazione*: sistemi che possono produrre diversi materiali per una pluralità di possibili utilizzazioni a partire da biomassa e prodotti di origine agricola o forestale, scarti dell'industria agroalimentare e alimentare (ad es. grassi animali), oli esausti";
- "*bioraffinerie di terza generazione*: sistemi che possono produrre diversi materiali per una pluralità di possibili utilizzazioni a partire da biomasse ottenute mediante valorizzazioni di terreni marginali o non agricoli o in mare".

È proprio verso le bioraffinerie di terza generazione che devono essere indirizzati gli sforzi della ricerca tecnologica industriale in un'ottica di integrazione nel territorio. La duplice esigenza di produrre bio-prodotti a costi di produzione sostenibili e di ottimizzare l'uso del territorio, in modo da non dar vita ad una pericolosa competizione con le produzioni alimentari, promuoverebbe lo sviluppo di filiere produttive che impiegano materia prima costituita da substrati generalmente non utilizzabili a fini alimentari (materiali lignocellulosici, oli e grassi non commestibili, ecc.) o prodotti in grado di crescere su terreni marginali o comunque in aree diverse da quelle tradizionalmente destinate alle produzioni agricole convenzionali (ad es. colture microalgali). Lo studio di diverse materie prime vegetali e di scarti locali in logica di filiera integrata e l'identificazione di colture autoctone, che possano essere coltivate in terreni marginali e non irrigui, permette infatti di valorizzare le specificità dei territori ed aumentare la fertilità dei terreni. Questa tipologia di colture presenta interessanti opportunità per l'innovazione e l'ulteriore sviluppo delle bioraffinerie, è sinergica con le colture alimentari e può essere spendibile anche in un contesto di *bioremediation*.

3. Bonifiche, riqualificazione aree industriali e bioraffinerie

Una delle più interessanti prospettive di sviluppo delle bioraffinerie vede proprio la produzione di *chemicals* da colture utilizzate per la fitodepurazione di terreni da bonificare o di acque reflue urbane ed industriali contenenti sostanze pericolose. Spesso gli interventi di bonifica tradizionali hanno dei costi così rilevanti da non essere sostenibili. La coltivazione su tali siti, di colture per fini energetici offrirebbe l'opportunità di un utilizzo del terreno contaminato per la produzione di biomassa da avviare a processi di bioraffinazione [Chaney et al., 1997; Zalesny et al., 2009; Meers et al., 2005]. In Italia una delle piante modello capace di avere capacità di bioaccumulo di inquinanti ed impiegabile nella produzione di prodotti ad alto valore aggiunto è *Arundo donax*. Il suo utilizzo, anche adottando semplici configurazioni impiantistiche, può portare al raggiungimento di buone rese in bioetanolo [Accardi et al., 2014]. Più in generale, invece, nel mondo abbiamo ampia è la scelta di varietà di coltivazioni che possono essere utilizzate in processi di *phytoremediation* e conseguentemente per processi di bioraffinazione, come, ad esempio, *Pennisetum purpureum* [Ishii et al., 2013], *Chlorella vulgaris* [Piotrowska-Niczyporuk et al., 2013], *Panicum virgatum*, *Hordeum vulgare* e *Phalaris arundinacea* [Ebbs et al., 1998], sfruttando quindi quelle risorse caratteristiche di ogni area geografica del mondo.

La riqualificazione e il riutilizzo dei siti dismessi viene promossa dalle misure strutturali dell'Unione Europea al fine di proteggere la salute umana e l'ambiente [Corte dei Conti Europea, 2012]. In Italia il decollo definitivo del settore delle bonifiche dei siti contaminati potrebbe trasformare concretamente il sistema produttivo nazionale facendolo entrare a pieno titolo nella *green economy*. Anche se di bonifiche vere e proprie ce ne sono proprio poche rispetto al numero totale dei siti inquinati, cominciano a concretizzarsi alcuni processi di riconversione industriale: ne è un esempio la bioraffineria per la produzione di biocarburanti di seconda generazione di Crescentino (Vercelli) del Gruppo Mossi & Ghisolfi e la bioraffineria di Porto Torres, nata dalla joint-venture tra Eni/Versalis e Novamont.

Innovazione nei processi e nei prodotti, ricerca, integrazione con le filiere locali e con i territori, bonifica e riconversione dei siti produttivi dismessi per non consumare ulteriore suolo, sono le scelte obbligate per nobilitare e preservare il manifatturiero *made in Italy* dalle minacce di una globalizzazione dei mercati. Si devono accelerare il processo di risanamento ambientale non solo semplificando la normativa vigente, nel rispetto del principio del "chi inquina paghi", ma anche risolvendo l'annoso problema di reperimento delle risorse economiche per i siti cosiddetti orfani. È fondamentale sostenere i progetti di ricerca e sviluppo di oggi per quelle innovazioni tecnologiche che daranno vita ai manufatti di domani: un sostegno che dovrà essere economico in un quadro di riferimento stabile.

4. Tecnologie di conversione e produzioni di bio-prodotti

Tra le tecnologie di conversione delle biomasse nei processi di bioraffinazione si possono distinguere quelle termochimiche (combustione, gassificazione e pirolisi), quelle chimiche incentrate sull'uso di catalizzatori e quelle biochimiche (fermentazione e trattamenti enzimatici).

La fermentazione degli zuccheri contenuti nelle biomasse permette di ottenere diversi prodotti attraverso l'impiego di un ampio spettro di processi biologici e svariati ceppi microbici o enzimi. In Figura 2 sono riportati alcuni prodotti ad alto valore aggiunto, ottenuti tramite fermentazione di zuccheri a 3, 4, 5 e 6 atomi di carbonio

[Jang et al., 2012]. Tra i principali bio-prodotti derivati dalla fermentazione del glucosio si annoverano: etanolo, butanolo e svariati acidi (acetico, lattico, succinico, propionico, acido itaconico, acido glutammico, ecc.). Questi acidi costituiscono le piattaforme per la sintesi di polimeri biodegradabili in grado sia di sostituire materiali plastici convenzionali sia di fornire nuovi materiali per il settore salute [Corma et al., 2007].

Sono altresì le materie prime per la sintesi di:

- solventi per la produzione di resine di poliesteri insaturi, di medicinali, cosmetici, prodotti alimentari;
- polimeri acrilati che trovano impiego nella produzione di pellicole, fibre tessili, adesivi, carta, pellame, detergenti, in ingegneria plastica, e intermedi nell'industria agrochimica e farmaceutica;
- precursori di dolcificanti alimentari, surfattanti biodegradabili, surrogati per impieghi in alimenti, prodotti farmaceutici e cosmetici, detergenti e prodotti alimentari.
- resine fenoliche, poliesteri e policarbonati.

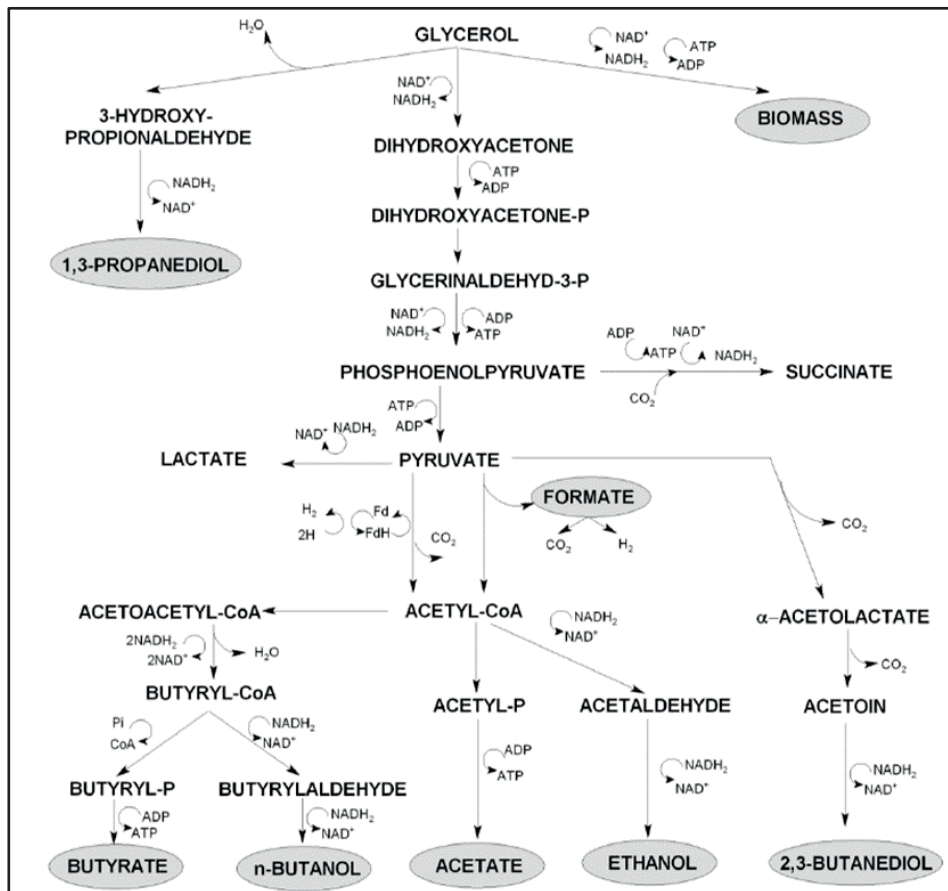
Figura 2 - Prodotti chimici ad alto valore aggiunto ottenuti dalla fermentazione di zuccheri a 3, 4, 5, 6 atomi di carbonio che possono utilizzati ulteriormente come precursori di altri prodotti chimici di rilevanza economica



Un ruolo significativo è ricoperto anche dai grassi e dagli oli derivati da biomasse. Gli usi industriali non alimentari dei lipidi vegetali includono la produzione di una miriade di prodotti tra i quali: biodiesel, lubrificanti, surfattanti, medicinali, cosmetici, saponi, detergenti, adesivi e plastiche [Dyer et al., 2008]. Attraversi processi di trans-esterificazione è possibile ottenere biodiesel utilizzabile, puro o in miscela con il gasolio, per l'alimentazione di motori a combustione interna a ciclo diesel. Tale conversione richiede l'aggiunta di un acido o un catalizzatore alcalino (soda caustica tipicamente) che in presenza di metanolo permette la produzione di esteri metilici degli acidi grassi. Il metanolo può essere sostituito con l'etanolo per

produrre acidi grassi etil-esteri [Shahid et al., 2011; Malca et al., 2011]. La produzione industriale del biodiesel viene effettuata a partire da oli vegetali estratti da semi o frutti oleosi di colture dedicate (colza, soia, girasole, palma da olio ecc.), da oli alimentari esausti rigenerati o, in misura minore, da grassi animali di scarto dei processi di macellazione e lavorazione delle carni. Dal processo di trans-esterificazione si ottiene come co-prodotto il 1,2,3-propantriolo, più comunemente conosciuto con il nome commerciale di glicerolo, che a sua volta può essere usato come substrato di crescita di consorzi microbici specifici per la produzione di una vasta gamma di diverse sostanze di chimica fine [Mattam et al., 2013; Leja et al., 2011]. Il glicerolo, attraverso un adeguato trattamento di purificazione, può essere impiegato nell'industria chimica ed utilizzato direttamente come materia prima in diversi processi (produzione di saponi, cosmetici, prodotti farmaceutici, esplosivi, ecc.) ma, in prospettiva, considerati gli enormi quantitativi attualmente disponibili sul mercato, è di maggiore interesse la sua conversione in prodotti chimici e/o energetici a più alto valore aggiunto. Infatti, rispetto agli zuccheri normalmente impiegati come substrato di processi fermentativi, il glicerolo presenta il vantaggio di essere in uno stato più "ridotto", cioè di contenere in proporzione meno ossigeno, prestandosi meglio alla trasformazione in prodotti scarsamente ossigenati, quali ad esempio succinato, etanolo, butanolo e 2,3 butandiolo, oltre che alla produzione di idrogeno, secondo differenti *pathway* metabolici (Figura 3).

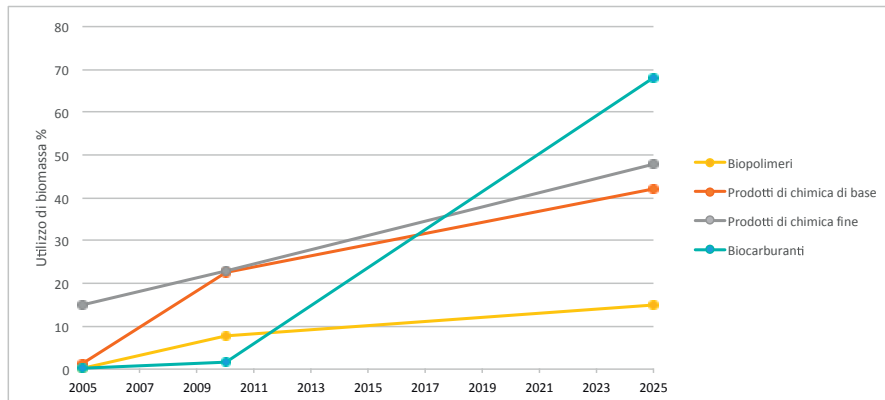
Figura 3 - Pathway metabolici della fermentazione del glicerolo con evidenziati i prodotti ottenuti



Fonte: Leja et al., 2011

In prospettiva l'industria utilizzerà una percentuale crescente di materie prime rinnovabili per la produzione di bio-prodotti: secondo stime di USDA/OCSE [USDA, 2008] la percentuale mondiale dovrebbe raggiungere il 22-28% nel 2025 con un continuo trend di crescita (Grafico 1).

Grafico 1 - Trend di sviluppo dei prodotti da bioraffineria



Fonte: Star-COLIBRI, 2011

Nelle Tabelle 1 e 2 sono riportati rispettivamente i composti chimici prodotti e quelli in via di produzione in processi di bioraffinazione.

Tabella 1 - Composti chimici prodotti nelle bioraffinerie

Prodotti delle bioraffinerie	Bioraffinerie in UE	Bioraffinerie nel mondo
BioEtanolo	Diversi impianti	Diversi impianti
Etilene	Waker AG (0.5 ktpa - 2010)	Braskem (200 ktpa - 2010); Dow Chemicals/Mitsui (350 ktpa - 2014); Genencor/Danisco (780 ktpa - 2012); Solvay/Indupa (120 ktpa - 2007, 2012)
Acido acetico	Galactic (1.6 ktpa - 2009)	Hi Sun (5.5 ktpa - 2008); Natureworks (155 ktpa - 2015); Natureworks (155 ktpa - 2005); Purac (100 ktpa - 2007); Tong-Jie-Lang (0.1 ktpa - 2007)
Acido lattico	Purac (5 ktpa- 2008)	Purac (75 ktpa - 2012)
Lactide	Solvay (10 ktpa - 2010)	Dow Chemicals (1 ktpa - 2011); Solvay/Vinythai (100 ktpa - 2014); Solvay/ Vinythai (100 ktpa - 2012); Yang Nong Jiang Su (150 ktpa - 2011); Dow Shanghai (150 ktpa - n.d.); Samsung Korea (30 ktpa); Fujjian Haobang (5 ktpa)
Epicloridrina	Solvay (10 ktpa - 2010)	Dow Chemicals (1 ktpa - 2011); Solvay/Vinythai (100 ktpa - 2014); Solvay/ Vinythai (100 ktpa - 2012); Yang Nong Jiang Su (150 ktpa - 2011); Dow Shanghai (150 ktpa - n.d.); Samsung Korea (30 ktpa); Fujjian Haobang (5 ktpa)
1,3 Propandiolo	Metabolic Explorer (8 ktpa, 2010)	Tate and Lyle/Dupont (60 ktpa - 2010); Metabolic Explorer (50 ktpa - 2013); Bio-Xcell/ Metabolic Explorer (n.d.) Huamei Biomaterials
1,2-Propandiolo	-	ADM (100 ktpa - 2010); Cargill/ Ashland (65 ktpa - 2008); Dow Chemicals (1 ktpa n.d.); Senergy (30 ktpa - 2008)
Butanolo	-	Shi Jinyan (50 ktpa - 2014); Laihe Rockley (150 ktpa); Cathay Industrial Biotech (100 ktpa); Abengoa, Green Biologics Eastman, Cobalt Technologies, Celtic Renewables, Working Bugs
Isobutanolo	-	Gevo (50 ktpa - 2012); Butamax
Acido succinico	Bioamber (DNP-ARD) (3 ktpa - 2009); CSM/BASF (15 kpa - 2011); Roquette/DSM (10 ktpa - 2012)	Bioamber (17 kta - 2013); Bioamber (34 ktpa - 2014); Lanxess (20 ktpa - 2012); Myriant (15 ktpa - 2013); Myriant / Davy Process Tech (15 ktpa - 2013)
Furfurale	TFC Belgium	Numerosi produttori
Acido itaconico	Numerosi produttori	Numerosi produttori
Xilitolo e Arabifolo	Numerosi produttori	Numerosi produttori
Isoprene	Genencor/Goodyear (0.01 ktpa - 2014)	Votorantim / Amyris (680 ktpa - 2012)
Polioli	-	Bayer (35 ktpa - 2011); Novomer (CO ₂)
Polidrossialcanoati	Metabolix/Antibioticos (10 ktpa)	Meredian (15 ktpa - 300 ktpa); Tianjin GreenBio Materials (10ktpa); Newlight/Biomer (GHG to PHA)

Fonte: elaborazione dati STOA 2013, de Jong et al. 2012 e GreenChems Blog

Tabella 2 - Composti chimici in via di produzione nelle bioraffinerie

Prodotti delle bioraffinerie	Bioraffinerie in UE	Bioraffinerie nel mondo
Acido acrilico	-	OPX Biotechnologies/DOW (0.02 ktpa - 2015); Cargill/Novozymes (0.01 ktpa n.d.); Genomatica, MetaboliX, Myriant, Arkema, BASF
Acido propionico e acido 3 idrossipropionico (3HP)	Pertorp (1 ktpa - 2012)	BASF/Cargill/Novozymes
Propilene	-	Braskem (30-50 ktpa - 2013); Global Bioenergies, Dow Chemicals, Coskata/Total/IFP (syngas)
1,4-Butandiolo	Bioamber (23 ktpa - 2014) Grupo M&G Genomatica (20 ktpa - 2013); Novamont (20 ktpa - 2013)	Genomatica (0.02 ktpa - 2010)
Bio-Isobutene (2-metilpropene)	-	Gevo/Lanxess, Global Bioenergies
Metil metacrilato	Evonik Industris 0.01 ktpa	MRC and Lucite (2016), Evonik and Arkema (2018), Ascentix BioTechnologies
Acid levulinico	-	Seget
Acido adipico	-	Verdezyne 0.04 ktpa - 2013; Rennovia, DSM, Amyris, Genomatica, BioAmber, Aemetis
2,5-Furan acido dicarbossilico	-	Avantium
Acido glucarico	-	.Rivertop
Polidrossibutirrato (PHB)	Bio-on (10 ktpa - 2013); Biomer (1 ktpa)	Tianjin GreenBio Material Co (10 ktpa - 2009); Yikeman, Shandong (3 ktpa n.d.); Zhejiang Tian An (2 ktpa n.d.); PHB Industrial Brasil SA (0.1 ktpa n.d.)

Fonte: elaborazione dati STOA 2013, de Jong et al. 2012 e GreenChems Blog

5. Bioenergia da biomasse

A livello nazionale, le scelte di politica energetica sono orientate al raggiungimento di 4 obiettivi principali, sia per il 2020 che per il 2050:

- competitività: ridurre significativamente il gap di costo dell'energia per i consumatori e le imprese, con un graduale allineamento ai prezzi europei;
- ambiente: superare gli obiettivi ambientali definiti dal "Pacchetto 20-20-20" e assumere un ruolo guida nella "Roadmap 2050" [European Commission, 2011];
- sicurezza: rafforzare la sicurezza di approvvigionamento, soprattutto nel settore gas, e ridurre la dipendenza dall'estero;
- crescita: favorire la crescita economica sostenibile attraverso lo sviluppo del settore energetico.

Arrivare a soddisfare il 20% dei consumi finali lordi entro il 2020 attraverso le fonti di energia, in termini energetici significa valori pari a circa 25 Mtep di energia finale l'anno ripartiti tra i settori elettrico, termico e i trasporti. Nello specifico del settore trasporti è prevista una spinta verso i biocarburanti di seconda generazione che danno maggiori garanzie di sostenibilità ambientale ed il supporto allo sviluppo della produzione nazionale di biometano per permettere il graduale raggiungimento degli obiettivi europei. Tali obiettivi sono stati recentemente ridiscussi e la Commissione europea ha raggiunto un accordo circa i target vincolanti al 2030, raccomandando agli Stati membri di portare al 27% la parte di rinnovabili nel mix energetico e di ridurre del 40% le emissioni di gas ad effetto serra.

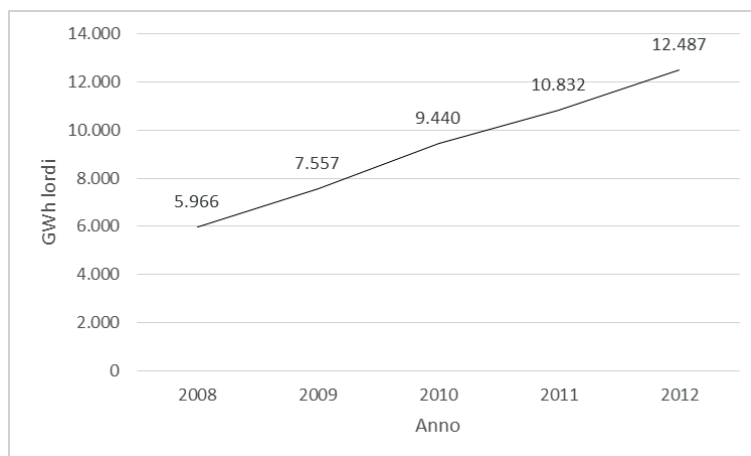
La produzione di energia dalle biomasse, diretta o sotto forma di combustibili solidi, liquidi e gassosi, si realizza per mezzo di processi di diversa natura, dalla combustione diretta alla trasformazione in combustibili prodotti per via termochimica o biologica. Analizzando il Rapporto statistico del GSE, aggiornato al 2012, in Italia risultano complessivamente presenti 2.200 impianti di bioenergia alimentati con biomasse, biogas e bioliquidi. Rispetto al 2011 il numero è aumentato dell'80%, mentre la potenza installata è cresciuta del 35%, passando da 2.825 MW a 3.801 MW [GSE, 2012].

Tali dati includono anche gli impianti che utilizzano rifiuti urbani, gli impianti di captazione dei gas da discarica e quelli per la produzione di biogas da fanghi di depurazione. Il Decreto 28/2011, infatti, nella definizione di biomassa include anche la frazione biodegradabile dei rifiuti e pertanto gli impianti che fanno ricorso a tale fonte sono conteggiati nell'ambito delle biomasse [GSE, 2012].

Nel complesso questa spinta verso le fonti rinnovabili ha determinato in Italia dal 2008 un deciso incremento della produzione di bioenergia, come si evince dalla Grafico 2.

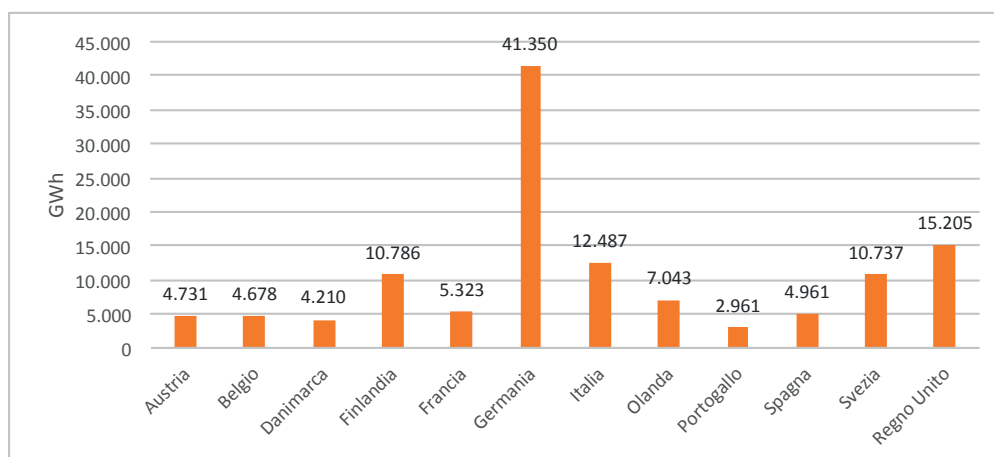
Tale produzione ci permette di collocare l'Italia al terzo posto nella graduatoria dei Paesi dell'Europa dei 15 per produzione di bioenergie, dopo Germania e Regno Unito (Grafico 3).

Grafico 2 - Produzione di bioenergia da biomasse in Italia



Fonte: elaborazione dati GSE, 2012

Grafico 3 - La produzione di bioenergie da biomasse nei Paesi dell'Unione europea



Fonte: elaborazione dati GSE, 2012

Le dinamiche di sviluppo della bioenergia registrate tra il 2011 e il 2012 sono riferibili senza dubbio al passaggio dal vecchio al nuovo sistema di incentivi, entrato in vigore a partire dal 2013. Questo ha determinato la “corsa” alla realizzazione di progetti per accedere alle tariffe più convenienti del meccanismo in scadenza [D.Lgs. 28/2011].

In tale contesto di riferimento il GSE ha pubblicato le nuove Procedure applicative ai sensi dell’art. 24, comma 1, del D.M. 6 luglio 2012 [D.M. 6 luglio 2012] per calcolare la produzione netta di energia degli impianti oltre 1 MW che beneficiano di incentivi [GSE, 2014].

Attualmente le alternative biotecnologiche più valide per l'utilizzazione energetica delle biomasse sono:

- la produzione di biogas mediante digestione anaerobica di reflui zootecnici, civili o agroindustriali, colture dedicate e frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU), e la successiva utilizzazione del biogas prodotto per la generazione di calore e/o elettricità o l'impiego come biocarburante;
- la trasformazione in combustibili liquidi, utilizzati per la produzione di energia elettrica (bioliquidi) o nel settore dei trasporti (biocarburanti) di particolari categorie di biomasse coltivate come alcune oleaginose, cereali e colture zuccherine o da colture di microalghe.

Il biodiesel e il bioetanolo di prima generazione sono in grado di soddisfare solo una ridotta frazione della domanda energetica globale, perché con l'aumentare della richiesta di biocombustibili si rischia una pericolosa competizione con il settore alimentare. Questa preoccupazione è fortemente sentita a livello europeo, al punto che, in sede di revisione e aggiornamento della Direttiva n. 28 del 2009 [Direttiva 2009/28/CE], è attualmente in discussione la proposta di limitare al 5% il contributo dei biocarburanti ottenuti a partire da materie prime a possibile destinazione alimentare, coprendo il restante 5% con elettricità da fonti rinnovabili e biocarburanti cosiddetti di seconda generazione.

Molti dei prodotti derivati da biomasse posseggono anche caratteristiche che ne qualificano la sostenibilità nel fine vita (compostabilità, biodegradabilità, reimpiego) che, specialmente per i biopolimeri, ne dovrebbero consentire l'affermazione sul mercato. In altri casi si tratta di prodotti con solo una componente originata da biomasse (ad es. compositi) che vanno ad integrarsi con i prodotti convenzionali, spesso migliorandone le caratteristiche tecnologiche e di sostenibilità ambientale.

6. Biocombustibili di seconda e terza generazione

Lo sviluppo di biocombustibili di seconda generazione e terza generazione da risorse non alimentari è possibile rispettivamente attraverso lo sfruttamento delle frazioni ligno-cellulosiche non edibili di piante terrestri, e l'impiego di biomasse di scarto o di micro e macroalghe. I vantaggi dell'uso delle microalghe per la produzione di un'ampia gamma di biocombustibili, dal biodiesel al bioidrogeno, dal biogas ad oli idrocarburici, sono numerosi ed includono aspetti fisiologici, come una elevata efficienza fotosintetica, circa quadrupla rispetto a quella delle biomasse terrestri ed una crescita estremamente rapida (le microalghe possono raddoppiare la loro biomassa in poche ore). Importanti sono anche i vantaggi ambientali connessi con la coltivazione algale, come l'utilizzo di aree marginali, e la possibilità di integrare la produzione di biomassa e la sintesi di bio-combustibili con la depurazione delle acque reflue e l'assorbimento di anidride carbonica. L'elevato contenuto lipidico della maggior parte delle specie algali, pari in media al 20-50% del peso secco della biomassa, permetterebbe produttività molto alte, se confrontate con le tradizionali piante da cui si ottiene il biodiesel. Nonostante il livello di conoscenza scientifica raggiunto e gli indubbi vantaggi, non è una banale passare dalla scala di laboratorio alla grande scala degli *open ponds* o dei foto-bioreattori. Numerosi sono gli ostacoli da superare, quali i costi energetici ed economici per la coltivazione algale, dalla gestione e manutenzione delle vasche di crescita alla raccolta della biomassa, dall'essiccazione e all'estrazione dei lipidi. Inoltre, le condizioni ambientali che favoriscono un'elevata produttività primaria e una crescita veloce di biomassa, ossia mezzi di coltura ricchi di nutrienti, sono in realtà sfavorevoli all'accumulo di lipidi, che in genere avviene quando l'alga è in carenza di nutrienti essenziali. I fattori ambientali che influenzano la fotosintesi sono moltissimi, e inevitabilmente riducono l'efficienza fotosintetica a livelli ampiamente inferiori di quelli massimi teorici (10%), tali da rendere il costo del biodiesel da alghe doppio di quello da petrolio. Attualmente il mercato relativo all'utilizzo delle coltivazioni algali è indirizzato alla produzione di sostanze ad elevato valore aggiunto come gli integratori alimentari o sostanze farmaceutiche (carotenoidi, asta-xantina, beta-carotene, pigmenti, ecc.) i cui prezzi sono dell'ordine di 10.000-100.000 dollari/tonnellata. L'ipotesi di accoppiare la produzione di bio-combustibili (il cui prezzo è nettamente inferiore ai 1000 dollari/ tonnellata) con la sintesi di prodotti ad alto valore, potrebbe avere come conseguenza una saturazione del mercato di questi bio-prodotti con un inevitabile calo del profitto derivante dalla loro vendita.

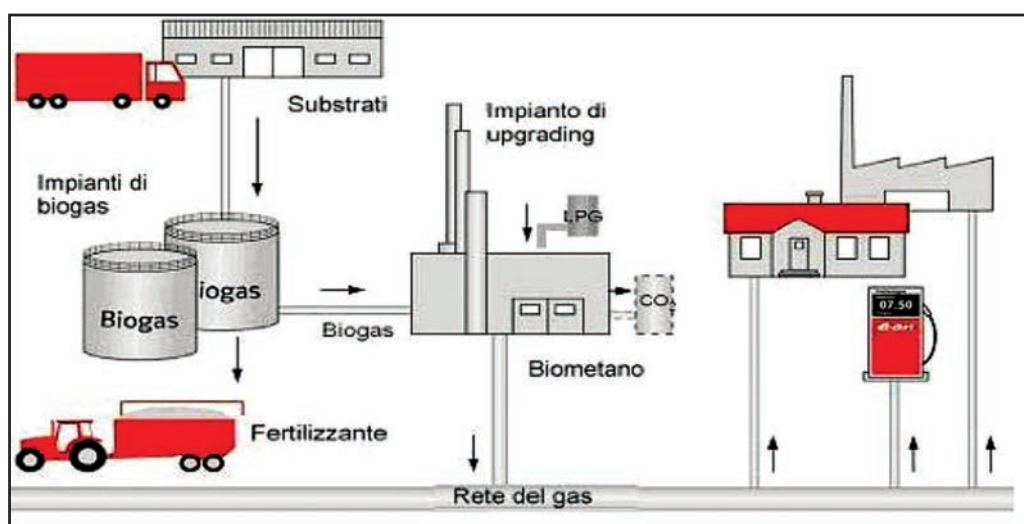
L'elevata biodiversità delle specie algali esistenti e la relativa facilità di modifica genetica del loro genoma, renderebbe possibile un'alternativa percorribile al fine di abbassare i costi della produzione algale, incrementando le rese ottenibili, migliorando per via genetica l'efficienza di conversione solare delle alghe ed il loro contenuto lipidico [Özçimen et al., 2013].

7. Biogas e bioenergia

In Italia la produzione di biogas e, conseguentemente, di energia elettrica da fonte rinnovabile, rappresenta uno dei settori maggiormente dinamici in termini di interesse per gli investimenti del mondo agro-zootecnico. Il 2012 è stato senza dubbio un anno di notevole sviluppo del settore biogas agro-zootecnico, che ha visto praticamente raddoppiare sia il numero di impianti sia la potenza elettrica installata: 994 impianti e 756 MW elettrici [Fabbri et al., 2013]. La grande spinta in avanti del settore è stata indotta dalla tariffa onnicomprensiva di cui alla Legge 23 luglio 2009, n. 99 [Legge 99/2009] e dal fatto che tale tecnologia è affidabile e consente di raggiungere gli obiettivi programmati in sede di progettazione. Alla promozione del settore biogas ha contribuito la grande opportunità economica offerta da tale tecnologia, che consente agli imprenditori di mantenere all'interno della propria realtà aziendale tutto il valore aggiunto della produzione: dalla materia prima (effluenti zootecnici, colture dedicate) al prodotto finale (energia elettrica e termica). Il risultato è che il settore si è ormai strutturato ben consolidato e la prima asta di iscrizione ai Registri prevista dal D.M. 6 luglio 2012 ha visto assegnati tutti i 170 MW previsti per il 2013.

Inoltre, grazie alla emanazione del Decreto 5 dicembre 2013 [D.M. 5 dicembre 2013] sarà inoltre possibile sfruttare le opportunità offerte dalla produzione di biometano, attraverso purificazione e *upgrading* del biogas (Figura 4).

Figura 4 - Schema impianto *upgrading* di biogas a biometano: immissione in rete, impiego per autotrazione, recupero del digestato



Fonte: Bertagna et al., 2013

L'impiego del biometano a fini energetici sia come combustibile, sia per l'alimentazione delle reti di distribuzione del gas naturale presenta diversi vantaggi: è prodotto da un'ampia varietà di biomasse; può essere immesso nella rete di distribuzione senza ulteriori aggravii di costi; è convertibile in gas liquido per i veicoli commerciali su distanze medio/lunghe; è utilizzabile nei veicoli alimentati a gas naturale già in

commercio. La disponibilità di reti regionali di distribuzione, considerando quanto sia ampiamente e capillarmente sviluppata la rete italiana, ben si presta alla realizzazione di questo tipo di sviluppo. Le nuove tecnologie di purificazione del biogas a biometano sono elementi fondamentali per associare l'infrastruttura esistente a nuovi campi di applicazione e migliorare così la redditività degli impianti a biogas e ridurre la dipendenza energetica nazionale da fonti di approvvigionamento estere. Il nostro paese gode di una situazione potenzialmente favorevole per ciò che riguarda il suo utilizzo come carburante per autotrazione, dato che si posiziona al 4° posto mondiale in termini di numero di automezzi alimentati a metano, tali da consentire una produzione di biometano pari a 8 miliardi di m³/anno [Bertagna, 2013].

La Commissione europea in tema di mobilità sostenibile si prefigge di guidare lo sviluppo tecnologico e gli investimenti nella rete distributiva del biometano consentendo la mobilità a livello europeo ed evitando la frammentazione del mercato [European Commission, 2013]. Inoltre è in evoluzione la proposta di Direttiva europea orientata all'ampliamento delle infrastrutture dei combustibili alternativi assicurando la sostenibilità dei biocarburanti. In tale quadro di riferimento gli Stati Membri dovranno assicurare un numero sufficiente di stazioni di rifornimento accessibili al pubblico entro il 31 dicembre 2020 [European Commission, 2013].

Lo sviluppo del biometano oltre a costituire un fattore aggiunto di crescita per il settore agro-alimentare, garantendo la creazione di posti di lavoro e benefici economici a livello locale, rappresenta una grande opportunità anche per il settore manifatturiero. L'Italia è infatti leader europeo nella produzione di sistemi per il trattamento ed il trasporto del gas naturale, e la richiesta di nuove installazioni da associare alla produzione di biometano può alimentare una ulteriore crescita del settore nel settore agro-zootecnico.

8. Bioraffinerie e sfide da superare

Se le bioraffinerie costituiscono una soluzione percorribile, numerose sono le sfide tecniche, strategiche e commerciali che devono essere superate prima che sia possibile una commercializzazione su larga scala dei prodotti delle stesse. Dovranno essere individuate le migliori tecnologie possibili per la fermentazione, gassificazione e conversione chimica, ma anche per il pretrattamento e lo stoccaggio delle biomasse da impiegare. È necessaria un'azione concertata di numerosi partner oltre all'industria per coprire tutti gli aspetti della complessa catena di valorizzazione della biomassa: deve essere previsto un inserimento locale in sintonia con il territorio che, grazie all'oggettivo valore economico occupazionale, di sostenibilità ambientale e di innovazione deve risultare ben accetto alle comunità locali. Oltre all'integrazione territoriale, favorita dalle dimensioni ridotte degli impianti se confrontati con quelli della petrolchimica tradizionale, la disponibilità di biomasse richiede di sviluppare processi di integrazione nel rapporto con i fornitori, che consenta di avere accesso in un raggio di approvvigionamento contenuto a materiali qualificati da inserire nei processi produttivi. Le opportune infrastrutture di filiera e di distribuzione vanno al di là della portata finanziaria delle singole aziende private e richiedono quindi finanziamenti pubblici. I governi interessati a sostenere lo sviluppo delle bioraffinerie, per ragioni di tutela ambientale e sicurezza energetica, dovrebbero quindi prevedere importanti investimenti in R&S, in infrastrutture, ed una attenta regolamentazione per assicurare nel contempo la sicurezza alimentare ed evitare cambiamenti di uso del suolo. In termini di efficienza e sostenibilità, i prodotti della chimica da biomasse devono essere considerati e certificati alla luce di criteri che facciano riferimento all'intero ciclo di vita dei prodotti (*Life Cycle Assessment*) ed eventualmente a specifici standard di valutazione. Si possono prestare a questo scopo strumenti che combinano indicatori

di carattere generale con altri definiti in funzione del settore produttivo, evidenziando la creazione di maggior valore con un minore impatto ambientale. Lo sviluppo del settore inoltre deve essere compatibile con i più elevati standard di sicurezza sociale, ambientale ed occupazionale. Anche se i rischi per l'ambiente e per la salute umana connessi a queste nuove realtà, dovrebbero essere inferiori rispetto ai tradizionali impianti chimici e petrolchimici, la sicurezza di questi impianti industriali di nuova generazione va attentamente valutata [Accardi et al., 2013]. I dati sugli sviluppi occupazionali del settore indicano un numero di lavoratori rilevante e crescente nel tempo per cui occorre effettuare un processo di valutazione specifico. Secondo stime dell'International Labour Organization (ILO) e dell'UNEP la transizione verso un'economia verde potrebbe generare dai 15 ai 60 milioni di posti di lavoro a livello globale nei prossimi vent'anni [ILO, 2012]. I *Green Jobs* sono per certi versi attività che prevedono dei rischi già presenti per settori occupazionali affini ma dei quali l'entità e la modalità di esposizione sono mutate in relazione alla mutata tecnologia applicata. Pertanto in relazione alla valutazione di alcuni rischi i *Green Jobs* sono stati associati ad un concetto di riconversione di attività preesistenti ma con finalità diverse. La situazione italiana è parte integrante del più vasto contesto europeo che prevede 4,5 milioni di lavoratori verdi al 2020, di cui gran parte costituita dai *green collar*, cioè i lavoratori del terziario avanzato e della ricerca. Devono quindi essere analizzati i pericoli connessi con l'introduzione di queste nuove tecnologie, nuove sostanze e procedimenti di lavoro, nuove forme di occupazione e di organizzazione del lavoro [European Agency for Safety and Health at Work, 2013]. Anche la comunicazione svolge un ruolo di importanza primaria: informare i cittadini sugli aspetti di sicurezza oltre che sui benefici che possono derivare da una buona programmazione della valorizzazione delle biomasse, con tutto quello che rappresentano in termini di tutela del territorio e ricadute economiche e occupazionali, sarà, ancor più di qualsiasi incentivo, lo strumento per guidare il Paese verso percorsi virtuosi di sviluppo sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- Accardi DS, Lauri R, Pietrangeli B, Russo P, Di Palma L. 2014. Process simulation for the production of biofuels and chemicals in biorefinery. *Chemical Engineering Transaction*, 38. Submitted.
- Accardi DS, Bubbico R, Di Palma L, Pietrangeli B. 2013. Environmental and Safety Aspects of Integrated BioRefineries (IBR) in Italy. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 169-74.
- Bertagna S. 2013. Biogas e biometano in Italia ed in Europa. *La Rivista dei combustibili*, 67(2):46-48.
- Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol*, 8, 279-84.
- Commissione europea. 2009. Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. G.U. dell'Unione europea L140/16 del 5 giugno 2009.
- Corma A, Iborra S, Velty A. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. *Chem Rev* 107, 2411-2502.
- Corte dei Conti Europea. 2012. Le misure strutturali dell'UE hanno sostenuto con successo la riqualificazione dei siti industriali dismessi? Relazione speciale n. 23, pp 1-56.

- Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Suppl. Ordinario alla G.U. n. 71 del 28 marzo 2011 - Serie generale.
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387. Attuazione della Direttiva 2001/77 concernenti la promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità: G.U. n. 25 del 31 gennaio 2004.
- Decreto 9 ottobre 2013, n. 139. Regolamento concernente specifiche procedure autorizzative, con tempistica accelerata ed adempimenti semplificati, per i casi di realizzazione di impianti di produzione da fonti rinnovabili in sostituzione di altri impianti energetici, anche alimentati da fonti rinnovabili. G.U. Serie Generale n. 294 del 16 dicembre 2013.
- Decreto 6 luglio 2012. Attuazione dell'art. 24 del Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici. G.U. n. 159 del 10-7-2012 - Suppl. Ordinario n.143.
- Dyer JM, Stymme S, Green AG, Carlsson AS. 2008. High value oils from plants. *Plant J*, 54 (4), 640-55.
- Ebbs SD, and Kochian LV. 1998. Phytoextraction of Zinc by Oat (*Avena sativa*), Barley (*Hordeum vulgare*), and Indian Mustard (*Brassica juncea*) *Environ. Sci. Technol.* 32, 802-6.
- Erickson B, Nelson JE, Winters P. 2012. Perspective on opportunities in industrial biotechnology in renewable chemicals. *Biotechnology Journal*, 7, 176-85.
- European Agency for Safety and Health at Work 2013. Green jobs and occupational safety and health: Foresight on new and emerging risks associated with new technologies by 2020. European Agency for Safety and Health at Work, 2013.
- European Commission 2013. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure. COM 2013/0012, Brussels 24.01. 2013, 1-38.
- European Commission 2013. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy. COM 2013/17, Brussels 24 January 2013, 1-11.
- European Commission 2012. Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social committee and the committee of the Regions. European Commission, 2012.
- European Commission 2011. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM (2011) 112 final.
- Fabbri C, Labartino N, Manfredi S, Piccinini S. 2013. Biogas, il settore è strutturato e continua a crescere. *L'informatore Agrario* 11: 15.
- GSE 2012. Rapporto Statistico. Impianti a fonti rinnovabili, Settore Elettrico. GSE, 2012.
- GSE 2014. Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici. GSE, 2014.

- Ishii Y, Hamano K, Kang DJ, Kannika R, Idota S, Fukuyama K, Nishiwaki A. 2013. C4-Napier Grass Cultivation for Cadmium Phytoremediation Activity and Organic Livestock Farming in Kyushu, Japan. *Journal of Agricultural Science and Technology* 3 (4), 321-330.
- International Labour Office (ILO). 2012. Working towards sustainable development: opportunities for decent work and social inclusion in a green economy. ILO. Geneva, 2012, pp. 1- 185.
- International Energy Agency (IEA) 2014. Bioenergy Task 42 Biorefinery. URL: <http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/en/iea/biorefinery.htm>.
- Jang Y, Kim B, Shin JH, Choi JY, Choi J, Song CW, Lee J, Park HG, Lee SY. 2012. Bio-based production of C2-C6 platform chemicals. *Biotechnology and Bioengineering*, 109, 2437-59.
- Kamm B, Gruber PR, & Kamm M. 2006. Biorefineries - Industrial Processes and Products. Status Quo and future Directions. Wiley-Vch Verlag gmbh & co. Kгаа, Weinheim; 2006. Vol. 1 and 2.
- Legge 23 luglio 2009, n. 99. Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia. G.U. n.176 del 31-7-2009 - Suppl. Ordinario n. 136.
- Leja K, Czaczyk K, Myszka K. 2011. The use of microorganisms in 1,3-propanediol production. *African Journal of Microbiology Research* 5, 4652-58.
- Malca J, Freire F. 2011. Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modeling issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 338-51.
- Mattam AJ, Clomburg JM, Gonzalez R, Yazdani SS. 2013. Fermentation of glycerol and production of valuable chemical and biofuel molecules. *Biotechnology Letters*, 35, 1240-4.
- Meers E, Ruttens A, Hopgood M, Lesage E, Tack F. 2005. Potential of *Brassica rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils. *Chemosphere*, 61, 561-72.
- Ministero dello Sviluppo Economico 2013. Approvazione del documento contenente la Strategia energetica nazionale. G.U. Serie Generale n. 73 del 27 marzo 2013.
- Ministero dello Sviluppo Economico 2010. Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia di cui alla Direttiva 2009/28/CE. pp.1-216.
- Ministero dello Sviluppo Economico 2013. Decreto 5 dicembre 2013 Modalità di incentivazione del biometano immesso nella rete del gas naturale. G.U. Serie Generale n. 295 del 17.12.2013.
- Özçimen D, Ömer Gülyurt M, İnanet B. 2013. Algal Biorefinery for Biodiesel Production. In Tech open access.
- Piotrowska-Niczyporuk A, Bajguz A., Zambrzycka E, Godlewska-Żyłkiewicz B. 2012. Phytohormones as regulators of heavy metal biosorption and toxicity in green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae). *Plant Physiology and Biochemistry*, 52, 52-65.
- Science and Technology Options Assessment (STOA). 2013. Recycling agricultural, forestry & food wastes and residues for sustainable bioenergy and biomaterials; STOA 2013.
- Shahid EM, Jamal Y. 2011. Production of biodiesel: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 15, 4732-45.
- Star-COLIBRI 2011. Strategic Targets for 2020 - Collaboration Initiative on Biorefineries. Joint European Biorefinery Vision for 2030.

- United States Department of Agriculture (USDA) 2008. U.S. Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. USDA February 2008.
- Zalesny R, Wiese A, Bauer E, Riemenschneider D. 2009. *Ex situ* growth and biomass of populus bioenergy crops irrigated and fertilized with landfill leachate. Biomass Bioenergy, 33, 62-9.

Gestione della sicurezza e sostanze pericolose nel settore dei combustibili da fonte rinnovabile

Paolo Angelo Bragatto

INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insedimenti Antropici, Centro Ricerca Monte Porzio Catone (RM)

Introduzione

Il presente capitolo tratta dell'implementazione del sistema di gestione della sicurezza nei più comuni tipi d'impianto per la produzione di combustibili liquidi e gassosi da fonte rinnovabile (biodiesel, bioetanolo, biogas). Si traccia un quadro molto generale del settore, senza entrare nei dettagli impiantistici discussi in altre sezioni, ma facendo riferimento particolare solo alle sostanze pericolose presenti ed alle implicazioni derivanti dalle "nuove" classificazioni del pericolo introdotte dal Regolamento REACH ed alle conseguenti applicazioni normative di imminente recepimento. Dall'esame dell'esperienza operativa dei Paesi che hanno spinto in particolare la produzione di biogas, si possono trarre lezioni utili per il settore: l'adozione dei modelli di gestione e di organizzazione può contribuire in maniera determinante a controllare il pericolo derivante dalle sostanze presenti nei processi.

1. Sistemi di gestione della Sicurezza

1.1 I sistemi di gestione nella normativa recente

L'obbligo, derivante dalla Direttiva 2009/28/CE, di diversificare entro il 2020 l'impiego di combustibili di origine fossile in tutti i settori con l'impiego al 20% di fonti rinnovabili (10% per i trasporti), spinge verso la produzione di combustibili di pregio a partire da biomasse. Questo apre nuove possibilità industriali di sicuro interesse. È essenziale però che questi settori "nuovi" partano in maniera corretta, traendo vantaggio dalle esperienze di gestione già messe a punto per altri settori. In particolare è essenziale che nei nuovi settori la gestione della sicurezza del lavoro, nasca e si sviluppi di pari passo con le nuove attività. Quando cominciarono ad essere introdotti i sistemi di gestione, prima solo nell'ambito di applicazione della cosiddetta "Direttiva Seveso" [D.Lgs. 334/1999 e s.m.i.], e poi in maniera decisa con il Testo Unico del 2008, molti settori dovettero fare uno sforzo particolare per recepire la novità. Il sistema di gestione non è fatto per aggiungere ulteriori "fardelli" inutili, ma serve a gestire più razionalmente tutte le altre attività già svolte per la sicurezza, ad assicurarne la coerenza, a monitorarle, a poterle meglio documentare e presentare all'interno ed all'esterno. Proprio per questo, tranne per le aziende Seveso, il sistema di gestione non entra in modo cogente, ma è incentivato in vario modo secondo lo schema della *soft law*. L'adozione di adeguati modelli organizzativi e procedure gestionali è condizione essenziale per assicurare uno sviluppo sicuro del settore.

1.2 Standard di riferimento e modelli di organizzazione e gestione

In assenza di un riferimento internazionale riconosciuto fa scuola l'ente di standardizzazione britannico, al quale si devono le norme BS OHSAS-18001, la cui ultima edizione risale al 2007. A livello italiano sono

disponibili le Linee Guida UNI-INAIL per il sistema di gestione della salute e sicurezza sul lavoro (SGSL) del 2001. Per la sola applicazione nelle industrie con pericolo di incidente rilevante, esiste una norma UNI, la UNI 10617, sviluppata dal Comitato Termotecnico Italiano. Argomenti essenziali dei sistemi di gestione della sicurezza sono la valutazione dei rischi, l'esercizio di impianti e attrezzature, la manutenzione, l'informazione e la documentazione, il personale e la formazione, la gestione dei cambiamenti, la sicurezza degli appalti, l'analisi degli infortuni (e dei mancati infortuni), la valutazione delle prestazioni ed il continuo miglioramento del sistema. Il pieno riconoscimento dell'importanza dei sistemi di gestione della sicurezza è arrivato in Italia con l'emanazione del D.Lgs. 81/2008, il Testo Unico, che all'art. 30 stabilisce che l'adozione e l'attuazione di un "modello di organizzazione e di gestione" rispondente ad una serie di requisiti specificati, è "condizione esimente" delle responsabilità amministrative delle imprese in caso di violazioni delle norme antinfortunistiche. In particolare le Linee Guida UNI/INAIL SGSL del 2001 e lo standard BS OHSAS 18001:2007 sono assunti come riferimenti generali per rispondere ai requisiti indicati. Gli standard di riferimento per i sistemi di gestione, pur non avendo carattere cogente, sono fortemente favoriti da questa normativa: oltre ai vantaggi in termini di responsabilità, vi sono finanziamenti per l'implementazione dei sistemi di gestione nelle piccole aziende, sconti sui premi assicurativi ed altre agevolazioni per le aziende certificate. Per colmare il vuoto fra i sistemi generali definiti negli ultimi anni, sono stati introdotti modelli specifici di settore, che forniscono delle linee guida molto dettagliate per lo sviluppo dei sistemi di gestione. Un primo esempio è venuto dal comitato termo-tecnico italiano che assieme alla citata Norma UNI 10617 propone la Linea Guida UNI 10616, che contiene dettagli implementativi abbastanza completi, specializzati per le industrie a rischio d'incidente rilevante. Ancora più dettagliati sono i modelli applicativi sviluppati dal Direzione Centrale Prevenzione dell'INAIL per alcuni settori specifici, dei quali si farà menzione specifica trattando nello specifico le diverse tipologie produttive. L'importanza dei modelli applicativi per attuare nel concreto i sistemi di gestione è stata riconosciuta dal Ministero del Lavoro che il 13 febbraio 2014 ha emanato un decreto, che semplifica le procedure per le piccole e medie imprese, che decidano volontariamente di adottare un modello di organizzazione e gestione della salute e sicurezza sui luoghi di lavoro (MOG), idoneo ai fini dell'efficacia esimente nei confronti dei reati previsti dall'art. 25 *septies* del D.Lgs. 231/2001 (Omicidio colposo o lesioni colpose gravi e gravissime derivanti dalla violazione delle norme antinfortunistiche). I moduli sono scaricabili dal sito del ministero del lavoro [MINLAV 2014].

1.3 Rappresentazione bow-tie

Chi ha esperienza ispettiva sa bene che i sistemi di gestione della sicurezza comportano per le aziende non poche difficoltà. Non è facile accettare di formalizzare procedure implicite, per le quali, come si usa dire, "si è sempre fatto così". In particolare è possibile il caso di singole persone, con elevata qualificazione in materia, che assumono un atteggiamento di non collaborazione, per una paventata perdita di ruolo dovuta alla formalizzazione delle procedure. Per evitare questo la gestione della sicurezza deve essere affrontata come un elemento di miglioramento tecnico piuttosto che come esercizio burocratico. È importante che ogni elemento di documentazione non venga percepito come ridondante esercizio burocratico, ma piuttosto come strumento pratico. In particolare il Responsabile Servizio Prevenzione e Protezione (RSPP) deve disporre di strumenti operativi per sfruttare appieno la documentazione di sicurezza mantenendola sempre allineata con la continua

evoluzione degli impianti. Per superare il gap esistente fra sistema di valutazione/gestione del rischio ed esercizio è utile l'approccio delle *bow-ties*. La *bow-tie* consiste nell'individuare per ogni pericolo principale i sistemi tecnici e procedurali adeguati a prevenire gli incidenti oppure a mitigarne le conseguenze. Il vantaggio della rappresentazione *bow-tie* è che collega in maniera semplice ed efficace i pericoli, al centro della "farfalla" ed i sistemi di sicurezza, visti come barriere preventive alla sinistra e le barriere protettive alla destra [Ale & al., 2008]. Un vantaggio della *bow-tie* è che l'associazione fra sistemi di sicurezza e pericoli può essere sfruttata sia per l'analisi degli eventi incidentali che per le ispezioni e gli audit di sicurezza. Nell'ambito della gestione del rischio gli incidenti vanno intesi come deviazione dalle normali operazioni d'impianto con almeno una conseguenza fra la perdita di prodotto o produzione, danni all'integrità degli impianti, infortuni dei lavoratori, danni all'ambiente esterno. L'analisi di tutti gli eventi incidentali, compresi quelli senza conseguenze (quasi incidenti) è un elemento essenziale dei sistemi di gestione. Le attività di controllo sulle condizioni e funzionalità delle attrezzature (ispezioni) e sull'adeguatezza delle procedure e delle risorse organizzative (audit) sono elementi essenziali del sistema di gestione [Bragatto & al., 2014].

1.4 Applicazione specifiche al settore bioraffinerie e biogas

Nell'ambito della produzione di combustibili di pregio a partire da biomasse si distinguono in particolare due linee di sviluppo: i biocarburanti, in sostituzione di benzina e gasolio, per i normali usi di autotrazione e riscaldamento ed il biogas, impiegato direttamente per alimentare impianti di cogenerazione elettrica e termica. Nel seguito si esaminano i due settori, con particolare riferimento alle classificazioni di pericolo delle sostanze secondo i nuovi regolamenti europei (REACH - CLP). Tali classificazioni sono essenziali per determinare le modalità di realizzazione di una gestione corretta della sicurezza. Si fa anche riferimento all'esperienza operativa di altri Paesi europei, che hanno anticipato di qualche anno lo sviluppo del settore. I dati riportati sono tutti derivati dalla letteratura scientifica sull'argomento e non si riferiscono assolutamente ai casi studio specifici considerati in altre parti della ricerca.

2. Biocarburanti liquidi

Nell'ambito dell'affermarsi delle fonti rinnovabili, vi è una forte spinta alla produzione di succedanei del gasolio, normalmente intesi come "biodiesel". Il processo tradizionale è quello della trans-esterificazione con metanolo di oli vegetali (tecnologia FAME). Si ottiene un diesel adatto a molti usi, ma non a quello automobilistico, inoltre si hanno sottoprodotti di scarso pregio (glicerina). Per ovviare a questi limiti, in alternativa alla trans-esterificazione, è stata introdotta in anni recenti da ENI la tecnologia ECOFINING, basata su processi di idrossigenazione ed isomerizzazione, sempre di oli vegetali, che consente livelli qualitativi idonei anche ai turbodiesel, e con sottoprodotti di maggior pregio [Ray, 2013]. Come alternativa alla benzina vi è invece lo sviluppo della produzione di etanolo di origine vegetale, che di solito viene miscelato in proporzioni variabili nei carburanti per l'autotrazione, nonché venduto da solo per le numerose e note applicazioni industriali e civili. Il processo di produzione è quello ben noto della fermentazione alcolica di prodotti vegetali con buoni contenuti zuccherini (frutta, canne, tuberi, ecc.), e successiva distillazione e rettificazione. La ricerca tecnologica in questo settore mira a migliorare processi che partono da biomasse di basso o bassissimo valore economico, per evitare di impattare negativamente sul mercato dei prodotti

alimentari. I biocombustibili sono utilizzabili per l'autotrazione, miscelandoli solitamente con gli equivalenti prodotti di origine fossile. In particolare l'etanolo di origine bio, peraltro identico all'etanolo di origine sintetica, trova uso come succedaneo in aggiunta della benzina verde. In alcuni Paesi, come Brasile e Francia, prodotti contenenti percentuali variabili di etanolo sono da tempo in vendita alle pompe di distribuzione. Sia il biodiesel che l'etanolo vengono anche utilizzati per il riscaldamento civile.

2.1 Pericoli delle sostanze

Lo sviluppo di questo nuovo settore pone alcuni problemi di valutazione e gestione del rischio, che vanno attentamente considerati, onde evitare incidenti rilevanti che avrebbero conseguenze negative su un settore interessante per l'economia nazionale per molti motivi (indipendenza energetica, valorizzazione di terreni marginali per la produzione agro-industriale, sviluppo occupazionale in tutta la filiera impiantistica). In Tabella 1 si riportano le caratteristiche di pericolosità e le relative frasi di pericolo dell'etanolo e del biodiesel a confronto dei prodotti ai quali sono alternativi (benzina e gasolio) e del metanolo che ha un ruolo essenziale nel ciclo di produzione del biodiesel.

Tabella 1 - Caratteristiche di pericolosità delle sostanze

	Punto d'infiammabilità	Intervallo di esplosibilità	Frasi di pericolo (secondo codifica CLP)
Benzina	- 40 °C	1,4% - 7,6%	H225 - 411
Etanolo	12 °C	3,5% - 15%	H225 - 319
Gasolio	56 °C	-	H226 - 304 - 315 - 332 - 351 - 373 - 411
Biodiesel	52 °C	-	H226 - 304 - 315 - 332 - 351 - 373 - 411
Metanolo	11 °C	6% - 36%	H225 - 301 - 311 - 331 - 370
Idrogeno	-253 °C	4% - 76%	H220 - 280

Etanolo e metanolo entrano in molti processi industriali per le caratteristiche chimiche, sia come reagenti che come solventi. L'etanolo ha inoltre una notevole importanza base su prodotti di largo consumo, in particolare per l'alimentazione umana e per la detergenza. L'esperienza operativa sulla pericolosità di queste sostanze è quindi piuttosto ampia, anche se solo una piccola parte degli incidenti riguarda esplicitamente il settore "bio". In particolare nella banca dati europea degli incidenti rilevanti (impianti Seveso) EMARS si riportano, relativamente solo agli ultimi dieci anni, due gravi incidenti con l'etanolo:

- il primo in un impianto di produzione di chimica di base (MARS #711);
- il secondo in uno zuccherificio (MARS #408).

Altri due incidenti con il metanolo sono riportati in impianti di produzione chimica di base (MARS #667, #642). Non sono stati considerati gli incendi che, causati da altre sostanze, hanno successivamente coinvolto anche stoccaggi di metanolo o l'etanolo presenti nel sito, perché meno significativi per gli scopi della ricerca. Nella banca dati incidentale francese ARIA si riportano per l'ultimo decennio alcuni incidenti gravi con il metanolo e con l'etanolo, riconducibili all'innesco di atmosfere esplosive dovute alla presenza di vapori di alcool. Di questi uno è avvenuto durante il trasporto ferroviario di etanolo (ARIA #41248), un altro si è verificato in una fabbrica di produzione di condimenti e spezie (ARIA #40440) ed uno si riferisce all'esplosione di una cisterna, contenente metanolo, durante trasporto marittimo. Incidenti specifici per impianti biodiesel e bioetanolo sono riportati anche negli Stati Uniti, dove il settore ha da anni una certa importanza. Da articoli di letteratura risulta

che solo nel triennio 2006-2009 siano avvenuti 21 incidenti gravi, dovuti in parte al fatto che in questo settore hanno investito soprattutto piccole imprese del settore agro alimentare [Salzano et al. 2010]. In particolare nell'archivio pubblico dell'autorità americana per la sicurezza del lavoro (OSHA) si riportano due incidenti mortali in impianti di produzione di biodiesel (OSHA/Inspection record 308291996 OSHA/Accident record 200231801) e due incidenti, di cui uno mortale, riconducibili all'innescò di vapori di etanolo (OSHA/Inspection record 102762085 e OSHA/Accident record 201342649) durante lavori a caldo. Nel 2000 il primo incidente ha riguardato la produzione di etanolo da grano: un *pool fire* è stato innescato durante lavori di saldatura; il secondo è avvenuto nel 2002 in una distilleria in seguito a rilasci di vapori, provocati da un'erronea chiusura dei portelli di ispezione della colonna di assorbimento. Da ricordare, infine un incidente in Italia, che coinvolge il metanolo in un impianto per la produzione di biodiesel riportato con la scheda 48a-2003 nell'archivio Infor.MO degli infortuni mortali in Italia. Anche questo incidente risulta dovuto a lavori a caldo eseguiti in presenza di vapori di metanolo con conseguente innescò di atmosfera esplosiva.

2.2 Soglie di applicabilità Seveso III

Dal punto di vista normativo attualmente è ancora in vigore la Direttiva Seveso II [Directive 96/82/EC], basata sulla classificazione delle sostanze pericolose sui criteri della Direttiva Sostanze Pericolose DSD [Directive 67/548/EEC; EC, 1967] e della Direttiva Preparazioni Pericolose [DPD; Directive 1999/45/EEC] per la classificazione di sostanze e miscele. Il nuovo regolamento relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele [CLP; Regolamento CE 1272/2008; EC, 2008] abroga il DSD e DPD nel 2015. I criteri di classificazione implementati dal CLP differiscono da quelli del DSD e della DPD. In revisione della Direttiva Seveso (Seveso III), in base ai criteri del regolamento CLP, è stata ufficialmente pubblicata la Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) che dovrà essere recepita da tutti gli stati membri prima del giugno 2015. Nella presente trattazione si fa riferimento solo alla classificazione CLP ed alla Seveso III. I limiti fissati dalla Direttiva Seveso per i liquidi facilmente infiammabili sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2 - Assoggettabilità Seveso di alcune sostanze in uso nelle bioraffinerie

Sostanza (ton.)	Art.6	Art.8
Liquidi infiammabili (Etanolo)	5.000	50.000
Gasolio, Olio Combustibile, Biodiesel	2.500	25.000
Metanolo	500	5.000
Idrogeno	5	50

Ai fini del calcolo dei quantitativi vanno considerate:

- la massima capacità di stoccaggio totale dello stabilimento;
- la capacità dell'impianto stesso (*hold-up*) incluse colonne e tubazioni.

Per i depositi il secondo termine è trascurabile, mentre per gli impianti produttivi può influire in modo significativo. Il valore volumetrico ottenuto va convertito in termini ponderali, come richiesto dalla Direttiva, tenendo conto della densità dei singoli prodotti. Per quanto riguarda in particolare l'etanolo, che ha densità 789 kg/m^3 , la soglia in termini volumetrici è 6.337 m^3 , mentre per il (bio)diesel i limiti volumetrici sono $2.941,176 \text{ m}^3$. Nel caso lo stabilimento abbia più di una sostanza sottosoglia, va calcolata la quantità

equivalente sommando i rapporti fra i quantitativi massimi e le rispettive soglie Seveso, secondo la formula seguente:

$$q_{eq} = \sum_i \frac{q_i}{Q_i} \quad (1)$$

dove:

q_i = quantitativo detenuto in stabilimento;

Q_i = soglia Seveso;

q_{eq} = indice quantitativo equivalente.

$q_{eq} < 1 \rightarrow$ art.5

$1 \leq q_{eq} < 10 \rightarrow$ art. 6

$q_{eq} > 10 \rightarrow$ art. 8

In tale prospettiva un impianto biodiesel, dove sono presenti in maniera significativa sia metanolo che gasolio potrebbe rientrare in Seveso per la combinazione di più sostanze. Va sottolineato come la Direttiva Seveso III, a differenza della Direttiva precedente, faccia riferimento ai combustibili alternativi ai prodotti di origine petrolifera, equiparandoli agli stessi. Questo vale in particolare per il biodiesel, che è una miscela di sostanze, con caratteristiche simili (ma non identiche) al gasolio (combustibile diesel) derivato dal frazionamento del petrolio. Per quanto riguarda il bioetanolo esso è una sostanza pura del tutto identico all'etanolo di origine chimica e come tale viene considerato ai fini "Seveso". La "Seveso" impone degli obblighi precisi solo nel caso in cui vengano raggiunti o superate le soglie fissate dalla normativa. Questi obblighi comprendono in particolare una serie di comunicazioni nei confronti della popolazione residente nei dintorni e delle varie autorità, fra i quali prefettura e comune, finalizzate a controllare l'eventuale coinvolgimento esterno di un potenziale incidente. Vi è inoltre un rigido sistema autorizzativo che riguarda le modifiche tecniche ed organizzative che possono indurre aggravio di rischio.

2.3 Stabilimenti sottosoglia

Al di sotto dei limiti Seveso, si assume come poco credibile un coinvolgimento all'esterno e, conseguentemente gli obblighi sono molto ridotti, ma non inesistenti. Per gli stabilimenti sotto soglia esistono obblighi molto circoscritti definiti dall'art. 5, comma 2, del D.Lgs. 334/1999 di recepimento della Seveso II che stabilisce che il gestore degli stabilimenti sottosoglia è comunque tenuto a provvedere: 1) all'individuazione dei rischi di incidenti rilevanti, integrando il documento di valutazione dei rischi di cui alla normativa in materia di sicurezza del lavoro D.Lgs. 81/2008; 2) all'adozione delle appropriate misure di sicurezza e all'informazione; 3) alla formazione, all'addestramento ed all'equipaggiamento di coloro che lavorano in situ, come previsto dal decreto del Ministro dell'ambiente 16 marzo 1998. A seguito del D.Lgs. 238/2005 è stato abrogato il comma 3 del D.Lgs. 334/1999 che prevedeva ulteriori obblighi in termini di produzione documentale. Uno scenario possibile è che stabilimenti di produzione e/o stoccaggio di bioetanolo o di biodiesel non superino i limiti Seveso ma rientrino nella zona grigia dell'art. 5. Al di sotto delle soglie si esclude ragionevolmente la possibilità che eventuali incidenti possano coinvolgere l'esterno, cioè popolazione esterna o ambiente. Le conseguenze possibili sono all'interno (lavoratori ed impianto) e quindi possono essere gestite nell'ambito della sicurezza del lavoro, prevedendo misure adeguate di controllo.

2.4 Valutazione del rischio

Nel caso delle bioraffinerie, trattandosi sempre di impianti nuovi, sia come costruzione che come tecnologie, vengono verosimilmente adottate le migliori soluzioni disponibili. Tuttavia l'installazione delle migliori tecnologie da sola non è sufficiente a garantire la sicurezza, occorre infatti dotarsi di un sistema di gestione adeguato al livello di rischio, che assicuri il coinvolgimento di tutti i lavoratori, motivando un comportamento proattivo nei confronti della sicurezza. La valutazione dei rischi deve essere basata sull'individuazione di tutti i possibili scenari incidentali e dei sistemi tecnici ed organizzativi che sono in grado di prevenirne l'accadimento o mitigarne le conseguenze. I programmi di ispezione interna devono essere coerenti con la valutazione dei rischi e consentire un controllo continuo sia sulle condizioni dei sistemi tecnici in esercizio sia sull'adeguatezza ed applicazione dei sistemi organizzativi. In altre parole, risultano indispensabili stringenti programmi di ispezione sull'integrità e funzionalità delle attrezzature e della strumentazione, politiche di manutenzione preventiva, o meglio ancora predittiva degli impianti, e frequenti audit interni con particolare attenzione a tematiche quali la formazione (compresi i lavoratori delle ditte esterne ed i trasportatori), le prove di emergenza, la segnalazione di anomalie e quasi incidenti. Anche le modifiche vanno gestite valutando sempre le possibili ricadute sulla sicurezza includendo anche i cambiamenti organizzativi e procedurali. Infine un audit esterno permette un'occasione particolare per dare impulso al ciclo di miglioramento continuo.

2.5 Gestione del rischio

L'adozione di un sistema di gestione della sicurezza nel caso degli stabilimenti art. 5 non è un obbligo cogente, tuttavia va notato che con il Testo Unico si sono messe in atto tutte le forme dirette ed indirette di incentivazione, fra cui gli sconti sui premi assicurativi, il valore esimente che scarica alcune responsabilità del datore di lavoro e, sotto particolari condizioni, contributi a fondo perduto per l'avvio del sistema stesso. In pratica tutti i meccanismi della *soft-law* sono stati posti in atto per intraprendere questo percorso e sarebbe quindi opportuno per un gestore di un nuovo impianto per la produzione di biocombustibili (bioetanolo o biodiesel) approfittare di queste opportunità ed attivare un sistema di gestione, che protegga allo stesso tempo i lavoratori e gli impianti produttivi. Possono essere senz'altro seguiti modelli di gestione già esistenti, dei quali si conosce la validità. Il sistema di gestione UNI 10617:2012 è senz'altro adatto allo scopo. Un ulteriore riferimento è senz'altro il sistema SGSL-INAIL ed in particolare le Linee di Indirizzo approvate dall'INAIL per il settore "Energia e Petrolio" [INAIL, 2013]. Il citato modello dà indicazioni generali e fa riferimento a ulteriori documenti specifici per i vari punti. In particolare andranno individuati i pericoli legati al processo, possibilmente con il metodo HAZOP o in alternativa la *bow-tie*. A titolo di esempio in Figura 1 vengono riportate le *bow-ties* per due tipiche unità di una bio-raffineria stoccaggio e spedizione prodotto. Ovviamente le altre *bow-ties* andranno sviluppate *ad hoc* per i rischi specifici di diversi impianti di processo.

2.6 Bow-tie per ispezioni, audit ed analisi incidentale

La rappresentazione di tipo *bow-tie* può essere utilizzata sia per indirizzare e guidare gli audit sulla parte gestionale del sistema sicurezza che per programmare prove e verifiche, che devono essere periodicamente svolte sulle attrezzature e la strumentazione d'impianto. Gli audit di sicurezza condotti sulla base della *bow-tie* sono meno sistematici degli audit basati sulla disamina puntuale di un certo numero di elementi raccolti in

check-list strutturate. Le ispezioni condotte sulla base della *bow-tie* sono ispezioni basate sul rischio, quindi concentrano le risorse sui sistemi critici, riservando agli altri sistemi un'attenzione marginale. In questo modo si può ottenere un'efficacia equivalente con minori risorse. Negli stabilimenti soggetti a Seveso viene adottato l'approccio sistematico per gli audit, seppure integrato con alcuni controlli *risk-based* per i sistemi tecnici. Negli stabilimenti "sotto soglia" audit di tipo *risk-based* possono essere sufficienti, non essendoci vincoli di obbligatorietà. Il programma dei controlli sulle attrezzature di lavoro previste dall'art. 71 del D.Lgs. 81/2008 può essere organizzato sulla base dei livelli di rischio associati ai pericoli ed ai relativi sistemi di sicurezza. Ovviamente per le verifiche obbligatorie delle attrezzature in pressione e di sollevamento, normalmente presenti in questi stabilimenti, occorre tener conto delle periodicità fissate nell'Allegato VII del D.Lgs. 81/2008, con le eventuali deroghe che possono essere eventualmente richieste sulla base del D.M. 329/2004. Per l'analisi degli incidenti e dei quasi incidenti l'approccio *bow-tie* è il metodo riconosciuto più pratico ed efficace non solo nella letteratura scientifica ma anche da molti enti di controllo europei, che lo adottano in forma più o meno ufficiale per lo studio degli incidenti con infortunio, per i quali vi è di solito obbligo di comunicazione e registrazione, analogamente a quanto avviene in Italia. Il vantaggio dell'analisi degli incidenti basata sulla *bow-tie* è la possibilità di identificare con la massima chiarezza i punti deboli delle barriere di sicurezza (siano preventive o protettive, tecniche od organizzative) che hanno causato il loro parziale o totale fallimento. I risultati delle analisi incidentali possono così essere tradotti in un efficace piano di miglioramento dei sistemi di sicurezza. La Figura 1 rappresenta le *bow-ties* per alcuni scenari incidentali comuni ai vari tipi di bio-raffinerie. Per i singoli processi ovviamente occorrerà analizzare nel dettaglio i possibili scenari.

Figura 1 - Esempio di *bow-tie* per due reparti tipicamente presenti in una bioraffineria generica: stoccaggio prodotti e spedizioni

IMPIANTO SPEDIZIONI SHIPPING				
Formazione e addestramento;	Pulsanti STOP di emergenza su ciascuna baia di carico;	Sicurezza rimbalzo autoibrido	Rilevatori gas infiammabili;	Squadra A.I. di raffineria;
Procedure di accesso e permessi di lavoro;	Sistema antibloccamento sui bracci di carico;			
Procedure di manutenzione;				
IMPIANTO STOCCAGGI PRODOTTI				
Procedure di controllo e manutenzione periodiche e regolari;	Alto standard di progettazione ed esecuzione;	Collissione sculture e serbatoio	Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
Impiego di personale qualificato nelle operazioni di riempimento;	Allarme di altissimo livello indipendente;	Sicurezza riempimento serbatoio	Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
	Misuratore di alto e di altissimo livello riportato in sala controllo;		Videosorveglianza	
Formazione e addestramento;	Rispetto delle distanze opportune a evitare effetti domino;	Bollitori	Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
Procedure di accesso e permessi di lavoro;	Controllo della temperatura;			
Procedure di manutenzione;				
Procedure di controllo periodiche e regolari su tubazioni;	Alto standard di progettazione ed esecuzione;	Perdita da tubazione	Videosorveglianza	
	Sovradimensionamento degli spessori di corrosione;		Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
Procedure di ispezione regolari della superficie del serbatoio;	Alto standard di progettazione ed esecuzione;	Perdita dal manello del serbatoio	Videosorveglianza	
	Sovradimensionamento degli spessori di corrosione;		Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
	Misuratore di basso e di bassissimo livello riportata in sala controllo;			
Linee guida specifiche per l'installazione, il controllo e la manutenzione delle valvole di respirazione;	Sistema di sfogo dotato di una o più valvole di respirazione;	Impiombone del serbatoio	Sistema rilevazione incendi (cavo termosensibile);	Squadra A.I. di raffineria;
procedure>>>>>>>>>>	sistemi tecnici >>>>	*	<<<<<< sistemi tecnici	<<<<<< procedure

3. Gestione della sicurezza

Per evitare che si ripeta anche nel nostro Paese l'esperienza negativa dei Paesi che hanno sviluppato nel decennio passato il settore biogas è essenziale comunque porre la massima attenzione sulla pericolosità intrinseca del prodotto e sull'importanza di gestire in modo adeguato la sicurezza dell'impianto. Se si considera un impianto "tipico" di biogas agricolo della potenza massima di circa 1 MW e gas in gasometro per circa 2.500 m³ restiamo largamente sotto le soglie Seveso, riportate in Tabella 3.

Tabella 3 - Soglie di assoggettabilità SEVESO del biogas e biometano

Prodotto	soglia art. 6 (ton)	soglia art. 8 (ton)	soglia art. 6 (m ³)	soglia art. 8 (m ³)
biogas grezzo (metano 60%)	10	50	23.251,5	116.257,4
biogas rinforzato (metano)	50	200	69.754,5	279.017,9

Resta comunque l'obbligo di cui all'art. 5 del D.Lgs. 334/1999 che richiede un minimo livello di attenzione alla pericolosità intrinseca del gas in fase di compilazione del DVR. In particolare vanno considerati i pericoli dovuti a possibili perdite di contenimento del gas con ignizione della nube di gas e combustione rapida della maggior parte del prodotto (*flash fire*), formazione ed esplosione di miscele ossigeno/metano nell'unità di stoccaggio del biogas. In particolare occorrerà porre attenzione alla valutazione delle diverse aree ATEX ed all'impiego scrupoloso di attrezzature marcate ATEX, nonché alla normativa specifica per la prevenzione incendi.

3.1 Incidenti negli impianti di produzione di biogas

L'esperienza di altri Paesi, come la Germania, dove l'industria del biogas è presente già da una decina di anni con numeri economicamente significativi, mette in guardia dai pericoli del settore. In Germania, nel solo periodo 2005-2011 sono stati registrati 11 gravi incidenti in impianti di produzione biogas agricolo, con un numero d'impianti che nell'equivalente periodo è passato da poco più di 3.000 a quasi 6.000. Uno degli incidenti è mostrato in Figura 2. Le conseguenze sono state rilevanti, con distruzione d'impianti e gravissimi danni alle aziende agricole. Analoghi incidenti sono registrati anche in Francia ed in Austria. Nella Tabella 4 sono riportati i dati degli incidenti reperibili sulla banca dati incidenti ARIA al sito web www.aria.developpement-durable.gouv.fr con i codici di riferimento. In fondo alla Tabella vi sono alcuni eventi recenti non ancora riportati sul database. Gli incidenti riportati sono dovuti, come causa prima a fessurazioni e perdite dalla copertura, strutture sottodimensionate, tracimazione dei liquami, uso di attrezzature elettriche senza protezioni dal rischio di formazione atmosfere esplosive (ATEX), interferenza di altre attività con le tubazioni del gas. In generale la causa ultima è la gestione inadeguata della sicurezza, incluse la sottostima del rischio, la scarsa attenzione alla sicurezza nelle procedure di acquisto, i mancati controlli sistematici delle attrezzature di lavoro [Uslander & Bugel 2013].

Figura 2 - Incidente biogas a Riedlingen, Germania


Fonte: URL: <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>

Tabella 4 - Incidenti recenti nel settore biogas-agricolo in Europa

Località	Paese	Data	fonte
Riedlingen	Germania	16/12/2007	ARIA # 42314
Lichtenau	Germania	15/01/2008	ARIA # 42315
Pratteln	Svizzera	19/10/2007	ARIA # 42316
Lichtenau	Germania	15/08/2008	ARIA # 42317
Bad Sassendorf	Germania	05/02/2008	ARIA # 42320
Sankt Magarethen an der Raab	Austria	27/03/2007	ARIA # 42322
Sulz am Neckar	Germania	14/05/2008	ARIA # 42324
Kleinsachsenheim	Germania	30/05/2008	ARIA # 42328
Gehlenberg	Germania	22/09/2008	ARIA # 42342
Dorfen	Germania	28/06/2010	ARIA # 42341
Somain	Francia	25/03/2011	ARIA # 40476
Casalpoglio MN	Italia	12/05/2012	GazzettadiMantova
Lendinara RO	Italia	02/05/2013	Rovigo24ore
Sprotau	Germania	13/01/2014	Thueringer-Allgemeine

In Francia due gravi incidenti hanno interessato il medesimo sito classificato “Seveso”, quindi ben in teoria preparato alla gestione delle emergenze interne ed esterne, ciò ha permesso in entrambi i casi una buona gestione dell’evento con ridotte conseguenze sia per gli addetti che per la popolazione. Gli incidenti sono avvenuti rispettivamente il 27/1/2012 ed il 1/2/2012, in particolare il primo è stato causato da un movimento inappropriato di una gru che ha danneggiato delle tubazioni, mentre il secondo episodio è stato causato dal freddo intenso che ha gelato l’alimentazione della torcia, vanificando un essenziale dispositivo di sicurezza. Un episodio simile era avvenuto quattro anni prima sempre nello stesso sito. I dettagli di questi incidenti sono disponibili sulla banca dati incidenti ARIA. Per quanto concerne la situazione italiana si verificò lo scorso anno nell’impianto di Casalpoglio (Mn) l’esplosione “fisica” della cupola gasometrica, provocata da una sovrappressione, derivante da un guasto del cogeneratore e che non fu controllata a causa del mancato intervento dei dispositivi di sicurezza. I codici delle rispettive schede sono 34251; 42713; 42739. Nel 2010 un incidente simile (blocco della torcia) era stato segnalato in un altro impianto di biogas da acque reflue,

sempre classificato Seveso (ARIA #34485). In un impianto di gassificazione da rifiuti a Stoccarda il 29/12/2005 (ARIA #32574) una fuga di idrogeno solforato ha prodotto un morto e sei infortunati gravi. In Italia questo genere d'impianti è meno diffuso, ma non si può dimenticare l'incidente di Peschiera del Garda, dove due operai furono uccisi ed un terzo ferito gravemente in un impianto di biogas da acque reflue di vecchia concezione (12/3/97 ARIA #11345). Gli episodi dimostrano la vulnerabilità dei grandi impianti di biogas e l'importanza di disporre al meglio le procedure organizzative di emergenza previste dalla Seveso. L'istituto francese di ricerca sul rischio industriale INERIS ha condotto un'indagine molto dettagliata dell'esperienza operativa degli impianti biogas in Europa, sia agricoli che da trattamento acque reflue o rifiuti, dove si passano in rassegna tutti gli eventi riportati nelle varie fonti disponibili, inclusi incendi, esplosioni e nubi tossiche [INERIS 2012]. Pur essendo il pericolo intrinseco di questi impianti relativamente basso, la scarsa attenzione, la mancanza di cultura della sicurezza e di procedure adeguate nelle varie fasi di produzione porta al verificarsi con troppa frequenza di incidenti.

3.2 SGSL/MPI

Ovviamente la valutazione e la gestione della sicurezza devono essere scalati sulle dimensioni degli impianti e delle organizzazioni. I modelli indicati al paragrafo precedente, idonei per impianti di bio-raffinazione veri e propri, sono adatti ad impianti di produzione di biogas di grandi dimensioni, che tipicamente sono associati al trattamento dei fanghi di depurazione. Per gli impianti associati a produzioni agricole, di maggiore diffusione in Italia, il modello può invece risultare sovradimensionato, ed è più idoneo optare sul modello di SGSL/MPI: 2011 sviluppato per micro e piccole aziende [INAIL, 2011]. Nell'implementazione ed adattamento del modello alla situazione specifica si dovrà dare adeguato spazio ad aspetti tipici della gestione delle sostanze pericolose, quali valutazione del rischio, ispezione ed audit, analisi quasi incidenti e pianificazione emergenze (incluse le esercitazioni periodiche).

BIBLIOGRAFIA

- Ale BJM, Baksteen H, Bellamy LJ, Bloemhof A, Goossens L, Hale AR, Mud ML, Oh JIH, Papazoglou IA, Post J, Whiston JY. Quantifying occupational risk: the development of an occupational risk model. *Safety Science* 2008; 46 (2), 176-185.
- ARIA. URL: <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>.
- Bragatto P. Ansaldi S. Antonini F. Agnello S. Bow-tie approach for improved auditing procedures at "Seveso" establishments in *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon* Taylor & Francis, London, 2014; pp. 1447-1455.
- Decreto Legislativo 231/2001. Procedure semplificate per l'adozione dei modelli di organizzazione e gestione nelle piccole e medie imprese. G.U. n. 45 del 24 febbraio 2014.
- EMARS. URL: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/>.
- HSE Health & Safety Executive (2011) *Hazards arising from the conveyance and use of gas from Non-Conventional Sources (NCS)*, 2011.
- INAIL. Linee di indirizzo SGI-AE Sistema di Gestione Integrato Salute Sicurezza Ambiente - Aziende Energia. 2013. URL: <http://sicurezzasullavoro.inail.it/CanaleSicurezza/ModelliApplicativi.html>.

- INAIL. Linee di indirizzo SGSL–MPI Sistemi di Gestione per la Salute e la Sicurezza sul Lavoro nelle Micro e Piccole Imprese. 2011.
URL: <http://sicurezzasullavoro.inail.it/CanaleSicurezza/ModelliApplicativi.html>.
- INERIS. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations rapport d'étude DRA-12-117442-01013A. 2012. URL: <http://www.ineris.fr/centredoc/dra-12-117442-01013a-rex-2-1341240391.pdf>.
- Infor.MO. URL: <http://www.ispesl.it/getinf/informo/>.
- Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali - Sicurezza Lavoro. Procedure semplificate per l'adozione dei modelli di organizzazione e gestione nelle piccole e medie imprese. 2014.
URL: http://www.lavoro.gov.it/SicurezzaLavoro/PrimoPiano/Pages/20140225_proceduresemplificate.aspx.
- OSHA. URL: <https://www.osha.gov/pls/imis/accidentsearch.html>.
- Ray A. Second-generation hydrocarbon fuels from oil palm by-products. Journal of Oil Palm & The Environment 2013; 4:22-28.
- Salzano E, Diserio M, Satacesaria E. Emerging safety issues for biodiesel production plant Chemical Engineering Transaction. 2010; 19: 415-420.
- Uslander T, Bugel U, ICT 2013. Support for Efficient and Collaborative Risk Assessment Conference: Future Safety and Security Research in Europe. URL: <http://www.cztpis.cz/en/download/>.

Produzione di bioetanolo nell'impianto di Crescentino (Gruppo M&G) ed aspetti di sicurezza

Biancamaria Pietrangeli, Roberto Lauri

INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insedimenti Antropici, Roma

1. Il Gruppo Mossi & Ghisolfi

Il Gruppo Mossi & Ghisolfi (M&G) è stato fondato nel 1953 a Tortona (Alessandria) da Vittorio Ghisolfi. Sin dall'inizio, l'azienda si è occupata della produzione di imballaggi in plastica per il *packaging*. Lo sviluppo di M&G è stato caratterizzato da una forte crescita sui mercati mondiali nei settori delle plastiche e del poliestere, divenendo tra i leader mondiali del PET. Negli ultimi dieci anni il volume della produzione del Gruppo è circa triplicato, passando da 600.000 a 1,7 milioni di tonnellate di PET/annue. Consapevole della necessità di individuare nuove ed efficaci alternative alle problematiche poste dai prodotti chimici derivati dal petrolio, il Gruppo inizia nel 2006 una serie di ricerche da cui deriva la tecnologia Proesa®. Il Gruppo M&G ha un Centro Ricerche a Rivalta Scrivia (AL), che impiega circa 150 fra ingegneri, biotecnologi, chimici, che si occupano di R&S in tema di biocarburanti, chimica e tecnologie da fonti rinnovabili. È in fase di costruzione il Centro Ricerche di Modugno (Bari), che si occuperà di studio di processi catalitici per la valorizzazione della lignina, studi di modellazione e progettazione, ricerca su molecole base della chimica dei polimeri, ricerca su combustibili green (jet fuels, combustibili navali). Il centro impiegherà circa 50 persone e si estenderà su di una superficie di circa 13.000 m². Presso il Centro Ricerche di Rivalta Scrivia nel 2009 è stato messo a punto un impianto pilota continuo in cui sono stati testati più di dieci tipi di biomasse e svariati enzimi e microorganismi, costituendo quindi la base per la costruzione dell'impianto industriale. Nel 2012 è stato realizzato nel comune di Crescentino (VC), il primo impianto industriale al mondo per scala e tecnologia, per la produzione di bioetanolo di seconda generazione da biomassa lignocellulosica, con una capacità di produzione di 40.000 t/a (Figura 1). L'impianto utilizza biomasse lignocellulosiche disponibili in filiera locale (nel raggio di 40-70 km) non destinate al consumo alimentare (*Arundo donax*, *Miscanto*, *Panicum virgatum*), residui agricoli (bagasse della canna da zucchero, paglie, il tutolo e lo stocco del mais) ed eucalipto. Nello specifico, *Arundo donax*, ossia la comune canna di fosso, assicura una significativa capacità di sequestro di CO₂, cresce su terreni marginali, richiede un basso consumo di acqua, fertilizzanti e territorio (grazie all'elevata resa per ettaro). Inoltre la parte non utilizzabile della materia prima vegetale, la lignina, viene riutilizzata come combustibile per gli impianti di generazione elettrica in modo che l'impianto operi in totale autonomia. L'obiettivo più ambizioso del Gruppo M&G è la costruzione di filiere agroindustriali pienamente sostenibili, sia ambientalmente che economicamente, e la realizzazione di impianti commerciali su linea singola che possono produrre 150.000-200.000 t/a di bioetanolo. A livello nazionale la tecnologia Proesa® è in grado di soddisfare il mercato potenziale italiano pari a 1,5 milioni di tonnellate di bioetanolo: sarebbe sufficiente coltivare con *Arundo donax* il 3% dei terreni abbandonati in Italia per arrivare al traguardo del 2020. Sotto il profilo della competitività di prezzo, il bioetanolo di seconda generazione è più economico della benzina, anche con prezzi medi del greggio tra 60 e 70 dollari al barile.

Figura 1 - Impianto di Crescentino



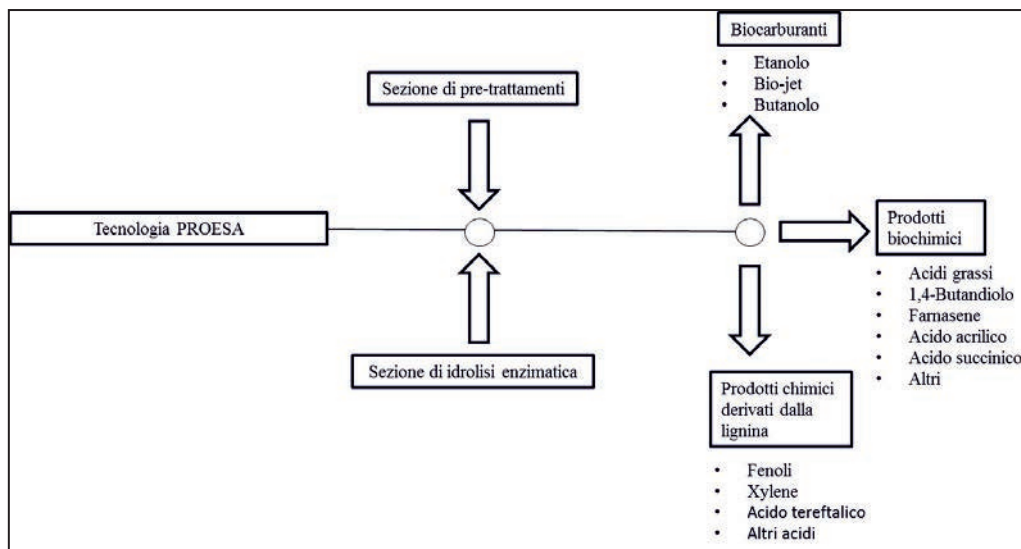
Fonte: Mossi & Ghisolfi

In base a quanto previsto dalla Direttiva 2009/28 dell'Unione Europea, la produzione di bioetanolo di seconda generazione da *Arundo donax* o dagli scarti della raccolta del mais e del riso significa abbattere le emissioni di gas serra di oltre 80 punti percentuali rispetto ai processi convenzionali per la produzione di benzina da petrolio, mentre il bioetanolo di prima generazione consente una riduzione di solo il 22%.

2. Prospettive di sviluppo del gruppo

L'impianto di Crescentino permette la produzione di zuccheri a basso costo che, grazie a successive modificazioni chimiche, possono costituire la base per una vera e propria bioraffineria, in grado di produrre un ventaglio di prodotti intermedi chimici, dai *fine chemicals* ai *bulk chemicals* (Figura 2). Proprietaria della tecnologia Proesa® è Beta Renewables, una *joint venture* tra BioChemtex (la società di ingegneria e R&D del Gruppo M&G), il fondo TPG (Texas Pacific Group) e la società danese Novozymes. Altra importante sinergia è quella con la società brasiliana GraalBio Investimentos S.A, con la quale M&G ha in progetto la costruzione del primo impianto di produzione di bioetanolo di seconda generazione in Brasile. Ad integrazione della ricerca condotta da BioChemtex in ambito di conversione di materie prime lignocellulosiche, è nato il Progetto MOGHI che intende studiare le possibili vie di trasformazione/valorizzazione della lignina in molecole ad alto valore aggiunto e/o in prodotti con mercati consolidati (come i BTX, monomeri per plastiche, ecc.). Tale progetto, permetterà di creare una nuova realtà produttiva capace di produrre in maniera sostenibile e competitiva *biochemicals*, derivanti da processi che coinvolgono l'utilizzo di biomasse lignocellulosiche non in competizione con la filiera alimentare.

Figura 2 - Step e prodotti della tecnologia Proesa®



Fonte: Mossi & Ghisolfi

BioChemtex ha soluzioni progettuali per convertire il bio-etanolo in bio-etilene, etilene ossido (EO) e/o monoetilen glicole (MEG). Il bio-etilene offre una serie di vantaggi, tra cui:

- una soluzione a basso investimento di capitale iniziale per generare una certa capacità di etilene, rispetto ai cracker tradizionali a gas naturale o a nafta;
- la possibilità di produrre etilene ossido a livello locale evitando così lo svantaggio di affrontare problematiche di sicurezza associate al suo trasporto su lunghe distanze;
- la possibilità di differenziarsi, mettendo sul mercato un prodotto "verde", per il quale vi è crescente richiesta da parte del consumatore.

Nel 2012 è stato progettato, costruito ed avviato a Taiwan uno degli impianti di deidratazione dell'etanolo più moderni al mondo, per la produzione di bio-etilene grado chimico. Il prodotto dell'impianto è successivamente trasformato in bio-MEG utilizzando a valle un'installazione preesistente.

3. Crescentino in cifre

Il progetto di Crescentino è stato sostenuto dalla Commissione Europea nell'ambito del Settimo Programma Quadro per la Ricerca e lo Sviluppo e dal Ministero dello Sviluppo Economico attraverso Industria 2015. La bioraffineria sorge su un'area di circa 15 ettari, che in precedenza ospitava la fonderia Teksid del Gruppo Fiat. L'area è stata scelta perché si trova al centro di un territorio a vocazione agricola, dispone di un collegamento ferroviario interno ed è relativamente vicina ai laboratori BioChemtex di Rivalta Scrivia, dove è stata sviluppata la tecnologia Proesa®. Inoltre, una parte della vecchia fonderia è stata riutilizzata trasformandola nel magazzino per la conservazione delle biomasse. Di seguito alcuni dati quantitativi relativi alla bioraffineria:

- valore investimento: 150 milioni di euro;
- superficie: 150.000 metri quadri;
- biomassa utilizzata: 270.000 t/a (alla massima potenzialità);

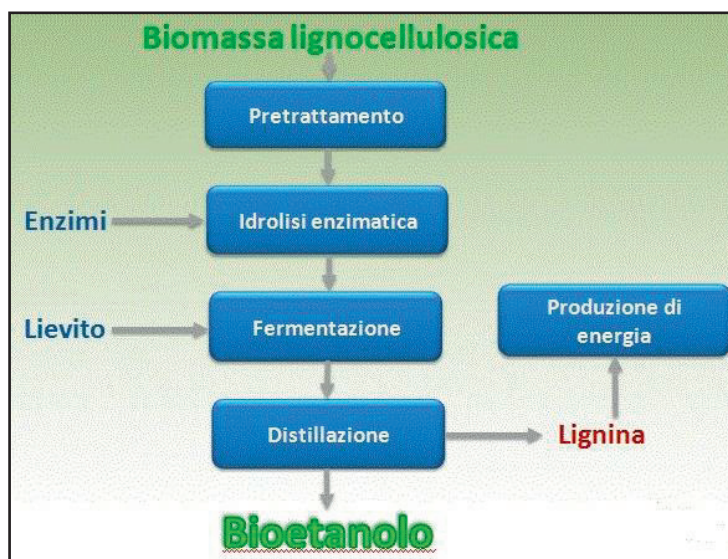
- capacità magazzino biomasse: 10.000 tonnellate;
- produzione: 40.000 tonnellate di bioetanolo/anno (potenzialità di 60.000 t/a);
- produzione di energia elettrica (la potenza installata è pari a 13 MW) utilizzando la lignina ottenuta nelle prime fasi del processo. Lo stabilimento è totalmente autosufficiente per i propri consumi energetici;
- riciclo dell'acqua: 100%. Dopo l'utilizzo l'acqua viene pulita, riciclata e riutilizzata all'interno dell'impianto, abbattendo così i consumi. Il biogas prodotto durante le fasi di depurazione dell'acqua viene alimentato alla caldaia per la produzione di vapore per il processo;
- addetti: circa 100.

4. La tecnologia Proesa®

In estrema sintesi Italian Bio Products S.p.A. (IBP) produce bioetanolo a partire da biomassa lignocellulosica. L'impianto può utilizzare una vasta gamma di biomasse lignocellulosiche (BLC) sia secca che umida. Le materie prime di riferimento considerate per la progettazione sono *Arundo donax* (umido, 60% circa di umidità) e paglia di grano (secca, 10% circa di umidità). *Arundo* viene trinciato sul campo ed alimentato entro pochi giorni all'impianto. La paglia essendo secca può essere stoccata per periodi più lunghi senza degradare e per questo si presta ad essere utilizzata come biomassa di emergenza da utilizzare quando non è disponibile *Arundo*. Come scarti di lavorazione si producono biogas e lignina. Il biogas viene utilizzato per alimentare tre caldaie per la produzione di vapore tecnologico necessario al ciclo produttivo, mentre la lignina viene utilizzata per l'alimentazione di una caldaia di maggiori dimensioni, che genera vapore destinato alla produzione di elettricità. Al termine della fermentazione delle materie prime si forma una sostanza sufficientemente liquida per essere pompabile (denominata "birra") formata da alcool, acqua e lignina per la parte rimanente. La birra è pompata nelle torri di distillazione, che concentrano l'alcool al 95%, mentre il rimanente 5% è acqua (alcool e acqua formano una miscela azeotropica).

Successivamente, un filtro biomolecolare provvede ad aumentare la concentrazione di alcool a valori superiori al 99%. L'alcool, così raffinato e stoccato in contenitori provvisori, è sottoposto a prove per verificarne la concentrazione; se la verifica è positiva viene trasferito nei serbatoi dello stoccaggio finale, dai quali sarà prelevato per essere caricato sui mezzi di trasporto (vagoni ferroviari ed automezzi). Una volta avviato, l'impianto funziona a ciclo continuo. Gli impianti di produzione dell'alcool etilico sono installati tutti all'aperto. Le attività produttive sono a ciclo continuo e quasi completamente automatizzate. In condizioni ordinarie, il lavoro è distribuito su tre turni di 8 ore. Nello specifico sono quattro i passaggi fondamentali per la produzione del bioetanolo da biomasse, come schematizzato in Figura 3.

Figura 3 - Il processo di produzione del bioetanolo da biomassa lignocellulosica



Fonte: Mossi & Ghisolfi

4.1 Pretrattamento

Le biomasse lignocellulosiche (BLC) sono costituite essenzialmente da polisaccaridi: cellulosa, emicellulosa e lignina. Il principale ostacolo, che si incontra nell'utilizzo delle BLC, è la difficoltà di accesso ai polisaccaridi: cellulosa ed emicellulosa sono la materia prima, che deve essere liberata dalla barriera di lignina. Lo scopo del pretrattamento è proprio quello di destrutturare la matrice lignocellulosica, separandola nelle componenti polimeriche principali, rendendole accessibili all'azione degli enzimi prevista nello step successivo. BioChemtex ha sviluppato un nuovo metodo di pretrattamento, che prevede l'utilizzo di vapor d'acqua saturo e consente di ottenere il rilascio dei polisaccaridi in modo rapido, con basso consumo energetico e senza l'aggiunta di prodotti chimici (ad es. acidi). Questo tipo di pretrattamento minimizza la formazione di prodotti di degradazione delle BLC, come ad esempio furfurale o idrossimetilfurfurale (5-HMF), che agiscono come inibitori del processo fermentativo che converte gli zuccheri in etanolo.

4.2 Idrolisi enzimatica

L'idrolisi è lo stadio del processo necessario ad ottenere zuccheri semplici dai polisaccaridi liberati con il passaggio di pretrattamento. L'idrolisi enzimatica è effettuata da un mix di enzimi cellulolitici, che permettono di ottenere esosi, come il glucosio, mentre la frazione composta dall'emicellulosa viene scissa in una miscela di zuccheri pentosi, di cui xilosio ed arabinosio, sono i componenti più abbondanti. Per l'idrolisi sono necessari almeno tre diversi enzimi: endocellulasi, esocellulasi e glicosidasi, che scindono selettivamente la cellulosa e permettono di ottenere gli zuccheri monomerici. L'emicellulosa, diversamente dalla cellulosa, è un etero polimero ramificato e si compone di diversi zuccheri. Per idrolizzarla efficacemente sono necessari non solo gli enzimi responsabili dell'idrolisi dei monomeri di xilosio che ne formano lo scheletro, ma anche altre attività enzimatiche accessorie, che scindono i legami tra lo xilosio e gli altri zuccheri presenti.

4.3 Fermentazione degli zuccheri a etanolo

Una volta ottenuta la soluzione di zuccheri attraverso il passaggio di idrolisi, si procede alla fase di fermentazione operata da un ceppo di *Saccharomyces cerevisiae* (coperto da brevetto). Il lievito, prima di essere inoculato nella soluzione di zuccheri, viene propagato fino a raggiungere non solo la concentrazione necessaria per il processo, ma anche lo stato metabolico ottimale ai fini della conversione. Al fine di aumentare le rese, il microrganismo utilizzato nel processo è stato studiato e selezionato al fine di renderlo capace di convertire tutti gli zuccheri liberati.

4.4 Distillazione

In quest'ultimo stadio, in un'apposita colonna di distillazione, si separa l'etanolo prodotto dal residuo di fermentazione, principalmente costituito da lignina. La corrente di etanolo esce dalla testa della colonna, mentre dalla coda viene recuperata la frazione solida. La lignina, avendo un alto potere calorifico, viene inviata ad una caldaia, per consentire l'auto-sostentamento ed una perfetta integrazione energetica dell'intero processo. La corrente di etanolo è sottoposta ad una fase di deidratazione, che permette di ottenere un prodotto puro al 99%.

5. Le bioraffinerie e le possibili implicazioni alla luce della Direttiva 2012/18/CE (Seveso III)

Lo sviluppo delle bioraffinerie pone alcuni problemi di valutazione e gestione del rischio, che vanno attentamente considerati, onde evitare incidenti rilevanti, che avrebbero conseguenze negative su un settore interessante per l'economia nazionale per molti motivi (indipendenza energetica, valorizzazione di terreni marginali per la produzione agro-industriale, sviluppo occupazionale in tutta la filiera impiantistica). In Tabella 1 si riportano le caratteristiche di pericolosità e le relative frasi di pericolo dell'etanolo e del biodiesel, confrontandoli con i prodotti ai quali sono alternativi (benzina e gasolio).

Tabella 1 - Caratteristiche di pericolosità delle sostanze

	Punto d'infiammabilità	Intervallo di esplosività	Fraasi di pericolo (secondo codifica CLP)
Benzina	- 40 °C	1,4% - 7,6%	H225 - 411
Etanolo	12 °C	3,5% -15%	H225- 319
Gasolio	56 °C	-	H226 - 304- 315-332-351- 373- 411
Biodiesel	52 °C	-	H226 - 304 - 315 – 332 – 351 – 373- 411

Le frasi di pericolo determinano che le sostanze rientrino anche nella classificazione ai fini del controllo del pericolo di incidente rilevante (Seveso). Si noti che ai fini della Seveso è ininfluente se il prodotto ha origine bio o chimica, contano solo le frasi di pericolo associate alla sostanza. Dal punto di vista normativo attualmente è ancora in vigore la Direttiva Seveso II [D.Lgs. 238/2005] basata sulla classificazione delle sostanze pericolose sui criteri della Direttiva Sostanze Pericolose DSD [Directive 67/548/EEC] e della Direttiva Preparazioni Pericolose (DPD) [Direttiva 1999/45/CE] per la classificazione di sostanze e miscele, ma in questo lasso di tempo, in base ai criteri del CLP, è stata anche ufficialmente pubblicata la Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) [Direttiva 2012/18/UE], che dovrà essere recepita da tutti gli stati membri prima del

giugno 2015. Il nuovo Regolamento relativo alla classificazione, all'etichettatura ed all'imballaggio delle sostanze e delle miscele (CLP) [Regolamento CE 1272/2008] abrogherà il DSD ed il DPD nel 2015. I limiti fissati dalla Direttiva Seveso per i liquidi facilmente infiammabili sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2 - Assoggettabilità Seveso di alcune sostanze in uso nelle bioraffinerie

Sostanza (ton.)	Art.6	Art.8
Liquidi infiammabili (Etanolo)	5.000	50.000
Gasolio, Olio Combustibile, Biodiesel	2.500	25.000
Metanolo	500	5.000

Ai fini del calcolo dei quantitativi vanno considerate:

- la massima capacità di stoccaggio totale dello stabilimento;
- la capacità dell'impianto stesso (*hold-up*), incluse colonne e tubazioni.

Per i depositi il secondo termine è trascurabile, mentre per gli impianti produttivi può influire in modo significativo. Il valore volumetrico ottenuto va convertito in termini ponderali, come richiesto dalla Direttiva, tenendo conto della densità dei singoli prodotti. Per quanto riguarda in particolare l'etanolo, che ha densità pari a 789 kg/m³, la soglia in termini volumetrici è 6.337 m³ (art. 6), mentre per il (bio)diesel i limiti volumetrici sono 2.941,176 m³.

5.1 Bioraffineria di Crescentino: valutazione dei quantitativi di bioetanolo ai fini dell'applicabilità della Direttiva Seveso

La bioraffineria di Crescentino è provvista di:

- n. 3 serbatoi di stoccaggio giornaliero, aventi ognuno un volume di 193 m³;
- n. 2 serbatoi di stoccaggio finale (quando il prodotto finito ha superato le analisi specifiche richieste), aventi ognuno un volume di 1.450 m³;
- n. 1 serbatoio di denaturante (le sue caratteristiche chimico-fisiche sono approssimabili a quelle dell'alcool etilico) di volume pari a 300 m³.

Pertanto la capacità complessiva dello stoccaggio è di 3.779 m³, a cui, per la corretta valutazione dei quantitativi presenti in impianto, vanno aggiunti i contributi delle torri di distillazione, delle tubazioni, dei filtri biomolecolari e dei mezzi di trasporto. Considerando un coefficiente di massimo riempimento pari a 0,9 (i serbatoi hanno un tetto fisso esterno ed uno flottante interno) il volume globale dello stoccaggio è di 3.401 m³. A tale valore si devono aggiungere 60 m³ totali tra torri, filtri e condotte e 1.200 m³ corrispondenti alla capacità di carico della ferrocisterna. Ne consegue che il quantitativo (q_i) di liquido facilmente infiammabile (etanolo) presente è pari a:

$$q_i = 3.401 + 60 + 1.200 = 4.661 \text{ m}^3$$

Il valore risulta inferiore alla soglia di 6.337 m^3 (art.6) riportata nella Direttiva Seveso. Qualora lo stabilimento avesse più di una sostanza sottosoglia, si dovrebbe calcolare la quantità equivalente, sommando i rapporti fra i quantitativi massimi e le rispettive soglie Seveso, secondo la formula seguente:

$$q_{eq} = \sum_i \frac{q_i}{Q_i} \quad (1)$$

dove:

q_i indica il quantitativo detenuto in stabilimento (ton);

Q_i rappresenta la soglia "Seveso" (ton);

q_{eq} è l'indice quantitativo equivalente.

A seconda del valore assunto dalla grandezza q_{eq} gli stabilimenti industriali possono rientrare nei seguenti articoli:

- 1) $q_{eq} < 1 \rightarrow$ art.5;
- 2) $1 \leq q_{eq} < 10 \rightarrow$ art. 6;
- 3) $q_{eq} > 10 \rightarrow$ art. 8.

5.2 Stabilimenti sottosoglia

Al di sotto dei limiti Seveso, si assume come poco credibile un coinvolgimento all'esterno e conseguentemente gli obblighi sono molto ridotti, ma non inesistenti. Per gli stabilimenti sotto soglia esistono obblighi molto circoscritti definiti dal comma 2 dell'art.5 del D.Lgs. 334/1999 di recepimento della Seveso II, che stabilisce che il gestore degli stabilimenti sottosoglia è comunque tenuto a provvedere:

- 1) all'individuazione dei rischi di incidenti rilevanti, integrando il documento di valutazione dei rischi di cui alla normativa in materia di sicurezza del lavoro [D.Lgs. 81/2008];
- 2) all'adozione delle appropriate misure di sicurezza e all'informazione;
- 3) alla formazione, all'addestramento ed all'equipaggiamento di coloro che lavorano in situ, come previsto dal Decreto del Ministro dell'Ambiente 16 marzo 1998 [D.M. 16/3/1998].

A seguito del Decreto Legislativo 21 settembre 2005, n. 238 [D.Lgs. 238/2005], è stato abrogato il comma 3 del Decreto Legislativo 17 agosto 1999, n. 334 [D.Lgs. 334/1999], che prevedeva ulteriori obblighi in termini di produzione documentale. Uno scenario possibile è che stabilimenti di produzione e/o stoccaggio di bioetanolo non superino i limiti Seveso, ma rientrino nella zona grigia dell'art. 5. A tal proposito si è riscontrata, nella bioraffineria di Crescentino (impianto sotto soglia), l'osservanza delle disposizioni, precedentemente riportate in questo paragrafo. Al di sotto delle soglie si esclude ragionevolmente la possibilità che eventuali incidenti possano coinvolgere l'esterno, cioè popolazione esterna o ambiente. Le conseguenze possibili sono all'interno (lavoratori ed impianto) e quindi possono essere gestite nell'ambito della sicurezza del lavoro, prevedendo misure adeguate di controllo.

6. La sicurezza nell'impianto di Crescentino: aspetti generali

Nell'ambito del Progetto sono stati studiati alcuni specifici aspetti di sicurezza relativi al ciclo produttivo dell'impianto IBP di Crescentino (VC). In particolare l'attenzione è stata focalizzata sulla gestione della sicurezza nello stoccaggio delle materie prime e dei prodotti di fermentazione, come dettagliato nei paragrafi seguenti.

Lo stabilimento oggetto dello studio è stato costruito a partire dal 2011 e i lavori si sono conclusi alla fine del 2012. Lo *start up* dell'impianto è avvenuto nei primi mesi del 2013.

Con riferimento agli adempimenti in materia di Valutazione di Impatto Ambientale, di cui alla Legge regionale 14 dicembre 1998, n. 40 e s.m.i. [L.R. 40/1998], il progetto è stato sottoposto a VIA ed il relativo giudizio positivo di compatibilità ambientale è stato reso con provvedimento n. 746 del 21 marzo 2011.

Con riferimento agli adempimenti in materia di Autorizzazione Integrata Ambientale, di cui al Decreto Legislativo 18 febbraio 2005 n. 59 [D.Lgs. 59/2005] e s.m.i., l'impianto non ricade nelle categorie progettuali per le quali è previsto il rilascio dell'autorizzazione integrata ambientale di cui all'art. 5 del D.Lgs. 59/2005 e s.m.i.

L'impianto è coerente con le Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili [D.M. 10/09/2010], con i disposti di cui alla Delibera della Giunta Regionale del 30 gennaio 2012 [D.G.R. 6-3315/2012] e con il Piano Paesaggistico Regionale. L'impianto non rientra in area della rete Natura 2000 e non ricade in zona sottoposta a tutela ai sensi del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 [D.Lgs. 42/2004].

L'impianto IBP non ricade nel campo di applicazione della Direttiva Seveso per impianti a rischio di incidenti rilevanti e smi [D.Lgs. 334/1999].

In merito alla Legislazione antincendio, l'impianto è in possesso del Certificato Prevenzione Incendi, rilasciato dal competente comando dei Vigili del Fuoco di Vercelli in data 21/12/2012. L'impianto IBP è stato progettato e realizzato sulla base di valutazioni del rischio rispondenti ai requisiti normativi vigenti. Le macchine dell'impianto sono realizzate in conformità al Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n. 17 (Direttiva macchine) [D.Lgs. 17/2010] e sono dotate di sistemi di prevenzione e protezione necessari (protezioni, barriere, coibentazioni, valvole di sicurezza, dischi di rottura). I processi sono controllati in modo prevalentemente automatico e condotti mediante sistemi di supervisione che permettono agli operatori di gestire la produzione direttamente dalla sala controllo da DCS. Le poche postazioni operative in prossimità dei macchinari sono dotate di protezioni tali da assicurare lo svolgimento delle attività in completa sicurezza.

In relazione alla valutazione del rischio di formazione di atmosfere esplosive, le specifiche sezioni di impianto e apparecchiature, che ricadono in questo ambito, sono dotate di sistemi di allarme e sono realizzate in conformità alla Direttiva Atex [Direttiva 94/9/CE] e conseguenti Recepimenti di Legislazione Nazionale [D.P.R. 126/1998]. In relazione alla valutazione del rischio di apparecchiature a pressione, le specifiche sezioni di impianto, che ricadono in tale ambito, sono realizzate in conformità alla Direttiva PED [Direttiva 97/23/CE] in materia di attrezzature a pressione e conseguenti Recepimenti di Legislazione Nazionale [D.Lgs. 93/2000].

Tutti gli aspetti rilevanti, che attengono al Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n. 81 [D.Lgs. 81/2008], sono stati classificati, valutati e monitorati.

L'impianto IBP è inoltre certificato dal 29 maggio 2013 secondo lo schema Volontario di Tracciabilità delle

biomasse, International Sustainability & Carbon Certification [ISCC - EU] e lo schema Nazionale ICIM - RED di certificazione per i biocarburanti e bioliquidi [D.Lgs. 23/1/2012], discendenti dalla Direttiva 2009/28/CE nota come Direttiva RED. Gli schemi di certificazione ISCC - EU e ICIM RED operano sulla base dei principi di qualità ISO 9000 [ISO 9001:2008] ai quali IBP si attiene, pur non essendo ancora certificata secondo quest'ultimo schema.

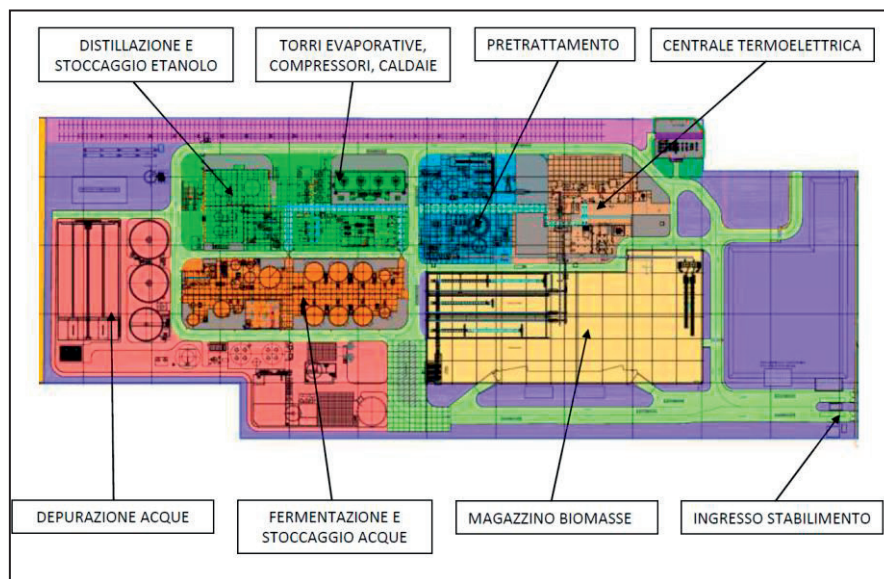
7. Aspetti di sicurezza approfonditi nell'ambito del Progetto

Grazie all'ampia disponibilità dimostrata dal Gruppo M&G è stato possibile esaminare numerosi documenti relativi alla valutazione e gestione dei rischi per la salute e la sicurezza nell'impianto di Crescentino.

La valutazione dei rischi occupazionali è stata effettuata per ciascuna mansione dei lavoratori adibiti alle diverse attività nello stabilimento, in rapporto al relativo tempo di esposizione, considerando le percentuali di stazionamento del lavoratore presso ogni area produttiva valutata.

In Figura 4 sono riportate le aree dello stabilimento Italian Bio Products (IBP).

Figura 4 - Rappresentazione schematica delle aree dello stabilimento Italian Bio Products (IBP) di Crescentino



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Dall'esame delle lavorazioni previste nelle differenti aree dello stabilimento ed in considerazione dei materiali impiegati l'attenzione si è focalizzata sugli aspetti di sicurezza ritenuti di maggior rilievo, quali quelli relativi a:

- rischi per la sicurezza connessi alla possibile formazione di miscele esplosive e rischi per la salute dovute alla presenza di polveri di paglia nelle zone di stoccaggio delle biomasse;
- rischi per la sicurezza nell' area fermentazione;
- gestione della sicurezza connessa alle condizioni di stoccaggio del bioetanolo in relazione al rischio incendio ed esplosione.

7.1 Valutazione e controllo del rischio connesso alle operazioni condotte nel magazzino biomasse

Il magazzino biomasse è costituito da un'area coperta di circa 20.000 m² al di sotto della quale vengono stoccate le biomasse, che saranno poi utilizzate nel processo produttivo. L'area è suddivisa in due zone: una per lo stoccaggio della materia prima fresca (*Arundo donax*, cippato, ecc.) e l'altra per la biomassa secca (paglia). Nell'area sono presenti inoltre i nastri trasportatori, che provvedono al trasferimento delle biomasse alla centrale termoelettrica o alla zona del pretrattamento. All'interno dell'area e nelle immediate vicinanze vi è un elevato transito di mezzi di trasporto (trattori e camion) e di movimentazione materiale (carrelli elevatori). Nel magazzino biomasse l'attività è sostanzialmente suddivisa nella ricezione delle biomasse dai fornitori esterni e nello stoccaggio, che avviene giornalmente. Quotidianamente l'addetto fornisce le istruzioni ai conducenti dei veicoli circa le operazioni da compiere e l'area in cui depositare il carico e seguire le operazioni di scarico. Nel caso delle biomasse arundo/cippato il lavoratore aziona quindi le coclee ed i nastri che, dalla fossa di scarico, trasportano la biomassa alle tre vasche di stoccaggio. Lo stoccaggio avviene quindi in modo automatizzato senza che l'addetto abbia un ruolo, se non di controllo in remoto, nello stesso. Nel caso della paglia, l'addetto provvede allo stoccaggio delle balle nelle aree appositamente individuate con segnaletica orizzontale, attraverso l'utilizzo di mezzi di movimentazione. L'attività di alimentazione e gestione dell'impianto consiste nel prelevare dal magazzino le balle di paglie e posizionarle, con l'ausilio di mezzi di movimentazione, sulla parte iniziale dell'impianto di sminuzzamento. La conduzione dell'impianto paglia è limitata ad una supervisione a bordo impianto o da sala di controllo senza che l'addetto esegua vere e proprie operazioni manuali. L'attività inoltre prevede che l'addetto garantisca il corretto funzionamento dei nastri di trasporto della biomassa (cippato/arundo/paglia) dalle vasche di stoccaggio e/o dall'impianto paglia alla caldaia o al pretrattamento. Sono previste eventuali ispezioni lungo le passerelle adiacenti al nastro. Nella zona della biomassa secca vi sono alcune zone classificate a rischio esplosione debitamente segnalate da cartellonistica. La zona di deposito delle biomasse è coperta da un sistema antincendio automatico. La valutazione del rischio, relativa alle operazioni condotte nel magazzino biomasse, viene effettuata in considerazione delle disposizioni riportate nel Titolo IX (sostanze pericolose) e nel Titolo XI (protezione da atmosfere esplosive) del D.Lgs. 81/2008. In tale ambiente di lavoro è possibile che in alcune zone si venga a creare temporaneamente un'elevata concentrazione di polveri aerodisperse. Gli effetti negativi dell'esposizione a polveri durante l'attività lavorativa devono essere considerati sia relativamente alla sicurezza che alla salute. Elevate esposizioni a polveri possono comportare, in determinati casi, rischi di incendio o di esplosione. La deposizione di polveri al suolo può rendere la pavimentazione molto scivolosa e, quindi, insicura. Infine l'esposizione a polveri, anche quando occorra in ambienti aperti, non confinati, può essere all'origine di malattie a carico dell'apparato respiratorio e di altri apparati [Eduard W et al., 2012]. Inoltre l'area oggetto di valutazione è caratterizzata da una probabile presenza di polveri di legno durante le operazioni di scarico del cippato/arundo. Il cippato di legno è ragionevolmente composto anche da legni duri classificati dallo IARC come potenzialmente cancerogeni. A tale scopo è stato pianificato un monitoraggio ambientale finalizzato alla determinazione della concentrazione di polveri aerodisperse.

7.2 Valutazione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori derivante dalla formazione di miscele esplosive dovute a polveri organiche

La valutazione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori derivanti dalla formazione di miscele esplosive, è in ottemperanza a quanto richiesto dall'art. 17 del Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n. 81 e dal Titolo XI (artt. 287-297) del medesimo Decreto [D.Lgs. 81/2008] e costituisce la necessaria integrazione del documento generale di valutazione del rischio. Il D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. impone infatti al datore di lavoro i seguenti obblighi:

- adottare, ai fini della prevenzione e della protezione contro le esplosioni, le misure tecniche ed organizzative adeguate alla natura dell'attività (con particolare riferimento alla prevenzione della formazione di miscele esplosive);
- qualora la natura dell'attività non consenta di evitare la formazione di miscele esplosive, il datore di lavoro deve evitare l'accensione delle stesse ed attenuare gli effetti di un'esplosione in modo da tutelare la salute e la sicurezza dei lavoratori.

Nell'assolvere gli obblighi stabiliti dall'art. 29, il datore deve valutare i rischi specifici derivanti da atmosfere potenzialmente esplosive, considerando i seguenti elementi:

- probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
- probabilità che le sorgenti di accensione diventino attive ed efficaci;
- caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processi e loro possibili interazioni;
- entità degli effetti prevedibili.

Al fine di salvaguardare la sicurezza e la salute dei lavoratori il datore/gestore dell'impianto prende i provvedimenti necessari affinché:

- dove possono svilupparsi atmosfere esplosive in quantità tale da mettere in pericolo la sicurezza e la salute dei lavoratori o di altri, gli ambienti di lavoro siano strutturati in modo che il lavoro possa svolgersi in condizioni di sicurezza;
- negli ambienti di lavoro in cui possono svilupparsi atmosfere esplosive in quantità tale da mettere in pericolo la sicurezza e la salute dei lavoratori o di altri sia garantito un adeguato controllo durante la presenza dei lavoratori, in funzione della valutazione del rischio, mediante l'utilizzo di mezzi tecnici adeguati.

Nell'assolvere questi obblighi il datore di lavoro provvede ad elaborare ed a tenere aggiornato un documento, denominato "Documento sulla protezione da atmosfere esplosive". Tale Documento deve precisare, in particolare:

- che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- che sono state adottate adeguate misure per prevenire la formazione di atmosfere esplosive o, qualora ciò non sia possibile, evitarne l'accensione ed attenuare gli effetti pregiudizievoli di un'esplosione in modo da garantire la sicurezza e salute dei lavoratori;
- quali sono i luoghi che sono stati classificati nelle zone di cui all'Allegato XLIX al Decreto di riferimento;

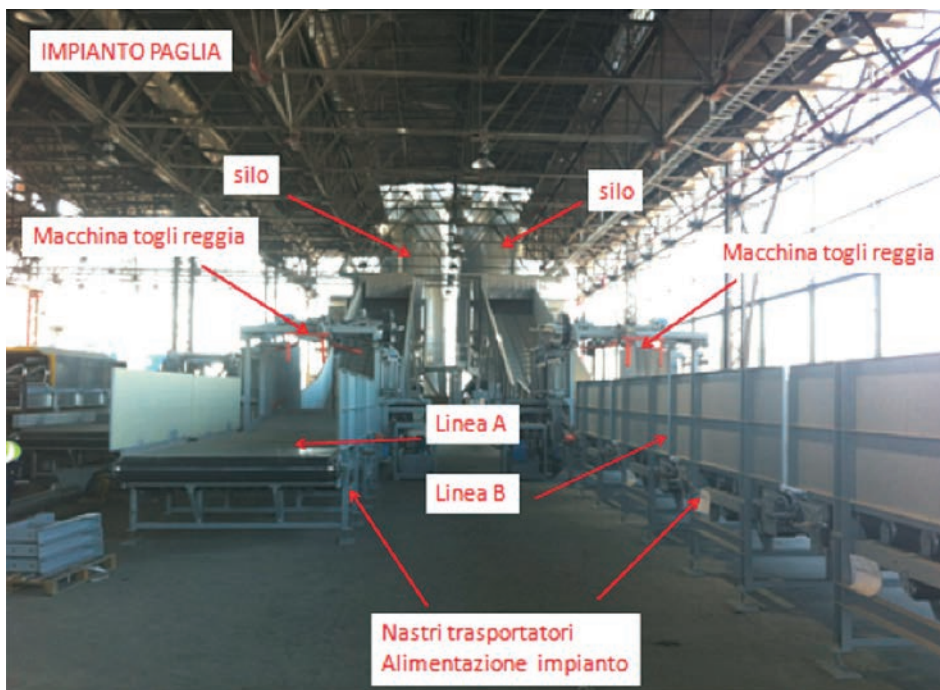
- quali sono i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime di cui all'Allegato L al Decreto di riferimento;
- quali sono i luoghi segnalati o da segnalare di cui all'Allegato LI;
- che i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, sono concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- che sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego sicuro delle attrezzature di lavoro.

Il documento, di cui trattasi, deve essere rivisto ed aggiornato qualora i luoghi di lavoro, le attrezzature o l'organizzazione del lavoro abbiano subito modifiche, ampliamenti o trasformazioni rilevanti. Le considerazioni riportate in questo paragrafo valgono anche per la valutazione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori, derivanti dalla formazione di atmosfere esplosive, dovute alla presenza di etanolo. Pertanto la trattazione riguardante le miscele potenzialmente esplosive, che potrebbero essere generate da rilasci di etanolo, parte direttamente dall'individuazione delle zone "pericolose".

7.3 Impianto di stoccaggio della paglia

Nell'impianto di stoccaggio (capannone coperto, privo di tamponamenti laterali) la paglia è immagazzinata in forma di balle. Le balle vengono caricate su un nastro trasportatore, che alimenta la macchina che provvede a tagliare le reggette o le reti, che tengono legata la paglia. La paglia è quindi avviata attraverso un altro nastro trasportatore alla macchina trinciatrice (o mulino sfibratore) che provvede a sminuzzarla in piccoli frammenti, idonei per la trasformazione biochimica. La paglia sminuzzata è portata fuori dalla trinciatrice attraverso una coclea, che a sua volta alimenta un impianto di trasporto pneumatico. In questa fase due magneti provvedono ad eliminare eventuali piccoli frammenti metallici, mentre una "trappola" provvede all'eliminazione di parti solide pesanti, come pietre, ecc. Il trasportatore pneumatico trasporta la paglia macinata in un silos, la cui parte alta è foggata a ciclone con la funzione di separare la paglia. La parte bassa del silos svolge la funzione di polmone. L'aria è inviata ad un filtro a maniche, che provvede a trattenere la polvere, prima di scaricare l'aria in atmosfera attraverso il camino. L'impianto è composto da due linee in parallelo, ad eccezione del camino di scarico in atmosfera, che è unico per i due impianti. Le attività produttive sono a ciclo continuo e quasi completamente automatizzate. Nelle Figure 5, 6 e 7 sono riportate le sezioni dell'impianto di alimentazione della paglia descritte.

Figura 5 - Sezione dell'impianto di alimentazione della paglia dove sono visibili le 2 linee in parallelo e le macchine togli reggia



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Nella zona sud-ovest del magazzino biomasse è stoccata una notevole quantità di cippato/arundo quantificabile in circa 9.000 tonnellate.

Figura 6 - Sezione dell'impianto di alimentazione della paglia dove sono visibili i filtri a maniche, l'aspiratore corazzato ed il camino



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Nelle restanti parti viene depositata la paglia in balle in quantità massima di 2.500 tonnellate. Il magazzino risulta avere pertanto un elevato carico di incendio. L'intera superficie è coperta da un impianto di estinzione incendi automatico, che si aziona mediante la rilevazione di fuochi grazie a strisce termosensibili poste a soffitto.

Figura 7 - Sezione dell'impianto di alimentazione della paglia dove è visibile il mulino sfibratore



Fonte: Mossi & Ghisolfi

7.4 Monitoraggio ambientale per la determinazione delle polveri

Ai fini della valutazione del rischio ai sensi degli artt. 223 e 236 del D.Lgs. 81/2008, l'azienda ha previsto un monitoraggio ambientale per la determinazione delle polveri (totali e respirabili) nell'ambiente di lavoro.

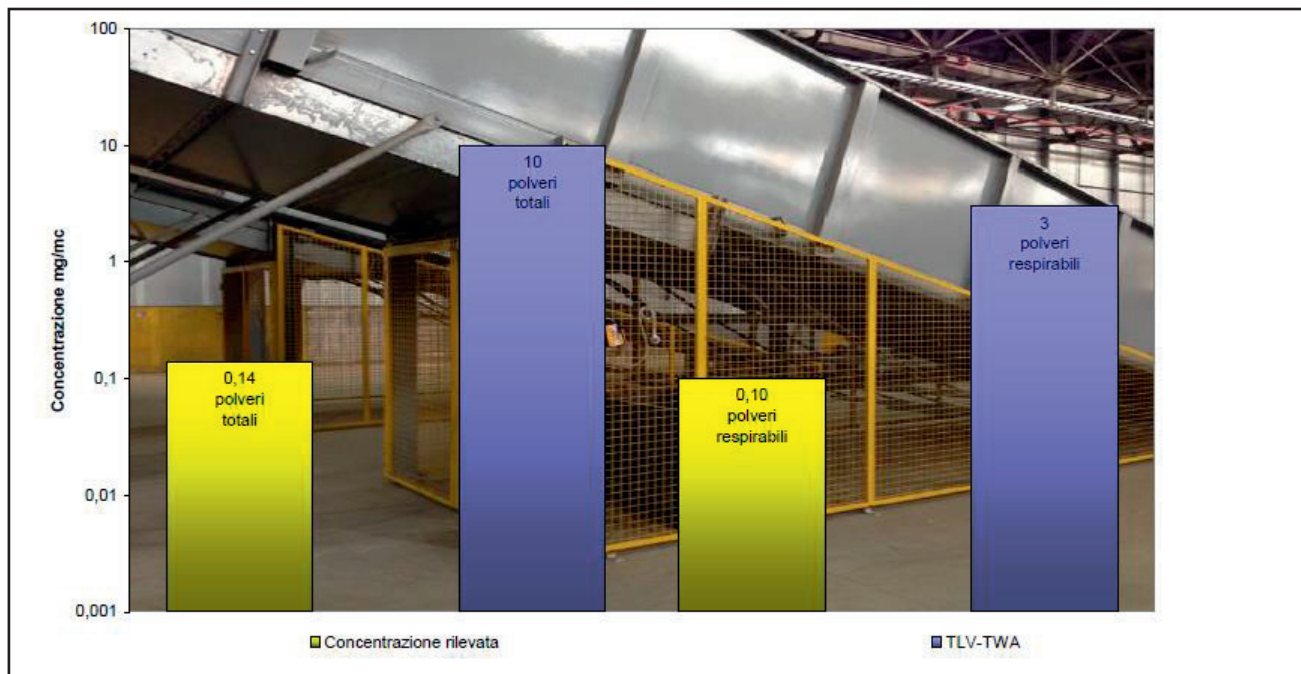
- I valori di TLV-TWA presi a riferimento sono pari a 10 mg/m^3 per le polveri totali e 3 mg/m^3 per quelle respirabili [ACGIH, 2012];
- La concentrazione di polveri totali è stata determinata mediante campionamento su filtri in esteri misti di cellulosa e successiva determinazione gravimetrica, mentre la concentrazione di polveri respirabili è stata determinata mediante campionamento con selettore di tipo Dorr-Oliver su filtri in esteri misti di cellulosa e successiva determinazione gravimetrica.

Le postazioni sottoposte a monitoraggio sono state:

1. il centro ambiente magazzino;
2. l'impianto paglia (campionamento area di lavoro e personale su operatore);
3. l'area di scarico del cippato (su operatore);
4. l'operazione di pulizia della pavimentazione dell'impianto paglia (su operatore);
5. l'area *pretreatment biomass feeder*.

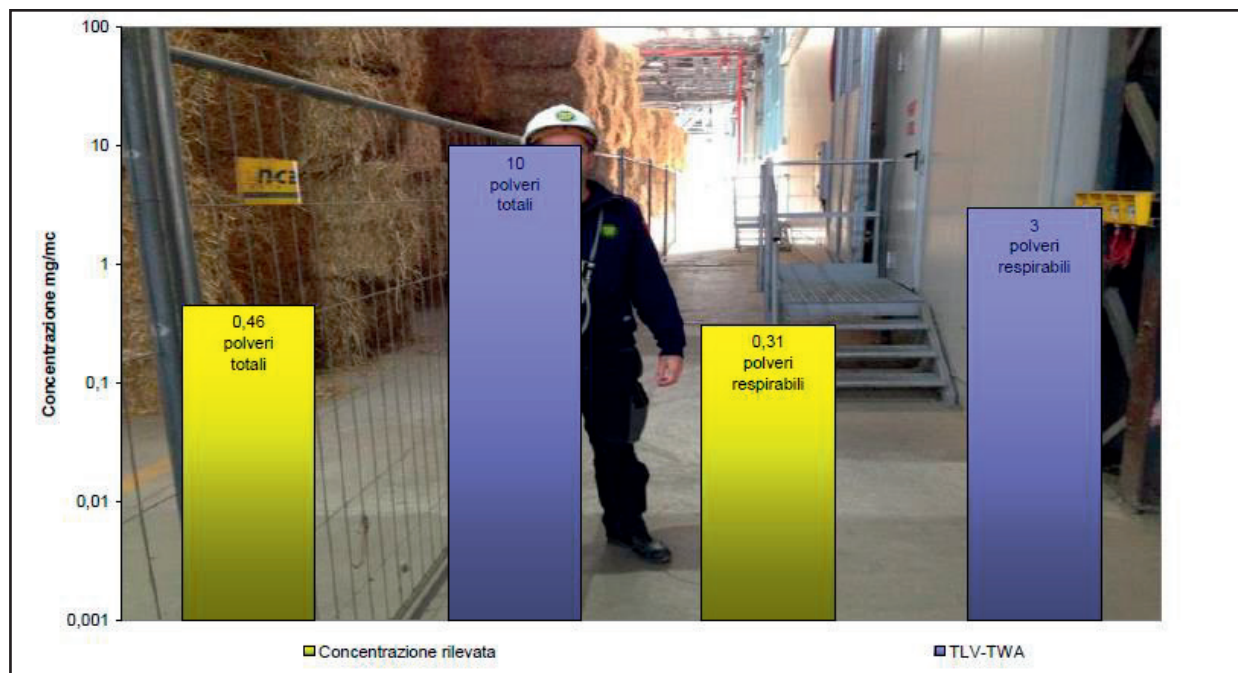
Nelle Figure 8, 9 e 10 si riportano i risultati dei monitoraggi di alcune delle postazioni campionate in relazione al valore di TLV-TWA di riferimento.

Figura 8 - Risultati monitoraggio polveri nell'area dell'impianto paglia



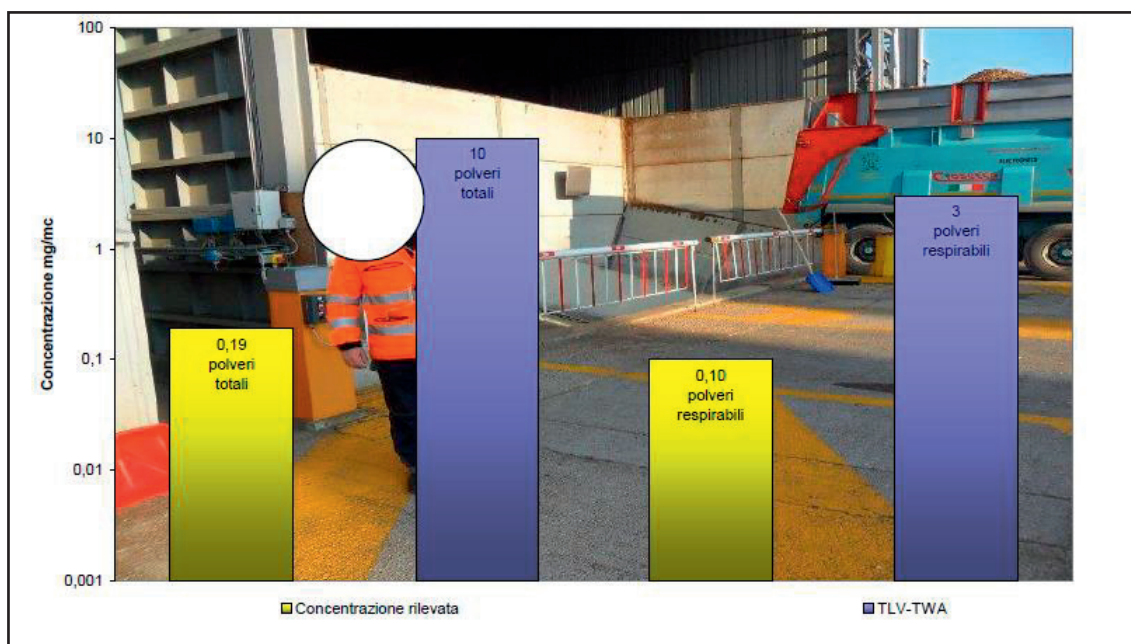
Fonte: Mossi & Ghisolfi

Figura 9 - Risultati monitoraggio polveri del campionamento su personale addetto impianto paglia



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Figura 10 - Risultati del monitoraggio polveri del campionamento su personale addetto all'area scarico cippato



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Dai risultati del monitoraggio ambientale si evince che in tutte le postazioni la qualità ambientale in riferimento alla concentrazione di polveri può essere considerata accettabile.

7.5 Operazioni a potenziale pericolo esplosione nel magazzino biomasse e misure di prevenzione e protezione

In condizioni di funzionamento ordinario, le lavorazioni nel magazzino biomasse, sono quasi completamente automatizzate, se si esclude il carico delle balle di paglia. Secondo le zone di lavoro ed il tipo di lavorazioni svolte, durante il funzionamento ordinario non vi sono operazioni che avvengono in luoghi con pericolo di esplosione. Tuttavia, considerando anche operazioni di funzionamento anomalo, si individuano le seguenti operazioni potenzialmente pericolose:

- operazioni di manutenzione in corrispondenza di zone classificate come potenzialmente esplosive;
- operazioni di manutenzione in zone con accumulo di polvere;
- operazioni di conduzione e sorveglianza generica, quali lettura di strumenti, regolazioni, tarature.

Dall'analisi delle lavorazioni previste sono state individuate due zone dove possono essere presenti miscele esplosive dovute a polveri: una risulta essere all'esterno dei silos (lato ovest dell'impianto), limitata ad un raggio di tre metri attorno agli stessi ed estesa per tutta l'altezza dei silos e l'altra è sopra il tetto dei silos. Nelle restanti aree del magazzino biomasse, è esclusa la possibilità di formazione di atmosfere esplosive. Nella valutazione del rischio sono state considerate le misure di prevenzione e protezione adottate ossia tutte le misure in atto, sia quelle in conformità con norme tecniche e di legge che quelle aggiuntive. Oltre alle misure tecnologiche relative a macchine, impianti e attrezzature (omologati ATEX), le zone interessate sono protette contro i fulmini. A fini preventivi è garantita una corretta organizzazione del lavoro e manutenzione

dell'impianto, è presente apposita cartellonistica e segnaletica, il personale è formato ed addestrato per il rischio specifico, è previsto l'uso di procedure ed istruzioni operative, di DPI e delle attrezzature di sicurezza.

Sono inoltre previste disposizioni specifiche per:

- l'uso di calzature antistatiche e di attrezzi antiscintilla da parte del personale;
- il divieto di salire sul tetto dei silos durante il funzionamento;
- il divieto di effettuare manutenzioni in presenza di polveri.

Dal punto di vista organizzativo il personale, che opera nelle zone con pericolo di esplosione (addetto alla produzione, alle manutenzioni od alla pulizia), riceve opportuna informazione/formazione ed effettua le attività di competenza osservando le Procedure Aziendali definite e formalizzate con i Permessi di Lavoro ad Alto Rischio. L'obbligo di osservanza delle procedure definite vige anche per il personale non dipendente, che opera all'interno dello Stabilimento e che interviene in zone classificate a rischio. Per ciascuna zona è disponibile un numero sufficiente di operatori aventi i requisiti di esperienza e formazione per autorizzare, coordinare, controllare ed eseguire le necessarie attività. Nell'ambito della formazione sulla sicurezza ed igiene sul lavoro sono previste sessioni formative ed informative *ad hoc* per il rischio esplosione e specifiche procedure per le seguenti operazioni, che comportano la presenza di potenziali pericoli di esplosione dovuti alle polveri:

- lavori a caldo (saldatura, taglio, ecc.);
- gestione modifiche;
- *by-pass* sistemi di sicurezza;
- sicurezza in caso di *black out*;
- programmazione pulizia impianti/ambiente di lavoro;
- gestione e coordinamento degli appaltatori.

L'attività di riparazione in zone pericolose è garantita tramite appropriate procedure con l'impiego di Permessi di Lavoro. Le attività di ispezione e verifica periodica nelle aree, che possono comportare la presenza di atmosfere potenzialmente esplosive, sono svolte da personale competente.

Sono sottoposti a verifica periodica con la frequenza prevista dai costruttori delle apparecchiature o in funzione di specifiche esigenze interne, i seguenti componenti critici:

- sistemi di messa a terra;
- sistemi di sfogo delle esplosioni;
- sistemi di compartimentazione delle esplosioni;
- rilevatori di pressione;
- logiche di controllo e comando.

L'attività lavorativa viene monitorata anche in funzione dei possibili depositi di polvere per evitare che il rischio incendio diventi significativo. A tale scopo sono previste operazioni di pulizia dei locali con l'utilizzo di aspiratori mobili, idonei all'impiego in aree, che presentano il rischio di esplosione.

È assolutamente vietata la pulizia con aria compressa. Le operazioni di pulizia sono giornaliere per la pavimentazione del magazzino e settimanali per i macchinari. La frequenza di pulizia può aumentare in funzione del grado di polverosità presente, onde evitare accumuli anche lievi di polvere soprattutto in prossimità dei componenti critici (motori elettrici, giunti flessibili, ecc.). Nelle Figure 11 e 12 sono mostrati i mezzi adibiti alle operazioni di pulizia.

Figura 11 - Mezzo adibito alle operazioni di pulizia dell'area magazzino con cabina chiusa e spazzole con immissione di acqua per ridurre la polverosità



Fonte: Mossi & Ghisolfi

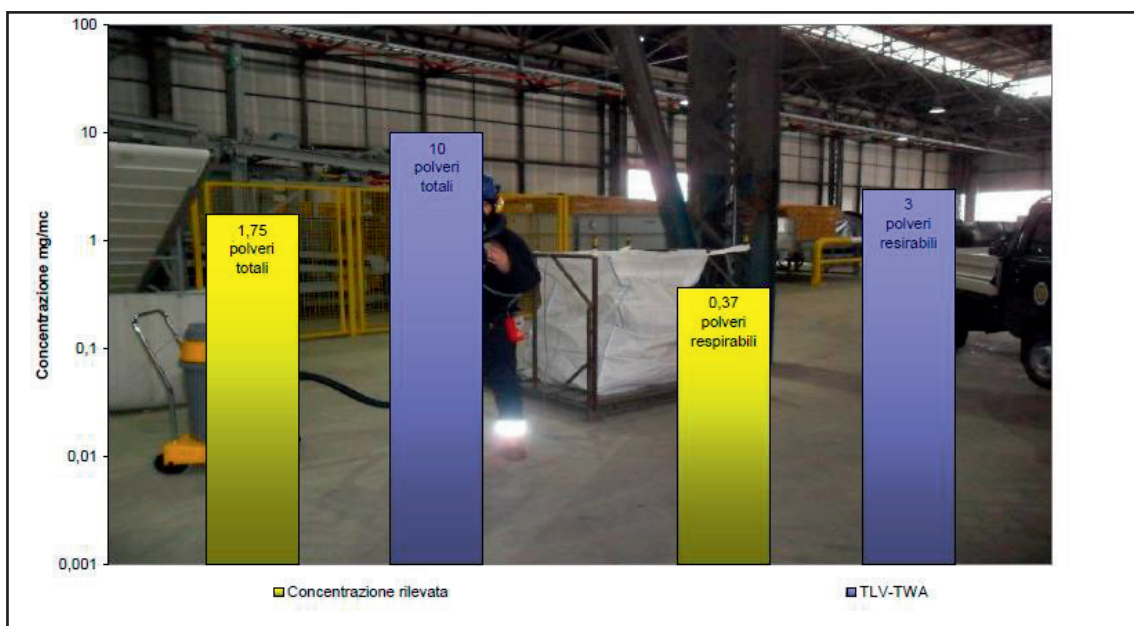
Figura 12 - Motoscopa con installazione del tubo flessibile per aspirare sulle superfici sopraelevate



Fonte: Mossi & Ghisolfi

In Figura 13 vengono riportati i risultati del campionamento polveri su operatore durante la routinaria operazione di pulizia.

Figura 13 - Risultati monitoraggio polveri del campionamento personale addetto durante routinaria operazione di pulizia



Fonte: Mossi & Ghisolfi

In Tabella 3 sono riassunte le misure di prevenzione e di protezione adottate nel magazzino biomasse.

Tabella 3 - Misure di prevenzione e di protezione adottate nel magazzino biomasse

Possibile eventi incidentali o pericolo di contaminazione	Misure adottate			
	Per prevenire l'evento ipotizzato		Per mitigare l'evento ipotizzato	
	Sistemi organizzativi e gestionali	Sistemi tecnici	Sistemi organizzativi e gestionali	Sistemi tecnici
Impianto paglia (Fuoriuscita di polveri di paglia con formazione di cumuli, strati o nubi nell'ambiente esterno)	Presidio costante da parte del personale durante il funzionamento dei macchinari	Compartimentazione dei nastri di trasporto delle balle di paglia	Piano di pulizia giornaliera della pavimentazione per la rimozione degli strati di polvere	
	Videosorveglianza costante dell'area	Compartimentazione silos contenenti paglia sminuzzata	Piano di pulizia settimanale dei macchinari per la rimozione degli strati di polvere	
		Sistemi di filtrazione delle polveri successivi ai silos	Squadre di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici	
		Compartimentazione del nastro di trasporto della paglia sminuzzata al pretrattamento		
Impianto paglia (Esplosione nube di polvere di paglia all'interno dei reparti)	Utilizzo indumenti e dpi antistatici	Impianti elettrici conformi alla Direttiva Atex	Squadre di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici	Sistema di spegnimento incendio automatico attivato da strisce termosensibili a soffitto
	Utilizzo attrezzatura antideflagrante	Impianti di trasporto e stoccaggio collegati alla rete di terra		Idranti
	Autorizzazione preventiva tramite permesso di lavoro per i lavori a caldo			Estintori carrellati
	Divieto di fumo			
	Divieto di salire sul tetto dei silos durante il funzionamento;			
	Divieto di effettuare manutenzioni in presenza di polveri			
	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra			
Impianto paglia (Incendio di cumuli, strati di polvere nell'ambiente esterno)	Autorizzazione preventiva tramite permesso di lavoro per i lavori a caldo	Sistema conta scintilla all'interno dei silos	Squadre di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici	Sistema di spegnimento incendio automatico attivato da strisce termosensibili a soffitto
	Divieto di fumo			Idranti
	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra			Estintori carrellati
Impianto paglia (Inalazione frazione respirabile polveri)	Gestione impianto da sala controllo posta nelle vicinanze	Compartimentazione dei nastri di trasporto delle balle di paglia	Piano di pulizia giornaliera della pavimentazione per la rimozione degli strati di polvere	Utilizzo filtranti facciali durante le operazioni che possono comportare una esposizione eccessiva a polveri
	Pattugliamento dell'impianto limitato allo stretto necessario	Compartimentazione silos contenenti paglia sminuzzata		
	Videosorveglianza costante dell'area	Sistemi di filtrazione delle polveri successivi ai silos	Piano di pulizia settimanale dei macchinari per la rimozione degli strati di polvere	
		Compartimentazione del nastro di trasporto della paglia sminuzzata al pretrattamento		
Scarico cippato (Incendio di cumuli, strati di polvere nell'ambiente esterno)	Autorizzazione preventiva tramite permesso di lavoro per i lavori a caldo		Squadre di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici	Sistema di spegnimento incendio automatico attivato da strisce termosensibili a soffitto
	Divieto di fumo			Idranti
	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra			Estintori
Scarico cippato (Inalazione frazione respirabile polveri)	Obbligo di non sostare a meno di 15 metri dal veicolo durante lo scarico del cippato		Piano di pulizia giornaliera della pavimentazione per la rimozione degli strati di polvere	Utilizzo filtranti facciali durante le operazioni, che possono comportare una esposizione eccessiva a polveri

8. Gestione della sicurezza nell'area fermentazione

L'area di fermentazione è posta in zona completamente all'aperto. Prima di iniziare ad alimentare i fermentatori (sei da circa 2.000 m³ ognuno) vengono preparati gli inoculi di lieviti attraverso due appositi reattori (propagatori). Il ciclo di fermentazione dura circa tre giorni ed al termine si ottiene la soluzione composta da lignina ed acqua con un contenuto di etanolo variabile, che viene trasferito automaticamente al serbatoio di stoccaggio di circa 2.200 m³ dal quale il prodotto viene trasferito in continuo alla zona di distillazione.

In relazione al pericolo esplosione, la bassa concentrazione di alcool nel liquido di fermentazione (birra) consente di assimilare la zona ad una fabbrica di birra o ad una cantina nelle quali il pericolo di esplosione dovuto all'alcool è inesistente. Per questo motivo le sorgenti di emissione significative ai fini del pericolo di esplosione si considerano assenti. In assenza di sorgenti di emissione, sono assenti anche le zone con pericolo di esplosione.

Il ciclo di fermentazione avviene in modo del tutto automatizzato ed i lavoratori hanno il compito di controllare in remoto (da sala controllo) il corretto funzionamento dell'impianto (livelli dei recipienti, flussi, temperature e altri indicatori di processo). Ogni operatore riceve formazione specifica per le attività di pertinenza per la gestione in sicurezza delle stesse. Una volta a turno eseguono un pattugliamento in tutte le zone dell'impianto al fine di verificare l'assenza di anomalie ed eseguire il prelievo di campioni nei propagatori ed in ciascun fermentatore.

Al termine di ogni *batch* di fermentazione il reattore viene sterilizzato con vapore. Non esistono flussaggi con azoto in alcuna zona di impianto, mentre questo gas inerte è disponibile per bonificare i serbatoi di stoccaggio in caso di manutenzioni straordinarie. I sistemi di sicurezza quali valvole di sicurezza o dischi di rottura sono installati nelle zone impiantistiche ove possono esserci anomali incrementi di pressione oltre il valore di *design* di apparecchiature, strumenti o linee.

Gli enzimi ed i *chemicals* di maggior utilizzo (potassa, soda, acido solforico, urea, antifoam, acido cloridrico, acqua ossigenata) sono gestiti in circuito chiuso mediante appositi serbatoi dotati di bacini di contenimento. Sono dislocati presso le aree di interesse, appositi contenitori con kit per assorbimento di spandimenti accidentali.

Non è previsto l'uso di solventi.

L'operazione di prelievo giornaliero dei campioni viene effettuata nei punti di campionamento dislocati sull'impianto e consiste nell'aprire specifiche valvole da cui fuoriescono le fasi da campionare per le successive analisi. Il lavaggio delle apparecchiature avviene tramite circuito dedicato (*cleaning inside piping*) contenente una soluzione di soda caustica al 20%. L'addetto non ha possibilità di venire a contatto con le sostanze chimiche contenute all'interno del circuito se non nei punti di sfianto e per eventuali perdite. È previsto che in occasioni di manutenzioni periodiche (tendenzialmente annuali) sia necessario entrare all'interno delle cisterne debitamente svuotate. In questo contesto si configura un'operazione in spazi confinati e/o sospetti di inquinamento regolamentata da specifica procedura di sicurezza interna.

9. Il pericolo di esplosione dovuto alla presenza di etanolo: individuazione delle zone a rischio di formazione di miscele esplosive ed operazioni potenzialmente pericolose

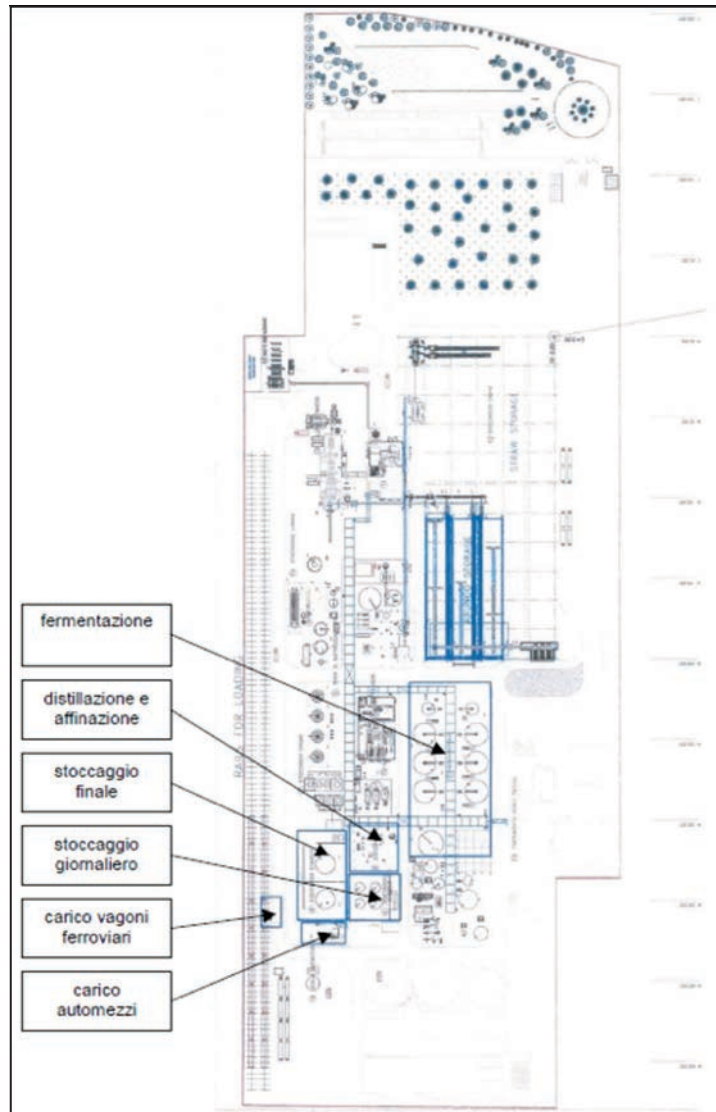
Il pericolo di esplosione è stato affrontato considerando le atmosfere potenzialmente esplosive, che possono essere generate da rilasci di alcool etilico. Sono stati esaminati in particolare tutti i componenti e tutte le fasi del processo, caratterizzate dalla presenza di etanolo (dalla fermentazione al carico del prodotto finito sui mezzi di trasporto) al fine di definire le operazioni potenzialmente pericolose ed i luoghi nei quali potrebbero originarsi miscele potenzialmente esplosive. Questo approccio ha permesso di individuare le misure di prevenzione, di protezione ed organizzative più efficaci nell'ottica di ridurre a valori accettabili il livello di rischio, connesso con le condizioni di esercizio dell'impianto. Dall'analisi condotta sono emerse le seguenti zone (Figura 14), come aree a rischio di formazione di atmosfere potenzialmente esplosive:

- zona di fermentazione;
- zona di distillazione;
- zona di stoccaggio giornaliero;
- zona di stoccaggio finale;
- zona di carico automezzi e vagoni ferroviari.

In questa sede non sono state considerate le operazioni di conduzione delle caldaie, perché devono svolgersi nel rispetto delle prescrizioni del costruttore delle macchine, ma solamente le attività legate alla presenza di etanolo:

- 1) operazioni di prelievo di campioni di prodotto;
- 2) operazioni di carico dell'alcool su automezzi;
- 3) operazioni di carico dell'alcool su vagoni ferroviari;
- 4) operazioni di controllo periodico;
- 5) operazioni di manutenzione da effettuarsi in zone classificate come potenzialmente esplosive.

Figura 14 - Planimetria dello stabilimento di Crescentino



Fonte: Mossi & Ghisolfi

9.1 Individuazione delle possibili sorgenti di ignizione

Una miscela esplosiva per accendersi deve rientrare nel suo intervallo di esplosività (delimitato dai limiti inferiore e superiore) e deve essere presente una sorgente di innesco attiva. Nel caso specifico, le fonti di ignizione possibili sono le seguenti:

- superfici calde;
- fiamme e gas caldi (operazioni di saldatura);
- scintille di natura meccanica (utilizzo di attrezzi di acciaio);
- apparecchiature elettriche (tutte quelle montate nelle aree potenzialmente esplosive);
- elettricità statica;
- scariche atmosferiche.

9.2 Misure di prevenzione e protezione applicate contro il rischio di esplosione

Per minimizzare il livello di rischio di esplosione, associato alla presenza di etanolo, sono state applicate misure di prevenzione e di protezione, curando anche degli aspetti organizzativi, relativi alla formazione ed informazione del personale, che opera nell'impianto, ed alla gestione delle attività manutentive. Nella bioraffineria di Crescentino viene verificato che:

- 1) tutti gli attrezzi da utilizzare nelle zone classificate come potenzialmente esplosive siano del tipo antiscintilla;
- 2) il vestiario degli operatori, comprese le scarpe, è di tipo antistatico;
- 3) tutti gli impianti elettrici presenti nelle zone Atex siano stati omologati;
- 4) è disponibile il dispositivo per la messa a terra degli automezzi, adibiti al trasporto del bioetanolo, con controllo automatico del collegamento. In mancanza di collegamento, il carico non ha inizio;
- 5) sia stata effettuata la valutazione del rischio dovuto al fulmine;
- 6) è stato richiesto a tutti i fornitori, che operano con loro mezzi e personale all'interno dello stabilimento, di produrre in forma scritta i risultati della loro valutazione dei rischi riferita alle operazioni di carico del mezzo.

Le valutazioni sono state confrontate con gli standard di sicurezza dell'Azienda e sono stati concordati eventuali provvedimenti aggiuntivi;

- 7) siano disponibili istruzioni specifiche relative a tutte le operazioni, che possono avvenire nelle zone, in cui si potrebbero generare miscele esplosive.

Il gestore dell'impianto ha adottato le seguenti misure di protezione:

- 1) le zone con pericolo di esplosione sono segnalate da appositi cartelli di pericolo;
- 2) sono stati installati esplosimetri nelle zone classificate a rischio di formazione di atmosfere potenzialmente esplosive;
- 3) sono stati installati arrestatori di fiamma a protezione delle tubazioni, in cui fluisce l'etanolo;
- 4) adeguata formazione ed informazione degli operatori.

9.3 Misure organizzative

Il gestore del complesso industriale provvede a curare l'organizzazione di alcune operazioni relative ad attività, in cui sono presenti pericoli di esplosione dovuti alla presenza di alcool etilico. In particolare il personale, che opera nelle zone in cui potrebbero originarsi atmosfere esplosive (addetti al processo produttivo, alle manutenzioni o alla pulizia), riceve opportuna informazione e formazione e deve svolgere le attività di competenza esclusivamente attraverso le procedure aziendali definite e formalizzate con i Permessi di Lavoro ad Alto Rischio. La presenza di procedure stabilite vale anche per il personale non dipendente, che opera all'interno dello stabilimento e che interviene nelle aree con pericolo di esplosione. È buona prassi che, in tali zone, vi sia un numero sufficiente di operatori, aventi i requisiti di esperienza e formazione per autorizzare, coordinare, controllare ed eseguire le necessarie attività. Nell'ambito della formazione sulla sicurezza sul lavoro, alla luce della valutazione di rischio effettuata, sono predisposte sessioni formative ed informative, specifiche per il rischio di esplosione, aventi il seguente schema generale:

- pericolo di esplosione;

- materiali infiammabili presenti;
- sorgenti d'innescio;
- punti critici presenti;
- zone con atmosfere potenzialmente esplosive;
- procedure di lavoro;
- manutenzione;
- permessi di lavoro;
- misure di emergenza;
- supervisione, controllo e coordinamento.

Nel complesso produttivo di Crescentino sono state definite delle procedure operative, riguardanti operazioni che, direttamente o indirettamente, comportano la presenza di potenziali pericoli di esplosione. Le operazioni individuate sono:

- lavori a caldo (saldatura, taglio, ecc.);
- gestione delle modifiche;
- sicurezza in caso di *black-out*;
- programmazione della pulizia dei componenti dell'impianto;
- gestione e coordinamento degli appaltatori.

Nell'ambito delle attività di manutenzione (riparazione, ispezione e verifica periodica), che comportano il rischio di innesco in zone in cui potrebbero generarsi miscele esplosive, la sicurezza viene garantita tramite appropriate procedure. Tutte le aree, che possono presentare atmosfere potenzialmente esplosive, devono essere ispezionate periodicamente dal personale competente. Inoltre devono essere identificati i componenti critici ai fini della sicurezza e sottoposti a verifica periodica con frequenza prestabilita, prevista dai costruttori delle apparecchiature o in funzione di specifiche esigenze interne. L'elenco dovrebbe almeno comprendere:

- sistemi di messa a terra;
- sistemi di sfogo delle esplosioni;
- sistemi di compartimentazione delle esplosioni;
- rilevatori di pressione;
- logiche di controllo e comando.

10. Aspetti di sicurezza relativi allo stoccaggio del bioetanolo

Nell'impianto di Crescentino viene prodotto bioetanolo attraverso un complesso sistema di trasformazione. L'alcool etilico prodotto viene stoccato in serbatoi di stoccaggio giornaliero e quindi sottoposto a prove per verificarne la conformità alle specifiche di vendita; se la verifica è positiva, viene trasferito nei serbatoi dello stoccaggio finale, dai quali sarà prelevato per essere caricato sui mezzi di trasporto (vagoni ferroviari ed automezzi). Se invece le analisi dovessero dare esito negativo, l'etanolo verrebbe nuovamente inviato nelle torri di distillazione al fine di ottenere gli standard qualitativi desiderati. Lo studio condotto è stato focalizzato sulle misure di sicurezza (protezioni attive e passive) applicate per mitigare le conseguenze derivanti da

incendi, che potrebbero derivare dalla presenza di alcool etilico. Tale scelta discende dal fatto che l'indice di rischio (incendio), riportato nel Documento di Valutazione dei Rischi, è quello maggiore tra i pericoli, collegati alla presenza di etanolo (formazione di atmosfere esplosive). Le aree del complesso industriale prese in esame sono quelle caratterizzate da alcool etilico presente in concentrazioni superiori al 90% (colonne di distillazione, stoccaggio giornaliero e finale, aree di carico di autocisterne). Infine sono stati affrontati alcuni aspetti organizzativi e gestionali, che sono funzionali per il corretto espletamento del Sistema di Gestione della Sicurezza.

10.1 Proprietà chimiche e fisiche dell'alcool etilico

L'alcool etilico (C₂H₆O) è caratterizzato, per quanto concerne le indicazioni di pericolosità specifiche per l'uomo e per l'ambiente, dalla frase di rischio R 11 (facilmente infiammabile) e dal codice H 225 (liquidi e vapori facilmente infiammabili). In Tabella 4 sono illustrate le principali proprietà, strettamente collegate alla sua infiammabilità e relative ad una sua concentrazione compresa tra il 90% ed il 99,9%.

Tabella 4 - Proprietà fisiche e chimiche dell'etanolo

Etanolo			
Punto di infiammabilità (°C)	Temperatura di autoaccensione (°C)	Limite inferiore di infiammabilità (% v/v)	Limite superiore di infiammabilità (% v/v)
12	425	3,5	15

10.2 Lo stoccaggio del bioetanolo

Il bioetanolo viene stoccato allo stato liquido, alla temperatura di 30°C ed alla pressione assoluta di 1,8 bar nello stoccaggio giornaliero e 3,5 bar in quello definitivo, in serbatoi a tetto fisso esterno e tetto flottante interno (Figura 15), posizionati all'interno di bacini di contenimento in grado di raccogliere eventuali rilasci. La temperatura di ebollizione dell'alcool etilico ($T_{EB} = 78,5^{\circ}C$) impedisce il *flash* del quantitativo, che potrebbe essere rilasciato in caso di perdite (ad es. da tubazioni, da valvole o da flange di connessione), che generano pozze, che possono incendiarsi (*pool fire*).

Figura 15 - Serbatoi di stoccaggio del bioetanolo



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Sono presenti nell'impianto:

- 3 serbatoi dedicati allo stoccaggio giornaliero ed alla valutazione della qualità del prodotto ed aventi ciascuno un volume di 193 m³;
- 2 serbatoi per lo stoccaggio finale aventi una capacità singola di 1.450 m³;
- un serbatoio di denaturante (assimilabile a benzina) avente un volume di 300 m³.

Pertanto il volume complessivo stoccato di etanolo è pari a 3.779 m³.

10.3 Il bacino di contenimento

I serbatoi di stoccaggio del bioetanolo sono racchiusi in un bacino di contenimento, impermeabile, realizzato in calcestruzzo e la cui capacità non è inferiore ad 1/3 del volume complessivo dei serbatoi inclusi in esso [D.M. 18/5/1995]. La pavimentazione del bacino è dotata di un'adeguata pendenza per convogliare gli eventuali rilasci di bioetanolo, derivanti da perdite di tubazioni e di flange, in un pozzetto di raccolta, dotato di rilevatori (uno in esercizio e l'altro in *stand-by* per fronteggiare guasti), che inviano un segnale di allarme in sala controllo, qualora fosse riscontrata la presenza di alcool etilico. In questo modo è possibile predisporre l'azionamento del sistema di immissione della miscela schiumogena nel bacino al fine di ridurre le conseguenze di un *pool fire* sulla salute e sulla sicurezza degli operatori.

10.4 Le misure di protezione attiva: gli impianti antincendio

Il complesso industriale di Crescentino dispone delle seguenti misure di sicurezza per mitigare gli effetti di eventuali incendi, che potrebbero scaturire in seguito a rilasci di etanolo:

- sistemi di rilevazione di fumi e di calore;
- dispositivi di trasmissione del segnale di allarme;
- rete di idranti;
- impianti fissi di spegnimento automatico a diluvio, alimentati con una miscela schiumogena, posti a protezione dei serbatoi di stoccaggio (giornaliero e finale) del bioetanolo, del magazzino della paglia e di *Arundo donax*, della zona di distillazione, del gasometro e delle aree di carico delle autobotti e delle ferrocisterne;
- sistemi di immissione di liquido schiumogeno nel bacino di contenimento, racchiudente i depositi di alcool etilico, e nel bacino (Figura 16), al cui interno sono collocate le pompe per il trasferimento del bioetanolo ai serbatoi;
- riserva di acqua per l'antincendio con annessa stazione di pompaggio;
- un congruo numero di estintori portatili e carrellati (dispositivi mobili di estinzione) per intervenire prontamente qualora si verificasse un principio di incendio.

Figura 16 - Sistema di immissione di liquido schiumogeno nel bacino racchiudente le pompe di trasferimento del bioetanolo



Fonte: Mossi & Ghisolfi

10.5 La rete di idranti

La rete di idranti è stata dimensionata in ottemperanza ai requisiti sanciti dal Decreto Ministeriale 18 maggio 1995 [D.M.18/5/1995]. Infatti poiché l'insediamento produttivo di Crescentino dispone di un deposito all'aperto di bioetanolo di capacità superiore a 3.000 m^3 (3.779 m^3), sono stati installati n. 74 idranti soprasuolo UNI 70 in grado di erogare una portata non inferiore a 4.000 l/min ad una pressione di almeno 3 bar. La rete di alimentazione idrica è stata dimensionata per garantire la contemporaneità di funzionamento di almeno 65 idranti per almeno due ore.

10.6 Impianti fissi di estinzione

Gli impianti fissi di estinzione sono a protezione dei serbatoi di stoccaggio dell'etanolo (Figura 17) per evitare che fenomeni di irraggiamento possano creare pericolosi effetti domino. Questi impianti sono del tipo "a diluvio" e sono costituiti da una rete di tubazioni, su cui sono montati speciali ugelli che, all'aprirsi di un'apposita valvola, detta valvola di diluvio, indipendentemente dal punto in cui si è manifestato il principio d'incendio, entrano contemporaneamente in azione erogando il fluido estinguente su tutta l'area protetta. Poiché l'alcool etilico può generare fuochi di classe B [Dentoni et al., 2009], l'agente estinguente adottato è costituito da una miscela schiumogena (acqua e schiuma). L'apertura della valvola, che mette in azione anche la diffusione di un segnale di allarme, può essere comandata manualmente oppure dai sistemi di rivelazione presenti (di fumo, di calore, ecc.).

Figura 17 - Impianti fissi a diluvio installati sui serbatoi di stoccaggio del bioetanolo



Fonte: Mossi & Ghisolfi

10.7 L'impianto "schiuma"

Le aree dei serbatoi di etanolo, delle pompe di trasferimento del biocombustibile (sono inclusi i rispettivi bacini di contenimento) e di carico delle autobotti e delle ferrocisterne sono protette dall'impianto di immissione di liquido schiumogeno (Figura 18), che funge da supporto al sistema fisso antincendio (nella zona di stoccaggio dell'alcool).

Figura 18 - Sistema di immissione di liquido schiumogeno nel bacino contenente i serbatoi di stoccaggio di bioetanolo



Fonte: Mossi & Ghisolfi

L'agente estinguente impiegato è ricavato dalla miscela di acqua e di un liquido schiumoso fluoro sintetico a base di tensioattivi idrocarburici, tensioattivi fluorurati e sostanze stabilizzanti. Il sistema è in grado di erogare almeno 1.600 l/min di miscela schiumogena ad una distanza di 50 metri. Per fronteggiare situazioni di emergenza è stata predisposta una scorta di 3.000 litri (Figura 19), ripartita in fusti. Le piazzole di carico delle autobotti e delle ferrocisterne sono protette da un impianto schiuma a diluvio, che prevede la duplice opzione di attivazione manuale/automatica mediante l'azione di testine di rilevazione termica. Sono stati installati degli erogatori in prossimità delle tettoie al fine di garantire la copertura dell'intera area adibita allo stazionamento dei mezzi, che trasportano l'etanolo prodotto. L'alimentazione della miscela schiumogena viene eseguita per mezzo di un apposito premiscelatore, la cui capacità è di circa 1.000 litri.

Figura 19 - Serbatoi della miscela schiumogena



Fonte: Mossi & Ghisolfi

10.8 La riserva idrica dell'antincendio

La riserva idrica è costituita da un serbatoio di accumulo, avente un volume di 450 m³ ed è provvista di una stazione di pompaggio, realizzata in accordo alla Norma UNI EN 12845 [UNI EN 12845, 2009]. L'alimentazione del serbatoio è assicurata dalle vasche di prima pioggia e dall'integrazione, in caso di necessità, del pozzo per garantire un'adeguata portata di acqua in ogni momento della giornata. In particolare il dimensionamento della riserva è stato studiato per fronteggiare la condizione di intervento più gravosa, rappresentata dalla contemporaneità di esercizio di sei idranti (per un minimo di 120 minuti) e due impianti schiuma (autonomia minima pari a 30 minuti).

10.9 La stazione di pompaggio

Per garantire in ogni situazione l'erogazione di un'adeguata portata di acqua o di liquido schiumogeno viene assicurata non solo una consona riserva idrica, ma anche la continuità nel funzionamento della stazione di pompaggio. Per conseguire questo obiettivo l'unità di pompaggio è equipaggiata con un'elettropompa

(Figura 20) ed una pompa diesel (l'una di riserva all'altra per fronteggiare eventuali anomalie di esercizio) ed in aggiunta è stata installata anche una pompa (*jockey*) finalizzata a tenere in pressione le reti antincendio (idranti e impianti fissi).

Figura 20 - Pompe della stazione di pompaggio



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Nel complesso industriale di Crescentino sono presenti due cabine antincendio (Figura 21); la più piccola è dedicata alla rete degli idranti, mentre la più grande è rivolta agli impianti fissi presenti nello stabilimento. Sia nella cabina asservita alla "rete degli idranti" che in quella al servizio degli "impianti fissi" sono presenti le tre pompe, precedentemente citate. Varia, però, il range di pressione, che disciplina la loro entrata in azione. Infatti le due reti sono degli anelli chiusi tenuti in pressione dalla pompa *jockey* e quando un idrante o un impianto fisso sono azionati, la pressione del circuito scende finché non si arriva al di sotto di un valore prestabilito, che determina l'attivazione dell'elettropompa. Se la pressione dovesse scendere al di sotto di un altro valore prefissato, si attiverebbe anche la pompa diesel. Le pompe si disattivano quando sono ripristinate le normali condizioni operative. Sul serbatoio di stoccaggio dell'acqua utilizzata per le unità antincendio sono installati dei sensori di livello, in grado di monitorare lo stato del riempimento, caratterizzato dall'individuazione di soglie di alto, basso e bassissimo livello. Durante il funzionamento della rete antincendio la strumentazione capta la diminuzione del livello ed interviene aprendo la valvola (Figura 22) di alimentazione dell'acqua (da acquedotto) ed interverrà successivamente chiudendola al momento del ripristino delle condizioni stabilite. La ridondanza dei dispositivi di misura del livello consente di sopperire ad eventuali avarie dei sensori e di controllare con continuità la riserva di acqua. Questa scelta, combinata all'adozione del sistema di pompe, installate in entrambe le cabine, garantisce una costante alimentazione degli impianti antincendio e ciò apporta un incremento degli standard di sicurezza dell'insediamento produttivo.

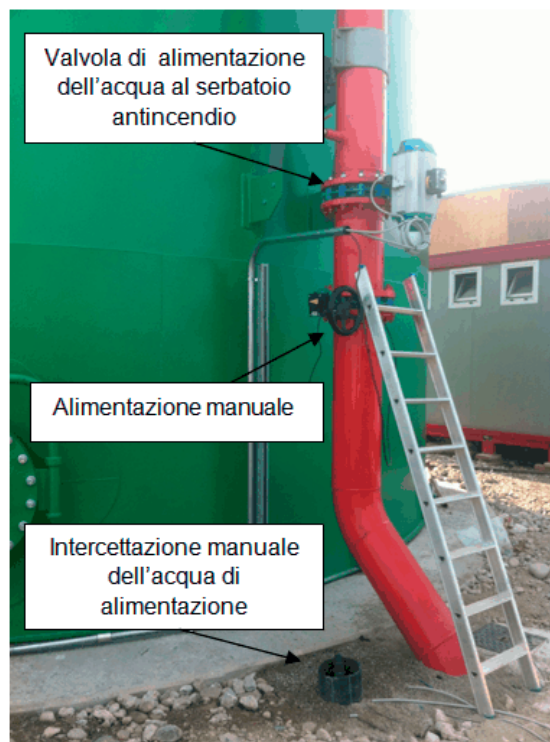
Figura 21 - Cabine antincendio



Fonte: Mossi & Ghisolfi

Le pompe possono essere messe in azionamento in modo automatico e quindi seguire gli automatismi legati alla variazione della pressione, oppure in modalità manuale (Figura 23). Ciò si attua ponendo il selettore di ogni pompa sullo “zero” (manuale) oppure su “uno” (automatico). Sul retro di entrambe le cabine sono posizionate le tubazioni di alimentazione (Figura 24) delle tre pompe con le rispettive valvole di intercettazione, una tubazione, che consente il riciclo dell’acqua del serbatoio (normalmente chiusa) sempre tramite pompe ed una tubazione, che alimenta l’acqua al sistema di raffreddamento del radiatore del motore diesel.

Figura 22 - Regolazione dell'alimentazione della riserva idrica antincendio



Fonte: Mossi & Ghisolfi

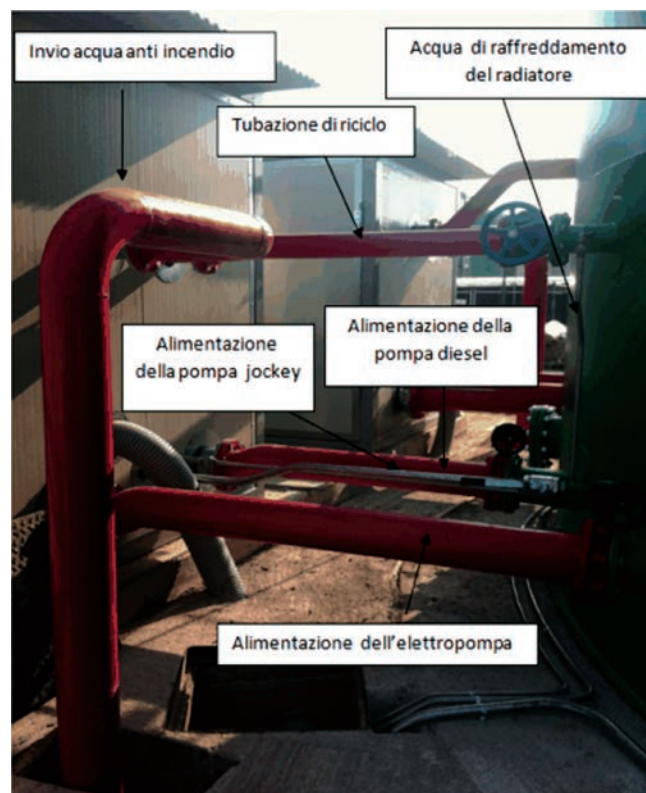
Figura 23 - Pannelli di controllo delle pompe



Fonte: Mossi & Ghisolfi

I quadri delle cabine sono elettricamente alimentati dalla rete di stabilimento e come precedentemente riportato, per ogni pompa è presente un pannello di comando dedicato in cui si può selezionare, lo “start” e lo “stop” della pompa, “automatico” o “manuale” ed alcune spie, che indicano lo stato della pompa o del pannello stesso (ad es. presenza di tensione, richiesta di avviamento, ecc.). Il quadro elettrico, dove sono collocati i comandi della pompa *jockey*, è indipendente dalla rete elettrica aziendale, per mezzo di due batterie, che intervengono in caso di *black-out*, assicurando la continuità di esercizio della macchina.

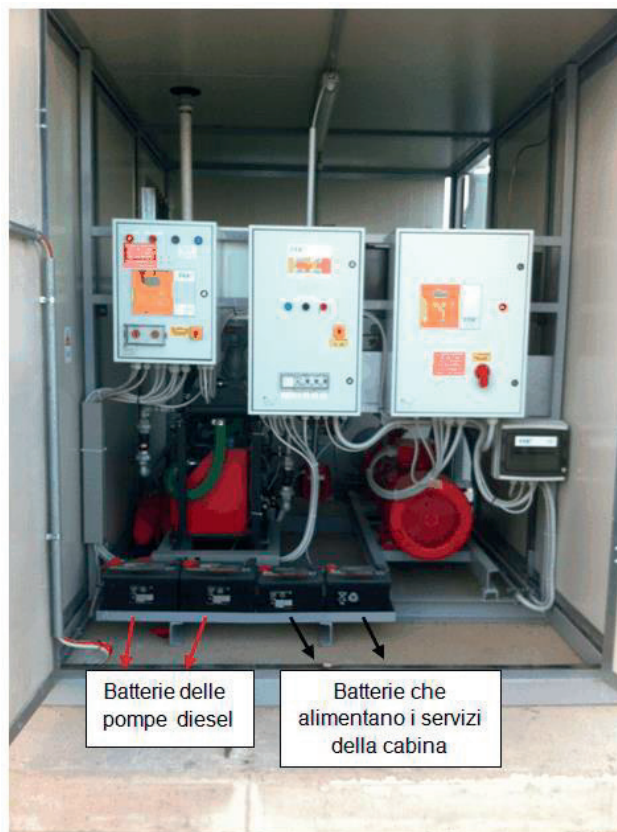
Figura 24 - Tubazioni di alimentazione delle pompe asservite all'antincendio



Fonte: Mossi & Ghisolfi

La pompa diesel è totalmente indipendente dalla rete elettrica aziendale, in quanto essa è alimentata da un pacco costituito da due batterie (Figura 25). Tutte le batterie sono in costante ricarica, grazie ad un caricabatterie presente nella cabina ed il loro stato di carica è indicato da apposite spie.

Figura 25 - Batterie delle pompe diesel



Fonte: Mossi & Ghisolfi

10.10 Gli impianti mobili di estinzione

Nell'area industriale di Crescentino sono presenti:

- n. 4 estintori a polvere di tipo carrellato (da 50 kg cadauno);
- n. 42 estintori a polvere (da 6 kg cadauno);
- n. 32 estintori a CO₂ (da 5 kg cadauno).

Essi sono dislocati in modo uniforme nell'impianto ed è assicurata la loro chiara visibilità e la facile accessibilità. Inoltre sono per tipologia e numero conformi a quanto previsto dall'Allegato V del Decreto Ministeriale 10 marzo 1998 [D.M. 10/3/1998].

10.11 Le misure di protezione passiva: le distanze di sicurezza del deposito di stoccaggio del bioetanolo

Le distanze di sicurezza del deposito di alcool etilico sono state definite in accordo con le indicazioni riportate nel D.M. 18 maggio 1995, riferendosi alla sezione quinta (unità di deposito all'aperto di capacità superiore a 3.000 m³), dal momento che il volume complessivo dello stoccaggio è pari a 3.779 m³. Per l'impianto di Crescentino si ha la seguente situazione:

- distanza di protezione non inferiore a 5 m;

- distanza di sicurezza interna (distanza del deposito di stoccaggio da elementi pericolosi presenti nell'impianto) non inferiore a 7 m;
- distanza di sicurezza esterna (distanza del deposito da abitazioni, insediamenti antropici, ecc.) non inferiore a 15 m;
- distanza tra serbatoi adiacenti (posti nello stesso bacino) pari a $\frac{1}{2}$ diametro del recipiente maggiore tra i due.

Sono stati considerati "elementi pericolosi", quelli riportati nell'Allegato tecnico al D.M. 18 maggio 1995:

- i serbatoi;
- le pompe;
- i punti di travaso;
- le autobotti e le ferrocisterne.

Tra gli elementi pericolosi del deposito e la proiezione verticale di linee elettriche aeree sono state osservate distanze non inferiori a (Allegato tecnico al D.M. 18 maggio 1995):

- 7 m per tensioni superiori ad 1 kV e non superiori a 30 kV;
- al valore dato dalla formula $L = 7 + 0,05 U$ dove L è espresso in metri e la tensione U è espressa in kV per tensioni superiori a 30 kV.

Le linee elettriche aeree a tensione inferiore ad 1 kV devono rispettare, dagli elementi pericolosi del deposito, la distanza di protezione.

10.12 Organizzazione e gestione della sicurezza: i documenti tecnici

Presso i depositi di etanolo di capacità superiore a 3.000 m³ e quindi anche nell'impianto di Crescentino devono essere disponibili ed esposti i seguenti documenti:

- un manuale operativo contenente le istruzioni per l'esercizio degli impianti;
- uno schema di flusso degli impianti;
- una planimetria riportante l'ubicazione degli impianti, delle attrezzature antincendio e l'indicazione delle aree protette dai singoli impianti antincendio;
- il Certificato Prevenzione Incendi con i rinnovi effettuati;
- il piano di emergenza interna;
- il regolamento interno di sicurezza, contenente in forma sintetica i principali divieti e le disposizioni preventive, che devono essere osservati da chiunque abbia accesso al deposito;
- gli schemi degli impianti elettrici e degli eventuali sistemi di segnalazione e di allarme.

Il piano di emergenza, avente lo scopo di organizzare l'intervento nei casi di allarme per perdita di prodotto o incendio, deve assegnare compiti precisi agli operatori del deposito, organizzati in squadra di pronto intervento e deve distinguere due fasi:

- operazioni essenziali per la sicurezza dell'impianto, quali togliere tensione alle zone interessate dall'emergenza ed azionare gli impianti antincendio;
- operazioni antincendio propriamente dette, quali il controllo del fuoco, il suo eventuale spegnimento, il controllo delle eventuali perdite di prodotto.

10.13 Addestramento del personale

Il personale addetto ai depositi deve essere edotto su:

- i rischi specifici derivanti dall'attività;
- il regolamento interno di sicurezza ed il piano per gli interventi di emergenza;
- le modalità di uso dei mezzi di protezione ed antincendio.

Il personale deve, inoltre, essere istruito sulle cautele da osservare per ovviare a perdite di prodotto, incendi e per intervenire efficacemente in caso di emergenza. Gli operatori dei depositi di capacità superiore a 1.000 m³ (rientra in tale ambito l'impianto di Crescentino) devono partecipare ad esercitazioni (devono essere svolte almeno 2 esercitazioni all'anno) sulle procedure da applicare in caso di emergenza.

10.14 Prescrizioni di esercizio

All'interno delle unità di deposito del bioetanolo non devono circolare o sostare automezzi, salvo quelli autorizzati ad accedere alle postazioni di carico e scarico. All'interno delle aree di stoccaggio dell'alcool etilico non devono accedere persone non autorizzate ed è vietato fumare, usare fiamme libere, introdurre materiali o apparecchi, che possono causare scintille. In caso di necessità di interventi, per controlli o manutenzioni, devono essere osservate tutte le precauzioni del caso. Qualora si presenti la necessità di manutenzione con fiamma (ad es. si deve effettuare una saldatura) su parti di impianto, devono essere adottate le seguenti precauzioni:

- sospendere qualsiasi attività, che possa comportare perdita di prodotto;
- sgomberare l'area da materiali e attrezzature non pertinenti l'operazione;
- isolare dal resto dell'impianto l'apparecchiatura, su cui deve essere effettuato l'intervento e bonificarla;
- controllare che non sussistano condizioni di infiammabilità;
- predisporre adeguati mezzi antincendio per un rapido impiego.

Tutte le operazioni con uso di fiamma devono essere coordinate dal responsabile del deposito o da persona da questi delegata, che deve fissare modalità e tempi di esecuzione. Presso il deposito è stata installata la segnaletica di sicurezza, ai fini antincendio, conforme alla vigente normativa ed alle prescrizioni di cui alla Direttiva 92/58/CE del 24 giugno 1992 [Direttiva 92/58/CEE].

10.15 Registro dei controlli

Il complesso industriale dispone di un registro dove sono annotati i controlli e gli interventi manutentivi relativi agli impianti elettrici, ai presidi antincendio, ai dispositivi di sicurezza dei depositi, le riunioni di addestramento e le esercitazioni pratiche del personale. Tale registro deve essere costantemente aggiornato e disponibile per i controlli da parte dei competenti organi del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

BIBLIOGRAFIA

- ACGIH. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012.
- Dentoni V, Massacci G. Rischio d'incendio. Dispensa del Corso "Sicurezza del lavoro e difesa ambientale". 2009.
- Eduard W, Heederik D, Duchaine C, Green BJ. Bioaerosol exposure assessment in the workplace: the past, present and recent advances. *J Environ Monit.* 2012;14:334-9.
- International Organization for Standardization. ISO 9001:2008 Quality Management System - Requirements. ISO, 2008.
- Italia. Decreto Legislativo 21 settembre 2005, n. 238. Attuazione della Direttiva 2003/105/CE, che modifica la direttiva 96/82/CE, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. G.U. n. 271 del 21 novembre 2005 – SO n. 189.
- Italia. Decreto Legislativo 17 agosto 1999, n. 334. Attuazione della Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. G.U. n. 228 del 28 settembre 1999 – SO n. 177.
- Italia. Legge regionale 14 dicembre 1998, n. 40. Disposizioni concernenti la compatibilità ambientale e le procedure di valutazione. BU Regione Piemonte 17 dicembre 1998, Suppl. al n. 50.
- Italia. Decreto Legislativo 18 febbraio 2005, n. 59. Attuazione integrale della Direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento. G.U. n. 93 del 22 aprile 2005 - S.O. n. 72.
- Italia. Decreto Ministeriale 10 settembre 2010. Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili. G.U. n. 219 del 18 settembre 2010.
- Italia. D.G.R. 30 gennaio 2012, n. 6-3315. Individuazione delle aree e dei siti non idonei all'installazione ed esercizio di impianti per la produzione di energia elettrica alimentati da biomasse, ai sensi del paragrafo 17.3. delle "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili" di cui al D.M. del 10 settembre 2010 BU Regione Piemonte n. 05 del 2 febbraio 2012.
- Italia. Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42. Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137. G.U. n. 45 del 24 febbraio 2004 - SO n. 28.
- Italia. Decreto 16 marzo 1998. Modalità con le quali i fabbricanti per le attività industriali a rischio di incidente rilevante devono procedere all'informazione, all'addestramento e all'equipaggiamento di coloro che lavorano in situ. G.U. n. 74 del 30 marzo 1998.
- Italia. Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n. 17. Attuazione della Direttiva 2006/42/CE, relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE relativa agli ascensori. G.U. n. 41 del 19 febbraio 2010.
- Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 23 marzo 1998 n. 126. Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva. G.U. n. 101 del 4 maggio 1998.
- Italia. Decreto Legislativo 25 febbraio 2000 n. 93. Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione. G.U. n. 91 del 18 aprile 2000.

- Italia. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. G.U. n 101 del 30 aprile 2008.
- Italia. Decreto 23 gennaio 2012. Sistema nazionale di certificazione per i biocarburanti e bioliquidi. G.U. 7 febbraio 2012 n.31.
- Italia. Decreto Ministeriale 18 Maggio 1995. Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei depositi di soluzioni idroalcoliche. G.U. del 9 giugno 1995 SO n.133
- Italia. Decreto Ministeriale 10 marzo 1998. Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro. G.U. n 81 del 7 aprile 1998 SO n.64.
- UNI EN 12845. Installazioni fisse antincendio - Sistemi automatici a sprinkler - Progettazione, installazione e manutenzione. UNI, 2009.
- Unione europea. Directive 67/548/EEC on the approximation of laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances. GUCE L 196, 16 August 1967, pp. 1-98.
- Unione europea. Direttiva 1999/45/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 31 maggio 1999 concernente il ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative degli Stati membri relative alla classificazione, all'imballaggio e all'etichettatura dei preparati pericolosi. GUCE L200/1 del 30 luglio 1999.
- Unione europea. Direttiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 4 luglio 2012 sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio. GUCE L197/1 del 24 luglio 2012.
- Unione europea. Regolamento CE n. 1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006. GUCE L353/1 del 31 dicembre 2008.
- Unione europea. Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. GUCE L 140/16 del 5 giugno 2009.
- Unione europea. Direttiva 94/9/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 marzo 1994 concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relativi agli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive.
- Unione europea. Direttiva 92/58/CEE del Consiglio, recante le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o di salute sul luogo di lavoro. GUCE L 245 del 26 agosto 1992.

Aspetti di sicurezza nella produzione di bioplastiche nello stabilimento Novamont di Terni

Roberto Lauri, Biancamaria Pietrangeli

INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insedimenti Antropici, Roma

1. La realtà Novamont

Novamont è una realtà industriale con sede a Novara, nata nel 1989 per realizzare il progetto ambizioso di alcuni ricercatori provenienti dal gruppo Montedison: l'integrazione tra chimica, ambiente e agricoltura. Fin dalla sua nascita Novamont incoraggia un nuovo modello di sviluppo sostenibile e promuove la transizione da un'economia di prodotto ad un'economia di sistema, da un approccio alle risorse di tipo dissipativo ad un approccio di tipo conservativo, attraverso l'impiego di fonti rinnovabili per la produzione di bioplastiche per applicazioni specifiche a basso impatto ambientale. La *mission* dell'azienda è quella di sviluppare materiali e *bio-chemicals* attraverso l'integrazione di chimica e agricoltura, attivando bioraffinerie di terza generazione nel territorio e fornendo soluzioni applicative, che garantiscano lungo tutto il loro ciclo di vita un uso efficiente delle risorse con vantaggi sociali, economici ed ambientali di sistema: ovvero, una "Chimica vivente per la qualità della vita". In tutti i suoi stabilimenti e centri di ricerca Novamont è fortemente impegnata nel promuovere processi sicuri ed a basso impatto, adottando misure ed azioni di miglioramento continuo. Oltre che a Novara (dove hanno sede il centro direzionale, i laboratori di ricerca e gli impianti pilota), Novamont è presente a Terni, con uno stabilimento produttivo e laboratori dedicati ad ingegneria di processo e controllo qualità, e a Piana di Monte Verna (CE), con un centro di ricerca sulle biotecnologie industriali. L'azienda dispone inoltre di sedi commerciali in Francia, Germania e Stati Uniti. Con il marchio Mater-Bi®, Novamont produce e commercializza una famiglia di bioplastiche basate su componenti rinnovabili, con caratteristiche e proprietà di uso del tutto simili alle plastiche tradizionali ma, allo stesso tempo, con la possibilità di essere completamente biodegradabili e compostabili (cioè smaltite mediante il riciclaggio organico) ai sensi della Norma europea EN13432, il più importante riferimento tecnico per i produttori di materiali, le autorità pubbliche, i compostatori, i certificatori e i consumatori. Il Mater-Bi® si presenta in forma di granuli sferoidali (Figura 1) e può essere lavorato con le tecnologie di trasformazione utilizzate per le plastiche tradizionali, per l'ottenimento di film, termoformati, additivi, espansi, estrusi e stampati a iniezione. Il Mater-Bi® esplica a pieno le proprie potenzialità ambientali quando è utilizzato in applicazioni dove le sue particolari performance danno dei vantaggi di sistema sia in fase d'uso che nel fine vita. I settori applicativi spaziano dall'agricoltura, alle stoviglie monouso, agli imballaggi, alle raccolte differenziate, ecc. Tramite una tecnologia proprietaria Novamont produce anche gli Origo-Bi®, famiglia di poliesteri ottenuta da oli vegetali, che entra nel processo di realizzazione del Mater-Bi® per migliorarne le caratteristiche tecniche, economiche e ambientali e aumentarne il range di proprietà. La strategia di sviluppo e di innovazione dell'azienda si basa sul concetto di bioraffineria integrata di terza generazione, dedicata alla produzione di bioplastiche ed intermedi chimici da fonti rinnovabili e caratterizzata da un approccio di forte collaborazione multidisciplinare con il mondo agricolo, con quello della ricerca e con le istituzioni locali. Il modello di bioraffineria integrata promosso da Novamont rappresenta inoltre una grande opportunità per riconvertire siti industriali dismessi ed attivare fenomeni di rigenerazione territoriale. Uno degli sviluppi fondamentali di questo progetto è rappresentato da Matrìca, *joint venture* paritetica tra Novamont e Versalis, nata nel 2011 con l'obiettivo di riconvertire lo stabilimento petrolchimico di Porto Torres (SS) in una bioraffineria

integrata. Matrìca, partendo da colture oleaginose selezionate ed a basso impatto, produrrà dal 2014 un'ampia gamma di prodotti (*biochemicals*, biointermedi, basi per biolubrificanti e bioadditivi per gomme, oli estensori), utilizzando processi innovativi e tecnologie e competenze di ricerca Novamont.

Figura 1 - Mater-Bi®



Fonte: Novamont

Altro nodo centrale e sinergico della strategia di sviluppo di Novamont è la messa a punto di processi di biotecnologie industriali, sinergici rispetto a quelli chimici tradizionali, e la creazione della prima Piattaforma Biotecnologica nazionale per la produzione di chemicals da risorse rinnovabili attraverso processi fermentativi. In questa direzione, un risultato importante è rappresentato da Mater-Biotech, società nata nel 2012, a cui è associato il progetto di riconversione del sito Bioltalia di Adria (RO) nel primo impianto al mondo dedicato alla produzione industriale di Bio-Butandiolo (BDO) da fonte rinnovabile tramite processi fermentativi. Il butandiolo rappresenta una materia prima strategica per la produzione di biopolimeri per plastiche biodegradabili, ed è inoltre un intermedio chimico, finora ottenuto soltanto da fonti fossili, caratterizzato da elevatissima domanda per una vasta gamma di applicazioni (tessile, elettronica, automotive, ecc.). Nel febbraio 2014 Novamont ha inoltre acquisito da Mossi & Ghisolfi la maggioranza (78%) di Mater-Biopolymer, la società che controlla lo stabilimento laziale di Patrica (FR), originariamente dedicato alla produzione di PET ed oggi già in parte trasformato con una tecnologia proprietaria Novamont per la produzione di poliesteri Origo-Bi®. A Terni è infine presente anche Sincro, una *joint-venture* paritetica costituita nell'anno 2006 con agricoltori di Coldiretti per sviluppare in Umbria una produzione di biolubrificanti da fonte rinnovabile.

2. Analisi del ciclo di produzione dello Stabilimento Novamont di Terni

2.1 Ciclo di produzione

Novamont svolge le attività di produzione di Mater-Bi® all'interno del complesso industriale Polymer di Terni. La produzione del materiale termoplastico biodegradabile è realizzata nei reparti di compounding denominati TB2 e TB3. I poliesteri Origo-Bi®, che entrano nel processo di realizzazione del Mater-Bi®, sono prodotti nel reparto PL1.

I due reparti di *compounding* (TB2 e TB3) sono indipendenti e dotati ciascuno di autonomia funzionale, sia per quanto riguarda il processo che per i servizi ausiliari. I due reparti sono ubicati in aree non adiacenti. Il reparto di produzione Origo-Bi® (PL1), ospita l'impianto di polimerizzazione. Questo reparto è funzionalmente indipendente, autonomo e fisicamente separato dagli altri reparti di Produzione. I reparti sono delimitati da pareti di compartimentazione resistenti al fuoco. Nelle unità TB2 e TB3, sono realizzati i processi di *compounding* e granulazione di polimeri. Nello stabilimento è presente anche un reparto di ricerca e sviluppo (TB1), in cui sono installati impianti pilota per prove, ricerche e sperimentazioni. I poliesteri prodotti nell'unità PL1 vengono utilizzati come materia prima nel reparto di *compounding* TB3. Gli impianti di *compounding* e granulazione (TB2 e TB3) sono composti complessivamente da sette linee continue per la produzione di Mater-Bi®. Il processo di produzione per ogni linea può essere schematicamente suddiviso nelle seguenti fasi:

- 1) stoccaggio di materie prime solide e liquide;
- 2) caricamento, dosaggio e miscelazione delle materie prime solide e liquide;
- 3) processo di estrusione/*compounding*;
- 4) granulazione, omogeneizzazione, stoccaggio del prodotto e confezionamento.

La produzione avviene secondo un ciclo di lavorazione continuo (circa 8.000 h/anno), articolato su tre turni giornalieri (tali da ricoprire le 24 h) per 7 giorni a settimana. L'impianto di polimerizzazione (reparto PL1) è composto da quattro linee di produzione discontinue. Il processo può essere schematicamente suddiviso nelle seguenti fasi:

- 1) stoccaggio materie prime solide e liquide;
- 2) caricamento materie prime solide in tramogge;
- 3) processo di sintesi (esterificazione e polimerizzazione);
- 4) granulazione, omogeneizzazione e stoccaggio.

La produzione avviene secondo un processo di lavorazione discontinuo a cicli consecutivi, articolato su tre turni giornalieri per 7 giorni a settimana.

3. Aspetti di sicurezza esaminati nel ciclo produttivo

Nell'ambito del Progetto sono stati studiati alcuni specifici aspetti di sicurezza relativi al ciclo produttivo dell'impianto di Terni. In particolare è stata focalizzata l'attenzione sulla movimentazione dell'amido di mais e sulla gestione di alcune criticità, che potrebbero emergere durante l'esercizio dei reattori di esterificazione e di polimerizzazione, indicando procedure e sistemi tecnici, che sono stati adottati per attenuare le ripercussioni di eventi incidentali sugli operatori. Nello specifico è opportuno ricordare che lo stabilimento in questione non rientra nel campo di applicazione della Direttiva "Seveso" [D.Lgs. 238/2005]. L'impianto è stato progettato e realizzato sulla base delle valutazioni del rischio condotte *ad hoc* e risponde ai requisiti normativi vigenti. Le macchine dell'impianto sono realizzate in conformità alla Direttiva macchine CE [D.Lgs. 17/2010] e sono dotate di sistemi di prevenzione e protezione necessari (protezioni, barriere, coibentazioni, valvole di sicurezza, dischi e membrane di scoppio). I processi sono controllati in modo automatico e condotti mediante sistemi di supervisione, che permettono agli operatori di gestire la produzione direttamente dalla sala controllo, senza postazioni operative in prossimità dei macchinari. In relazione alla valutazione del rischio di formazione di

atmosfere esplosive le specifiche sezioni di impianto e apparecchiature, che ricadono in questo ambito, sono dotate di sistemi di polmonazione (inertizzazione dei reattori con N₂) e flussaggio con azoto (tramogge di carico dei reagenti solidi) e sono realizzate in conformità alla direttiva Atex [D.P.R.126/1998]. In relazione alla valutazione del rischio di esplosione meccanica, le specifiche sezioni di impianto, che ricadono in questo ambito, sono realizzate in conformità alla direttiva PED [D.Lgs. 93/2000]. Sono state inoltre condotte analisi Hazop (HAZard and OPerability analysis) con lo scopo di esaminare gli ambienti di lavoro ed identificare i pericoli cui tali ambienti espongono i lavoratori ed individuare eventuali deviazioni dagli intenti di progetto, che possono portare ad inconvenienti di sicurezza o di esercizio [Chemical Industry Safety and Health Council of the Chemical Industries Association Ltd,1977; Lees, FP, 1996]. Nello stabilimento di produzione di Terni vengono applicati sistemi di gestione integrati e certificati, conformi alle norme BS OHSAS 18001, ISO 9001 e ISO14001 [BS OHSAS 18001:2007; ISO 9001:2008; ISO 14001:2004], allo scopo di rispettare la normativa vigente e di migliorare continuamente le prestazioni, l'organizzazione e la gestione dei processi.

4. La sicurezza nello stoccaggio e nella movimentazione dell'amido di mais

La gestione dell'amido di mais viene presa in considerazione in merito alle disposizioni riportate nel Titolo IX e nel Titolo XI del D.Lgs. 81/2008. La valutazione del rischio chimico per la salute viene effettuata impiegando il Modello MOVARISCH. Tale modello è stato approvato dai gruppi tecnici delle Regioni Emilia-Romagna, Toscana e Lombardia in applicazione alle Linee Guida del Titolo VII-*bis* del D.Lgs. 626/1994, ora Titolo IX, Capo I, D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (D.Lgs. 81/2008), proposte dal Coordinamento Tecnico per la Sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome.

URL: <http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1783>

Il Modello MOVARISCH è una modalità di analisi, che, attraverso un percorso informatico semplice, consente di effettuare la valutazione del rischio chimico per la salute dei lavoratori secondo quanto previsto dall'art. 223 del D.Lgs. 81/2008 [D.Lgs. 81/2008]. Il rischio R per le valutazioni del rischio, derivanti dall'esposizione ad agenti chimici pericolosi, è il prodotto del pericolo P per l'esposizione E (Hazard x Exposure):

$$R = P \times E$$

Il pericolo P rappresenta l'indice di pericolosità intrinseca di una sostanza o di una miscela che nell'applicazione di questo modello viene identificato con le frasi o indicazioni di pericolo H, che sono utilizzate nella classificazione, secondo i criteri dell'Allegato I del Regolamento (CE) 1272/2008 e successive modificazioni (Regolamento CLP) [Regolamento 1272/2008]. Ad ogni Hazard Statement (Frase o Codice di pericolo H) è stato assegnato un punteggio (score), tenendo conto del significato delle disposizioni relative alla classificazione e all'etichettatura delle sostanze e delle miscele pericolose di cui all'Allegato I del Regolamento (CE) 1272/2008 e successive modificazioni. Il *pericolo P* rappresenta quindi la potenziale pericolosità di una sostanza indipendentemente dai livelli a cui le persone sono esposte (pericolosità intrinseca). L'*esposizione E* rappresenta il livello di esposizione dei soggetti nella specifica attività lavorativa. Il *rischio R*, determinato secondo questo modello, tiene conto dei parametri di cui all'art. 223, comma 1, del D.Lgs. 81/2008:

- Per il pericolo P sono tenute in considerazione le proprietà pericolose e l'assegnazione di un valore limite professionale, mediante il punteggio assegnato;

- Per l'esposizione E si sono presi in considerazione: tipo, durata dell'esposizione, le modalità con cui avviene l'esposizione, le quantità in uso, gli effetti delle misure preventive e protettive adottate.

Il rischio R, in questo modello, può essere calcolato separatamente per esposizioni inalatorie e per esposizioni cutanee:

$$R_{\text{inal}} = P \times E_{\text{inal}}$$

$$R_{\text{cute}} = P \times E_{\text{cute}}$$

Nel caso in cui per un agente chimico pericoloso siano previste contemporaneamente entrambe le vie di assorbimento il rischio R cumulativo (R_{cum}) è ottenuto tramite il seguente calcolo:

$$R_{\text{cum}} = \sqrt{R_{\text{INAL}}^2 + R_{\text{CUTE}}^2}$$

Gli intervalli di variazione di R sono:

$$0,1 < R_{\text{inal}} < 100$$

$$1 < R_{\text{cute}} < 100$$

$$1 < R_{\text{cum}} < 141$$

Il criterio per la valutazione del rischio è riportato in Tabella 1. Considerando per l'amido di mais un P-score di 2,10 (sostanze non pericolose a cui è assegnata una TLV, nello specifico la TWA 10 mg/m³) [ACGIH, 2009], il R_{cum} , calcolato tenendo conto delle misure generali di tutela, risulta essere 7,8, ossia irrilevante per la salute.

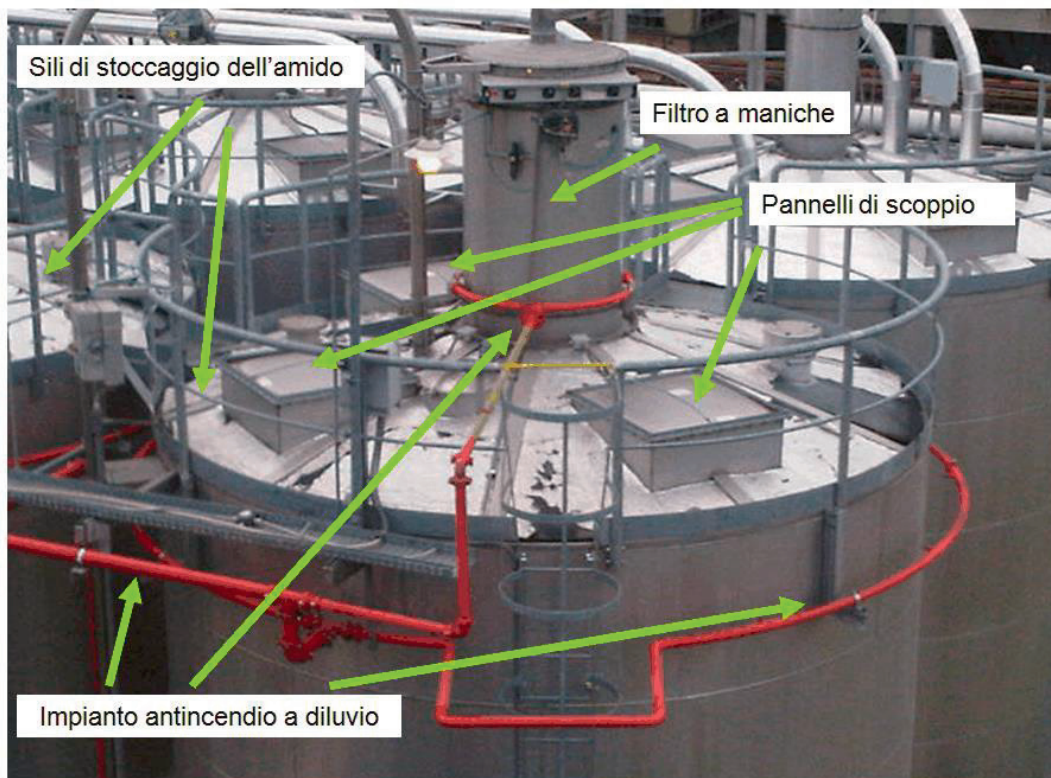
Tabella 1 - Criterio per la valutazione del rischio da agenti chimici

	Valori di Rischio (R)	Classificazione
RISCHIO IRRELEVANTE	$0,1 \leq R < 15$	Rischio irrilevante per la salute ZONA VERDE Consultare comunque il medico competente
	$15 \leq R < 21$	Intervallo di incertezza. ZONA ARANCIO E' necessario, prima della classificazione in rischio irrilevante per la salute, rivedere con scrupolo l'assegnazione dei vari punteggi, rivedere le misure di prevenzione e protezione adottate e <u>consultare il medico competente per la decisione finale.</u>
RISCHIO SUPERIORE ALL'IRRELEVANTE	$21 \leq R \leq 40$	Rischio superiore al <u>rischio chimico irrilevante per la salute</u> . Applicare gli articoli 225, 226, 229 e 230 D.Lgs.81/08
	$40 < R \leq 80$	Zona di rischio elevato
	$R > 80$	Zona di grave rischio. Riconsiderare il percorso dell'identificazione delle misure di prevenzione e protezione ai fini di una loro eventuale implementazione. Intensificare i controlli quali la sorveglianza sanitaria, la misurazione degli agenti chimici e la periodicità della manutenzione.

Fonte: MOVARISCH, URL: <http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1783>

I monitoraggi ambientali eseguiti dimostrano concentrazioni di polveri totali inferiori di un ordine di grandezza rispetto alla TLV TWA di riferimento. Un ulteriore contributo alla riduzione del rischio per la salute è indirettamente fornito dalle misure messe in campo per ridurre il rischio di esplosione successivamente analizzato. Per gli operatori sono inoltre previste attività di sorveglianza sanitaria da parte del Medico Competente aziendale. In relazione alla sorveglianza sanitaria dei lavoratori è opportuno ribadire che nel 2004 il Decreto del Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale del 27 aprile 2004 [D.M. 27/4/2004] ha aggiornato l'elenco delle malattie per le quali è obbligatoria la denuncia. Nel sistema di rilevazione istituito per le malattie dell'apparato respiratorio sono stati inseriti agenti di origine vegetale. Successivamente il Decreto del Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale del 9 aprile 2008 [D.M. 9/4/2008] ha pubblicato le nuove Tabelle delle malattie professionali, che consentono il riconoscimento automatico dell'origine professionale di specifiche patologie. Per le malattie dell'apparato respiratorio sono espressamente compresi gli agenti causa di asma bronchiale allergico di origine vegetale quali la polvere e la farina di cereali. Fatta salva la valutazione del rischio chimico (Titolo IX, D.Lgs. 81/2008), la gestione dell'amido ha rilevanza per quanto concerne la protezione da atmosfere esplosive (Titolo XI, D.Lgs. 81/2008). Come sopra riportato, i processi di lavorazione sono controllati in modo automatico e condotti mediante sistemi di supervisione, che permettono agli operatori di gestire la produzione direttamente dalla sala controllo, senza postazioni operative in prossimità dei macchinari. L'amido di mais viene stoccato all'interno di silos (Figura 2), provvisti di impianto antincendio e la dispersione di polveri nell'ambiente viene limitata dalla presenza, nella linea degli sfiati, di maniche filtranti, che costituiscono un'affidabile barriera contro le emissioni in atmosfera e nell'ambiente di lavoro. Successivamente l'amido viene prelevato dall'area di stoccaggio e convogliato al sistema di dosaggio (gravimetrico).

Figura 2 - Silos di stoccaggio dell'amido di mais provvisti di impianti antincendio



Fonte: Novamont

Questo trasporto avviene per via pneumatica all'interno di condotti, che lavorano in depressione rispetto alla pressione atmosferica per evitare rilasci di polveri esplosive nell'ambiente di lavoro. Il caricamento dei dosatori è automatizzato e non richiede la presenza di operatori. Inoltre l'impianto di dosaggio (Figura 3) dell'amido di mais è realizzato conformemente ai dettami della Direttiva Atex e ciò consente di gestire con sicurezza le operazioni di carico. In Tabella 2 sono riportate le misure di prevenzione e di protezione adottate per limitare gli effetti derivanti da eventi incidentali (esposizione dei lavoratori ed esplosione della nube polverosa), che potrebbero essere causati dalla fuoriuscita di polveri di amido di mais. Per ridurre i rischi connessi con tali problematiche sono impiegati, ove possibile, sistemi chiusi, sistemi di aspirazione generali e localizzati, dispositivi di protezione individuale e componenti elettriche compatibili con la classificazione Atex delle aree.

Figura 3 - Dosaggio dell'amido di mais



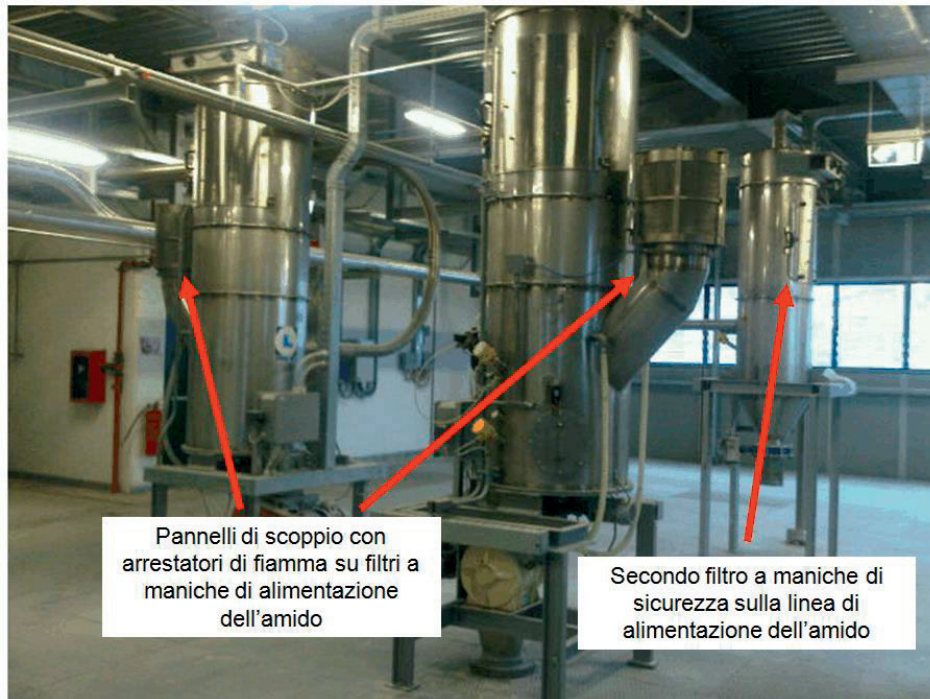
Fonte: Novamont

A tal proposito preme sottolineare come il rilascio di polveri di amido di mais nell'ambiente esterno e la conseguente formazione di cumuli potenzialmente esplosivi [D.Lgs. 233/2003], siano fortemente ridotti per mezzo dell'installazione, lungo la linea di evacuazione in atmosfera della corrente di aria, deputata al trasporto dell'amido, di una serie di filtri a maniche (Figura 4), soluzione che migliora sia le performance di abbattimento (si raggiungono valori prossimi al 99% in particolari condizioni di sporco) che il livello di sicurezza del processo, poiché viene assicurata la presenza in esercizio di almeno un sistema di depolverazione anche durante le fasi in cui si deve procedere al disinserimento dal ciclo di un'unità per la pulizia delle maniche (rimozione del pannello polveroso captato), dipendente dalla caduta di pressione impostata [Lauri R, 2011], o per la sostituzione delle stesse.

Tabella 2 - Misure di sicurezza nella gestione dell'amido di mais

Possibile eventi incidentali o pericolo di contaminazione	Misure adottate			
	Per prevenire l'evento ipotizzato		Per mitigare l'evento ipotizzato	
	Sistemi organizzativi e gestionali	Sistemi tecnici	Sistemi tecnici	Sistemi organizzativi e gestionali
Fuoriuscita di polveri di amido con formazione di cumuli e strati in ambienti esterni (silos e movimentazione)	Certificazione prevenzione incendi	Valvole di sicurezza	Idranti, estintori, sistemi a diluivio per le silerie.	Squadra antincendio e per le emergenze ambientali, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici
	Piano di rimozione degli strati di polveri	Compartimentazione Silos e prevenzione della propagazione dell'esplosione mediante valvole di isolamento		
	Presidio costante durante le operazioni di scarico autosilo (con personale o videosorveglianza)	Trasporto pneumatico in depressione		
	Sistema Certificato di Gestione Qualità, Ambiente e Sicurezza, Procedure Gestionali e istruzioni Operative	Sistemi di filtrazione con doppi filtri a maniche pneumatici ed autopulenti		
		Sistemi di captazione e di aspirazione polveri con filtrazione		
	Autorizzazione da sala controllo dello scarico delle polveri da autosilos	Impianti di trasporto pneumatico, stoccaggio e alimentazione equipotenziati collegati alla rete di terra		
	Impianti elettrici conformi alla Direttiva Atex			
Fuoriuscita di polveri di amido con formazione di nubi in ambienti esterni (silos e movimentazione)	Procedura lavori a caldo	Membrane e pannelli di scoppio	Idranti	Squadra di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici
	Certificazione prevenzione incendi			
	Sistema Certificato di Gestione Qualità, Ambiente e Sicurezza, Procedure Gestionali e istruzioni Operative			
	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra			
	Videosorveglianza delle aree di impianto non presidiate			
Esplosione nubi di polvere di amido all'interno di reparti	Permessi di Lavoro per ogni intervento di manutenzione/modifica di personale esterno/interno	Compartimentazione Silos e prevenzione propagazione esplosione mediante valvole di isolamento	Idranti	Squadra di emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici
	Sistema Certificato di Gestione Qualità, Ambiente e Sicurezza, Procedure Gestionali e istruzioni		Arrestatori di fiamma	
	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra		Impianti di rivelazione fumi, fiamme e calore	
Incendio di cumuli e di strati di polvere all'interno dei reparti	Controlli periodici di impianti elettrici e rete di terra	Sistemi di captazione e di aspirazione polveri con filtrazione	Idranti	Squadra emergenza, manutenzione e controllo della funzionalità dei sistemi tecnici
	Videosorveglianza delle aree di impianto non presidiate		Arrestatori di fiamma	
			Impianti di rivelazione fumi, fiamme e calore	

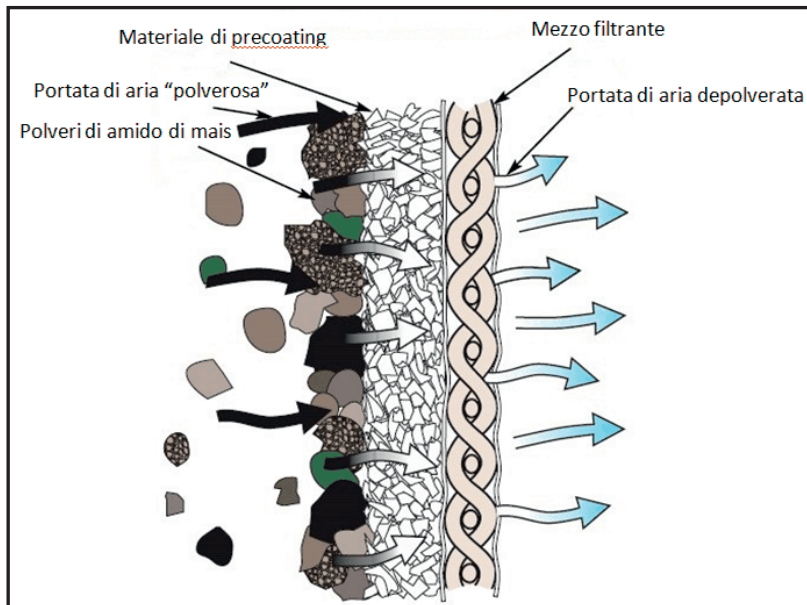
Figura 4 - Filtri a maniche e secondo filtro di sicurezza



Fonte: Novamont

Ogni sistema filtrante (Figura 5) è dotato di dischi di scoppio per la protezione dalle sovrappressioni e di arrestatori di fiamma, data la natura esplosiva delle polveri trattate.

Figura 5 - Funzionamento del filtro a maniche



5. Le aree di produzione dell'impianto

L'impianto è composto dalle seguenti aree:

- produzione dei poliesteri Origo-Bi® (unità PL1), che vengono successivamente impiegati nelle unità TB2 e TB3;
- produzione del Mater-Bi® (reparti di compounding TB2 e TB3).

L'unità PL1 (impianto di polimerizzazione) rientra nell'ambito delle attività soggette al D.Lgs. 59/2005 [D.Lgs. 59/2005 e s.m.i. "Impianti chimici per la fabbricazione di prodotti chimici di base, come polimeri"]. Il prodotto generato (polimeri biodegradabili) da tale unità viene utilizzato prevalentemente nell'area TB3 e all'occorrenza anche nell'unità TB2. L'impianto di polimerizzazione è composto da quattro linee di produzione, suddivise nelle seguenti sezioni:

- 1) stoccaggio delle materie prime solide e liquide;
- 2) caricamento delle materie prime solide mediante tramogge;
- 3) processo di sintesi (processo di esterificazione e processo di polimerizzazione);
- 4) taglio, omogeneizzazione e stoccaggio.

Il ciclo di lavorazione prevede l'impiego delle seguenti materie prime (anche di origine vegetale):

- monomeri (solidi);
- monomeri e additivi (liquidi);
- catalizzatori (liquidi);
- pre-polimeri e additivi (solidi).

Le materie prime vengono prelevate dai silos esterni o dai luoghi destinati allo stoccaggio, convogliate al sistema di dosaggio (Figura 6) ed inviate al reattore di esterificazione.

Figura 6 - Impianto di alimentazione dei monomeri per la produzione di polimeri biodegradabili



Fonte: Novamont

Le differenti modalità di stoccaggio, caricamento, trasporto e dosaggio variano a seconda dello stato fisico della materia prima (Tabella 3). Il processo di sintesi (Figura 7), attuato nell'area produttiva PL1, prevede un'iniziale reazione di esterificazione, a cui segue una reazione di polimerizzazione degli oligomeri, ottenuti per mezzo del primo processo di trasformazione. Il reattore di esterificazione viene alimentato con materie prime liquide, solide e catalizzatori. La reazione di esterificazione dei monomeri genera oligomeri fusi, che vengono successivamente trasferiti alla seconda fase di sintesi (reattore di polimerizzazione), vapori di acqua e sottoprodotti organici volatili (liquidi e vapore).

Tabella 3 - Stoccaggio, caricamento, trasporto e dosaggio delle materie prime

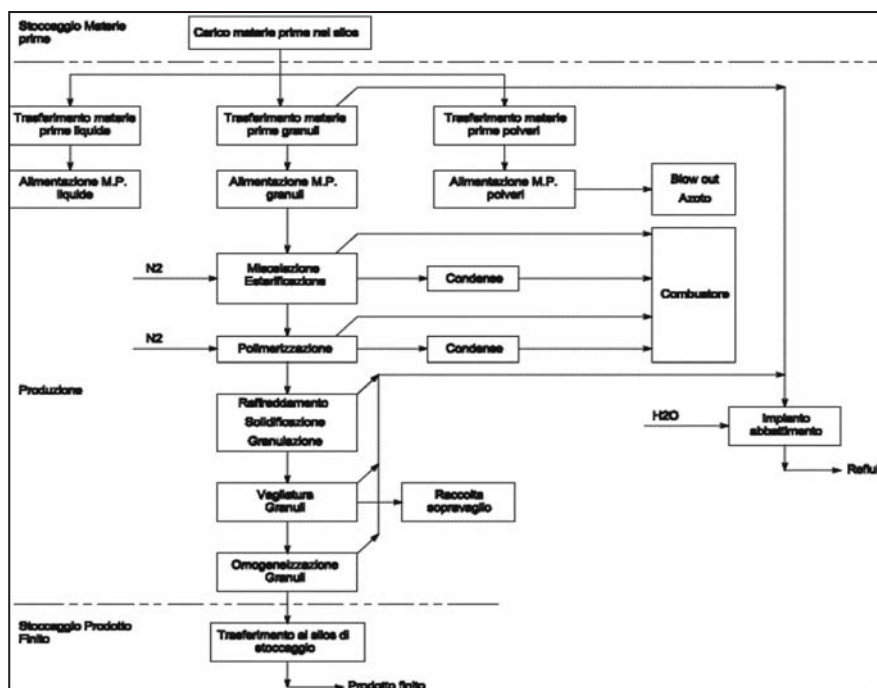
Stato fisico	Stoccaggio	Caricamento	Trasporto	Dosaggio
Solido in granuli	silos	automatico	pneumatico	gravimetrico
Solido in polvere	silos	automatico	pneumatico	gravimetrico
Liquido	serbatoio esterno	automatico	pompa	pompa, misuratore di portata
Liquido (monomeri, catalizzatore)	fusti	manuale		recipienti di dosaggio, che vengono misurati manualmente e caricati

La reazione di polimerizzazione produce polimeri biodegradabili (poliesteri Origo-Bi®) e sottoprodotti volatili (vapori), che vengono condensati e raccolti separatamente:

- I monomeri liquidi vengono reintrodotti nel processo di produzione;
- I sottoprodotti liquidi (facilmente infiammabili) vengono inviati al combustore.

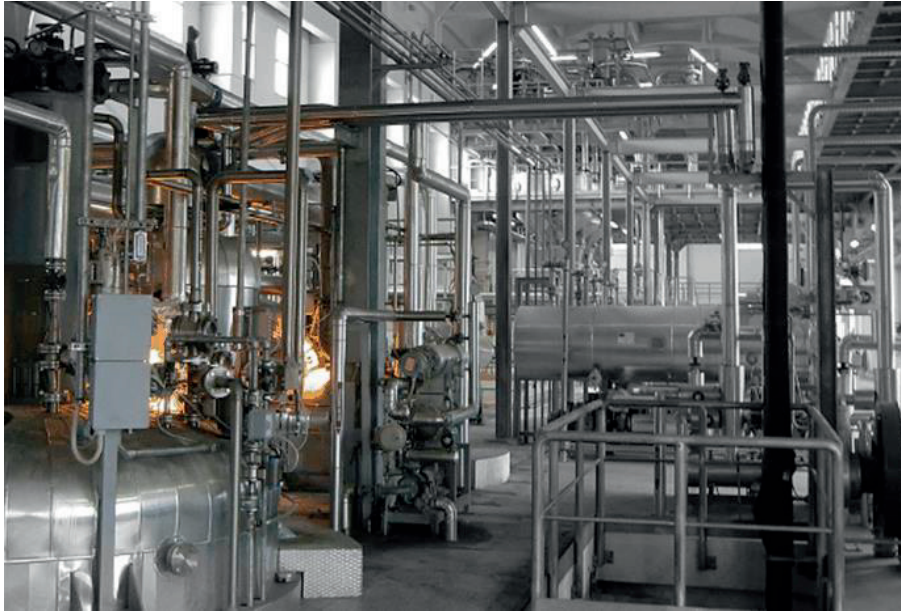
Vengono riportate in Figura 8 le linee di produzione dei polimeri. Tali composti subiscono infine processi di raffreddamento, di solidificazione, di granulazione e di omogeneizzazione dei granuli ottenuti al fine di rispettare le specifiche di prodotto stabilite.

Figura 7 - Ciclo produttivo dell'Unità PL1



Fonte: Novamont

Figura 8 - Linee di produzione dei polimeri biodegradabili



Fonte: Novamont

L'esterificazione è condotta in reattori polmonati con azoto (inertizzazione del reattore), mantenuti a temperatura elevata mediante sistemi di termostatazione ad olio diatermico; la pressione di esercizio può variare dalle condizioni atmosferiche al vuoto. La polimerizzazione avviene sempre in assenza di ossigeno, ad elevata temperatura (sistema di termostatazione ad olio diatermico) ed in condizioni di alto vuoto.

6. Le fasi di lavorazione nelle unità TB2 e TB3

Le fasi del ciclo di lavorazione (Figura 9), realizzato nelle unità TB2 e TB3, sono le seguenti:

- 1) stoccaggio delle materie prime solide e liquide;
- 2) caricamento, dosaggio e miscelazione delle materie prime solide e liquide;
- 3) processo di estrusione/*compounding*;
- 4) taglio dei granuli, omogeneizzazione, stoccaggio del prodotto e confezionamento.

Il prodotto finale delle unità TB2 e TB3 è una bioplastica. Il processo produttivo prevede l'impiego delle seguenti materie prime:

- amido di mais stoccato sfuso in silos;
- polimeri biodegradabili;
- additivi liquidi e solidi.

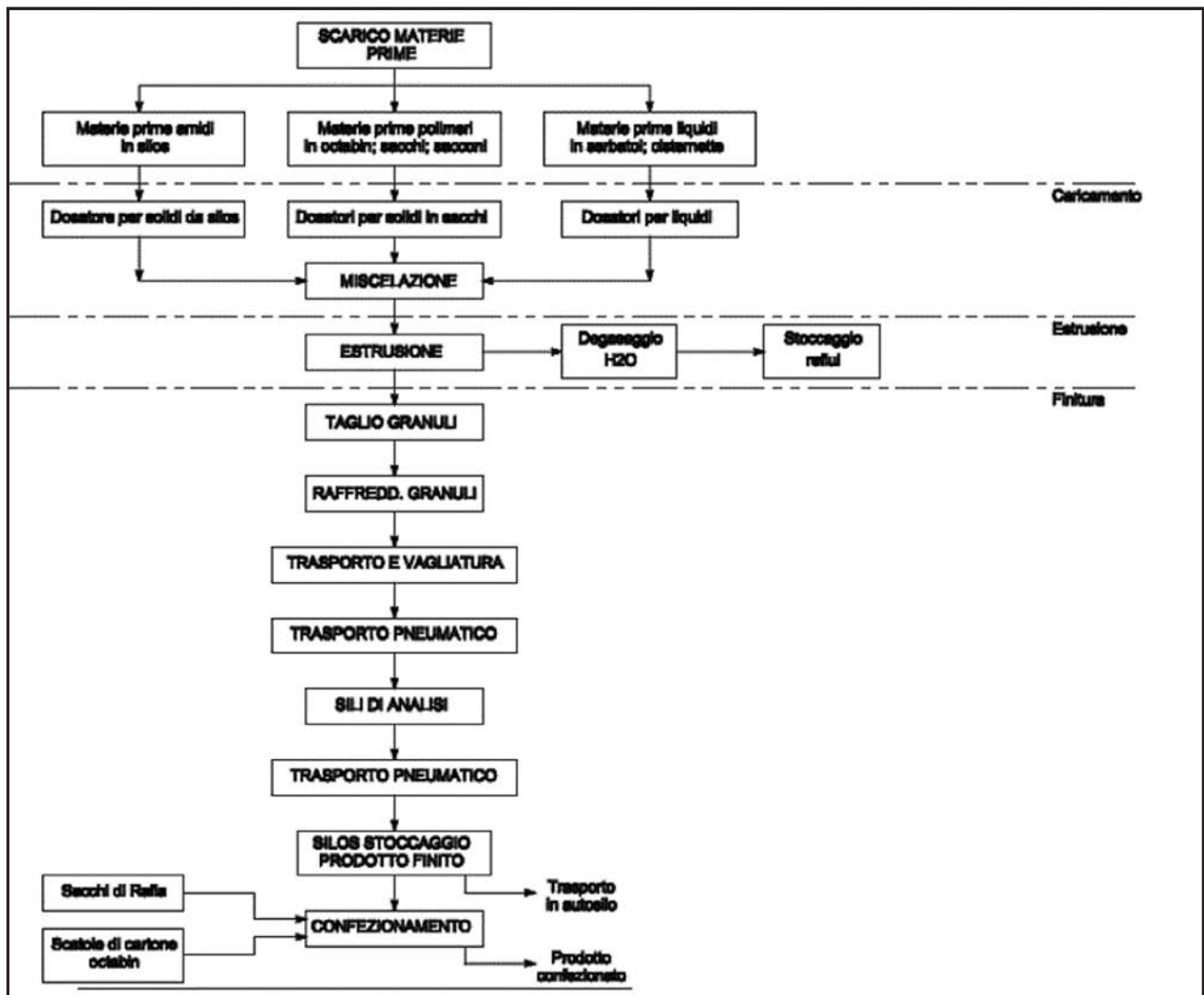
Questi elementi vengono prelevati dai luoghi di stoccaggio, convogliati al sistema di dosaggio ed alimentati con modalità e dispositivi diversi a seconda del loro stato fisico (Tabella 4). Le materie prime, dopo essere state premiscelate, vengono sottoposte ad un processo di *compounding*, nel quale avvengono le trasformazioni chimico-fisiche (destrutturazione, plastificazione e complessazione dell'amido), che portano alla realizzazione del prodotto allo stato fuso. Nella sezione terminale dell'estrusore è presente un sistema di

degasaggio per estrarre le sostanze volatili ed i vapori dal materiale ancora fuso. Il prodotto viene successivamente fatto fluire attraverso la filiera, granulato e raffreddato con un sistema di taglio in testa. I granuli solidi vengono successivamente sottoposti a vagliatura (per ottenere la prestabilita granulometria) ed inviati ai silos di analisi, dove il prodotto viene temporaneamente stoccato in attesa dei test. Il laboratorio di controllo della qualità preleva i campioni di prodotto ed effettua le analisi, che permettono di attestare la rispondenza dello stesso alle specifiche ed agli standard previsti.

Tabella 4 - Stoccaggio, caricamento, trasporto e dosaggio delle materie prime

Stato fisico	Stoccaggio	Caricamento	Trasporto	Dosaggio
Solido in granuli	magazzino	manuale	pneumatico	gravimetrico
Solido in polvere	silos	automatico	pneumatico	gravimetrico
Solido in grani	silos	automatico	pneumatico	gravimetrico
Liquido	serbatoio esterno	automatico	pompa	gravimetrico
Liquido	piazzale esterno	manuale	pompa	gravimetrico o volumetrico

Figura 9 - Ciclo produttivo delle unità TB2 e TB3



Fonte: Novamont

I lotti di produzione, che superano le analisi, vengono stoccati in appositi silos e quindi confezionati.

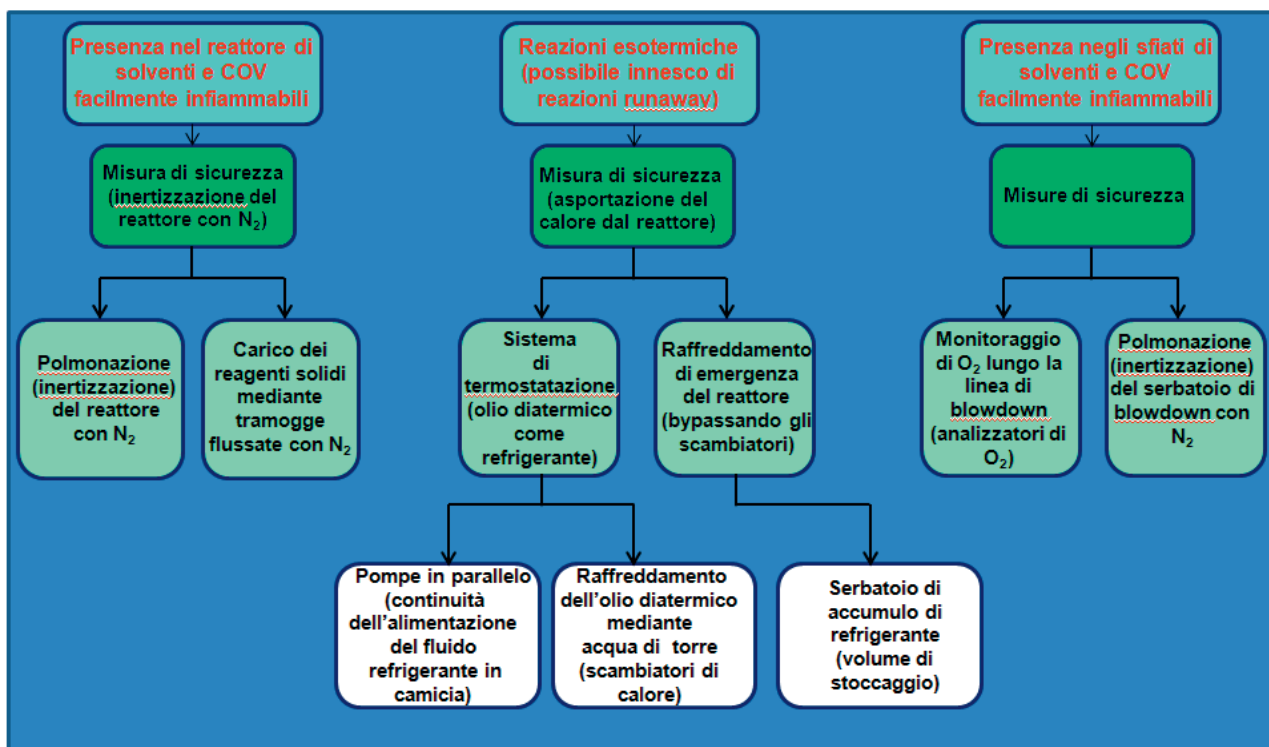
7. La sicurezza nella gestione dei processi dell'impianto di polimerizzazione

Il processo di sintesi prevede un'iniziale reazione di esterificazione, seguita da una polimerizzazione. La conduzione in sicurezza delle citate reazioni è assicurata da misure e scelte progettuali, che vengono successivamente riportate in Figura 10. In particolar modo l'attenzione è stata rivolta a:

- 1) regolazione della temperatura di esercizio (di reazione) dei reattori di esterificazione e di polimerizzazione (sistema di termostatazione) per evitare l'insorgere di reazioni *runaway* (fuggitive);
- 2) alimentazione dei reagenti solidi nei reattori;
- 3) gestione degli sfiati dei reattori (rischio di infiammabilità dovuto alla presenza di solventi infiammabili e composti organici volatili sotto forma di vapori).

Il reattore di esterificazione, a seconda delle fasi, lavora a diversi livelli di temperatura e le sue condizioni termiche sono regolate da un sistema di termostatazione costituito da una serpentina (semitubo saldato sulla superficie esterna del reattore), in cui fluisce olio diatermico, da una batteria di scambiatori a fascio tubiero (in grado di modulare la temperatura dell'olio diatermico in base alle condizioni di esercizio) e da due pompe centrifughe in parallelo (una in funzionamento ed una in *stand-by*). Questa ultima soluzione è stata adottata per garantire continuità alla circolazione del fluido nella camicia (serpentina) anche in caso di guasto di una delle due turbomacchine operatrici. Questo aspetto non è di rilevanza secondaria ai fini del livello di sicurezza del ciclo produttivo, in quanto tale opzione garantisce la sottrazione di calore dal reattore di polimerizzazione, evitando l'insorgere di reazioni fuggitive, che potrebbero essere favorite da fasi esotermiche.

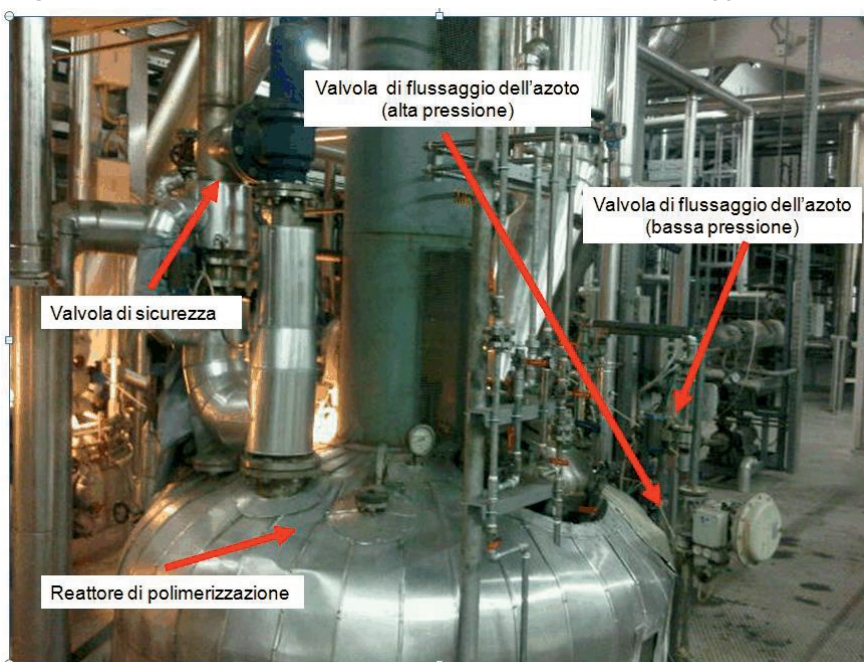
Figura 10 - Misure di sicurezza dei reattori



Una centralina di termostatazione dell'olio, associata ad un sistema automatico di gestione, è in grado di regolare con esattezza la temperatura dell'olio da inviare ai reattori e conseguentemente la temperatura della

massa reagente all'interno di essi. Il riscaldamento del fluido termovettore (olio diatermico) è ottenuto tramite spillamento di olio caldo da un circuito primario, mentre il raffreddamento è ottenuto mediante scambio termico con acqua di torre in scambiatori a fascio tubiero. La reazione di esterificazione è fortemente endotermica ($\Delta H_r > 0$, cioè la reazione avviene con assorbimento di energia dall'esterno) e ciò facilita la gestione del processo poiché sono le reazioni esotermiche ($\Delta H_r < 0$, cioè vi è rilascio di energia verso l'esterno) quelle, che presentano maggiori problematiche di sicurezza, dal momento che è necessario rimuovere il calore prodotto per evitare che ciò produca un aumento della cinetica di reazione, con ulteriore sviluppo di energia termica e la possibilità di innesco di una reazione fuggitiva (*runaway*). A tal proposito nell'unità PL1 viene riscontrata una fase debolmente esotermica nella reazione di polimerizzazione. I processi condotti, la modesta entità dell'energia termica rilasciata e la presenza del sistema di termostatazione in grado di "asportare" con rapidità il calore sviluppatosi attraverso il raffreddamento del fluido termovettore con acqua di torre, consentono di ritenere estremamente basso il rischio di insorgenza di reazioni *runaway*, anche in presenza di errori degli operatori o nell'alimentazione delle materie prime. Nonostante la debole esotermia del processo non si è rinunciato alla possibilità di effettuare un raffreddamento di emergenza (incremento del livello di sicurezza) del reattore di polimerizzazione, qualora le condizioni lo richiedessero. La trasmissione di calore tra il fluido circolante in camicia e la massa reagente all'interno del reattore è favorita, in entrambi i reattori, dall'agitazione meccanica, che consente di avere adeguati valori del coefficiente di scambio termico. Particolare attenzione è stata rivolta alla fase di carico dei reagenti solidi nei reattori (sia di esterificazione che di polimerizzazione) in quanto essi lavorano in condizioni di vuoto e pertanto sono state adottate misure finalizzate ad evitare pericolose infiltrazioni di aria, che potrebbe generare miscele potenzialmente esplosive con i solventi ed i sottoprodotti volatili, presenti nei reattori. Ciò è stato ottenuto con la polmonazione di entrambi i reattori con azoto (Figura 11) per inertizzare il loro volume interno e con l'alimentazione delle materie prime solide mediante tramogge di carico (in leggera sovrappressione) flussate con N_2 (gas inerte) al fine di evitare che l'ambiente "interno" del reattore venga a contatto con l'ambiente esterno (aria).

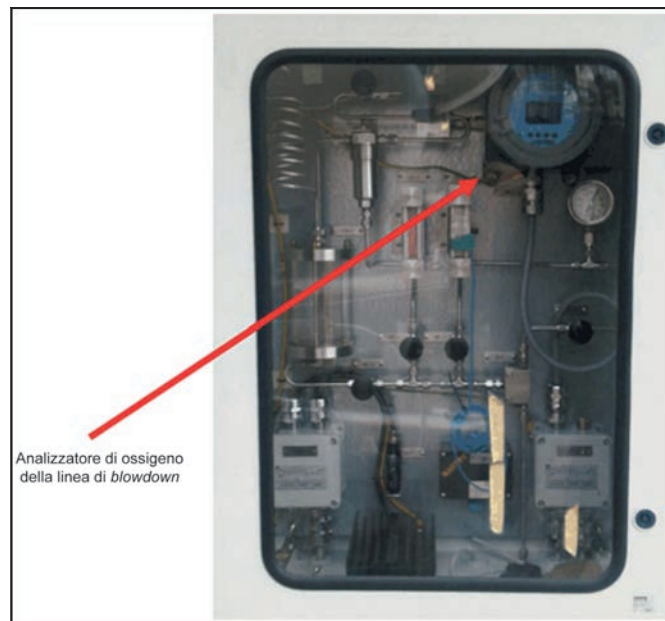
Figura 11 - Testa del reattore di polimerizzazione e linee di flussaggio dell'azoto



Fonte: Novamont

La strumentazione impiegata per la gestione dei processi presenta un elevato grado di affidabilità ed è opportunamente ridondata per garantire elevati standard di sicurezza e di capacità di controllo, evitando pericolose deviazioni dei parametri di esercizio dalle condizioni impostate. Ogni strumento è soggetto a regolari manutenzioni, a verifiche di funzionalità ed a tarature periodiche. La strumentazione installata permette sia la verifica in campo sia il monitoraggio e la supervisione da remoto, presso la sala controllo, dei dati e dei valori delle grandezze di riferimento. Questi ultimi vengono archiviati elettronicamente assieme alla totalità degli allarmi emessi dal sistema di controllo automatico del ciclo produttivo. In questo modo si ottiene un continuo miglioramento nel settaggio delle variabili di processo, che consente di coniugare il raggiungimento della qualità del prodotto finito con la gestione in sicurezza dell'intero ciclo. I reattori sono provvisti di sistemi di protezione dalle sovrappressioni (valvole di sicurezza e dischi di rottura). Particolare attenzione è stata rivolta agli sfiati dei reattori (di esterificazione e di polimerizzazione) a causa della presenza al loro interno di composti infiammabili (sottoprodotti volatili e solventi), che potrebbero essere trascinati nel serbatoio di *blowdown* (unità di raccolta). La portata gassosa, espulsa dagli sfiati, ha un tenore volumetrico di O_2 residuo estremamente basso, che viene costantemente monitorato da analizzatori (Figura 12) per evitare di ricadere all'interno del campo di infiammabilità dei composti presenti. La ridondanza di tale strumentazione assicura continuità alla rilevazione anche in presenza di guasti.

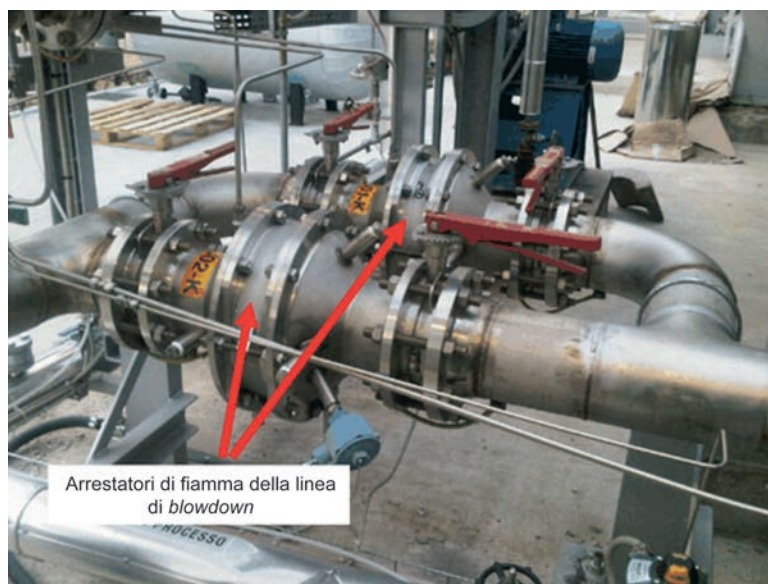
Figura 12 - Analizzatore di O_2 della linea di *blowdown*



Fonte: Novamont

Il sistema è mantenuto in costante depressione al fine di evitare anche minime perdite verso l'esterno. La linea di trasporto degli sfiati al serbatoio di *blowdown* è provvista di misure di protezione dalle esplosioni, quali arrestatori di fiamma (Figura 13) in grado di fermare le onde di combustione in entrambi i verso di flusso e resistere a sovrappressioni anche elevate. Inoltre tale serbatoio è costantemente inertizzato con azoto (Figura 10) per evitare la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive.

Figura 13 - Arrestatori di fiamma della linea di *blowdown*



Fonte: Novamont

BIBLIOGRAFIA

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2009. Guide to Occupational Exposure Values. ISBN: 978-1-882417-96-4.
- Chemical Industry Safety and Health Council of the Chemical Industries Association Ltd. 1977. A guide to Hazard and Operability Studies. London, 1977.
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. G.U. n 101 del 30 aprile 2008.
- Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n. 17. Attuazione della Direttiva 2006/42/CE, relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE relativa agli ascensori. G.U. n. 41 del 19 febbraio 2010.
- Decreto Legislativo 21 settembre 2005, n. 238. Attuazione della Direttiva 2003/105/CE, che modifica la direttiva 96/82/CE, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. G.U. n. 62 del 16 marzo 2005.
- Decreto del Presidente della Repubblica 23 marzo 1998 n. 126. Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva. G.U. n. 101 del 4 maggio 1998.
- Decreto Legislativo 25 febbraio 2000 n. 93. Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione. G.U. n. 91 del 18 aprile 2000.
- Decreto Legislativo 12 giugno 2003 n. 233. Attuazione della Direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive. G.U. n. 197 del 26 agosto 2003.
- Decreto Ministero del lavoro 9 aprile 2008. Nuove tabelle delle malattie professionali nell'industria e nell'agricoltura. G.U. n. 169 del 21 luglio 2008.

- Decreto Ministero del Lavoro 27 aprile 2004. Elenco delle malattie per le quali é obbligatoria la denuncia, ai sensi e per gli effetti dell'art. 139 del testo unico, approvato con decreto del Presidente della Repubblica 30 giugno 1965, n. 1124, e successive modificazioni e integrazioni. G.U. n.134 del 10 giugno 2004.
- International Organization for Standardization. ISO 9001:2008 Quality Management System – Requirements. ISO, 2008.
- International Organization for Standardization. ISO 14001:2004 Environmental Management System – Requirements with guidance for use. ISO, 2004.
- Lauri R. Tecnologie di rimozione del particolato prodotto dalle centrali termoelettriche. La Termotecnica 3, 2011, 65-70.
- Lees FP. Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 1, 2 and 3. Butterworth's, 1996.
- MOVARISCH. URL: <http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1783>.
- Occupational Health and Safety Assessment Series. 2007. BS OHSAS 180001:2007. Occupational health and safety management systems - Requirements. BSI, 2007.
- Regolamento (CE) n. 1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le Direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006. GUCE L 353/1 del 31 dicembre 2008.

Le nuove prospettive Eni per la produzione di biocarburanti: dalla *biorefinery* di Venezia alle microalghe

Andrea Amoroso¹, Felicia Massetti²

¹ENI S.p.a. Divisione Refining & Marketing, Tecnologie di Processo & Licensing, Roma

²ENI S.p.a. Divisione Refining & Marketing, Unità Processi, Tecnologie energetico-ambientali, Direzione R&S, Roma

Eni e la produzione di biocarburanti

L'industria europea della raffinazione sta attraversando un periodo molto difficile, caratterizzato già da alcuni anni da perdite economiche, dalla riduzione della domanda dei prodotti petroliferi e dalla conseguente sovracapacità di raffinazione installata.

In tale contesto, Eni ha investito in un progetto innovativo che porterà alla conversione del tradizionale schema di una delle sue raffinerie, Raffineria di Venezia, ad un ciclo *green*, per la produzione di biocarburanti (HVO) di elevata qualità a partire da biomasse oleose.

Il progetto chiamato *Green Refinery* è incoraggiato dallo scenario europeo dei biocarburanti, fortemente legato alla politica ambientale dell'Unione Europea volta alla riduzione delle emissioni di gas serra, espressa dalle Direttive *Fuel Quality* 1998/70/CE e *Renewable Energy* 2009/28/CE. Per soddisfare le prescrizioni delle Direttive Europee, Eni utilizza ogni anno quasi 1 Mt di biocarburanti (FAME, etanolo e bioETBE), ad oggi totalmente acquistato sul mercato.

Con il Progetto *Green Refinery* Eni produrrà autonomamente circa la metà del proprio fabbisogno di biocarburanti, attraverso l'utilizzo della tecnologia ECOFININGTM, sviluppata congiuntamente da Eni/HoneywellUOP, portando la Raffineria di Venezia ad essere un esempio di innovazione tecnologica unico al mondo.

La configurazione di bioraffineria delineata dal progetto *Green Refinery* costituisce un assetto operativo alternativo a quello tradizionale e non prevede un aumento di capacità degli impianti. Gli interventi necessari per riadattare gli impianti esistenti al nuovo ciclo produttivo sono stati minimizzati e sono configurabili quali attività di "manutenzione straordinaria". Il progetto è incentrato principalmente sulla conversione delle due unità di desolforazione gasoli.

La modalità operativa "bio" è caratterizzata da un miglioramento del quadro ambientale rispetto all'assetto tradizionale (acque ed emissioni).

Va inoltre sottolineato che presentando il biodiesel tradizionale (FAME) una limitazione al *blending* al 7%, non può ottemperare alle prescrizioni della normativa RED 20-20-20, tale limitazione potrà essere superata con i diesel rinnovabili di nuova generazione (HVO) prodotti con la nuova tecnologia e di caratteristiche superiori al FAME.

Il processo inoltre è indipendente dalla fonte rinnovabile utilizzata, che sia essa di I (oli vegetali), II (grassi animali e oli esausti di cottura) o III generazione (biomasse derivate da alghe e rifiuti).

Il progetto *Green Refinery* a Venezia rappresenta per Eni una scelta strategica, in quanto permette di garantire attraverso uno schema innovativo un futuro produttivo, economicamente sostenibile e migliorativo del quadro ambientale per un sito industriale che, subendo in maniera particolare le pressioni della presente situazione economica a causa del suo schema a bassa conversione, era altrimenti destinato a chiusura.

La "Bioraffineria" sarà in grado di produrre a regime circa 500 kt/a di biocarburanti di elevata qualità a partire da biomasse oleose, inizialmente di prima generazione come olio di palma, per poi integrare nel ciclo anche cariche di seconda e terza generazione.

Come attività di Ricerca e Sviluppo sul tema dei nuovi biocarburanti uno dei settori fortemente presidiati da Eni riguarda la produzione di HVO dalle microalghe che rappresentano una delle fonti rinnovabili di terza generazione.

Le microalghe sono organismi monocellulari che vivono in ambiente acquoso (acqua dolce, marina, ipersalina), di piccole dimensioni che, al pari delle piante maggiori, hanno la capacità di proliferare grazie alla fotosintesi clorofilliana riuscendo quindi a biofissare la CO₂ disciolta nell'ambiente acquoso sfruttando l'energia solare.

Le microalghe si caratterizzano in particolare per le alte capacità produttive di componenti oleosi, per aree del sud Italia, come quelle siciliane, si possono indicare dalle 10 alle 30 tonnellate di lipidi per ettaro all'anno contro circa cinque della palma ed una della colza.

Altro fattore da sottolineare è che le microalghe possono essere considerate una *energy crop* da coltivare in terreni marginali e quindi non impattano con l'area *food*. Attualmente vengono utilizzate tal quali per l'alimentazione dei pesci (acquacoltura) oppure vengono processate per ottenere composti di pregio che trovano collocazione in campo nutrizionale, farmaceutico e cosmetico.

In Eni la ricerca sulle microalghe ha preso l'avvio nel 2003. Nelle prime fasi della sperimentazione è stato possibile dimostrare che alcune specie algali sono capaci di proliferare sia su acqua dolce che marine utilizzando l'anidride carbonica contenuta nei gas di scarico di caldaie murali di riscaldamento domestico alimentate a gas naturale.

La biomassa raccolta è stata utilizzata in un digestore anaerobico per la produzione di biogas. La coltivazione algale è stata poi effettuata su impianti pilota di piccola dimensione collocati nel centro ricerche di Monterotondo. I risultati si sono rivelati promettenti ottenendo produttività medie di biomassa di 15-25 g/m²/giorno (corrispondenti a 50-80 ton/ha/anno).

Sulla base di queste evidenze, le attività sperimentali sono state trasferite nel 2007 presso la Raffineria di Gela che tra quelle italiane si presentava la più adatta per via delle condizioni climatiche e infrastrutturali. In questa raffineria è stato dimostrato che alcune specie algali erano capaci di crescere su acque reflue dell'impianto di trattamento dello scarico industriale utilizzando come fonte di carbonio la CO₂ prodotta da un impianto (Texaco). A seguito di una attività in raffineria su *bench* scale ed una prima fattibilità tecnica economica, è stato realizzato un impianto pilota costituito da una sezione di crescita ed *harvesting* della biomassa in *open ponds*, (sezione *upstream*) con vasche da 50, 200, 1.000, 2.000 m² per un totale di un ha ed una sezione di recupero della fase oleosa (sezione *downstream*) composta da una sezione di termolisi e idrolisi acida per recuperare solamente gli acidi grassi dalla componente oleosa.

L'attività pilota tuttora in corso ha consentito di mettere a punto la coltivazione andando a selezionare specifici ceppi ed a controllarne la crescita e le fasi successive di *dewatering*.

Attualmente Eni sta anche studiando un processo *downstream* per il recupero della frazione oleosa attraverso una operazione di estrazione con solvente sulla biomassa umida; è in corso una seconda fattibilità tecnico-economica per la produzione di 50.000 t/a di biolio per individuare la filiera più affidabile ed economica per ottenere l'olio. Uno dei punti rilevanti del processo di recupero dell'olio dalle microalghe,

oggetto di approfondimento da parte eni, riguarda l'*upgrading* dell'olio estratto per finalizzarlo alla produzione di *greendiesel* con la tecnologia *Ecofining* in fase di *start up* a Venezia e la valorizzazione.

Sulla base dei risultati delle attività programmate nel 2014, che prevedono sia il completamento della fattibilità tecnica economica che un primo studio di LCA, Eni potrà testare l'intero processo di coltivazione e recupero del biolio dalle microalghe sul pilota di Gela opportunamente revampato.

IL SETTORE DEL BIOGAS IN ITALIA ED ASPETTI DI SICUREZZA

Biogas: le opportunità di sviluppo per l'Italia

Ezio Veggia

Confagricoltura, Roma

Il biogas in Italia

Confagricoltura è l'Organizzazione agricola, che ha maggiormente promosso in questi anni lo sviluppo delle bioenergie ed in particolare della filiera agricola del biogas, riconoscendone il forte valore economico, ambientale e sociale. Uno sviluppo che ha fatto segnare risultati importanti in soli pochi anni. Secondo gli ultimi dati pubblicati a fine 2013 dal GSE, gli impianti di produzione di biogas, limitatamente a quelli alimentati con deiezioni animali e materie prime derivanti da attività agricole, installati in Italia a fine 2012, erano 1.168 per una potenza complessivamente installata di 793,5 MW_{el}. Considerando il trend di crescita registrato nel 2013, soprattutto nel primo semestre, si può stimare un numero di circa 1.300 impianti, attualmente in produzione. Possiamo dunque affermare che il settore agricolo stia contribuendo in misura significativa al raggiungimento degli obiettivi clima energia al 2020 e che sia sicuramente pronto a raccogliere la sfida degli ancor più ambiziosi obiettivi, proposti dall'UE per il 2030 in materia di energie rinnovabili e di diminuzione delle emissioni climalteranti, che dopo il 2020 vedranno coinvolti anche i settori non soggetti all'*Emission Trading Scheme* e dunque l'Agricoltura. Si tratta di temi di notevole interesse per le imprese agricole che, anche con il supporto della nuova programmazione della P.A.C per il periodo 2014-2020, mirano ad essere sempre più competitive, innovando i propri processi produttivi in un'ottica di sviluppo sostenibile. Alle politiche di sostegno alla produzione elettrica e termica da biomasse, si è aggiunto di recente un ulteriore strumento di promozione. Il Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 5 dicembre 2013 ha infatti definito il sistema di incentivazione del biometano introducendo diverse tipologie di incentivo in relazione alle possibili destinazioni (combustibile/carburante). Dunque non solo energia elettrica e termica da biogas prodotto da biomasse agricole, ma anche biocarburanti. Il biometano è un "idrocarburo rinnovabile", che può essere usato senza alcuna miscelazione e senza dover in alcun modo modificare le apparecchiature attualmente alimentate a gas naturale. Può essere ottenuto sia con processi di purificazione e di *upgrading* del biogas che attraverso la metanazione dell'idrogeno o anche partendo da processi di gassificazione delle biomasse. L'immissione di biometano nella rete del gas naturale offre l'opportunità per un utilizzo più efficiente dell'energia rispetto a quanto ottenibile oggi dalla combustione del biogas nei cogeneratori, sistemi nei quali molto spesso, causa la loro collocazione lontano dai centri abitati e dagli insediamenti manifatturieri, la frazione di energia generata sotto forma di calore viene in minima parte utilizzata. I vantaggi non si fermano all'efficienza: flessibilità di utilizzo e disaccoppiamento nei momenti di sfruttamento di energia elettrica e calore sono importanti caratteristiche che ben si sposano col biometano. La programmabilità, infatti, della produzione elettrica da biogas consente di modulare la potenza immessa in rete e dunque possiamo immaginare di indirizzare il biogas all'elettrico (nelle ore in cui cala la produzione

derivante dal sole e dal vento) piuttosto che all'*upgrading* a biometano in relazione alle esigenze della rete. In momenti poi di eccesso di offerta di energia elettrica in rete, si può prelevare dalla rete l'energia elettrica (prodotta da fonti intermittenti), producendo da questa idrogeno da inviare a successiva metanazione con la CO₂ recuperata dal biogas, immettendo poi nella rete del gas non solo metano biologico, ma anche l'energia elettrica eccedente trasformata in metano rinnovabile.

Il biometano, immesso in rete o trasportato con carri bombolai, può essere utilizzato in sistemi cogenerativi delocalizzati rispetto a dove viene prodotto, ubicati laddove risulta elevata la richiesta sia di energia elettrica sia di energia termica. Un altro possibile ed importante impiego del biometano, come già indicato, è quello di "biocarburante" per autotrazione. Riteniamo che proprio quest'ultimo uso possa avere maggiori potenzialità di sviluppo e offrire interessanti opportunità per il settore agricolo, considerate le possibilità offerte dai diversi sistemi di incentivazione delle diverse forme di energia e visto l'attuale quadro politico economico. Va infatti sottolineato che l'Italia è leader europeo per i veicoli a gas naturale: il parco auto a metano circolante (circa 860.000 veicoli) è nove volte superiore a quello della Germania, secondo Paese in questa particolare graduatoria. Inoltre va ricordato che nell'ultimo anno nella nostra Nazione, in un contesto di sostanziale e generale contrazione delle immatricolazioni di autovetture, vi è stato un incremento di vendite di veicoli alimentati a gas metano superiore al 28%. La percezione che abbiamo è che il processo di digestione anaerobica sia in grado non solo di produrre energia, ma di modificare, migliorandola, la capacità produttiva delle aziende agricole nel loro insieme, rendendole maggiormente competitive sui mercati alimentari e foraggeri tradizionali. L'impianto di produzione di biogas/biometano non deve essere considerato come sostitutivo delle attività tradizionali dell'azienda agricola, ma come una piattaforma tecnologica attorno alla quale pianificare nuovi investimenti, che consentano un'integrazione delle attività nell'ottica di una moderna multifunzionalità dell'agricoltura. In sintesi il biogas è una grande occasione di sviluppo della bioeconomia europea in quanto, oltre ad offrire una valida opportunità economica, presenta positivi impatti ambientali dovuti alla significativa diminuzione di emissioni legata alla stabilizzazione dei materiali organici mediante il processo di digestione anaerobica delle deiezioni, all'uso dei sottoprodotti agricoli ed agroindustriali, e soprattutto alla possibilità di sostituire fertilizzanti chimici con un ammendante organico di ottima qualità in grado di ridare fertilità ai terreni. Grazie soprattutto alla grande disponibilità di sottoprodotti, effluenti zootecnici, residui agroindustriali, oltre a colture di integrazione in rotazione a quelle tradizionali o a nuove colture introducibili potenzialmente anche in terreni marginali (senza cioè sottrarre risorse dedicate alla coltura per l'alimentazione umana), si stima che il biometano possa raggiungere la non trascurabile produzione di 4-5 miliardi di metri cubi all'anno entro il 2030. Il Decreto è sicuramente un passo fondamentale nella direzione di uno sviluppo della filiera biogas-biometano, ma per una completa attuazione delle disposizioni occorre completare rapidamente il quadro regolatorio di competenza dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas e del GSE. Purtroppo alcune ombre si stanno addensando sul settore.

Il Decreto Legge 145/2013 "Destinazione Italia", convertito in Legge di recente contiene una serie di disposizioni preoccupanti per il futuro delle rinnovabili: dall'eliminazione dei prezzi garantiti per la cessione dell'energia al GSE nel regime di ritiro dedicato per i piccoli impianti, alla rimodulazione degli incentivi. Obiettivi che, se da una parte vanno nella direzione di ridurre il costo dell'energia per i consumatori, dall'altra rischiano di provocare danni non solo per l'ulteriore sviluppo delle energie rinnovabili, ma anche per gli impianti già in produzione. La normativa ambientale frena l'utilizzo dei sottoprodotti, degli effluenti zootecnici

(tra cui la pollina), creando incertezze tra gli imprenditori agricoli, nonostante vi sia un chiaro indirizzo sul favorire l'utilizzo energetico dei residui provenienti dall'agricoltura. La normativa presenta alcuni aspetti non chiari sull'utilizzazione agronomica del digestato, che sempre più si sta rivelando un fertilizzante organico di elevata qualità, che permette di gestire in modo sostenibile, sia dal punto di vista economico che ambientale, la concimazione dei terreni. Interpretazioni distorte rischiano infatti di classificare rifiuto ciò che è un prezioso fertilizzante derivante da residui organici e vegetali.

Una simile problematica deve essere affrontata e risolta anche nell'ambito della questione nitrati, dove le imprese della pianura padana da tempo attendono risposte concrete ai numerosi problemi, che riguardano l'applicazione della Direttiva 91/676/CEE: dalle modifiche al D.M. 7 aprile 2006 per dare certezza all'utilizzazione agronomica del digestato, ad una maggiore flessibilità nei periodi di utilizzo degli effluenti zootecnici. In attesa che sia concluso lo studio dell'ISPRA, diretto ad aggiornare la delimitazione delle aree vulnerabili, anche sulla base del ruolo effettivo sull'inquinamento delle acque esercitato dalle diverse sorgenti di contaminazione da nitrati (fertilizzanti organici e chimici, civile, fanghi da depurazione).

La valorizzazione delle biomasse attraverso la digestione anaerobica

Marco Boggetti

ERAPRA Piemonte, Torino

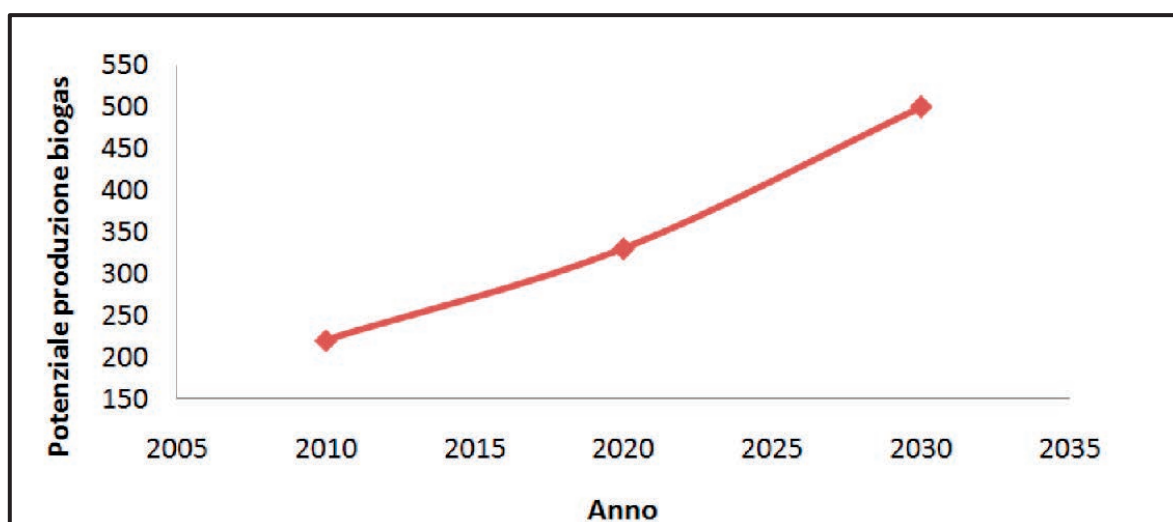
Introduzione

La crescente domanda di energia e la necessità di incrementare l'utilizzo di fonti energetiche alternative spingono ad allargare il contributo delle fonti rinnovabili nell'ambito della produzione di energia elettrica. Nel novero delle fonti rinnovabili rientra il biogas, generato dalla digestione anaerobica delle biomasse [Al Seadi, 2008]. Nel corso degli ultimi dieci anni la digestione anaerobica si è notevolmente diffusa in molti Paesi europei, tra i quali anche l'Italia. Questa tecnologia viene utilizzata non solo allo scopo di recuperare energia rinnovabile, il biogas, ma anche per controllare le emissioni maleodoranti e per stabilizzare le biomasse prima del loro utilizzo agronomico. In Italia la normativa sugli incentivi all'autoproduzione di energia elettrica da fonti rinnovabili si è tradotta in un rinnovato interesse verso gli impianti di biogas.

Secondo le stime dell'Autorità Energetica Tedesca (DENA), il territorio europeo potrebbe arrivare a produrre oltre 500 miliardi di kWh/anno entro il 2030.

In Figura 1 si riporta lo sviluppo potenziale della produzione di biogas in Europa.

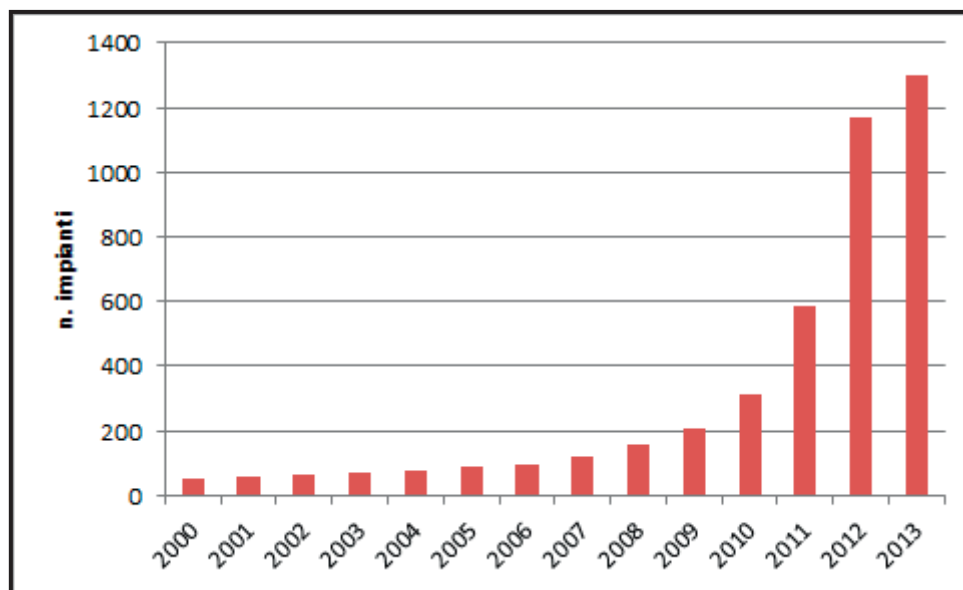
Figura 1 - Sviluppo potenziale della produzione di biogas in Europa



Fonte: DENA, URL: <http://www.dena.de>

Al fine di assolvere a livello nazionale agli obblighi della citata Direttiva 2009/28/CE, è stato spinto lo sviluppo della produzione di biogas in sostituzione di combustibili di origine fossile (metano e GPL) normalmente utilizzati come fonte energetica per riscaldamento, produzione di energia elettrica ed altri usi. In Italia il settore ha ampliato considerevolmente la propria importanza e si può stimare al 2013 un numero di circa 1.300 impianti, attualmente in produzione (Figura 2).

Figura 2 - Numero di impianti di biogas installati in Italia dal 2000 al 2013



Fonte: Fabbri C. et al., 2013

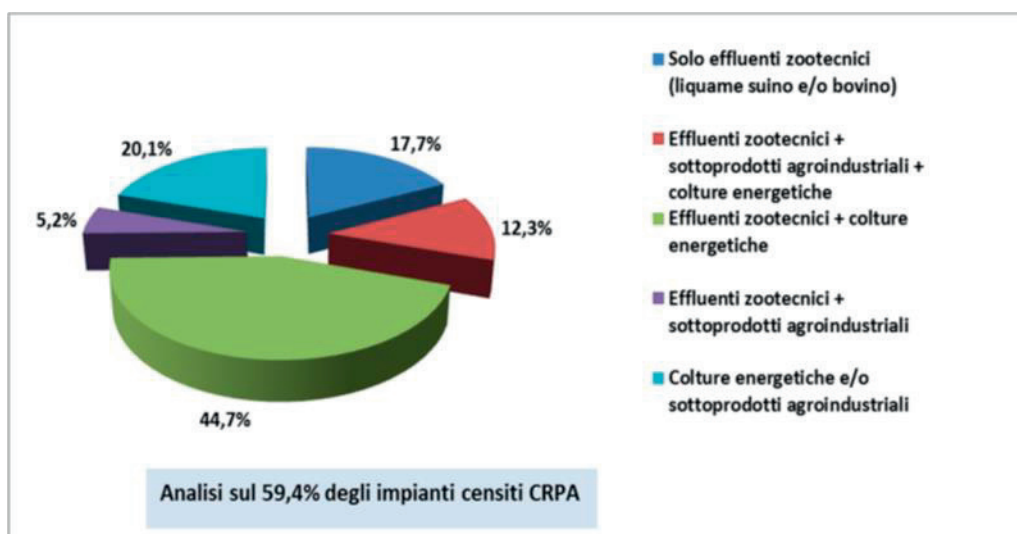
Lo sviluppo del biogas in Italia è stato caratterizzato da una pronunciata presenza nelle regioni del Nord dove, al 2012, si concentra il 77% degli impianti costruiti e l'81% della potenza elettrica installata. La regione maggiormente rappresentativa in termini di numero di impianti è la Lombardia, con 374 impianti (pari al 37,6% del totale nazionale), seguita dal Veneto con 151 impianti (pari al 15,2% del totale), Emilia-Romagna con 143 impianti (pari al 14,4% del totale) e Piemonte con 106 impianti (pari al 10,7%).

La tipologia di alimentazione degli impianti a biogas sul territorio nazionale è costituita da diverse tipologie di biomasse:

- il 44,7% degli impianti è alimentato da effluenti zootecnici e colture energetiche (38,2% della potenza installata);
- il 20,1% da colture energetiche e/o sottoprodotti agroindustriali (22,4% della potenza installata);
- il 17,7% solo da effluenti zootecnici (3,2% della potenza installata);
- il 12,3% è alimentato da effluenti zootecnici, sottoprodotti agroindustriali e colture energetiche (11,8% della potenza installata);
- il rimanente 5,2% è alimentato da effluenti zootecnici e sottoprodotti agroindustriali (24,4% della potenza installata).

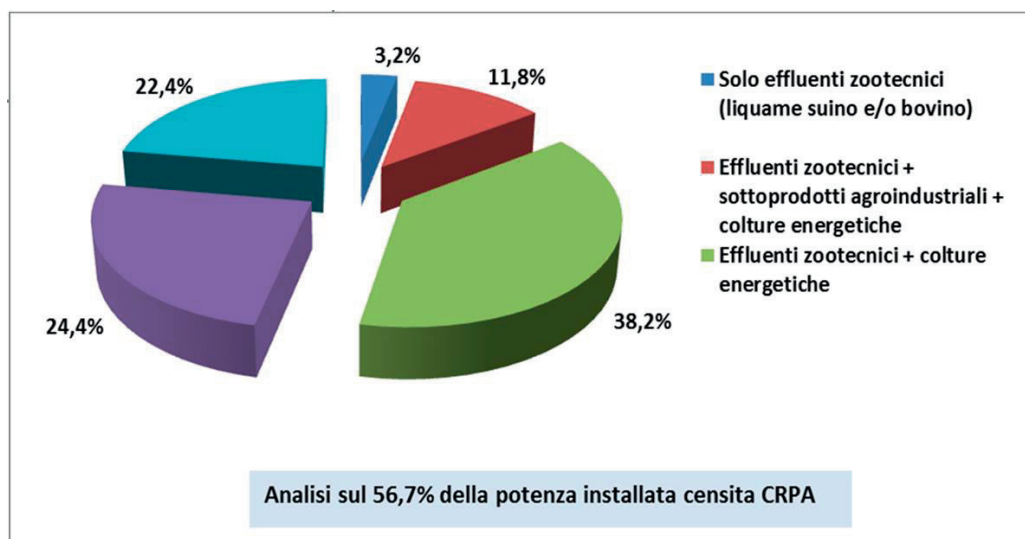
Nelle Figure 3 e 4 vengono indicati rispettivamente la ripartizione degli impianti a biogas in base alla tipologia di alimentazione ed alla potenza elettrica installata.

Figura 3 - Ripartizione degli impianti a biogas in funzione della tipologia di biomassa di alimentazione



Fonte: Fabbri C. et al., 2013

Figura 4 - Ripartizione della potenza elettrica installata in funzione della tipologia di biomassa di alimentazione



Fonte: Fabbri C. et al., 2013

1. Il processo di digestione anaerobica e le biomasse utilizzabili

Dalla fermentazione anaerobica di biomasse di scarto o di bassa qualità si ottiene il biogas, prevalentemente una miscela a base di metano con numerose sostanze spurie (anidride carbonica, ossigeno, azoto, idrogeno libero, Idrogeno solforato, idrocarburi aromatici, ecc.) [Cuček & al. 2011]. Nel presente documento si fa riferimento al biogas agricolo che nella composizione tipica ha concentrazioni dal 55 al 58% di metano, dal 35% al 38% di anidride carbonica, ossigeno ed azoto al di sotto del 1%. L'idrogeno solforato è in concentrazioni fino a 180 ppm, gli aromatici sotto 1 ppm.

In Tabella 1 viene riportata la resa indicativa in biogas di biomasse di diversa natura.

Tabella 1 - Biomasse per la digestione anaerobica e relativa resa indicativa in biogas espressa in m³ per tonnellata di solidi volatili (SV)

Materiali	m ³ biogas/ t SV
Deiezioni animali	200-500
Frazione organica dei rifiuti solidi urbani	400-600
Fanghi da impianti di depurazione di acque reflue urbane	250-350
Scarti organici e acque reflue dell'agro-industria	400-800
Colture non alimentari ad uso energetico	550-750
Residui colturali	350-400

Fonte: Baccaro S. et al., 2011

Il processo di digestione anaerobica consente inoltre di ottenere una migliore qualità dei residui rispetto ad altri processi biodegradativi. I fanghi anaerobici sono stabilizzati e presentano un contenuto elevato di sostanze azotate, che li rende particolarmente adatti all'utilizzo come *compost* in agricoltura; l'uso di tali fanghi migliora consistenza, capacità di trattenere umidità, aereazione e capacità tamponante del suolo.

1.1 Effluenti zootecnici

Gli effluenti zootecnici avviabili alla digestione anaerobica sono il liquame suino, quello bovino e le deiezioni avicole. Il liquame suino è caratterizzato da un contenuto di sostanza secca o solidi totali (1-6%) e di sostanza organica (o solidi volatili) estremamente variabile a causa delle differenti tipologie di allevamento comunemente presenti sul territorio. Dal liquame prodotto da un suino da ingrasso del peso medio di 85 kg si possono ottenere mediamente 0,100 m³ di biogas al giorno. Il contenuto di solidi totali del liquame bovino oscilla tra l'8 e il 15% e varia oltre che in funzione del tipo di allevamento anche in base alla quantità di paglia aggiunta nelle stalle. Dal liquame prodotto da una vacca da latte del peso medio di 500 kg si possono ottenere mediamente 0,750 m³ di biogas al giorno. Tra le varie deiezioni avicole, la pollina di galline ovaiole è quella che più si presta alla digestione anaerobica, perché l'allevamento in gabbie non prevede l'uso di lettiera. Le deiezioni, asportate fresche, presentano un contenuto in solidi totali del 18-20% ed alto contenuto di azoto. L'ammoniaca, che si libera in presenza di acqua per idrolisi enzimatica, può raggiungere alte concentrazioni e inibire il processo di digestione e dare luogo a forti emissioni nella fase di stoccaggio del digestato. Inoltre frequentemente la pollina contiene inerti che, sedimentando, possono causare problemi operativi e ridurre il volume utile dei reattori [Piccinini et al., 2008].

1.2 Frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU)

Nei rifiuti urbani domestici la percentuale di frazione organica umida è compresa in genere tra il 25% e il 35% in peso. La composizione media di questa frazione, se derivante da raccolta differenziata secco-umido non differisce in modo sostanziale dall'organico raccoglibile da utenze selezionate, quali mercati all'ingrosso dell'ortofrutta e dei fiori, mercati ittici e rionali, esercizi commerciali di generi alimentari, punti di ristoro (pizzerie, ristoranti, ristorazione collettiva). La presenza di piccole quantità di plastica e vetro è in genere inferiore al 5% sul totale. Queste frazioni organiche presentano un elevato grado di biodegradabilità ed umidità (> 65%), che le rendono adatte alla digestione anaerobica. Il loro uso non è, però, consigliabile negli

impianti di biogas aziendali per liquami zootecnici, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento. La FORSU è un substrato abbastanza eterogeneo e la resa in termini di produzione di biogas dipende innanzitutto dalle caratteristiche del substrato e dalla configurazione impiantistica con cui il processo viene condotto [Mata Alvarez et al., 2000].

1.3 Fanghi da impianti di depurazione di acque reflue

I fanghi da impianti di depurazione di acque reflue sono costituiti da biomassa microbica e da sostanza inerte, organica ed inorganica, a basso tenore in solidi e di sostanza volatile. Considerando che la digestione anaerobica dei fanghi di depurazione rappresenta un mezzo per la stabilizzazione della sostanza organica e la distruzione degli eventuali microrganismi patogeni, allo scopo di rendere il residuo consono allo smaltimento finale. Essa rappresenta una più che valida opzione che riduce le problematiche di gestione dei fanghi di depurazione, permettendo nel contempo, di ricavare l'energia necessaria al funzionamento degli stessi.

1.4 Scarti organici e acque reflue dell'agro-industria

Le ingenti quantità di prodotti agricoli lavorati dall'industria alimentare producono reflui spesso avviabili alla digestione anaerobica. Tipici sottoprodotti e scarti agro-industriali sono, ad esempio, il siero di latte, contenente proteine e zuccheri, scarti dall'industria casearia, dalla lavorazione del pomodoro, ecc. Di interesse per la digestione anaerobica sono anche diversi scarti organici liquidi e/o semisolidi dell'industria della carne (macellazione e lavorazione della carne), quali grassi, sangue, contenuto stomacale, ecc. Tali residui, ad esempio, possono essere addizionati come co-substrati nella co-digestione di liquami zootecnici e/o fanghi di depurazione.

1.5 Colture non alimentari ad uso energetico

La coltivazione di piante specifiche da avviare alla digestione anaerobica per la produzione di biogas può essere una soluzione per ridurre la sovra-produzione agricola, ma anche una valida alternativa per l'utilizzo di aree incolte e a riposo o di aree irrigate con acque recuperate dai depuratori urbani. Nel corso degli ultimi anni molti studi sono stati effettuati su mais, sorgo, foraggi, ecc., per valutarne le caratteristiche ai fini del loro utilizzo energetico e la resa in biogas. Anche le tecnologie impiantistiche attualmente in via di sviluppo sono orientate all'introduzione di tali substrati, sia liquidi che solidi, nel digestore. L'uso delle colture energetiche come co-substrato, infatti, permette di ottimizzare la produzione di biogas e il riciclo dei nutrienti. Questo perché possono essere prodotte in azienda ed essere addizionate come co-substrati agli effluenti zootecnici direttamente o dopo insilamento e il digestato ottenuto a seguito del trattamento anaerobico può essere utilizzato per fertilizzare le aree agricole in cui le stesse vengono coltivate [Faini et al., 2004].

1.6 Residui colturali

Si tratta di residui provenienti dai raccolti agricoli quali foraggi, frutta e vegetali di scarsa qualità, percolati da silos e paglia, che possono essere addizionati come co-substrati alle deiezioni animali [Piccinini et al., 2008].

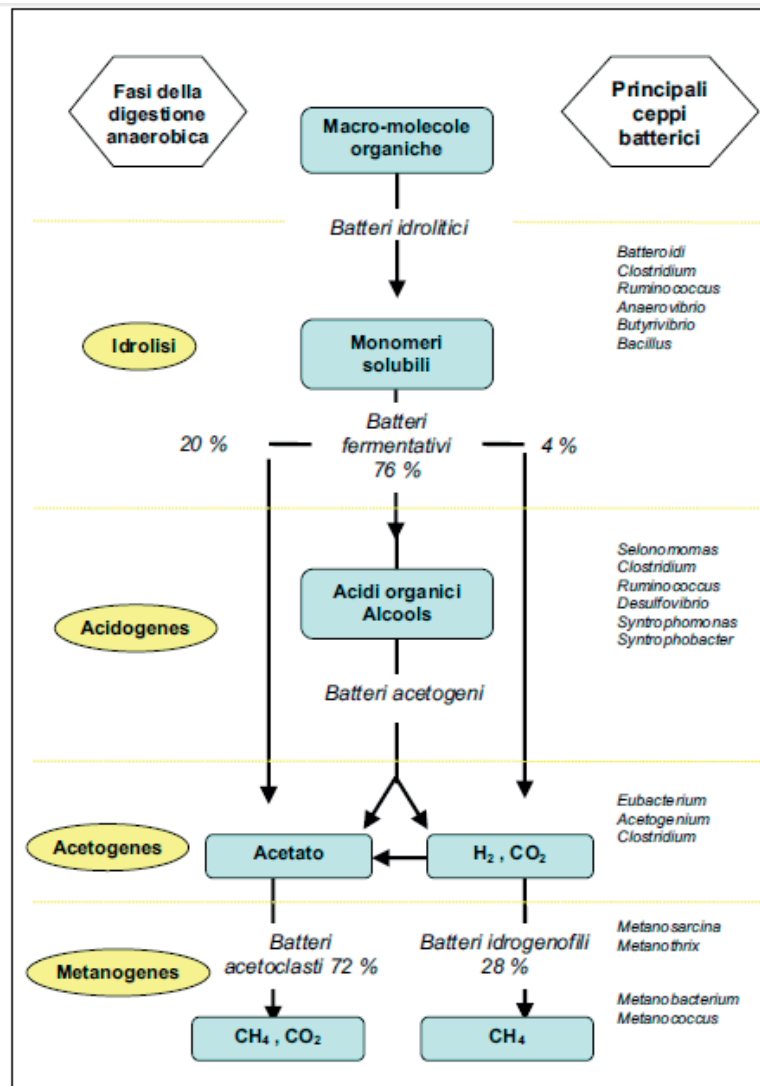
2. La co-digestione

La co-digestione consiste nella digestione contemporanea di scarti organici di diversa natura. In Italia, la maggioranza degli impianti agro-zootecnici si basa su processi di co-digestione di effluenti di allevamento, colture dedicate e/ o sottoprodotti [Castelli, 2011]. L'interesse che spinge gli operatori del settore verso la co-digestione è costituito principalmente dal fatto che la vendita della maggior quantità di elettricità prodotta, unitamente agli introiti ricevuti dai produttori del rifiuto organico utilizzato come co-substrato, permette di ottenere guadagni maggiori. Nelle piccole e medie strutture, in particolare, l'utilizzo della co-digestione può notevolmente migliorare l'economia globale in quanto gli aumentati guadagni permettono di bilanciare anche i maggiori investimenti necessari ed i costi sostenuti per rendere idoneo l'impianto al trattamento di più scarti. Ulteriore vantaggio proveniente dalla co-digestione è la possibilità di miscelare diversi prodotti e, quindi, compensare le fluttuazioni di massa stagionali dei rifiuti, evitare sovraccarichi o al contrario carichi inferiori alla capacità stessa del digestore e di mantenere più stabile e costante il processo.

3. Il processo di digestione anaerobica

Il processo di digestione anaerobica si basa sull'attività di diversi gruppi microbici legati da rapporti di simbiosi stretta a formare una vera e propria catena trofica. Nelle diverse fasi del processo, infatti, i prodotti derivati dal metabolismo di un gruppo di microrganismi costituiscono il substrato di crescita esclusivo di un altro gruppo trofico. Alla conversione partecipano almeno tre gruppi metabolici distinti di microrganismi, che si differenziano sia per i substrati di elezione che per i prodotti metabolici [Mata Alvarez et al. 2000]. Il processo biodegradativo si compone delle seguenti fasi: una prima fase di idrolisi dei substrati complessi accompagnata da una fase di acidificazione con formazione di acidi grassi volatili, chetoni ed alcoli; una successiva fase acetogenica in cui, a partire dagli acidi grassi, si ha la formazione di acido acetico, acido formico, biossido di carbonio ed idrogeno molecolare, ed, infine, un'ultima fase in cui, a partire dai prodotti della fase precedente, si osserva la formazione di metano dall'acido acetico e attraverso la riduzione del biossido di carbonio utilizzando l'idrogeno come co-substrato. Il processo di digestione anaerobica è schematicamente illustrato in Figura 5.

Figura 5 - Rappresentazione schematica delle diverse fasi della digestione anaerobica



Fonte: Cecchi F. et al., 2005

L'ambiente di reazione, per consentire la crescita contemporanea di tutti i microrganismi coinvolti, dovrà risultare da un compromesso tra le esigenze dei singoli gruppi microbici. Il pH ottimale è pari a 7-7,5; la temperatura di processo è pari ai 35°C, se si opera in mesofilia o di circa 55°C se si opera in termofilia [Deublein et al., 2008]. Il valore della temperatura determina in genere anche il tempo di residenza del processo: mediamente in mesofilia si hanno tempi compresi nel range di 15-40 giorni, mentre in termofilia il tempo di residenza è in genere inferiore ai 20 giorni. Con impiantistica di tipo semplificato è possibile operare anche in psicrofilia (10-25°C), con tempi di residenza superiori ai 30 giorni, fino ad un massimo di 90 giorni.

4. Le tecniche di digestione anaerobica

L'evoluzione tecnologica nel settore degli impianti di digestione anaerobica ha visto affermarsi di diversi processi che si basano su differenti concentrazioni di sostanza secca nel digestore. I diversi processi anaerobici si possono suddividere nella digestione ad umido ed in quella a secco.

4.1 Digestione a umido

Si parla di digestione a umido quando il substrato in digestione ha un contenuto di sostanza secca inferiore al 10%. Questa è la tecnica più diffusa in particolare per il trattamento dei liquami zootecnici: il processo prevede, dopo la fase di pre-trattamento del rifiuto, finalizzata alla rimozione di plastiche ed inerti e di corpi grossolani che potrebbero danneggiare gli organi meccanici del reattore, uno stadio di miscelazione in cui si ottiene una miscela con caratteristiche omogenee e l'opportuno contenuto in solidi. La diluizione può avvenire tramite aggiunta di acqua di rete o dal parziale ricircolo dell'effluente del reattore [Laraia, 2002].

4.2 Digestione a secco

La digestione anaerobica a secco è stata sviluppata per consentire il trattamento del rifiuto organico senza necessità di diluizioni, operando con tenori di sostanza secca superiori al 20%. I processi a secco consentono di ridurre i volumi di reazione e di risparmiare energia per il riscaldamento dei reattori e per la disidratazione del materiale digerito; per contro richiedono un maggior consumo energetico per l'alimentazione e l'agitazione dei solidi nel digestore. A causa delle proprietà reologiche dei flussi trattati, il materiale organico viene trasportato con nastri e pompato; questo incide sui costi di realizzazione di questo tipo di impianti. Questi sistemi sono in grado di operare con flussi di materiale molto concentrati e resistono ai possibili problemi causati da sassi, vetro o legno che non causano inceppamenti o danni. L'unico pre-trattamento richiesto è una preliminare vagliatura al fine di rimuovere il materiale con dimensioni superiori ai 40 mm. La digestione a secco è applicata in particolare alla frazione organica dei rifiuti urbani, sia da raccolta indifferenziata che da raccolte differenziate [Laraia, 2002].

4.3 Digestione semisecco

Processi con valori intermedi di sostanza secca (12-18%) sono meno comuni e vengono in genere definiti a semisecco. Il più comune reattore utilizzato rimane quello completamente miscelato (CSTR), operante in regime sia mesofilo che termofilo, all'interno del quale la miscelazione del materiale viene effettuata principalmente attraverso miscelatori meccanici coadiuvati o meno da sistemi di miscelazione a ricircolo di biogas.

5. La produzione di biometano

Grazie all'emanazione del Decreto 5 dicembre 2013 [D.M. 5 dicembre 2013] sarà possibile sfruttare le opportunità offerte dalla produzione di biometano, attraverso purificazione e *upgrading* del biogas. Con i processi di purificazione e potenziamento del biogas si può ottenere un prodotto di qualità equivalente a quella del gas naturale, con tenore di metano fino al 99%. Il biogas potenziato è equivalente al prodotto di origine minerale, che può essere distribuito nella normale rete di distribuzione del metano e miscelato con il prodotto di origine fossile. In questo modo è ovviamente disponibile per tutti gli usi del gas naturale. La disponibilità di reti regionali di distribuzione, considerando quanto sia ampiamente e capillarmente sviluppata la rete italiana, ben si presta alla realizzazione di questo tipo di sviluppo [Bertagna, 2013].

6. Trattamenti di raffinazione del biogas per l'immissione nelle reti di gas naturale

Le normative vigenti in Germania, in Francia, in Svizzera, in Svezia, in Austria, in Olanda hanno permesso e regolamentato già da anni la definizione di standard di qualità del biometano per l'immissione nella rete del gas naturale. In Italia questo tipo di riferimento invece non è ancora ben definito. Le caratteristiche del biogas grezzo sono tali da richiedere interventi depurativi e di raffinazione finalizzati ad innalzarne il livello qualitativo. In particolare, i trattamenti devono riguardare:

- la rimozione di componenti indesiderate (ai fini ambientali e di tutela delle componenti impiantistiche di veicolazione e di utilizzo), quali H₂S e composti solforati, ammoniaca, microinquinanti (in genere assenti se il biogas proviene dalla digestione anaerobica di biomasse di origine agricola), particolato solido ed umidità;
- il miglioramento delle caratteristiche termiche del combustibile (PCS, PCI, Indice di Wobbe) attraverso tecniche di raffinazione del gas, sostanzialmente indirizzate all'incremento del tenore di metano ottenibile tramite la rimozione della CO₂.

I singoli processi sono integrati in linee multistadio di depurazione e raffinazione del biogas grezzo che, secondo le configurazioni di processo adottabili e la qualità del biometano richiesta dall'utilizzo finale, possono essere più o meno articolate. Anche per questi processi è quindi necessario approfondire i dettagli tecnici ed i connessi aspetti di sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

- Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T. Biogas Handbook. 2008. Esbjergn, Denmark pp.1-125.
- Baccaro S, Amelio C, Ghisolfi E. Analisi dello stato dell'arte dei processi di rimozione della CO₂ da biogas. Report ENEA, 2011/97:1-60.
- Bertagna S. Biogas e biometano in Italia ed in Europa. La Rivista dei combustibili 2013; 67(2):46-48.
- Castelli S. Biomasse ed energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione. Ed. Maggioli, Dogana (Repubblica di San Marino) 2011:1-400.
- Cecchi F, Battistoni P, Pavan P, Bolzonella D, Innocenti L. La digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi. Aspetti fondamentali, progettuali, gestionali, di impatto ambientale ed integrazione con la depurazione delle acque reflue. 2005. Manuale APAT 13/2005:1-178.
- Čuček L, Klemeš J J, Varbanov P, & Kravanja Z. Life Cycle Assessment and Multicriteria Optimization of Regional Biomass and Bioenergy Supply Chains. Chemical Engineering Transactions 2011; 25: 575-580.
- Deublein D, Steinhauser A. Biogas from waste and renewable resources. Ed. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2008:1-429.
- DENA (Autorità tedesca per l'energia). URL: <http://www.dena.de>.
- Fabbri C, Labartino, N, Manfredi S, Piccinini S. Biogas, il settore è strutturato e continua a crescere. L'informatore Agrario 2013; 11:15.

- Faini A, Nocentini G, Bonari E, Fraga A, Galli M, Guidi W, Picchi G, Piccioni E, Sabbatini T, Villani R, Pampana S, Ginanni M, Mainardi M, Spinelli R. Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy. Farm. Quaderno ARSIA 2004; (6):1-159.
- Italia. Decreto 5 dicembre 2013. Modalità di incentivazione del biometano immesso nella rete del gas naturale. G.U. Serie Generale n. 295 del 17 dicembre 2013.
- Laraia R. Il trattamento anaerobico dei rifiuti. Aspetti progettuali e gestionali. Manuale APAT 13/2002:1-151.
- Mata Alvarez J, Macè S, Liabrès P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technology 2000;74(1):3-16.
- Piccinini S, Bonazzi G, Fabbri C, Sassi D, Schiff M, Soldano M, Verzellesi F, Berton M. Energia dal biogas, prodotto da effluenti zootecnici biomasse dedicate e di scarto. Associazione Italiana Energie Agroforestale Manuale Pratico AIEL 2008;4:17-18.
- Vismara R, Canziani R, Malpei F, Piccinini S. Biogas da agrozootecnia e agroindustria. Dario Flaccovio Editore, 2011.
- Saracco AM, Antonini M. Dal biogas al biometano un'opportunità per l'agricoltura. Confagricoltura Piemonte, 2014.

La sicurezza ambientale ed occupazionale negli impianti di produzione del biogas

Biancamaria Pietrangeli, Roberto Lauri, Domenico Davolos, Paolo Angelo Bragatto

INAIL Settore Ricerca, Dipartimento Installazioni di Produzione ed Insediamenti Antropici, Roma

Introduzione

Gli impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sono sottoposti ad un procedimento di autorizzazione prima dell'avvio operativo [Berton, 2010], secondo quanto previsto dall'art. 12 del D.Lgs. 29 dicembre 2003, n. 387 [D.Lgs. 387/2003] integrato e modificato dal D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28 [D.Lgs. 28/2011]. Nel caso specifico dell'impianto a biomasse oggetto dello studio di proprietà della Maccaresse SpA, sito nella Regione Lazio, è stato previsto un procedimento di autorizzazione unica, svoltosi tramite la Conferenza di servizi convocata dalla Provincia di Roma. Quella della Conferenza di servizi è una formula nota e utilizzata da tempo con due finalità: semplificare e velocizzare il procedimento autorizzativo, coordinare i vari interessi pubblici coinvolti in un'unica sede istituzionale e contestuale. Alla Conferenza dei servizi sono convocati: il Comune nel cui ambito territoriale ricade il progetto, la Provincia, l'Azienda sanitaria locale, l'Agenzia dell'ambiente regionale, la Soprintendenza ai beni culturali, i Vigili del Fuoco, il soggetto Gestore della rete elettrica, il Consorzio di bonifica e l'Agenzia delle dogane (UTF). A conclusione del procedimento, l'autorizzazione unica sostituisce a tutti gli effetti ogni autorizzazione, nullaosta, atto di assenso di competenza delle amministrazioni coinvolte. In generale l'autorizzazione unica rappresenta di per sé una variante allo strumento urbanistico ma, nel caso dell'impianto in esame realizzato in zone classificate agricole, si è reso necessario redigere il Piano di Utilizzazione Agronomico (PUA). L'autorizzazione include inoltre specifiche modalità per la rimessa in ripristino dei luoghi una volta dismesso l'impianto (tempo stimato 15 anni). Il termine per la conclusione del procedimento unico non è stato superiore ai 180 giorni dalla presentazione dell'istanza come imposto dalla Legge 7 agosto 1990, n. 241 [Legge 241/1990].

1. Produzione di biogas e sicurezza ambientale

La corretta progettazione e gestione degli impianti a biogas è condizione necessaria per garantire la tutela dell'ambiente e mitigare i potenziali impatti ambientali, che sono riconducibili alle emissioni in atmosfera, alle emissioni odorigene, al traffico veicolare in relazione ai flussi di materiale *in* e *out* all'impianto ed al rumore derivante dalle apparecchiature utilizzate nelle varie sezioni. Il massimo contenimento delle emissioni deve essere perseguito con misure di prevenzione strutturali, studiate già in fase di progettazione, e gestionali, insite nella corretta conduzione dell'impianto [Khoiyangbam, 2011]. Una delle fasi più importanti, per la possibile emissione di odori, è costituita dalla gestione degli stoccaggi delle biomasse in ingresso, che variano notevolmente in dipendenza dalla tipologia di biomassa e del relativo grado di fermentescibilità. In particolare si possono distinguere due grandi categorie: gli insilati con stoccaggio su platea, come da pratica agricola consolidata, ed i sottoprodotti agroalimentari, per i quali devono essere previsti accorgimenti di tipo gestionale ed impiantistico atti a ridurre il potenziale impatto odorigeno. Dal punto di vista impiantistico, lo

stoccaggio dei sottoprodotti deve avvenire in vasche/contenitori chiusi e a tenuta asserviti da opportuno trattamento dell'aria esausta; nel caso di silos per biomasse non palabili (liquami zootecnici, melasso, ecc.) si prevede l'adozione di impianti di trattamento dell'aria (per esempio, filtri a carboni attivi) per limitare le emissioni di effluenti gassosi. Le aree di stoccaggio devono essere dotate di pavimentazione o superficie impermeabilizzata, sagomata in modo da favorire il rapido sgrondo di eventuali percolati.

Dal punto di vista gestionale, per lo stoccaggio dei sottoprodotti, ad esclusione degli insilati, si devono limitare al massimo i tempi prima del loro caricamento al digestore (massimo 72 ore), al fine di prevenire fenomeni di anaerobiosi, fonte primaria di emissioni maleodoranti; si devono limitare imbrattamenti dei piazzali per perdite di materiale solido o di percolato ed utilizzare pompe e tubazioni a prova di tenuta assoluta in tutte le fasi di trasporto, carico e scarico [ARPA Emilia-Romagna, 2011]. Anche l'avvio dell'impianto di conversione energetica del metano può costituire una fase critica per le emissioni odorigene, se non vengono adottati alcuni accorgimenti di carattere impiantistico e gestionale. In questa fase, infatti, il biogas prodotto non ha sufficiente contenuto di metano per essere inviato al cogeneratore o per essere bruciato nella torcia di emergenza. Per evitare che il biogas venga immesso in atmosfera tal quale senza subire idoneo trattamento, vengono individuate specifiche prescrizioni: utilizzare combustibili supplementari (per esempio gpl o gas di rete) per sostenere la torcia e/o trattare in impianto di abbattimento le emissioni prima del loro scarico in atmosfera (per esempio con cartucce con filtri a carbone attivo). A regime il cogeneratore è assoggettato al rispetto di limiti indicati dal D.Lgs. 3 aprile 2006 n.152 [D.Lgs. 152/2006] con obbligo di un controllo al camino almeno annuale. Sono previsti anche controlli semestrali/annuali per verificare l'efficacia degli impianti di abbattimento (in particolare il biofiltro, utilizzato in questi impianti proprio per ridurre le emissioni odorigene), per i quali vengono definiti parametri di esercizio e valori limiti agli odori, anche se la normativa nazionale non ha fornito ad oggi alcun limite di Legge. Anche le fasi di separazione e stoccaggio del digestato devono avvenire in modo da limitare le emissioni odorigene. Le prescrizioni impiantistiche sono relative alla vasca che deve essere coperta. Il volume d'aria, presente tra il pelo del liquido e la copertura, deve essere aspirato e l'aria aspirata può essere reimpressa nell'impianto per l'utilizzo energetico o può essere convogliata ad un impianto di trattamento (biofiltro). Per la frazione palabile del digestato è obbligatoria la copertura dell'area di stoccaggio. Nel caso in cui sia previsto un trattamento di separazione del digestato in due frazioni (solido e chiarificato) con centrifughe a forte efficienza, tale operazione dovrà essere eseguita in ambienti completamente chiusi ed in depressione, con aspirazione e trattamento dell'aria esausta in impianto di biofiltrazione. I cumuli del digestato solido dovranno avere dimensioni adeguate ad evitare fenomeni di anaerobiosi all'interno degli stessi, provocando eventualmente odori al momento del loro caricamento e distribuzione sul suolo [ARPA Emilia-Romagna, 2011]. Relativamente alle emissioni in atmosfera gli impianti a biogas sono disciplinati dal D.Lgs. 152/2006, che è stato successivamente modificato ed integrato dal D.Lgs. 29 giugno 2010, n. 128 [D.Lgs.128/2010]. Nella Parte III, dell'Allegato I, della Parte V del D.Lgs. 152/2006 sono riportati i valori limite di emissione in aria per gli impianti che impiegano il biogas come vettore energetico, suddivisi in base al motore primo impiegato (turbina a gas, motore a combustione interna). L'utilizzo del biogas nel gruppo di cogenerazione comporta delle emissioni in atmosfera provenienti dal camino, costituite prevalentemente da monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x) e composti inorganici del cloro sotto forma di gas o vapori.

2. Produzione di biogas e sicurezza occupazionale

Nelle pagine precedenti è stato messo in evidenza quanto il settore della produzione del biogas sia sviluppato in Italia. In un siffatto contesto applicativo emerge la necessità di coniugare la promozione e l'incentivazione della produzione di energia da fonti rinnovabili con quella di evitare eventuali impatti negativi sia ambientali che occupazionali di tale tecnologia [Smith et al., 2013]. La rapida diffusione degli impianti a biogas in Italia ha suscitato diversi malumori, in particolare tra alcune associazioni del settore agricolo, contrarie ad un eccessivo sfruttamento dei terreni agricoli ai soli fini energetici. Le politiche a sostegno del settore devono necessariamente prevedere un'attenzione alla sostenibilità del territorio in modo che il settore costituisca per le aziende agricole una vera opportunità di crescita. Un aspetto che non va sottovalutato è quello relativo alla sicurezza di questi impianti: diversi sono infatti i rischi specifici che devono essere valutati e gestiti [Pietrangeli et al., 2013; Heezen et al., 2013]. Per tutelare la salute e la sicurezza nei luoghi di lavoro è necessaria *“la valutazione globale e documentata di tutti i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori ... finalizzata ad individuare le adeguate misure di prevenzione e protezione e ad elaborare il programma delle misure atte a garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di salute e sicurezza”* (D.Lgs. 81/2008, art. 2). La valutazione dei rischi, che costituisce un obbligo non delegabile del datore di lavoro, e la conseguente elaborazione del Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) sono finalizzate a:

- individuare i rischi per la salute presenti nell'azienda che potrebbero causare infortuni e malattie professionali, definire le modalità adeguate per eliminarli o gestirli (cioè ridurli per quanto possibile);
- fornire a tutti i soggetti coinvolti i mezzi, gli strumenti, le informazioni, la formazione e l'addestramento adeguati a tutelare la salute durante l'attività lavorativa.

Al 31 maggio 2013 le aziende fino a 10 lavoratori (salvo quelle a rischio di incidente rilevante) potevano dimostrare l'avvenuta valutazione dei rischi attraverso la cosiddetta “autocertificazione”. Dal 1° giugno 2013 anche queste aziende devono possedere il Documento di Valutazione, che analizzi tutti i rischi presenti in azienda (DVR), che indichi i requisiti di sicurezza adottati e che definisca il programma di interventi per mantenere o migliorare i livelli di prevenzione degli infortuni e delle malattie professionali. A tal fine sono state prodotte le “procedure standardizzate per la valutazione dei rischi”, come previsto dall'art. 29 del D.Lgs. 9 aprile 2008 n. 81 [D.Lgs. 81/2008], approvate dalla Commissione Consultiva Permanente e pubblicate con Decreto Interministeriale del 30 novembre 2012 [D.M. 30/11/2012]. Tali procedure standardizzate devono essere adottate dalle imprese con meno di 10 addetti, che avevano optato per l'autocertificazione della valutazione dei rischi e che dovranno quindi ora redigere il documento di valutazione. In Tabella 1 sono riportati i principali rischi per la sicurezza e per la salute negli impianti di produzione del biogas.

Tabella 1 - Principali rischi per la salute e la sicurezza negli impianti di biogas

Principali rischi per la sicurezza

Macchine e attrezzature	Rischio di investimento da parte di mezzi di trasporto della biomassa in entrata/uscita o da parte di mezzi di movimentazione materiale
	Ribaltamento e impennamento in fase di compressione delle biomasse in trincea
	Organi meccanici in movimento nel caso del trasporto delle biomasse
Ambienti di lavoro	Cadute dall'alto da parti dell'impianto, dai bordi delle trincee, ecc.
	Asfissia o anossia in caso di lavoro in luoghi confinati o sospetti di inquinamento
Materiali e sostanze - serbatoi e contenitori	Esplosione e incendio del digestore o del cogeneratore
Parti elettriche	Contatto elettrico a causa di lavori sull'impianto in bassa o media tensione

Principali rischi per la salute

Esposizione a rumore del cogeneratore

Esposizione ad agenti biologici a causa di reflui zootecnici, sottoprodotti organici agroalimentari, insilati, rifiuti, ecc.

Fonte: Rotundo D, 2012

La corretta gestione dei rischi occupazionali implica innanzitutto l'applicazione delle norme generali di prevenzione e protezione contenute nel Titolo I del D.Lgs. 81/2008 tra cui: la valutazione dei rischi, l'istituzione del servizio di prevenzione e protezione, il programma di formazione, informazione ed addestramento, la sorveglianza sanitaria, la gestione delle emergenze e di primo soccorso secondo il Decreto Ministeriale 15 luglio 2003, n. 388 [D.M. 388/2003], la prevenzione degli incendi secondo il Decreto Ministeriale 10 marzo 1998 [D.M. 10.3.1998] ed infine, la consultazione e partecipazione dei rappresentanti dei lavoratori. A queste si affiancano le disposizioni contenute nei Titoli specifici del D.Lgs. 81/2008 per quanto riguarda i luoghi di lavoro (Titolo II), le attrezzature di lavoro, i dispositivi di protezione individuale e le apparecchiature elettriche (Titolo III), gli agenti fisici (Titolo VIII), l'esposizione ad agenti biologici (Titolo X) e la protezione da atmosfere esplosive (Titolo XI). Nella individuazione dei principali rischi occupazionali, occorre tener conto poi delle disposizioni sugli ambienti confinati (serbatoi di stoccaggio, silos, recipienti di reazione, fosse biologiche, ecc.), ai quali, oltre alle disposizioni tecniche contenute nel Titolo II del D.Lgs. 81/2008 (artt. 66 e 121, Allegato IV), si applicano le disposizioni di tipo organizzativo contenute nel D.P.R. 14 settembre 2011, n. 177 [D.P.R. 177/2011]. Tra le altre normative rilevanti si segnala la normativa in tema di prevenzione incendi, disciplinata dal D.P.R. 37/1998 e D.P.R. 151/2011. Tale provvedimento regola i procedimenti di controllo delle condizioni di sicurezza per la prevenzione incendi, attribuiti, in base alla vigente normativa, alla competenza dei comandi provinciali dei vigili del fuoco, per le fasi relative all'esame dei progetti, agli accertamenti, ai sopralluoghi, all'esercizio delle attività soggette a controllo, all'approvazione delle deroghe alla normativa di conformità. La conclusione del procedimento conduce al rilascio di un certificato di prevenzione incendi.

Le norme relative al deposito di biogas sono contenute nel Decreto Ministeriale 24 novembre 1984 [D.M. 24.11.1984].

3. Il rischio biologico negli impianti di biogas

Tra i rischi lavoro-correlati nel settore della produzione del biogas si deve prendere in considerazione il rischio di esposizione ad agenti biologici. Il campo di applicazione del Titolo X del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. comprende, infatti, tutte le attività che possono comportare rischio di esposizione ad agenti biologici, sia quelle che prevedono un uso deliberato di microrganismi che le attività a rischio potenziale di esposizione. La differente tipologia di rischio espositivo condiziona gli adempimenti di legge. Il datore di lavoro può prescindere dall'applicazione delle disposizioni di cui agli artt. 273, 274, commi 1 e 2, 275, comma 3, e 279, qualora i risultati della valutazione dimostrino che l'attuazione di tali misure non è necessaria. In tutte le attività per le quali la valutazione del rischio evidenzia rischi per la salute dei lavoratori il datore di lavoro attua misure tecniche, organizzative e procedurali per evitare ogni esposizione degli stessi ad agenti biologici (art. 272), misure igieniche (art. 273), fornisce informazione e formazione ai lavoratori (art. 278) ed attua la sorveglianza sanitaria (art. 279).

La maggior parte dei microrganismi fonte di rischio espositivo nelle lavorazioni, che vengono svolte negli impianti di produzione del biogas, sono microrganismi ambientali o saprofiti appartenenti a classi di rischio a bassa patogenicità (Gruppi 1 e 2), da considerare patogeni opportunisti, ossia in grado di determinare uno stato di malattia solo in presenza di una diminuzione delle difese immunitarie dell'individuo esposto. Negli impianti di produzione di biogas l'esposizione agli agenti biologici può verificarsi per inalazione, ingestione e contatto dermico. Nelle routinarie operazioni di conduzione dell'impianto si può generare *bioaerosol* che è potenzialmente costituito da:

- *batteri Gram negativi*: contaminanti ubiquitari di terreni, acque e organismi viventi che si ritrovano sui materiali vegetali come grano, cotone, fieno, legno, ecc. dove crescono come saprofiti. Sono presenti sia nelle polveri di origine animale che in quelle di origine vegetale, nonché negli aerosol provenienti da liquami e rifiuti;
- *batteri Gram positivi*: predominanti nelle polveri di origine animale e, comunemente rinvenibili nei materiali vegetali stoccati. Predominano stafilococchi, streptococchi e *bacillaceae*;
- *attinomiceti*: batteri filamentosi Gram positivi che si possono trovare molto comunemente nelle polveri dei materiali vegetali stoccati. Le specie più abbondanti sono in genere termofile e si sviluppano soprattutto nel materiale umido: i più comuni appartengono ai generi *Streptomyces* e *Rhodococcus*;
- *miceti*: muffe e lieviti unicellulari che si ritrovano piuttosto comunemente nei composti vegetali stoccati, appartenenti per lo più ai generi *Penicillium* e *Aspergillus*.

Fonte di *biohazard* negli impianti di biogas sono anche gli agenti biologici contenuti nelle biomasse di alimentazione di origine animale (effluenti zootecnici) o umana (fanghi di depurazione di acque reflue) e, quindi, potenzialmente rinvenibili nel digestato prodotto. I rifiuti di origine animale ed umana contengono vari generi batterici (*Salmonella*, *Enterobacter*, *Clostridium*, *Listeria* ecc), parassiti (*Ascaris*, *Trichostrangylidae*, *Coccidae*), agenti fungini e virus [Bitton, 1989; Dudley et al., 1980, Ritari et al., 2012, Sahlstrom, 2003, Strauch 1991] che possono rappresentare un pericolo non solo occupazionale, ma anche ambientale, se il digestato prodotto non possiede idonee caratteristiche igienico-sanitarie. La qualità microbiologica delle materie prime di origine animale è garantita unicamente attraverso l'applicazione di specifiche misure

veterinarie e sanitarie quali: il controllo della salute del bestiame, il controllo igienico-sanitario delle materie prime in ingresso al digestore. Le biomasse ad alto rischio di contaminazione, come quelle da animali malati, devono essere escluse da tale utilizzo. Nel caso di impiego di categorie di biomasse quali: carcasse animali, loro parti o prodotti di origine animale non destinati all'alimentazione umana, devono essere previste specifiche misure di pre-sanitizzazione attraverso processi di pastorizzazione o sterilizzazione, come previsto dal Regolamento europeo 1069/2009 in materia. Nel caso di materie prime che non richiedono specifiche misure di risanamento, la combinazione del processo di digestione anaerobica con valori di temperatura e tempo di ritenzione idonei garantisce una efficace riduzione ed inattivazione dei patogeni nel digestato [Kearney et al., 1993 a e b]. Negli impianti di biogas queste variabili di processo vengono routinariamente controllate. I microrganismi che prendono parte al processo di digestione anaerobica sono a basso rischio, appartenenti alle classi di rischio 1 e 2 dell'Allegato XLVI del D.Lgs. 81/2008 e, nel caso di manipolazione, sono sufficienti misure quali l'uso di guanti, per le operazioni che possono comportare contaminazione delle mani, la corretta osservanza delle più basilari misure igieniche (non mangiare, né bere, né fumare durante queste operazioni) ed il lavaggio delle mani dopo le operazioni. Particolare rilevanza deve essere data ad una corretta informazione e formazione dei lavoratori sui pericoli biologici specifici in funzione delle relative mansioni ed all'addestramento allo svolgimento delle stesse in sicurezza. Nelle aree di lavoro, in dipendenza delle modalità operative previste per lo stoccaggio delle materie in entrata, per il carico del digestore, per lo scarico del digestato, è necessario considerare l'esposizione ad agenti biologici per via aerea, attraverso la formazione di polveri e/o *bioaerosol* [Douwes et al., 2003]. Esempi di agenti biologici contenuti nel *bioaerosol* nel settore specifico includono spore e cellule batteriche/fungine, ife fungine, pollini, virus, amebe, endotossine batteriche, aggregati di queste particelle e frammenti di dimensioni maggiori, come polveri di cereali, fibre vegetali. Se vengono osservate le misure di prevenzione sopradette, in genere non si dovrebbero osservare problemi di salute tra i lavoratori esposti. Al contrario se il lavoratore lamenta mal di testa, mialgie, diarrea, lacrimazione, irritazione delle vie aeree e della pelle, è necessario procedere ad una nuova valutazione delle misure di prevenzione adottate. Negli impianti di biogas deve inoltre essere considerata la potenziale esposizione del lavoratore alle endotossine batteriche. Sintomatologie a carico dell'apparato respiratorio associate ad esposizione ad endotossine sono rilevate in diversi ambienti occupazionali quali l'allevamento animale, il settore agricolo e di lavorazione di cereali, il settore dello smaltimento dei rifiuti, il compostaggio, ecc. [Post et al., 1998]. Le endotossine sono costituite dai lipopolisaccaridi (LPS), contenuti nella parete cellulare dei batteri Gram-negativi, derivanti dal materiale in decomposizione [Madsen, 2006]. A basse concentrazioni (< 200 Unità di endotossina (EU)/m³), le endotossine possono provocare febbre, mentre ad alte concentrazioni (> 200 EU/m³) sono causa di irritazione delle mucose, problemi respiratori fino ad infiammazioni croniche dell'apparato respiratorio. Basse concentrazioni di endotossine batteriche, pari a 50-500 EU/m³ per 8 ore lavorative, possono provocare un decremento della funzionalità respiratoria. È stato proposto un limite espositivo alle endotossine che è pari a 50 EU/m³ [ICOH, 1997]. L'esposizione a concentrazioni di endotossine superiori a 50 EU/m³ si può verificare durante alcune specifiche lavorazioni, che comportano formazione di aerosol, come quando si procede alle operazioni di manutenzione/pulitura dei filtri degli impianti, delle apparecchiature, delle cabine delle autopale, ecc. Nelle aree di lavoro degli impianti di biogas, specie se confinati, è possibile l'esposizione per via aerea ad alte concentrazioni di polveri organiche, spore fungine,

batteri, inclusi gli attinomiceti. Evidenze epidemiologiche e studi sperimentali supportano l'ipotesi che tali esposizioni siano associate a polmoniti da ipersensibilità, sindromi da polveri organiche, decremento della funzionalità respiratoria, infiammazioni delle vie aeree ed asma [Douwes et al., 2003]. Al fine di contenere la dispersione aerea di polveri organiche negli impianti è necessario quindi porre particolare attenzione alle zone di stoccaggio delle materie prime con misure di contenimento idonee, come ad esempio l'adozione di teloni di copertura delle biomasse. Relativamente alle vasche di stoccaggio del liquame zootecnico è opportuno prevedere agitatori ad immersione, per evitare la contaminazione aerodispersa, e pompaggio automatico per il trasferimento diretto dei liquami al digestore. È necessario minimizzare la formazione di polveri, causate dal risollevaramento dalle pavimentazioni stradali dell'impianto dovute al transito dei mezzi pesanti, dalle superfici sterrate dei piazzali ad opera del vento, da emissioni localizzate nelle aree di deposito delle materie prime, ecc. Anche l'adozione di buone tecniche di stabulazione degli animali e di rimozione degli effluenti (rapide e frequenti) va considerata una misura di minimizzazione della dispersione microbica aerodispersa nell'impianto. Il trasferimento di biomassa, come l'insilato, è preferibile che venga effettuato per mezzo di macchinari (autopala) dotati di sistemi di ventilazione dedicati e filtri HEPA, opportunamente sottoposti a manutenzione con apposita registrazione. Oltre a queste misure di contenimento primario è buona norma limitare al massimo il numero dei lavoratori coinvolti ed opportunamente informare e formare in tema di *biohazard*. Le misure igieniche più elementari (divieto di mangiare, bere e fumare sul sito e lavaggio frequente delle mani) vanno sempre ribadite al lavoratore, magari con apposita cartellonistica, affissa nel sito. Deve essere previsto l'uso di guanti per le operazioni che possono comportare contaminazione delle mani (come ad esempio durante lo scarico del digestato dal reattore). L'utilizzo di dispositivi per la protezione delle vie aeree del lavoratore deve essere considerato solo se non sono possibili altre misure di contenimento per prevenire l'esposizione. È infatti necessario sempre ricordare che non è agevole lavorare indossando questi dispositivi di protezione e sicuramente non possono essere indossati per lungo tempo.

4. Descrizione dell'impianto di biogas oggetto dello studio

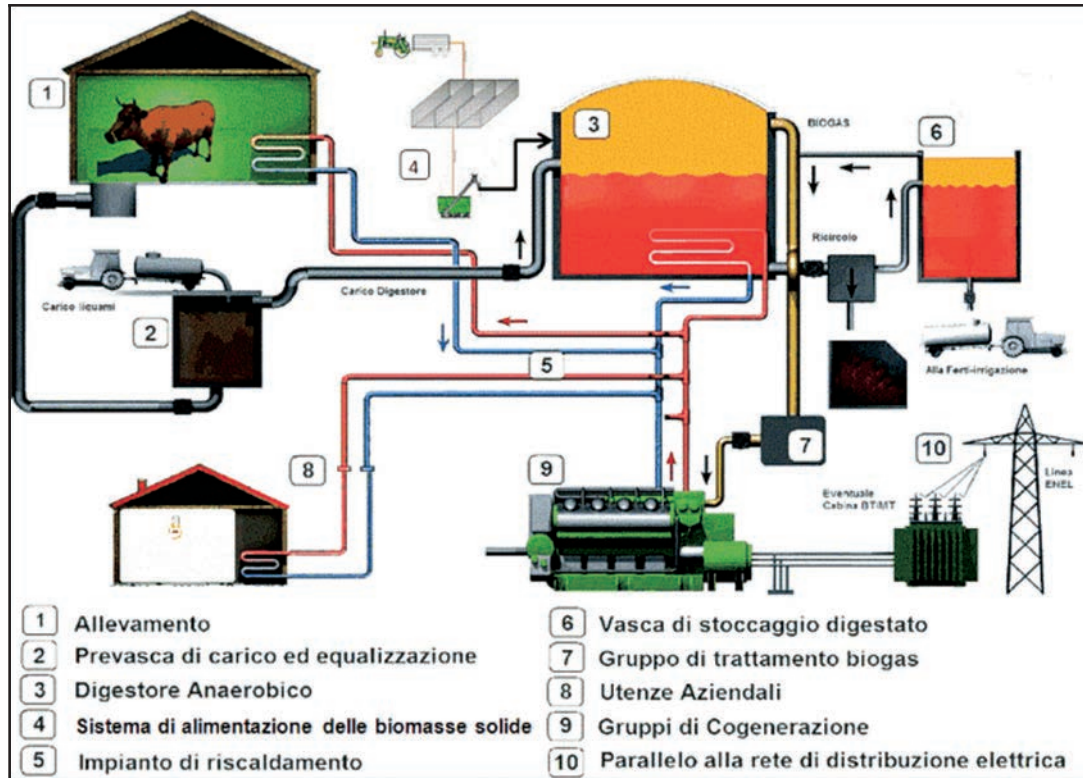
L'impianto, oggetto dello studio, è di proprietà della Maccarese S.p.A., un'importante Azienda agricola, costituita da 3.200 ettari di terreno pianeggiante, coltivato a seminativi, foraggi e ortaggi. L'azienda possiede al suo interno un grande allevamento di vacche da latte, con una mandria di 3.300 capi, che producono 32.000 litri di latte al giorno. L'insediamento produttivo, costruito nel 2010, dispone di due digestori circolari di diametro pari a 24 metri e altezza di 9 metri, ha una potenza installata di 625 kW_{el}, è in grado di produrre 4500000 kWh netti/anno ed utilizza come substrati di alimentazione, liquami bovini (130 m³/giorno) ed insilato di mais (22 t/giorno). L'impianto sfrutta la digestione anaerobica di sostanze organiche per la formazione di biogas, che viene utilizzato come combustibile di alimentazione di un'unità cogenerativa per la produzione combinata di energia termica (in parte impiegata per riscaldare i reattori anaerobici) ed elettrica.

Il ciclo produttivo dell'attività industriale, mostrato in Figura 1, si articola nelle seguenti fasi:

- 1) Stoccaggio delle biomasse solide e liquide;
- 2) Alimentazione delle biomasse al digestore anaerobico;
- 3) Digestione anaerobica;
- 4) Stoccaggio del biogas;

- 5) Trattamento del biogas (deumidificazione, desolforazione, filtrazione);
- 6) Produzione di energia elettrica e termica (unità di cogenerazione);
- 7) Stoccaggio e trattamento della biomassa digerita (digestato).

Figura 1- Schema del ciclo di produzione del biogas



4.1 Lo stoccaggio e l'alimentazione delle biomasse solide

Le biomasse solide (insilati di mais, sottoprodotti agricoli, ecc.) vengono scaricate in trincee di stoccaggio (Figura 2), aventi pavimentazione in asfalto. Il silos a trincea è costituito essenzialmente da una platea, da due pareti laterali di contenimento e generalmente da una parete di fondo. La pavimentazione del silos permette una maggiore resistenza all'azione corrosiva degli acidi, che si liberano dall'insilato durante il processo di insilamento. Il mais insilato viene coperto con idonei teloni in PVC al fine di impedire il contatto con l'aria ed attivare la fermentazione, che andrebbe ad influire negativamente sulle rese di biogas. Tale copertura permette inoltre di contenere le emissioni odorigene e quelle di polveri organiche nell'ambiente circostante. La gestione della trincea è la seguente: quotidianamente, prima dell'utilizzo, viene scoperto il fronte della trincea, per la parte interessata dall'operazione di desilamento del prodotto.

Figura 2 - Trincea di stoccaggio delle biomasse solide



Fonte: Maccaresse S.p.A.

Il prodotto viene desilato e portato alla tramoggia di carico mediante un mezzo dotato di benna mordente (autopala). Al termine delle operazioni di carico, aventi una durata di circa 2 ore, la trincea viene richiusa con il telone.

4.2 La tramoggia di carico delle biomasse solide

L'impianto è dotato di una tramoggia di carico delle biomasse solide, costituita da un container metallico aperto (Figura 3), la cui capacità è di circa 40 m³. Il sistema di carico degli insilati è composto anche da un dispositivo di pesatura e da un insieme di coclee (Figura 4), che alimentano il reattore anaerobico. Inoltre è presente un dispositivo di svuotamento costituito da un sistema di raschiamento del fondo.

Figura 3 - La tramoggia di carico dell'insilato



Fonte: Maccaresse S.p.A.

Figura 4 - Coclea di alimentazione del digestore



Fonte: Maccarese S.p.A.

4.3 Lo stoccaggio delle biomasse liquide

Le biomasse liquide (liquami zootecnici) vengono raccolte in vasche aperte, realizzate in calcestruzzo (Figura 5) ed equipaggiate con un agitatore ad immersione ed una pompa di rilancio, che consente il trasferimento dei liquami al digestore. Tali pompe sono dotate di un apparato di frantumazione, indispensabile in caso di presenza di paglia o di materiali a fibra lunga.

Figura 5 - La vasca di stoccaggio dei liquami



Fonte: Maccarese S.p.A.

4.4 I digestori anaerobici

I digestori (Figura 6) sono costituiti da vasche circolari, realizzate in calcestruzzo armato, riscaldate mediante appositi circuiti, che consentono di mantenere un idoneo livello termico delle biomasse in fermentazione al fine di massimizzare la resa del processo (la temperatura delle biomasse è costante e pari a circa 42°C). Per il riscaldamento dei liquami si utilizza l'acqua calda prodotta dal gruppo di cogenerazione. Il fermentatore è provvisto di agitatori motorizzati e progettati per creare un ambiente omogeneo. Gli agitatori, realizzati in acciaio inossidabile e con lame di fibre di vetro rinforzate con poliuretano, possono operare a temperature superiori a 60°C. Essi vengono utilizzati in immersione e, ruotando intorno ad un perno regolabile in altezza, possono essere posizionati in diversi punti, prevenendo la sedimentazione delle particelle solide e la formazione di schiume e croste superficiali. I fermentatori lavorano in leggera sovrappressione (2-5 mbar) per evitare infiltrazioni di aria, che potrebbero influire sulla resa della digestione anaerobica e contribuire alla formazione di atmosfere potenzialmente esplosive/infiammabili. Il livello delle biomasse contenute nei digestori viene costantemente controllato da un sensore radar. Tale livello prevede soglie di minimo e massimo riempimento, il cui superamento genera allarmi ed implica tempestivi interventi. Altri componenti dei fermentatori sono:

- gruppo di pompe di svuotamento della vasca e di ricircolo del digestato;
- sistemi (elettronici) di controllo e di gestione del processo;
- sensori di pressione (monitoraggio della sovrappressione) e sistemi di sicurezza di tipo idraulico (valvola di sicurezza a guardia idraulica).

Figura 6 - I digestori anaerobici dell'impianto di Maccarese



Fonte: Maccarese S.p.A.

Le pareti dei reattori sono coibentate per impedire la dissipazione del calore verso l'esterno.

4.5 Lo stoccaggio del biogas prodotto

L'impianto di Maccarese presenta un'unità di stoccaggio del biogas costituita da una cupola a membrana

singola, integrata nel digestore (Figura 6). Tale membrana è realizzata in tessuto gommato (fibre di poliestere) con inserto tessile di idonea fibra sintetica (PVC). La gomma utilizzata risponde ai requisiti prescritti dalle norme relativamente a:

- caratteristiche meccaniche;
- resistenza a bassa ed alta temperatura;
- resistenza agli agenti atmosferici;
- resistenza ai liquami organici.

Sono previsti inoltre anche dei dispositivi di protezione dell'accumulatore pressostatico dagli agenti atmosferici (parafulmini). Quando la membrana è sgonfia, l'abbassamento fino al livello del substrato in fermentazione viene impedito da un'impalcatura in legno, le cui travi poggiano sulla circonferenza e sul pilastro centrale. La sovrappressione di esercizio viene monitorata da appositi sensori di pressione e sono previste, su tale parametro, delle soglie di allarme. Una valvola di sicurezza a guardia idraulica protegge l'unità di stoccaggio da sovrappressioni pericolose per la sua integrità strutturale.

4.6 Unità di trattamento del biogas

Il biogas, prima di essere utilizzato dal gruppo di cogenerazione, deve subire dei trattamenti finalizzati a ridurre il contenuto di vapor d'acqua e di acido solfidrico (H_2S). Ciò viene eseguito per due finalità:

- 1) il miglioramento delle condizioni di esercizio del cogeneratore (si riduce fortemente l'insorgere di fenomeni corrosivi del motore a combustione interna);
- 2) l'incremento della resa energetica (si innalza il potere calorifico inferiore del biogas).

Il biogas viaggia attraverso delle tubazioni interrato. Questa soluzione consente un abbassamento della sua temperatura e quindi favorisce la condensazione del vapor acqueo, in esso contenuto. La condensa viene successivamente convogliata, attraverso una linea dedicata, dotata di adeguata pendenza (1-2%), ad un apposito pozzetto di raccolta. Per l'abbattimento dell'acido solfidrico si ricorre ad un desolfatore, costituito da torri di lavaggio, nelle quali il biogas entra in contatto con una soluzione acquosa di idrossido di sodio (NaOH) al 30%. L'efficienza di rimozione del dispositivo è prossima al 90%. Il reagente viene tenuto sotto controllo sia a livello quantitativo che qualitativo da un sistema automatico di reintegro (pH-metro e pompe). Inoltre nell'unità di desolforazione viene monitorata in continuo la percentuale di ossigeno presente per evitare di ricadere all'interno del campo di infiammabilità del biogas (il tenore di O_2 deve essere sempre mantenuto al di sotto del limite inferiore di infiammabilità).

4.7 Unità di cogenerazione

Il cogeneratore è installato in un container (Figura 7), che racchiude al suo interno anche il locale tecnico, nel quale sono presenti i dispositivi centralizzati di distribuzione del substrato e dell'energia termica, il sistema di controllo e di gestione dell'impianto e l'unità di analisi del biogas.

Il gruppo di cogenerazione è costituito da un motore a combustione interna (Diesel), accoppiato ad un alternatore ed è in grado di erogare una potenza di 625 kW_{el} .

Figura 7 - Gruppo di cogenerazione



Fonte: Maccarese S.p.A.

4.8 Lo stoccaggio del digestato

Il digestato costituisce il residuo del processo di digestione anaerobica e può essere considerato un buon fertilizzante. Il digestato viene convogliato fuori dal digestore attraverso un sistema di pompaggio e raccolto in apposite vasche di stoccaggio (Figura 8), da cui viene prelevato per il suo successivo utilizzo. Esso può essere impiegato come ammendante, dopo aver superato analisi chimico-fisiche mirate ad individuare la presenza di eventuali inquinanti per il suolo. L'esito positivo delle analisi permette il suo diretto utilizzo in agricoltura, mentre in caso contrario è necessario prevedere un sistema di trattamento. Dopo una permanenza totale di circa 40-45 giorni il digestato viene sottoposto ad una separazione solido/liquido per ridurre il volume di stoccaggio della frazione liquida. La frazione solida viene stoccata su una parte della superficie di insilaggio fino al momento dell'impiego come ammendante organico. Invece la frazione liquida separata, in parte viene ricircolata ai reattori, mentre la quota rimanente viene pompata in lagune di stoccaggio per poi essere inviata ai campi agricoli.

Figura 8 - Vasca di stoccaggio del digestato



Fonte: Maccarese S.p.A.

5. **Biohazard. Individuazione delle attività lavorative a potenziale rischio espositivo nell'impianto**

La presenza nell'ambiente lavorativo di microrganismi, anche patogeni, non implica, di per sé, che vi sia rischio di infezione per l'uomo che ne entri in contatto e questo va ricordato quando si pianificano piani di monitoraggio microbiologico ambientale. Numerosi sono infatti i fattori che contribuiscono a variare le caratteristiche di pericolosità dei microrganismi quali il loro stato fisiologico, la possibilità di sopravvivere nell'ambiente e conseguentemente di moltiplicarsi [Pietrangeli, 2008]. Bisogna inoltre considerare che non è sufficiente una contaminazione per indurre una malattia, né una eventuale infezione comporta con certezza lo sviluppo della malattia. In merito alla pratica del monitoraggio microbiologico ambientale negli ambienti di lavoro è necessario ribadire che non vige un obbligo ai sensi del D.Lgs. 81/2008 al fine della valutazione del rischio biologico. Nei casi in cui si proceda a tale monitoraggio è quindi opportuno definire a priori la gestione dei risultati dello stesso, che può essere considerato un metodo di autocontrollo per localizzare nel flusso del ciclo lavorativo i punti o le operazioni in cui può determinarsi l'esposizione a possibili pericoli. Per la sorveglianza routinaria dell'aria dell'ambiente lavorativo può essere utile procedere a monitoraggi per valutare se le concentrazioni microbiche rilevate nelle aree di lavoro durante le diverse attività risultino superiori a quelle di aree esterne all'impianto, utilizzando come indicatori le conte batteriche totali. Con tale finalità si è proceduto ad un monitoraggio microbiologico ambientale nell'impianto oggetto dello studio e sono state individuate 7 postazioni, di seguito elencate:

Postazione 1. Area in corrispondenza dell'operazione di trasferimento dell'insilato dal silos di stoccaggio alla tramoggia di carico del digestore;

Postazione 2. Area in corrispondenza della vasca di stoccaggio dei liquami al momento dell'avvio delle pompe per il carico automatico all'interno del digestore;

Postazione 3. Area interna alla cabina dell'autopala utilizzata per il trasferimento dell'insilato;

Postazione 4. Corsia di foraggiamento degli animali durante la somministrazione del pasto;

Postazione 5. Area in corrispondenza del carico del digestato dalla vasca del post-fermentatore al carro botte;

Postazione 6. Interno del locale dove si effettua il prelievo del digestato in uscita dal digestore da avviare al controllo analitico;

Postazione 7. Postazione esterna all'azienda agricola, in corrispondenza della strada comunale (Bianco).

Le date di campionamento sono state scelte sulla base delle condizioni climatiche e della programmazione delle attività svolte. Per quanto riguarda le condizioni climatiche, trattandosi di siti *outdoor*, sono stati esclusi i giorni di pioggia o con vento forte. In Tabella 2 si riportano i risultati relativi alle conte microbiche vitali per unità di volume di aria campionata in corrispondenza delle aree di lavoro individuate a potenziale rischio espositivo.

Tabella 2 - Cariche microbiche totali per unità di volume (m^3) di aria campionata nelle differenti postazioni dell'impianto di biogas oggetto dello studio durante specifiche attività lavorative

Postazione	Luglio 2013	Settembre 2013	Ottobre 2013
1 (area di carico insilato)	20 UFC/ m^3	45 UFC/ m^3	98 UFC/ m^3
2 (area di carico liquame)	39 UFC/ m^3	150 UFC/ m^3	100 UFC/ m^3
3 (interno cabina autopala)	63 UFC/ m^3	46 UFC/ m^3	50 UFC/ m^3
4 (corsia di alimentazione bovini)	> 400 UFC/ m^3	> 400 UFC/ m^3	> 400 UFC/ m^3
5 (carico digestato su carro botte)	67 UFC/ m^3	nd	70 UFC/ m^3
6 (locale campionamento digestato)	nd	320 UFC/ m^3	400 UFC/ m^3
7 (Esterno "bianco")	200 UFC/ m^3	180 UFC/ m^3	250 UFC/ m^3

L'analisi dei dati relativi al monitoraggio della contaminazione microbica vitale aerodispersa durante le lavorazioni svolte nell'impianto di biogas oggetto dello studio mostrano valori contenuti in tutte le postazioni e sempre inferiori a quelle riscontrate in corrispondenza della postazione esterna all'azienda agricola e presa a riferimento come valore di fondo della contaminazione ambientale, che è risultata mediamente pari a circa 2×10^2 UFC/ m^3 . L'unico valore superiore a quello della postazione esterna all'azienda agricola è stato quello rilevato nel locale dove si procede allo scarico del digestato evidenziato nei campionamenti eseguiti nel mese di settembre e ottobre 2013. Un valore di carica microbica aerodispersa (>400 UFC/ m^3) superiore a quello del bianco è stato osservato in tutti i campionamenti durante le attività di foraggiamento dei bovini (corsia di alimentazione bovini). Questa postazione si trova all'esterno dell'area dell'impianto di biogas ed è stata considerata appositamente per avere un confronto con una pratica lavorativa certamente da considerarsi a rischio potenziale di esposizione ad agenti biologici. Dall'analisi complessiva dei risultati dei monitoraggi effettuati si evince che i valori di carica microbica osservati sono sensibilmente inferiori a quelli riportati in letteratura riferibili a monitoraggi ambientali effettuati in altre attività industriali a rischio potenziale di esposizione ad agenti biologici, come il settore agro-zootecnico [Dutkiewicz et al., 2001; Pietrangeli et al., 2004; Eduard et al., 2001; Dungan, 2010; Zucker et al., 2000], gli impianti di smaltimento e riciclaggio dei rifiuti solidi urbani [Malmros et al., 1992; Bungler et al., 2000; Breum et al., 1999], gli impianti di trattamento delle acque reflue [Krajewski et al., 2004; Lee et al., 2007] e l'industria di lavorazione di prodotti vegetali [Dutkiewicz et al., 2000; Eduard, 2004]. Sebbene, come noto, non esistano valori limite espositivi agli agenti biologici accettati a livello internazionale, è possibile fare riferimento ad una serie di valori guida elaborati sulla base di rilevamenti ambientali ed evidenze epidemiologiche in alcuni settori a rischio espositivo potenziale. Nello specifico, sono stati proposti da diversi Autori o da Autorità nazionali valori guida per alcuni componenti del bioaerosol. In Danimarca, così come in altri Paesi scandinavi, sono stati suggeriti i limiti di 10^3 UFC/ m^3 per i batteri gram-negativi, di 10^4 UFC/ m^3 per i microrganismi totali vitali, e 5×10^3 UFC/ m^3 per gli agenti fungini, come livelli massimi espositivi [Malmros, 1990; Poulsen et al., 1995]. In considerazione di tali valori guida, quelli osservati durante la campagna di monitoraggio nell'impianto oggetto dello studio

evidenziano una bassa contaminazione dell'aria, a riprova dell'efficacia delle misure di contenimento adottate nell'impianto (automazione delle operazioni ove possibile, teloni di copertura delle biomasse in stoccaggio, ecc.) finalizzate a minimizzare l'esposizione del lavoratore. L'osservazione che la conduzione delle lavorazioni in ambienti non confinati (ambienti di lavoro completamente *outdoor*), contribuisce a mantenere bassa l'esposizione dell'operatore è confermata dal valore di contaminazione microbica aerodispersa osservata nel locale dove si effettua il campionamento del digestato per eventuali analisi/controlli. In tale postazione, durante l'attività prevista (scarico del digestato), è necessaria l'adozione di specifiche misure di contenimento. Considerato che il locale dove si effettua tale attività è chiuso e quindi viene a mancare l'effetto della ventilazione dell'aria, che contribuisce alla dispersione e diluizione delle cariche microbiche aerodisperse, è necessario che l'operatore indossi durante tale attività dispositivi di protezione delle vie aeree, come ad esempio mascherina di protezione FFP2. L'approccio più corretto al controllo del rischio biologico occupazionale rimane infatti quello preventivo attraverso un percorso valutativo, che individua le lavorazioni/operazioni/fasi in cui può determinarsi l'esposizione, anche solo presunta, ad un possibile pericolo biologico, e procede alla definizione delle misure di contenimento e/o delle modalità operative, tanto più restrittive quanto maggiore è il pericolo di contaminazione evidenziato. Nello specifico degli impianti di produzione del biogas le misure tecniche, organizzative e procedurali al fine del contenimento del rischio biologico che possono essere proposte sono:

- Mantenere al livello più basso praticabile il numero dei lavoratori esposti agli agenti biologici potenzialmente presenti nell'impianto;
- Adottare procedure di lavoro e controlli di ingegneria tali da prevenire o minimizzare l'esposizione agli agenti biologici durante le diverse attività lavorative;
- Apporre teloni di copertura sui silos destinati allo stoccaggio delle materie prime al fine di contenere le emissioni di polveri organiche nell'ambiente circostante;
- Porre particolare attenzione alle condizioni di stoccaggio del materiale organico di alimentazione del digestore (insilato) evitando che si instaurino condizioni di elevata umidità, che favoriscono la formazione di specie fungine e condizioni di microaerofilia o anaerobiosi, che permettono la proliferazione di generi microbici anaerobi obbligati o facoltativi (*Clostridium*, *Bacillus*), da considerare patogeni opportunisti;
- Minimizzare la formazione di polveri, causate dal risollevarsi delle stesse dalle pavimentazioni stradali dell'impianto dovute al transito dei mezzi pesanti, dalle superfici sterrate dei piazzali ad opera del vento, da emissioni localizzate nelle aree di deposito delle materie prime;
- Prevedere misure di mitigazione, interventi operativi e attenzioni che possono essere efficacemente controllati in fase di costruzione dell'impianto e di programmazione delle attività giornaliere di conduzione, ivi comprese l'adozione di buone tecniche di stabulazione degli animali e di rimozione degli effluenti (rapide e frequenti);
- Prevedere vasche di stoccaggio del liquame zootecnico con agitatore ad immersione (per evitare la contaminazione aerodispersa) e pompa per il trasferimento diretto dei liquami al digestore;
- Equipaggiare i macchinari (autopala) per il trasferimento dell'insilato nella tramoggia da carico del digestore con sistemi di ventilazione dedicati, preferibilmente mediante l'utilizzo di filtri HEPA, monitorando periodicamente lo stato delle guarnizioni delle porte, provvedendo alla manutenzione dei filtri ed annotando la manutenzione su apposito registro;

- Fornire ai lavoratori idonei indumenti protettivi (tuta, stivali, guanti);
- Obbligo per il lavoratore di mantenere separati gli abiti di lavoro da quelli civili, anche al fine di prevenire e ridurre al minimo la propagazione microbica fuori dal luogo di lavoro;
- Obbligo di rispetto delle misure igieniche più elementari con apposita cartellonistica (non mangiare, non bere e non fumare sul sito, lavaggio frequente delle mani, almeno prima dei pasti e dei break, fare una doccia al termine del proprio turno lavorativo);
- Mettere a disposizione del lavoratore strutture igieniche dedicate (spogliatoi, docce, lavabi, detersivi, disinfettanti, ecc.);
- Informare i lavoratori sui pericoli e rischi biologici specifici in funzione dei compiti, delle mansioni e delle responsabilità;
- Addestrare e formare il lavoratore a svolgere le proprie mansioni in sicurezza e per affrontare eventuali emergenze.

6. Il pericolo di incendio negli impianti di produzione di biogas

Sul tema della sicurezza ed in particolare sulla problematica dell'incendio, la collettività si dimostra sempre più sensibile e attenta, visto che i danni provocati sono spesso ingenti sia dal punto di vista umano che economico. In questo contesto assume una notevole rilevanza l'adozione di misure, tese a minimizzare il livello di rischio nei luoghi di lavoro. A tal proposito recita un ruolo fondamentale l'ingegneria della sicurezza antincendio, la quale identifica i rischi e valuta, a seconda delle attività svolte nelle aree industriali, le misure di prevenzione e protezione più idonee per prevenire, controllare ed estinguere un incendio. Questo può scaturire dalla combustione del biogas (il cui principale elemento costitutivo è il metano) in presenza di ossigeno (comburente) e di una fonte di innesco. Le caratteristiche chimico-fisiche del biogas e l'ampiezza del suo intervallo di infiammabilità dipendono dalla tipologia delle biomasse impiegate nella sua produzione, che incidono sulla sua composizione chimica [Accardi et al., 2013]. Nel presente lavoro sono descritte le misure di prevenzione, di protezione attiva e passiva, che caratterizzano il sistema di sicurezza antincendio dell'impianto della Maccares S.p.A., fornendo anche indicazioni sull'esecuzione delle operazioni di manutenzione, che hanno un peso rilevante ai fini del corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza.

6.1 Il campo di infiammabilità del biogas

Il biogas è una miscela gassosa, il cui intervallo di infiammabilità dipende dal suo tenore volumetrico di metano (CH_4). Il campo di infiammabilità viene delimitato da un limite inferiore e da uno superiore, che rappresentano, rispettivamente, la concentrazione minima e massima in aria del combustibile, che costituiscono i valori estremi, che permettono l'attuazione della reazione di combustione in presenza di sorgenti di innesco. Più basso è il limite inferiore e più ampio il *range* e maggiore risulta l'indice di pericolosità della sostanza. Considerando, per semplicità, il biogas composto solamente da metano e da anidride carbonica, viene riportato in Tabella 3 il suo campo di infiammabilità rispetto al CH_4 .

Tabella 3 - Parametri chimico fisici del biogas (60% CH₄ e 40% CO₂) rispetto al metano

	Metano	Biogas
Potere calorifico inferiore (kWh/Nm ³)	10	6
Densità (kg/Nm ³)	0,72	1,2
Densità relativa rispetto all'aria	0,55	0,9
Temperatura di infiammabilità (°C)	595	700
Limiti di infiammabilità in aria (% in volume)	5-15	6-12
Fabbisogno di aria teorico (m ³ /m ³)	9,5	5,7

Fonte: Al Seadi T. et al., 2008

6.2 Le misure di sicurezza contro il rischio di incendio

La minimizzazione dell'indice di rischio di incendio nell'impianto di produzione di biogas viene attuata mediante il ricorso a:

- 1) misure di prevenzione, ossia il complesso delle azioni e dei provvedimenti, che riducono la frequenza di accadimento dell'evento;
- 2) misure di protezione, ossia gli interventi che limitano i danni, che potrebbero essere provocati dall'incendio.

Queste ultime sono suddivise in:

- *protezioni attive*: l'insieme delle misure di protezione, che richiedono l'azione di un uomo o l'azionamento di un impianto finalizzato alla precoce rilevazione, segnalazione e spegnimento dell'incendio;
- *protezioni passive*: l'insieme delle misure di protezione, che non richiedono l'azione di un uomo o l'azionamento di un impianto (distanze di sicurezza) [Dentoni et al., 2009].

6.3 Le misure di prevenzione dell'impianto di Maccarese

Nell'impianto della Maccarese S.p.A. sono presenti misure di prevenzione finalizzate ad:

- evitare il contatto tra il biogas ed il comburente (O₂ presente nell'aria);
- evitare l'insorgere di possibili fonti di innesco.

Per quanto concerne la prima condizione:

- sono stati rispettati i requisiti costruttivi richiesti per l'unità di stoccaggio del biogas (cupola a singola membrana). Infatti la membrana è realizzata in poliestere con inserti in PVC, in accordo alla normativa DIN 4102 B1 (resistenza al fuoco);
- la copertura gasometrica è stata sottoposta a specifici trattamenti per conferirle un'adeguata resistenza sia all'irraggiamento solare che all'attacco di funghi al fine di evitare il deterioramento e la possibile rottura dell'involucro, che comporterebbe un repentino contatto tra l'aria ed il biogas;
- la possibilità di interazione tra il comburente ed il biogas viene impedita anche dal controllo dei parametri di esercizio del digestore, che lavora in leggera sovrappressione (2-4 mbar) rispetto alla pressione atmosferica per impedire pericolose infiltrazioni di aria al suo interno;

- sono stati installati sistemi di rilevazione in grado di captare la presenza nell'aria di gas infiammabili prima che possano essere innescati.

Nei luoghi in cui è stata accertata la presenza di sostanze infiammabili (biogas) sono state eliminate o ridotte il più possibile le fonti di innesco, attenendosi ad alcuni criteri generali, finalizzati a garantire un'efficace azione preventiva. In particolar modo:

- la progettazione e la realizzazione degli impianti elettrici è stata eseguita a regola d'arte e secondo le norme CEI;
- gli impianti, le strutture e tutte le masse metalliche sono provvisti di messa a terra in modo da minimizzare l'eventualità che gli stessi diventino fonte di innesco;
- la realizzazione dei dispositivi di protezione dalle scariche atmosferiche è stata eseguita conformemente alle regole dell'arte;
- le riparazioni e gli interventi di manutenzione degli impianti elettrici sono stati affidati ad operai altamente qualificati.

In aggiunta a questi accorgimenti va evidenziato che il comportamento consapevole e responsabile del personale, che lavora nell'area produttiva del biogas, rappresenta un valido strumento di prevenzione al fine di evitare il compimento di azioni "pericolose". Per conseguire questo risultato il gestore dell'impianto deve organizzare, con una stabilita periodicità, corsi di formazione professionale, che hanno la finalità anche di rendere edotti gli operatori sull'utilizzo di attrezzature, che potrebbero avere ripercussioni sulla sicurezza antincendio.

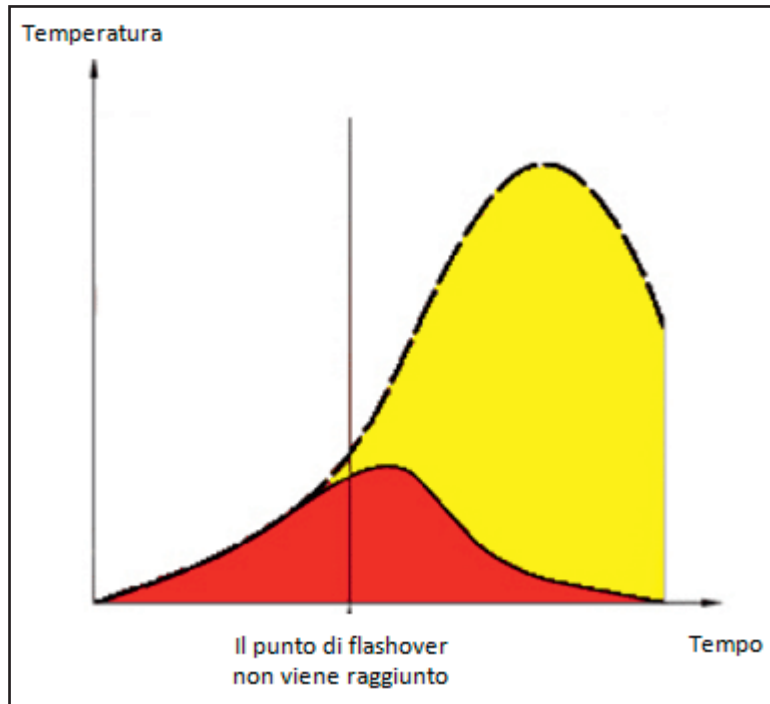
6.4 Le misure di protezione attiva dell'area di produzione del biogas

Le misure di protezione attiva presenti nell'impianto di Maccarese sono costituite da:

- impianto di rilevazione automatica di incendio;
- impianto di allarme;
- impianto ed apparecchiature di estinzione;
- impianto di alimentazione di sicurezza.

6.5 L'impianto di rilevazione automatica di incendio

La funzione dell'impianto di rilevazione è quella di rilevare un incendio nel minor tempo possibile e di fornire segnalazioni ed indicazioni affinché possano essere intraprese tempestivamente adeguate azioni per preservare la salute e la sicurezza degli operatori, che lavorano nel complesso industriale. Le protezioni attive modificano la curva d'incendio, abbassandola ed in tal modo riducono l'area e quindi l'energia termica associata all'incendio [Dentoni et al., 2009]. Inoltre impediscono il raggiungimento del punto di *flashover* (si innesca a partire da temperature di 500°C), ovvero un brusco innalzamento della temperatura ed aumento massiccio della quantità di materiale combustibile, che partecipa alla combustione. In Figura 9 si nota come l'impianto di rilevazione e segnalazione modifichi tale curva. L'area in giallo rappresenta il calore rilasciato dall'incendio senza l'intervento dell'impianto di rilevazione e l'area in rosso individua l'energia termica sprigionata, che è notevolmente minore, in caso invece di intervento della protezione attiva.

Figura 9 - Curva di incendio con l'intervento del sistema di rilevazione

Il rilevatore d'incendio, attraverso dei sensori, sorveglia, costantemente o ad intervalli frequenti prestabiliti, almeno un fenomeno fisico (fumo, fiamme, calore) connesso con l'incendio e fornisce un corrispondente segnale alla centrale di controllo. Nell'area deputata alla produzione del biogas sono installati rilevatori di fumo, sensibili alle particelle dei prodotti della combustione, e di calore, tarati sul valore ammissibile dell'energia termica, al cui superamento viene generato un segnale di allarme.

6.6 Dispositivi di allarme incendio

Il passo successivo alla rilevazione è la trasmissione della condizione di allarme. Nell'impianto è prevista:

- una segnalazione con percezione in ambiente;
- una segnalazione generalizzata per l'attivazione di procedure di emergenza e di evacuazione.

I dispositivi di allarme incendio sono degli apparecchi utilizzati per fornire un allarme tramite un segnale acustico (sirena) e un segnale visivo come ad esempio indicatori luminosi. Essi permettono di attirare l'attenzione delle persone, avvisandole del segnale di pericolo, e devono inoltre agevolare l'evacuazione. Sono stati installati dei sensori fumi e delle luci esterne di avviso, che, in caso di incendio al gruppo di cogenerazione o al container dei comandi, mettono al corrente il personale, che si trova nelle aree limitrofe. È stato rispettato il principio di funzionalità del sistema di segnalazione anche in condizioni di incendio già in atto. Ciò è stato ottenuto seguendo le buone tecniche riportate nella Norma UNI 9795, la quale specifica che, il collegamento fra i dispositivi di segnalazione e la centrale antincendio deve essere realizzato mediante cavi resistenti alla fiamma secondo la Norma CEI 20-36 a meno che la posa dei cavi stessi non ne garantisca una naturale protezione.

6.7 Impianto ed apparecchiature di estinzione dell'incendio

Nell'area di produzione del biogas sono presenti 3 idranti del tipo UNI 45 in grado di erogare alla pressione di 1 bar una portata di 110 l/min. Le tubazioni di alimentazione dell'acqua sono interrato e questa soluzione garantisce sia il necessario grado di protezione contro il gelo che contro i danni meccanici. Sono presenti anche degli estintori a polvere e a CO₂, dislocati nel vano dell'unità cogenerativa, nella sala comandi ed in aree esterne ed il loro posizionamento è stato studiato per assicurare un'immediata visibilità ed una facile accessibilità al fine di ridurre i tempi di intervento e quindi i possibili danni.

6.8 Impianto di alimentazione di sicurezza

Nell'impianto della Maccarese S.p.A. è stato installato un impianto di alimentazione di sicurezza, che garantisce l'erogazione dell'energia elettrica necessaria per l'attivazione dell'impianto antincendio in caso di emergenza. Esso entra in azione qualora si verificasse un guasto all'alimentazione principale.

6.9 La manutenzione degli impianti ed il registro antincendio

I dispositivi e gli impianti antincendio necessitano di una corretta gestione e manutenzione. Per gestione si intende l'insieme delle operazioni atte a garantire nel tempo un grado di affidabilità sufficiente per il regolare funzionamento dei suddetti sistemi. Nella gestione antincendio un'importanza fondamentale ricade sulla manutenzione, la quale deve essere affidata a personale esperto e qualificato. Infatti l'art. 4 del D.M. 10 marzo 1998 stabilisce che: *"gli interventi di manutenzione ed i controlli sugli impianti e sulle attrezzature antincendio sono effettuati nel rispetto delle disposizioni legislative e regolamentari vigenti, delle norme di buona tecnica emanate dagli organismi di normalizzazione nazionali e europei, o in assenza di dette norme di buona tecnica, delle istruzioni fornite dal fabbricante e/o dall'installatore"*. Il D.P.R. 12 gennaio 1998 n. 37 all'art. 5 dice: *"i controlli, le verifiche, gli interventi di manutenzione, l'informazione e la formazione del personale, che vengono effettuati, devono essere annotati in un apposito registro a cura dei responsabili dell'attività. Tale registro deve essere mantenuto aggiornato e reso disponibile ai fini dei controlli di competenza del Comando"*. L'impianto della Maccarese S.p.A. rientra nelle attività, aventi l'obbligo del Certificato Prevenzione Incendi (CPI) e di mantenere il registro antincendio aggiornato e reso disponibile in occasione dei controlli delle autorità competenti. La compilazione è a carico del responsabile del complesso industriale e riguarda tutti i controlli e gli interventi di manutenzione sugli impianti, sia quelli di natura ordinaria (sono effettuati sul posto con strumenti ed attrezzi di uso corrente) che straordinaria (operazioni che richiedono mezzi di particolare importanza o comportino sostituzione di intere parti d'impianto o la completa revisione), e sui componenti con specifica funzione antincendio. Nel registro cronologico degli interventi devono essere riportate fedelmente tutte le operazioni effettuate.

Il registro antincendio è composto da cinque sezioni:

- 1) anagrafica dell'attività: in cui sono inseriti i dati identificativi dell'attività, i dati anagrafici degli operatori coinvolti nel processo di messa in sicurezza dell'attività;
- 2) elenco degli impianti e attrezzature presenti: riporta un elenco degli impianti e delle attrezzature significative per la prevenzione incendi nell'attività;

- 3) registro cronologico degli interventi, delle verifiche e delle ispezioni: in cui vengono registrati gli interventi eseguiti nel corso degli anni in ordine cronologico. Permette di recuperare immediatamente i dati salienti dell'operazione e le scadenze future di manutenzione dei vari impianti;
- 4) scadenziario: in cui sono riportate, mese per mese, le scadenze;
- 5) formazione ed informazione dei lavoratori: in cui vengono annotati gli interventi di tipo formativo ed informativo, a cui sono stati sottoposti gli addetti della squadra antincendio.

6.10 La manutenzione degli estintori

La manutenzione degli estintori avviene in accordo con la Norma UNI 9994, eseguendo azioni di sorveglianza, di controllo e di revisione. La sorveglianza degli estintori a polvere o a CO₂, operazione atta a controllare, con frequenza (di massima) mensile, l'impianto e l'attrezzatura antincendio al fine di verificare che nelle normali condizioni operative non presenti danni materiali accertabili tramite un esame visivo, si effettua mediante le seguenti procedure:

- sia presente, segnalato con apposito cartello e numerato;
- sia chiaramente visibile, accessibile ed utilizzabile;
- non sia manomesso;
- abbia il dispositivo di sicurezza inserito;
- abbia l'indicatore di pressione con ago posizionato all'interno del campo verde (esclusi gli estintori a CO₂);
- non presenti l'ugello ostruito (esclusi gli estintori a CO₂);
- non presenti perdite e tracce di corrosione;
- non presenti fessurazioni del tubo flessibile;
- non presenti danni alla struttura di supporto;
- abbia il cartellino di manutenzione correttamente compilato.

Il controllo, misura di prevenzione finalizzata a verificare, con frequenza stabilita dalla norma specifica dell'impianto e dell'attrezzatura antincendio, l'integrità e la rispondenza dell'impianto e dell'attrezzatura antincendio alla sua funzione, consiste in una serie di procedure da effettuarsi sul posto ed in laboratorio con cadenza semestrale. Le procedure da effettuare sul posto sono essenzialmente quelle della sorveglianza precedentemente citate. Invece le operazioni, svolte in laboratorio nel caso di estintori a polvere, sono:

- la verifica della tenuta della carica mediante la misurazione della pressione interna nelle modalità previste dalla UNI EN 3-7;
- la rispondenza del tipo di gas ausiliario e della pressione alle indicazioni fornite dal produttore;
- la rispondenza a tutte le indicazioni fornite dal produttore.

Per gli estintori ad anidride carbonica le procedure indicate sono le seguenti:

- la verifica della tenuta della carica;
- la verifica di assenza di perdite di pressione;
- la rispondenza a tutte le indicazioni fornite dal produttore.

La revisione, intervento atto a verificare e rendere perfettamente efficiente l'impianto e l'attrezzatura antincendio tramite opportuni accertamenti, deve essere eseguita con una frequenza, che varia in funzione del tipo di agente estinguente e che si riassume nella Tabella 4.

Tabella 4 - Revisioni degli estintori in base al tipo di agente estinguente

Tipo di estintore	Tempo massimo di revisione con sostituzione della carica (mesi)
a polvere	36
a CO ₂	60

6.11 Le misure di protezione passiva dell'impianto

Il D.M. 24 novembre 1984 sancisce delle distanze di sicurezza (misure di protezione passiva), che devono essere rispettate nella fase di realizzazione in situ dei depositi di accumulo del biogas (cupole e palloni), rientranti, come riportato nel medesimo Decreto, nella categoria degli "accumulatori pressostatici", ossia contenitori in tessuto gommato, a volume variabile, fissati al suolo in modo semi-permanente, costituiti da una o più membrane ed adibiti all'accumulo di gas prodotto da trasformazioni biologiche. In base alle pressioni di esercizio consentite tali accumulatori vengono classificati come "depositi in bassa pressione". Nell'impianto di Maccarese l'unità di stoccaggio del biogas è costituita da due cupole gasometriche (Figura 10), integrate nei reattori anaerobici ed aventi ognuna un volume di circa 1.200 m³.

Figura 10 - Unità di stoccaggio del biogas



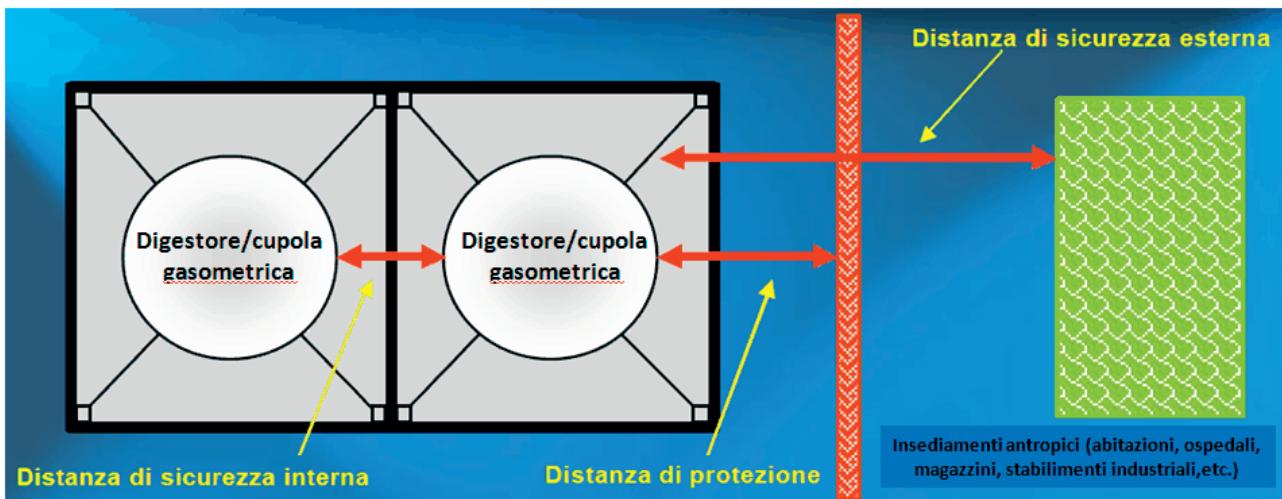
Fonte: Maccarese S.p.A.

Le unità digestore/cupola gasometrica della Maccarese S.p.A. sono state realizzate rispettando le seguenti distanze di sicurezza, riportate nel D.M. 24 novembre 1984:

- *distanza del deposito di accumulo (stoccaggio) da fabbricati destinati ad uffici e servizi inerenti l'attività e l'esercizio dell'impianto;*

- *distanza di protezione* (Figura 11): distanza che deve intercorrere tra l'unità di stoccaggio e la recinzione, delimitante l'area destinata alla produzione del biogas;
- *distanza di sicurezza interna*: distanza che deve sussistere tra l'accumulatore pressostatico e gli elementi pericolosi dell'impianto (altre unità di stoccaggio, stazioni di compressione, cabine di decompressione, cabine elettriche di trasformazione, elementi che presentano il pericolo di incendio o di esplosione nelle normali condizioni di esercizio, ecc.);
- *distanza di sicurezza esterna*: spazio esistente tra il deposito in bassa pressione ed il perimetro del più vicino fabbricato esterno allo stabilimento. Tale distanza deve essere aumentata del 50% qualora gli edifici esterni da proteggere sono adibiti ad attività industriali, che presentino pericolo di esplosione o di incendio, oppure sono costituiti da chiese, scuole, ospedali, locali di pubblico spettacolo, alberghi, convitti, caserme, grandi magazzini, mercati stabili, stazioni ferroviarie o da luoghi simili soggetti a notevole affollamento.

Figura 11 - Distanze di sicurezza dell'unità di stoccaggio del biogas



Tutte le distanze citate sono misurate a partire dal contorno della proiezione in pianta degli accumulatori pressostatici e sono state stabilite in funzione del valore assunto dal parametro "capacità di accumulo" (C), misurato in m³ e definito dalla seguente equazione:

$$C = V \cdot \frac{p}{p_0} = \frac{1200 \cdot 2}{1,01325} \cong 2369 \text{ m}^3 \quad 1)$$

dove:

- V = volume geometrico massimo dell'accumulatore pressostatico (1.200 m³);
- p = pressione massima di esercizio dell'accumulatore, indicata dall'esercente (2 bar);
- p₀ = pressione atmosferica (1,01325 bar).

Sulla base del valore di tale grandezza i depositi in bassa pressione sono classificati in:

- 1^a categoria (C >120.000 m³);
- 2^a categoria (20.000 < C ≤ 120.000 m³);
- 3^a categoria (C ≤ 20.000 m³).

Pertanto l'unità di stoccaggio dell'impianto esaminato è di "terza categoria". Questa classificazione incide sulla determinazione della distanza di sicurezza esterna, dipendente dalla categoria dell'accumulatore pressostatico (Tabella 5). I valori riportati nella seguente Tabella (in rosso viene evidenziata la situazione del complesso industriale della Maccarese S.p.A.) rappresentano quelli minimi, che devono essere garantiti.

Tabella 5 - Distanze di sicurezza in funzione della capacità di accumulo

Capacità singola di accumulo	Distanza di protezione (m)	Distanza di sicurezza interna (m)	Distanza di sicurezza esterna (m) (1 ^a cat.)	Distanza di sicurezza esterna (m) (2 ^a cat.)	Distanza di sicurezza esterna (m) (3 ^a cat.)
$C \leq 5000 \text{ m}^3$	4	5			20
$5000 < C \leq 50000 \text{ m}^3$	6	8		30	25
$C > 50000 \text{ m}^3$	8	10	40	35	

In aggiunta alle distanze finora prese in considerazione è stata rispettata la spaziatura (sancita dal D.M. 24/11/84) fra i recipienti di accumulo del biogas, misurata a partire dalla loro proiezione in pianta, ed i fabbricati destinati ad uffici e servizi relativi all'attività dell'azienda. Essa non deve essere inferiore a:

- 6 m per capacità di accumulo della singola unità di stoccaggio fino a 500 m³;
- 10 m per capacità di accumulo della singola unità di stoccaggio superiore a 500 m³ e fino a 5000 m³ (il caso in esame);
- 15 m per capacità di accumulo della singola unità di stoccaggio superiore a 5.000 m³ e fino a 50.000 m³;
- 20 m per capacità di accumulo della singola unità di stoccaggio oltre i 50.000 m³.

7. Il pericolo di esplosione negli impianti di produzione di biogas

L'esplosione è un fenomeno caratterizzato dalla formazione di un'onda di scoppio (onda di pressione o onda d'urto), derivante da un rapido rilascio di energia, la quale può essere immagazzinata nel sistema in varie forme (energia chimica, energia di pressione, ecc.). L'energia sprigionata può scaturire dalla combustione di una miscela infiammabile o dal rilascio di un fluido in pressione. Negli impianti per la produzione del biogas (miscela infiammabile) il primo fenomeno presenta una probabilità di verificarsi maggiore rispetto al secondo.

Quando sono coinvolte miscele infiammabili l'esplosione può verificarsi con le seguenti modalità:

- *deflagrazione*: la velocità dell'onda di combustione è subsonica [Rota et al., 2009] rispetto alle condizioni dei gas incombusti davanti al fronte di fiamma;
- *detonazione*: la velocità dell'onda di combustione è supersonica rispetto alle condizioni dei gas incombusti davanti al fronte di fiamma.

Pertanto una detonazione genera pressioni maggiori (picco di pressione fino a 20 bar) rispetto ad una deflagrazione (picco di pressione fino a 8 bar).

7.1 Analisi del pericolo di esplosione nell'impianto di Maccarese

In relazione all'analisi del pericolo di esplosione è necessario considerare che la principale causa di tale fenomeno, a cui potrebbero essere soggette queste realtà industriali, è costituita dalla composizione chimica (presenza di metano) del vettore energetico. Le visite effettuate presso l'impianto di Maccarese hanno avuto l'obiettivo di effettuare uno studio dettagliato dei componenti del ciclo produttivo e delle loro condizioni di esercizio, finalizzato ad individuare le possibili zone pericolose dell'impianto, ossia le aree in cui potrebbero generarsi atmosfere potenzialmente esplosive, e le sorgenti di emissione del biogas, allo scopo di verificare l'adeguatezza delle misure di prevenzione e protezione adottate.

7.2 Prima fase dell'analisi: la classificazione delle sorgenti di emissione dell'impianto di produzione del biogas

Le possibili "sorgenti di emissione" (SE) sono punti o componenti dell'installazione, dai quali può essere emesso in aria il biogas, che, come detto, è in grado di generare miscele esplosive. Il "grado di emissione" delle sorgenti è stato individuato, seguendo le indicazioni della Norma CEI EN 60079-10, che classifica le emissioni nei seguenti modi:

- *Grado continuo (C)*: emissione continua o che può avvenire per lunghi periodi;
- *Grado primo (P)*: emissione che può avvenire occasionalmente o periodicamente durante il normale esercizio;
- *Grado secondo (S)*: emissione che non è prevista durante il normale funzionamento e che se dovesse avvenire sarebbe poco frequente e di durata limitata.

Le sorgenti di rilascio del biogas danno vita a delle aree potenzialmente esplosive e pertanto la loro individuazione costituisce uno step fondamentale per la corretta collocazione dei dispositivi di sicurezza.

7.3 Seconda fase: la classificazione delle zone pericolose dell'impianto di produzione del biogas

La classificazione delle aree dell'impianto, che potrebbero presentare un'atmosfera potenzialmente esplosiva, è stata effettuata seguendo le indicazioni della Norma CEI EN 60079-10, la quale classifica i luoghi pericolosi in base alla frequenza di formazione ed alla persistenza di un'atmosfera esplosiva dovuta alla presenza di biogas, nelle seguenti zone:

- *Zona 0*: luogo nel quale un'atmosfera esplosiva, costituita da una miscela di aria e sostanze infiammabili (il biogas), è presente in modo continuativo o per lunghi periodi o frequentemente;
- *Zona 1*: luogo in cui occasionalmente è probabile che sia presente, durante il normale funzionamento, un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria e sostanze infiammabili (il biogas);
- *Zona 2*: luogo in cui non è probabile che sia presente un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria e sostanze infiammabili (il biogas) durante il funzionamento e/o se ciò dovesse avvenire è possibile la sua persistenza solo per brevi periodi.

7.4 Terza fase: la selezione e l'analisi delle condizioni di esercizio dei componenti dell'impianto

Prima di elencare le parti dell'impianto che sono state selezionate per l'individuazione delle aree potenzialmente a rischio di esplosione, si riportano in Tabella 6 i limiti del campo di esplosività del biogas.

Tabella 6 - Limiti di esplosività del biogas

Biogas	
Limite inferiore di esplosività (% vol)	6
Limite superiore di esplosività (% vol)	12
Temperatura di infiammabilità (°C)	700

Fonte: Al Seadi T et al., 2008

Lo studio effettuato per l'analisi del pericolo di esplosione ha interessato i seguenti componenti dell'impianto:

- 1) Vasca di stoccaggio delle biomasse liquide (liquami);
- 2) Unità di stoccaggio e di alimentazione delle biomasse solide;
- 3) Digestore anaerobico;
- 4) Unità di stoccaggio del biogas (cupola integrata nel digestore);
- 5) Desolforatore;
- 6) Sistema di deumidificazione (pozzetto di raccolta delle condense);
- 7) Sistema di trasporto del biogas;
- 8) Gruppo di cogenerazione.

7.5 La vasca di stoccaggio delle biomasse liquide

La vasca è di tipo aperto e dall'esame delle condizioni di funzionamento dell'impianto è stato riscontrato che il liquame non staziona per un tempo sufficiente per far innescare il processo di degradazione anaerobica e consentire quindi la produzione di biogas.

7.6 L'unità di stoccaggio e di alimentazione delle biomasse solide

L'unità di stoccaggio è aperta e le biomasse sono raccolte a temperatura ambiente. Anche in questo caso è emerso che il tempo di stazionamento delle biomasse solide non è tale da garantire l'innescio del processo di degradazione anaerobica e quindi produzioni significative di biogas, che potrebbero eventualmente verificarsi solamente durante il periodo estivo.

7.7 Il digestore anaerobico ed il sistema di stoccaggio del biogas

Il digestore anaerobico lavora in lieve sovrappressione rispetto all'ambiente esterno (2-5 mbar). L'unità di stoccaggio del vettore energetico è rappresentata da una cupola integrata (costituita da una singola membrana) nel digestore ed è provvista di dispositivi di protezione dalle sovrappressioni, costituiti da una valvola di sicurezza a guardia idraulica (Figura 12), da cui, durante l'esercizio del reattore anaerobico, può essere rilasciata in atmosfera una data portata di biogas. Tale elemento deve pertanto essere considerato

una sorgente di emissione di primo grado, che potrebbe dare origine ad una zona di classe 1, come descritto in precedenza. L'intera superficie della cupola di stoccaggio viene invece considerata una sorgente di emissione di secondo grado, che è in grado di originare una zona 2.

Figura 12 - Valvola di sicurezza a guardia idraulica



Fonte: Maccaresse S.p.A.

7.8 L'unità di desolfurazione

Il desolfatore è costituito da una torre di lavaggio, nella quale il biogas entra in contatto con una soluzione acquosa di idrossido di sodio (NaOH). Nell'unità di desolfurazione viene monitorata in continuo la percentuale di ossigeno presente per evitare di ricadere all'interno del campo di infiammabilità del biogas (il tenore di O₂ deve essere sempre mantenuto al di sotto del limite inferiore di infiammabilità) e, se si dovesse registrare un innalzamento di tale percentuale, verrebbe attivato un allarme, che agisce sui sistemi deputati ad intervenire per ripristinare le previste condizioni di esercizio del desolfatore. Pertanto nelle condizioni normali di funzionamento la probabilità, che si ricada nei limiti di infiammabilità del biogas è estremamente bassa. Le uniche potenziali sorgenti di emissione sull'unità di desolfurazione sono costituite dalle connessioni flangiate di ingresso e di uscita del biogas da tale componente. Esse possono essere classificate come sorgenti di secondo grado, che potrebbero dar vita ad una zona 2. Poiché il desolfatore non è idoneo a lavorare in zone con pericolo di esplosione, tale apparecchiatura, seguendo le indicazioni del costruttore, è stata collocata ad una distanza maggiore di 5 m dagli elementi considerati pericolosi: cogeneratore e digestore.

7.9 Il sistema di deumidificazione

Il trasporto del biogas avviene in condotte interrate, in cui il vapor d'acqua in esso contenuto, condensa e viene convogliato, per mezzo di apposite tubazioni in un pozzetto di raccolta. Tali tubazioni sono posizionate nel pozzetto in modo da costituire una guardia idraulica, che impedisce che il biogas venga rilasciato in atmosfera attraverso il pozzetto. Per ottenere tale fine il livello dell'acqua nel pozzetto viene fissato in base alla massima pressione posseduta dal biogas e viene monitorato da appositi sensori. La ridondanza della strumentazione assicura la continuità al monitoraggio, anche in presenza di eventuali guasti. In questo modo

si è in grado di intervenire tempestivamente, evitando rilasci di biogas. Pertanto le misure tecniche adottate consentono di non considerare solitamente il pozzetto come una possibile sorgente di emissione.

7.10 Il sistema di trasporto del biogas

Il biogas viaggia lungo delle condotte, che presentano diverse discontinuità costituite da valvole di regolazione, giunti flangiati, strumenti di misura (filettature per l'installazione della strumentazione). Pertanto tali discontinuità devono essere considerate delle possibili sorgenti di emissione di secondo grado, che potrebbero generare delle zone 2.

7.11 Il gruppo di cogenerazione

Il cogeneratore (motore a combustione interna) è dotato di strumenti e sicurezze, che al loro intervento, bloccano automaticamente il funzionamento del motore (blocco per insufficiente pressione del biogas, per bassa portata dell'acqua di raffreddamento, ecc.). L'unità di cogenerazione deve essere considerata una potenziale sorgente di secondo grado, che potrebbe dar vita ad una zona di classe 2.

8. Pericolo di esplosione: quadro riepilogativo delle potenziali zone con presenza di atmosfere esplosive

I risultati dello studio effettuato, analizzando le condizioni di esercizio dei componenti dell'impianto, vengono riportati, a titolo riepilogativo, in Tabella 7, dove si evidenziano le possibili sorgenti di emissione dell'area di produzione del biogas, il loro grado di emissione e le rispettive zone, che potrebbero generare.

Tabella 7 - Sorgenti di emissione dell'impianto oggetto dello studio

Sorgente di emissione	Grado di emissione	Risultati attesi
Valvola di sicurezza a guardia idraulica	primo	Zona 1
Membrana della cupola gasometrica	secondo	Zona 2
Connessioni flangiate	secondo	Zona 2
Filettature e/o valvole di regolazione	secondo	Zona 2
Cogeneratore	secondo	Zona 2

8.1 Il pericolo di esplosione: gli interventi per ridurre l'indice di rischio

L'indice di rischio, associato ad un evento incidentale, è dato dal prodotto della probabilità che esso si verifichi e dell'entità (magnitudo) dei danni, che potrebbe causare. Pertanto la gestione in sicurezza del pericolo di esplosione viene attuata nell'impianto mediante l'adozione di:

- 1) misure di prevenzione, che riducono la probabilità che un'esplosione si verifichi;
- 2) misure di protezione (Figura 13), che sono finalizzate a mitigare le conseguenze derivanti dal fenomeno.

Figura 13 - Misure di prevenzione e di protezione contro il rischio esplosione



8.2 Le misure di prevenzione dell'impianto

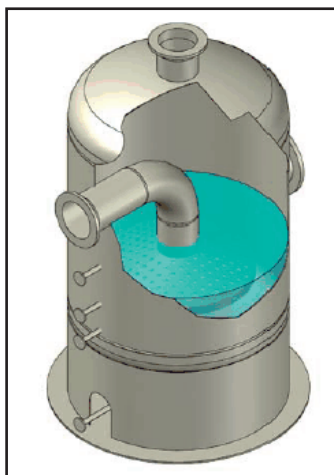
Per quanto concerne le zone riportate in Tabella 7, in cui si potrebbero generare atmosfere potenzialmente esplosive, sono state applicate delle misure di prevenzione per evitare che:

- il biogas non venga a contatto con l'aria;
- non siano presenti sorgenti di innesco.

Il primo requisito viene garantito dal fatto che il digestore lavora in leggera sovrappressione (2-4 mbar) per impedire che l'aria possa penetrare al suo interno, in cui è presente il biogas. Per mantenere questa condizione di esercizio il valore della sovrappressione viene monitorato in continuo, per mezzo di appositi sensori di pressione. Inoltre su tale sovrappressione sono fissati dei valori di soglia di alto ed altissimo livello in quanto la pressione del biogas non deve minare l'integrità della membrana interna dell'accumulatore pressostatico (cupola). Per la protezione dalle sovrappressioni si ricorre, come già detto, ad una valvola di sicurezza a guardia idraulica e ad una torcia di emergenza, che entra in azione generalmente quando vi è un eccesso di biogas prodotto, che non può essere smaltito a causa ad esempio di un guasto del gruppo di cogenerazione. La guardia idraulica è costituita da un volume chiuso in acciaio inox parzialmente riempito di acqua, il cui livello (Figura 14) nella tubazione di trasporto del biogas, che stabilisce il valore della sovrappressione ammissibile, viene misurato da dei sensori ed in questo caso sono fissate delle soglie di minimo e massimo riempimento (della guardia idraulica), monitorate dalla strumentazione installata, che, qualora si riscontrasse un discostamento dal valore di *set-point* impostato, trasmetterebbe dei segnali di allarme in sala controllo per ripristinare le condizioni previste. Un livello troppo basso dell'acqua potrebbe favorire il rilascio di biogas in atmosfera, con la conseguente diminuzione della resa del processo di digestione anaerobica e la formazione di una zona potenzialmente esplosiva. Viceversa un livello troppo alto impedirebbe l'emissione del biogas e quindi si innalzerebbe la sua pressione. La valvola di sicurezza a guardia idraulica dispone di camini esalatori per l'evacuazione del biogas, sui quali sono installati dei sistemi rompifiamma, come misura di sicurezza finalizzata ad arrestare il fronte di fiamma, derivante da un'eventuale

accensione della miscela biogas/aria. L'impianto è in grado di fronteggiare anche un improvviso e rapido aumento della pressione a valori superiori alla massima pressione consentita dall'unità di stoccaggio del biogas, dovuto ad esempio ad un'anomalia di funzionamento del cogeneratore, per mezzo di una torcia di emergenza (Figura 15), il cui sicuro azionamento è garantito da un doppio sistema di accensione. Quando viene ripristinato il valore prestabilito per la pressione del biogas nell'accumulatore, viene interrotta l'alimentazione della miscela gassosa alla torcia.

Figura 14 - Livello dell'acqua della guardia idraulica



Per impedire il contatto tra l'aria ed il biogas sono stati rispettati, durante la fase di realizzazione, specifici standard per la membrana della cupola, sanciti dalle seguenti normative di riferimento:

- resistenza alla rottura (Norma DIN 53504);
- allungamento a rottura (Norma DIN 53504);
- resistenza termica da - 40°C a 100°C;
- spessore del materiale (DIN 53534);
- densità del materiale (DIN 53534).

Inoltre la membrana interna (a contatto diretto con il biogas) dell'accumulatore pressostatico è stata sottoposta, al fine di preservarne l'integrità strutturale ed evitare il contatto del biogas con l'aria, a trattamenti per accrescere la sua resistenza all'irraggiamento solare (raggi UV) e conferirle un'adeguata resistenza ad attacchi di funghi. Per contrastare la presenza di sorgenti di innesco:

- sono state seguite le indicazioni riportate nella Norma UNI EN 13463-1, che stabilisce i requisiti costruttivi e le prove comuni a tutti gli apparecchi non elettrici al fine di evitare sorgenti di innesco efficaci;
- è stato redatto il "Documento di valutazione del pericolo di innesco" (Norma UNI EN 13463-1), nel quale sono riportate le modalità di esercizio (funzionamento normale, disfunzione prevista e disfunzione rara), che potrebbero dar luogo ad una fonte di innesco, e le misure adottate per impedire che tali sorgenti diventino efficaci;
- gli impianti elettrici sono stati realizzati a regola d'arte (rispondenza alle buone tecniche sancite dalle Norme CEI);

- il digestore anaerobico dispone di sistemi di protezione dalle scariche atmosferiche (Figura 16), che potrebbero costituire delle fonti di innesco;
- i componenti presenti nell'area di produzione del biogas sono conformi ai requisiti sanciti dalla Direttiva Atex;
- sono stati realizzati impianti di terra per evitare la formazione di cariche elettrostatiche.

Figura 15 - Torcia di emergenza



Fonte: Maccarese S.p.A.

Figura 16 - Parafulmini a protezione del reattore anaerobico

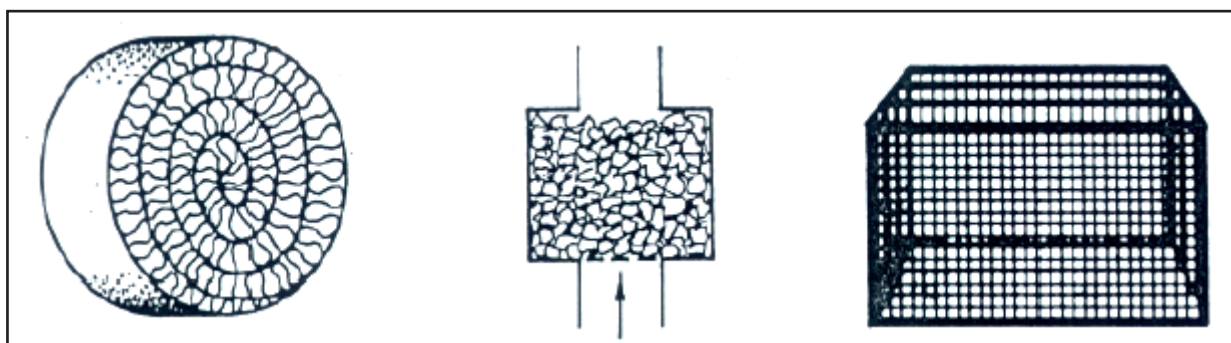


Fonte: Maccarese S.p.A.

8.3 Le misure di protezione dell'impianto

I sistemi di protezione dalle esplosioni presenti nell'impianto sono costituiti da arrestatori di fiamma. Essi sono a protezione delle tubazioni, in cui fluisce il biogas. Nelle tubazioni di trasporto del biogas, le quali presentano possibili sorgenti di emissione costituite dalle discontinuità presenti (flange, valvole di regolazione, strumenti di misura), sono posizionati degli arrestatori di "primo tipo" (Figura 17), che permettono di estinguere l'onda di combustione, che si potrebbe generare, attraverso il raffreddamento su superfici metalliche [Russo et al., 1985] opportunamente dimensionate (reti metalliche, lamiere perforate, riempimenti, ecc.). L'installazione scelta per gli arrestatori è la *in-line* (lungo il condotto) per fermare le onde di combustione in entrambe le direzioni. Questa opzione consente di migliorare il livello di sicurezza dell'impianto e di gestire le situazioni di pericolo (esplosione).

Figura 17 - Arrestatori di fiamma del primo tipo



Dall'analisi effettuata *in situ* si è verificata la congruenza e l'idoneità delle misure di sicurezza, sia di prevenzione che di protezione, tese a ridurre il rischio di esplosione e quindi le ripercussioni sulla salute degli operatori che svolgono le loro mansioni nelle zone individuate come aree in cui si potrebbero originare atmosfere esplosive.

9. Impianti di produzione di biogas: la *check list* come strumento per la verifica degli standard di sicurezza

Tra le finalità del progetto è stata prevista la predisposizione di materiale informativo sul tema della sicurezza degli impianti per la produzione di biogas sotto forma di *check list* al fine di proporre alle aziende uno strumento operativo finalizzato ad individuare gli elementi significativi per la sicurezza e la corretta conduzione di questi impianti (Allegato), in relazione ai pericoli incendio, esplosione e *biohazard*. L'elaborazione di tale *check list*, organizzata in moduli che possono essere svolti anche separatamente, può costituire un supporto tecnico per le aziende, che si trovano a dover redigere il Documento di valutazione del rischio in base a quanto previsto, come precedentemente riportato, dal nuovo Decreto sulle procedure standardizzate e non più attraverso la cosiddetta "autocertificazione".

BIBLIOGRAFIA

- Accardi DS, Lauri R, Pietrangeli B. *Biorefinery safety: the biogas industry*. IFIB Workshop on industrial biotechnology and bioeconomy. Napoli 22-23 ottobre 2013.
- Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T. *Biogas Handbook*. Esbjergn, Denmark 2008: 1-125.
- ARPA Emilia-Romagna. *Impianti a biomassa. Documento divulgativo sulle problematiche delle emissioni in atmosfera convogliate e diffuse*. ARPA Emilia Romagna, Bologna 2011: 1-7.
- Bertagna S. *Biogas e biometano in Italia ed in Europa*. *La Rivista dei combustibili* 2013; 67(2):46-48.
- Berton M. *Arrivate le linee guida per l'autorizzazione agli impianti rinnovabili*. *L'informatore Agrario* 2010; 40: 6-8.
- Bitton G. *Wastewater microbiology*. 2nd Edition Wiley-Liss, New York 1989.
- Breum NO, Wurtz H, Ebbehoj N. *Dustiness and bioaerosol exposure in sorting recyclable paper*. *Waste Manag. Res.* 1999;17: 100-108.
- Bungler J, Antlauf-Lammers M, Schulz TG, Westphal GA, Muller MM, Ruhnau P, Hallier E. *Health complains and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers*. *Occup. Environ. Med.* 2000; 57:458-464.
- Dentoni V, Massacci G. *Rischio d'incendio*. Dispensa del Corso "Sicurezza del lavoro e difesa ambientale". 2009.
- *Direttiva (CE) 1999/92 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 1999, relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive (quindicesima direttiva particolare ai sensi dell'art. 16, paragrafo 1, della Direttiva 89/391/CEE)*. GUCE L 23/57 del 28 gennaio 2000.
- *Direttiva 94/9/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 marzo 1994 concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*.
- Douwes J, Thorne P, Pearce N, Heederik D. *Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects*. *Ann. Occup.Hyg.* 2003; 47(3):187-200.
- Dudley DJ, Guentzel MN, Ibarra MJ, Moore BE, Sagik BP. *Enumeration of potentially pathogenic bacteria from sewage sludges*. *Appl Environ Microbiol* 1980; 39(1): 118-126.
- Dungan RS. *Board-Invited Review: fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures*. *J Anim Sci* 2010; 88(11): 3693-3706.
- Dutkiewicz J, Krysinska-Tracyk E, Skorska C, Sitkowska J, Prazmo Z, Golec M. *Exposure to airborne microorganisms and endotoxin in herb processing plants*. *Ann. Agric. Environ. Med.* 2001;8:201-211.
- Dutkiewicz J, Krysinska-Tracyk E, Skorska C, Sitkowska J, Prazmo Z, Urbanowicz B. *Exposure of agricultural workers to airborne microorganisms and endotoxin during handling of various vegetable products*. *Aerobiologia* 2000; 16:193-198.
- Eduard M. *Occupational asthma in greenhouse workers*. *Curr. Op. Pulmonary Med.* 2004; 10(2): 147-150.

- Eduard W, Douwes J, Mehl R, Heederik D, Melbostad E. Short term exposure to airborne microbial agents during farm work: exposure-response relations with eye and respiratory symptoms. *Occup. Environ. Med.* 2001;58:113-118.
- Heezen PA M, Gunnarsdóttir S, Gooijer L, Mahesh S. Hazard Classification of Biogas and Risks of Large Scale Biogas Production. *Chemical Engineering Transactions* 2013; 31: 204-209.
- ICOH Committee on Organic Dust. Endotoxin in the environment: a criteria document. *Int. J. Occup. Environ. Health* 1997; 3(suppl.):S1-48.
- Italia. Decreto Interministeriale del 30 novembre 2012 relativo alle procedure standardizzate per la valutazione dei rischi (DVR), ai sensi dell'art. 6 comma 8 lettera f) e dell'art. 26 comma 5 del D.Lgs. 81/2008. G.U. n. 285 del 6 dicembre 2012.
- Italia. Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387. Attuazione della Direttiva 2001/77 concernenti la promozione dell' energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità. G.U. n. 25 del 31 gennaio 2004.
- Italia. Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 relativo a norme in materia ambientale. G.U. n. 88 del 14 aprile 2006.
- Italia. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. G.U. n.101 del 30 aprile 2008.
- Decreto Legislativo 29 giugno 2010, n. 128 relativo alle modifiche ed integrazioni al Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, a norma dell'articolo 12 della legge 18 giugno 2009, n. 69. G.U. n. 186 del 11 agosto 2010.
- Italia. Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28 Attuazione della Direttiva 2009/28 concernenti la promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77 e 2003/30. G.U. n. 71 del 28 marzo 2011.
- Italia. Decreto Ministeriale 15 luglio 2003, n.388 recante disposizioni sul pronto soccorso aziendale, in attuazione dell'articolo 15, comma 3, del decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626, e s.m.i. G.U. n. 27 del 3 febbraio 2004.
- Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 12 gennaio 1998, n. 37. Regolamento recante disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi a norma dell'articolo 20, comma 8, della legge 15 marzo 1997, n. 59. G.U. n. 57 del 10 marzo 1998.
- Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 1 agosto 2011, n. 151. Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi, a norma dell'articolo 49 comma 4-quater, decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122. G.U. n. 221 del 22 settembre 2011.
- Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 14 settembre 2011, n. 177 recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, a norma dell'articolo 6, comma 8, lettera g), del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81. G.U. n. 260 del 8 novembre 2011.
- Italia. Decreto Ministeriale 10 marzo 1998. Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro. G.U. n. 81 del 7 aprile 1998.

- Italia. Decreto del Presidente della Repubblica 12 gennaio 1998 n. 37. Regolamento per la semplificazione dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi. G.U. n. 57 del 10 marzo 1998.
- Italia. Decreto Ministeriale 24 novembre 1985. Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l'accumulo e l'utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8. G.U. n. 12, 15 Gennaio 1985.
- Kearney TE, Larkin MJ, Frost JP, Levett PN. (a). Survival of pathogenic bacteria during mesophilic anaerobic digestion of animal waste. *J Appl Bacteriol* 1993;7 5(3):215-219.
- Kearney TE, Larkin MJ, Levett PN. (b) The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. *J Appl Bacteriol* 1993 ; 74 (1) :86-93.
- Khoiyangbam RS. Environmental Implications of Biomethanation in Conventional Biogas Plants. *Iranica Journal of Energy & Environment* 2011;2: 181-187.
- Krajewski JA, Cyprowski M, Szymczak W, Guchala J. Health complaints from workplace exposure to bioaerosols: a questionnaire study in sewage workers. *Ann. Agric. Environ. Med.* 2004;11:199-204.
- Lee JA, Thorne PS, Reynolds SJ, O'Shaughnessy PT. Monitoring risks in association with exposure levels among wastewater treatment plant workers. *J. Occup. Environ. Med.* 2007;49(11):1235-1248.
- Madsen AM. Airborne endotoxins in different background environments and seasons. *Ann Agric Environ Med* 2006;13:81-86.
- Malmros P. Problems with the Working Environment in the Solid Waste Treatment. The National Labour Inspection of Denmark, Report #10/1990. 1990.
- Malmros P, Sigsgaard T, Bach B. Occupational health problems due to garbage sorting. *Waste Manag. Res.* 1992;10: 227-234.
- Norma CEI EN 60079-10. Costruzioni elettriche per atmosfere esplosive per la presenza di gas. Parte 10: Classificazione dei luoghi pericolosi, 2010.
- Norma UNI EN 13463-1. Apparecchi non elettrici destinati ad essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive - Parte 1: Metodo e requisiti di base. Parte 1: Metodo e requisiti di base. 2009.
- Pietrangeli B. Il rischio biologico nei luoghi di lavoro: priorità di ricerca per la valutazione del rischio. *Prevenzione Oggi* 2008; 4(1): 60-74.
- Pietrangeli B, Lauri R, Bragatto PA. Safe Operation of Biogas Plants in Italy. *Chemical Engineering Transactions* 2013; 32: 199-204.
- Pietrangeli B, Venanzetti F. Rischio da esposizione ad agenti biologici nel settore agrozootecnico. *Ambiente Risorse Salute* 2004;99:44-49.
- Post W, Heederik D, Houba R. Decline in lung function related to exposure and selection processes among workers in the grain processing and animal feed industry. *Occup Environ Med.* 1998; 55(5): 349-355.
- Poulsen OM, Breum NO and Ebbehøj N. Collection of Domestic Waste. Review of Occupational Health Problems and their Possible Causes. *Science of the Total Environment* 1995;170 (1).
- Regolamento (CE) N. 1774 del Parlamento europeo e del Consiglio del 3 ottobre 2002, recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano, pubblicato sulla G.U.E. N. L 273/1 del 10 ottobre 2010.

- Regolamento (CE) N. 1069 del Parlamento europeo e del Consiglio del 21 ottobre 2009, recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano, pubblicato sulla G.U.E. N. L 273/1 del 10 ottobre 2010.
- Ritari J, Koskinen K, Hultman J, Kurola JM, Kymalainen M, Romantschuk M, Paulin L, Auvinen P. Molecular analysis of meso-and thermophilic microbiota associated with anaerobic biowaste degradation. *BMC Microbiology* 2012;12:121-135.
- Rota R, Busini V. Modellazione delle conseguenze di incidenti industriali. 2009, p. 67-9.
- Rotundo D. I principali rischi per la sicurezza e per la salute negli impianti di biogas. *Supplemento a L'Informatore Agrario* 2012; 25: 9-11.
- Russo G, Tufano V. Protezione di apparecchiature contro esplosioni interne. Ed. Cuen, Napoli 1985.
- Sahlstrom L. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Biores Technol* 2003; 87:161-166.
- Smith KR, Frumkin H, Balakrishnan K, Butler CD, Chafe ZA, Fairlie I, Kinney P, Kjellstrom T, Mauzerall D L, McKone TE, McMichael AJ, Schneider M. Energy and Human Health. *Annual Review of Public Health* 2013; 34: 159-188.
- Standard DIN 53504, Determination of tensile stress/strain properties of rubber; 2009.
- Standard DIN 53534. Tensile properties of plastics. 2000
- Standard DIN 4102 B1, Reaction to fire of materials and building elements, Part 1: Materials of construction, definitions, requirements and tests; 1998.
- Strauch D. Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge. *Rev Sci Tech Off Int Epiz* 1991; 10 (83):813-846.
- UNI 9994-1. Apparecchiature per estinzione incendi - Estintori di incendio - Parte 1: Controllo iniziale e manutenzione. 2013.
- UNI EN 3-7. Estintori d'incendio portatili - Parte 7: Caratteristiche, requisiti di prestazione e metodi di prova. 2008.
- Zucker BA, Trojan S, Muller W. Airborne gram-negative bacterial flora in animal houses. *J Vet Med B Infect Dis Vet Public Health* 2000; 47: 37-46.

Esposizione professionale a particolato sottile e bioaerosol in impianti di digestione anaerobica per la valorizzazione energetica di biomasse

Deborah Traversi, Riccardo Leinardi, Ilaria Gorrasi, Giorgio Gilli

Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Sanità Pubblica e Pediatriche, Sezione di Igiene, Torino

Introduzione

A livello mondiale, vi è una spinta considerevole nel rendere “verdi” molti aspetti dell’economia e del mercato del lavoro. I prezzi dell’energia e delle materie prime sono in aumento, producendo una crescente pressione nell’adottare pratiche e metodi di produzione ecologici, al fine di ridurre il riscaldamento globale ed evitare un cambiamento climatico irreversibile. Una rivoluzione verde dell’economia, inoltre, rappresenta una grande opportunità per avviare nuove imprese, sviluppare nuovi mercati con minori costi energetici, incentivare le attività e gli investimenti delle imprese nelle comunità locali, ridurre le disuguaglianze dovute ad un accesso limitato alle fonti energetiche. In Canada e Nord America, tali considerazioni hanno portato ad un estremo sviluppo nel settore, il che ha condotto ad una forte crescita economica [UNEP, 2008] e tale impulso è evidente anche nei Paesi emergenti. In Europa, questa spinta è arrivata in ritardo, ma ultimamente si è in una fase di pieno sviluppo: si stima che, nel 2009, fossero impiegate nel settore *green job* circa 3,4 milioni di persone ma, considerando tutto l’indotto, si arrivasse a circa 8,5 milioni. In Italia, si contavano 100.000 occupati nel 2010 e se ne conteranno quasi 250.000 al 2020 con una quota maggiore per le bioenergie (oltre 100.000 occupati), seguite dall’eolico con 80.000 e dal solare con 50.000 [R.E.R. Ermes Ambiente, 2012].

I *green jobs* sono, per certi versi, attività che prevedono dei rischi già presenti ma dei quali l’entità e la modalità di esposizione sono mutate in relazione alla mutata tecnologia applicata. D’altra parte occorre effettuare un processo di valutazione specifico che affronti specifici rischi emergenti o riemergenti in relazione alle nuove tecnologie applicate.

Tra le forme di energia rinnovabile più interessanti e sviluppate negli ultimi anni in Italia, troviamo il biogas prodotto attraverso la digestione anaerobica di biomasse agricole zootecniche. Secondo una recente indagine, negli ultimi tre anni il numero di installazioni sul territorio nazionale è aumentato di oltre il 75% raggiungendo oltre 900 impianti realizzati sul territorio nazionale, prevalentemente collocati al nord [Fabbri, 2011].

Nella filiera di produzione del biogas sono individuabili rischi di diversa natura lavoro-correlati: tra questi, possiamo citare il rischio esplosivo, il rischio chimico ed il rischio biologico. In relazione alle matrici utilizzate, che includono biomasse di origine vegetale ed animale, ed alle caratteristiche della fermentazione, il rischio biologico merita una considerazione particolare. La biomassa utilizzata è ricca di microrganismi, tra i quali anche patogeni e patogeni opportunisti, ed i processi anaerobici possono produrre una selezione della flora microbica tale da promuovere la presenza di microrganismi anaerobi, quali per esempio i clostridi, inizialmente poco rappresentati [Traversi, 2013]

Il D.Lgs. 81/2008, definisce un agente biologico come “qualsiasi microrganismo anche se geneticamente modificato, coltura cellulare ed endoparassita umano che potrebbe provocare infezioni, allergie o intossicazioni” mentre la definizione di bioaerosol dell’ACGIH riporta in modo esplicito anche frammenti di microrganismi e particelle derivanti da microrganismi [ACGIH *TLVs® and BEIs®, 2006*]. Pertanto, la valutazione del rischio per i lavoratori legata all’esposizione a bioaerosoli comprende una valutazione dei

microrganismi aerodispersi ed una valutazione delle componenti di origine biologica veicolate dal particolato. Il particolato inalabile (PM₁₀), si deposita lungo vari distretti del tratto respiratorio in funzione delle dimensioni delle particelle: in particolare, le particelle di dimensioni più rilevanti tendono a depositarsi nel primo tratto dell'albero respiratorio (10-6 µm), mentre quelle aventi un diametro inferiore a 6 µm possono raggiungere i distretti più profondi e quelle con diametro aerodinamico inferiore a 3 µm riescono a raggiungere anche gli alveoli polmonari [WHO, 2006].

Tra le diverse componenti del particolato inalabile, vi sono le endotossine, ovvero componenti strutturali lipopolisaccaridici della membrana esterna della parete batterica dei gram negativi. Date le loro caratteristiche dimensionali, possono anch'esse depositarsi lungo l'albero respiratorio, comportando lo sviluppo di effetti sistemici (asma, sindrome ODS, ecc.). La loro presenza nel bioaerosol non è trascurabile, ed anzi, si registra un aumento della loro concentrazione, anche a causa delle metodologie oggi adottate nelle operazioni di alimentazione intensiva del bestiame. La componente endotossica si riscontra maggiormente nelle frazioni più grossolane e più fini del PM₁₀, contribuendo in maniera considerevole alla sua patogenicità.

1. Scopo del lavoro

Obiettivo del presente lavoro è valutare il rischio di esposizione a bioaerosoli in impianti di produzione di biogas. A tal fine, vengono analizzati degli impianti su scala reale collocati nel territorio piemontese conducendo un'attività di monitoraggio esplorativa dei microrganismi aerodispersi e del PM₁₀ in 6 diverse frazioni dimensionali. Per ciascuna sub-frazione è stata valutata la presenza di endotossine batteriche.

Un sentito ringraziamento va alle aziende coinvolte in questo progetto: Società Cooperativa Agricola Speranza A.R.L. e MarcoPolo Environmental Group S.p.A.

2. Materiali e Metodi

2.1 Siti di campionamento

Il campionamento è stato effettuato in due diversi impianti di digestione anaerobica durante le attività di lavoro degli addetti e di funzionamento degli impianti stessi nei mesi di maggio e giugno del 2013, per un totale di 12 campionamenti. Il primo impianto è situato nella provincia di Torino (Impianto S), mentre il secondo si trova nella provincia di Cuneo (Impianto M).

La biomassa in ingresso nei due impianti è di origine diversa: nell'impianto S, si tratta di insilati, tutoli di mais, scarti ortofrutticoli ed effluenti zootecnici bovini; nell'impianto M, effluenti zootecnici bovini ed avicoli e biomasse vegetali da colture dedicate. I punti di campionamento prescelti durante i sopralluoghi sono caratterizzati da un'ampia movimentazione della biomassa; ciò avviene in prossimità dell'ingresso ai digestori in presenza della tramoggia di carico e alla fine del processo all'uscita del digestato. Nell'impianto S, i due siti di campionamento sono outdoor: il piazzale di carico della tramoggia ed il piazzale di prelievo del digestato, che non viene essiccato ma anzi prelevato tal quale con degli appositi mezzi per lo spargimento in campo. Nell'impianto M, invece, il primo sito è posizionato in un capannone di stoccaggio della biomassa all'interno del quale viene anche caricata la tramoggia, mentre il secondo è situato in un capannone semi-chiuso dove fuoriesce il digestato solido, separato dalla fase liquida.

2.2 PM10 ed endotossine

Il campionamento del PM10 è avvenuto utilizzando il campionatore ad alto flusso HVS modello AIRFLOW PM10 Analitica Strumenti dotato di un impattatore per il sub-frazionamento (sub-frazioni: 10-7.2; 7.2-3.0; 3.0-1.5; 1.5-0.95; 0.95-0.49 e <0.49 μm). Il flusso di aspirazione è stato di 1,27 m^3/min , conforme alla normativa UNI EN 12341, mentre la durata del campionamento è stata di 4 ore. Il particolato viene raccolto su membrane in fibra di vetro di due tipologie: Pall Corporation, Port Washington, New York, U.S.A formato A4 (203x254 mm, denominati "A"), per la frazione più sottile e filtri fessurati tipo A/E (8"x10", denominati "B") per le altre sub frazioni. Tutti i filtri sono stati condizionati in modo da controllare temperatura ed umidità e sottoposti a valutazione gravimetrica prima e dopo il campionamento.

Una porzione di ciascun filtro è stata utilizzata per la determinazione delle endotossine batteriche ($\frac{1}{4}$ filtro relativi alla sub-frazione < 0,49 μm ; $\frac{1}{2}$ filtro per le altre frazioni). L'estrazione è stata messa a punto in terreno RPMI-1640 rosso (500ml) con l'aggiunta dello 0,025% di Tween-20 [Traversi, 2011]. Gli estratti sono quindi stati congelati a -20°C , fino all'esecuzione del LAL QCL-1000 (Limulus Amebocyte Lysate) test Lonza *end-point* cromogenico.

2.3 Campionamento microbiologico

Il campionamento del bioaerosol è stato condotto con campionatore SAS Super 180 (PBI International); i parametri prescelti e le condizioni di crescita sono elencati in Tabella 1.

Tabella 1 - Parametri valutati per il campionamento del bioaerosol

Parametro ricercato	Tempo Incubazione	Temperatura Incubazione ($^\circ\text{C}$)	Terreno di coltura	Codice piastra PBI
Conta tot 22°C	48 h	22	PCA	PB5210.C
Conta tot 37°C	48 h	37	PCA	PB5210.C
Conta tot 55°C	48 h	55	PCA	PB5210.C
Funghi/lieviti	5-7 gg	25 ± 1 o 22 ± 2	SDA	PB1573.C
Pseudomonadaceae	18-48 h	37	Cetrimide	250793Z1
Clostridia	18-24 h	44	mCP	Preparate in laboratorio (SIFIN, TN1288)
Enterobacteriaceae	24 h	35-37	VRBG	251203ZA
Actinomiceti	5-10 gg	55	Starch casein agar	Preparate in laboratorio (US Biological, 57968-25)

Per la valutazione del livello di contaminazione microbiologica, sono stati calcolati degli indicatori sintetici proposti negli ambienti di lavoro che permettono di formulare valutazioni di carattere generale per ambienti *indoor* [INAIL, 2010] ed anche per ambienti *outdoor* [Grisoli, 2009]. I risultati sono anche espressi come Indice Globale di Contaminazione (IGCM) ed Indice di Contaminazione Batteri Mesofili (ICM).

2.4 Analisi statistica

I dati ottenuti sono stati elaborati con SPSS 19.0 per Windows. Le comparazioni tra medie sono state condotte con T-test ed ANOVA mentre le correlazioni sono espresse come rho di Spearman. I test applicati sono considerati significativi con $p < 0.05$, altamente significativi con $p < 0.01$.

3. Risultati e Discussione

3.1 PM10

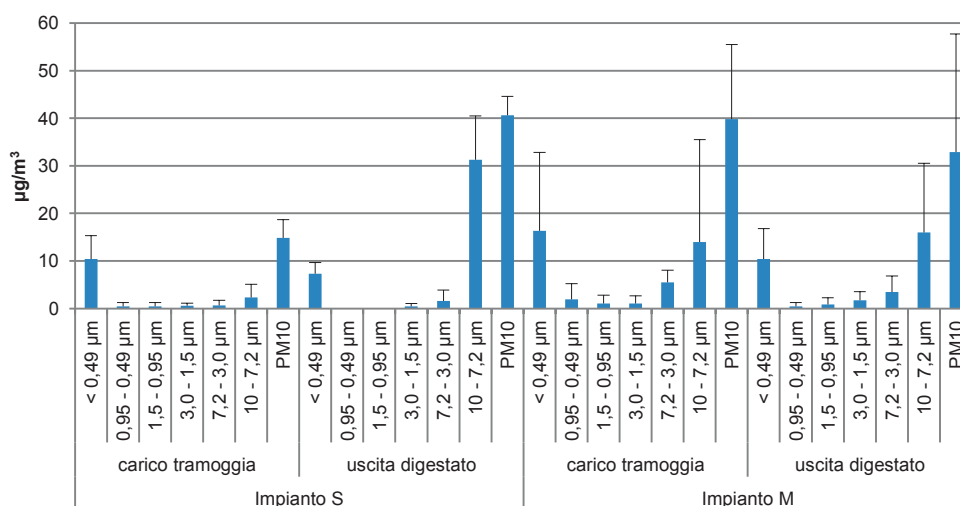
La Figura 1 mostra come le particelle aerodisperse siano mediamente più abbondanti in massa nelle frazioni estreme (PM10, frazione *coarse*, ed PM1, ultrasottile), mentre le altre frazioni sono poco rappresentate. Tale andamento è osservato in entrambi gli impianti, ed è analogo a quello osservato in letteratura soprattutto in ambiente rurale [Caggiano, 2010].

L'impianto M è caratterizzato da concentrazioni totali di PM10 tendenzialmente maggiori, ciò è compatibile con l'atteso trattandosi di siti parzialmente confinati. Dalla comparazione tra le concentrazioni medie di PM10 per impianto e sito di campionamento, emerge che la concentrazione è paragonabile considerando lo stesso impianto, ad eccezione della sub-frazione 10 - 7,2 µm dell'impianto S in prossimità del punto di prelievo del digestato. È possibile che tale differenza sia ascrivibile alla corrosione del suolo ed alla risospensione di particolato causata dal frequente passaggio di mezzi pesanti per il prelievo del digestato ed il successivo spargimento in campo. Per l'impianto M, si riscontra un'ampia differenza nella sub-frazione più fine, ma che non risulta essere significativa a causa della considerevole deviazione standard.

Il T-test evidenzia invece differenze significative tra impianti, con medie più elevate per l'impianto M per quel che riguarda alcune sub-frazioni intermedie (7.2-3 µm: $p=0.032$, 3.0-1.5 µm: $p=0.004$, 1.5-0.95 µm: $p=0.009$). Occorre, comunque, sottolineare che le concentrazioni di particelle comprese in queste sub-frazioni sono decisamente limitate; appare coerente che l'impianto M, in cui sono presenti punti di campionamento parzialmente confinati, evidenzino una polverosità più elevata, probabilmente dovuta ad una minore dispersione.

L'OMS, nel 2006, ha proposto come massimo livello di concentrazione medio annuo 20 µg/m³ per il PM10 e 10 µg/m³ per PM2.5. Nel 2008, l'UE ha adottato, in modo definitivo, una nuova direttiva (2008/50/EC), che pone limiti di qualità dell'aria anche relativamente ai PM2.5 (valore limite medio annuo fissato a 25 µg/m³ entro il 2015); tale Direttiva è stata recepita dall'Italia con il D.Lgs. 155/2010. In ambiente lavorativo, esistono indicazioni in termini di esposizione limite ammesse per le polveri, individuate da enti internazionali preposti pari a 15 mg/m³ per le polveri totali e 5 mg/m³ per le polveri inalabili [OSHA, 1988]. Particolari valutazioni sono inoltre espresse rispetto al rischio associato a polveri come le polveri di legno, di granella e di farina. In alcuni casi, il limite è ridotto per le polveri inalabili a 0.5 mg/m³ [Eduard, 2012].

Figura 1 - Concentrazioni medie delle sub-frazioni di PM10 per impianto e sito di campionamento



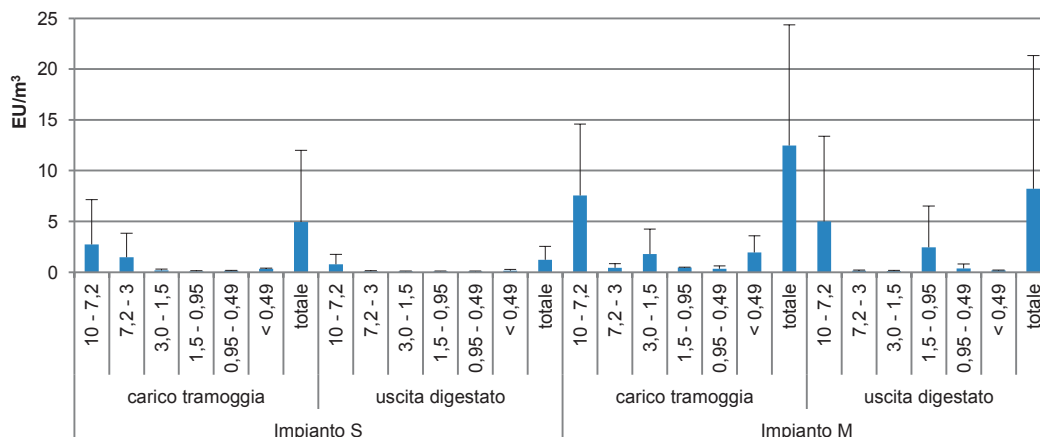
3.2 Endotossine

Le concentrazioni di unità endotossiche più elevate sono evidenziabili presso l'impianto M (Figura 2) ed in particolare nel sito di stoccaggio della biomassa e di carico della tramoggia. Tale evidenza è coerente sia con le caratteristiche dei siti di campionamento (ambiente confinato o semi-confinato), sia con la differente tipologia della biomassa trattata. L'impianto S, infatti, tratta percentuali più elevate di liquami, mentre nello stabilimento M sono utilizzate anche rilevanti quantità di matrici solide (letami, pollina, trinciati, ecc.). Le maggiori differenze, tuttavia, si riscontrano nelle metodologie di trattamento dei vari materiali, soprattutto alla fine del procedimento; l'impianto S non effettua generalmente l'essiccamento del materiale, in quanto il digestato viene utilizzato tal quale. Per questo motivo, il sito di campionamento per l'uscita è stato posizionato nei pressi della relativa botola, dove avviene l'aspirazione, con apposite lance, del digestato liquido. Nell'impianto M invece la separazione solido/liquido avviene in modo continuo, ed il separato viene stoccato in grossi cumuli a valle della filtropressa.

L'analisi statistica evidenzia una differenza significativa nel livello di endotossine registrato per sito di campionamento, con una media superiore nel sito di uscita del digestato, per la frazione granulometrica più sottile (T-test $p = 0,002$). Tale risultato potrebbe dipendere dalla disgregazione che avviene durante il processo di digestione anaerobica della popolazione gram negativa inizialmente presente nella matrice. Un'ulteriore differenza significativa evidenzia concentrazioni di endotossine maggiori, per alcune sub-frazioni, nell'impianto M rispetto ad S (T test sub-frazione 3-1.5 $p = 0.044$, 1.5-0.95 $p = 0.037$, 0.95 - 0.49 $p = 0.009$, <0.49 $p = 0.003$). Questa differenza è coerente alla tipologia dei siti campionati in relazione alle potenzialità di dispersione degli inquinanti.

I valori di EU/m^3 ottenuti sono molto bassi rispetto ai limiti proposti; un limite di esposizione internazionalmente riconosciuto non è ancora stato fissato, ma sono stati individuati solo valori indicativi, pari a $90 EU/m^3$ nelle 8 ore lavorative [DECOS, 1998]. Come tutte le componenti naturali del particolato aerodisperso, le endotossine si ritrovano maggiormente nella frazione coarse, e ciò è confermato dai dati ottenuti.

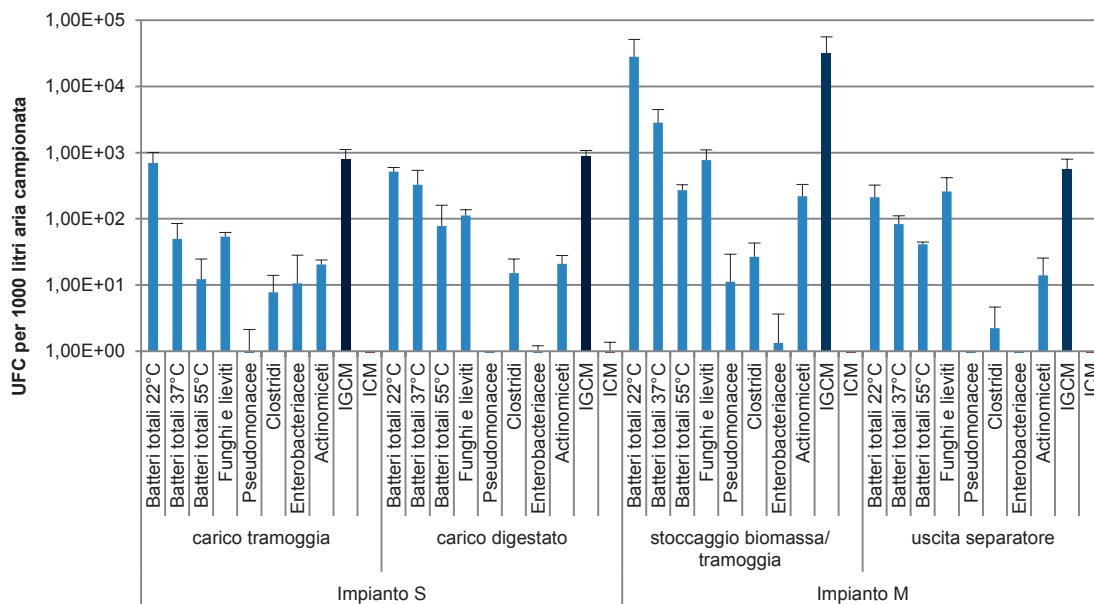
Figura 2 - Concentrazioni di endotossina espresse per impianto e sito di campionamento come EU/m^3 valutate in ciascuna sub-frazione di PM10



3.3 Indagine microbiologica

Dai risultati del monitoraggio illustrati in Figura 3, si evince che le conte batteriche sono i parametri più elevati seguite da funghi e lieviti ed actinomiceti. Per le conte batteriche e gli actinomiceti, la differenza fra le medie riscontrate risulta essere significativa (ANOVA conta batterica 22°C F=15,345 p=0,001; 37°C F=5,171 p=0,028; 55°C F=11,525 p=0,003; actinomiceti F=16,991 p=0,001). Il dato che risulta essere significativamente maggiore rispetto agli altri, è quello relativo alla contaminazione riscontrata nel sito di ingresso dell'impianto M. Le specie Enterobacteriacee sono poco presenti in particolare in uscita, mentre le specie Pseudomonadacee sono poco presenti con l'eccezione del sito confinato. La differenza tra entrata ed uscita sia per Enterobacteriacee che per le Pseudomonadacee, risulta essere statisticamente significativa (T-test Enterobacteriacee p = 0,044; Pseudomonadacee p = 0,039). La presenza di questi microrganismi risulta essere minore in uscita, indicando un potenziale abbattimento da parte del sistema anaerobico; in particolare, ciò si verifica per gli enterobatteri, i quali rivestono un significato rilevante per la salute umana ed ambientale: infatti, l'abbattimento ingresso-uscita risulta essere di circa 17 volte. I clostridi sono presenti in entrata ed in uscita, ma non si osserva, come potrebbe essere atteso per un processo di trattamento anaerobico, un fenomeno di arricchimento di tali microrganismi .

Figura 3 - Livelli di contaminazione microbica suddivisi per ciascun indicatore-sito-impianto



Considerando tutti i dati, scaturisce una buona correlazione tra batteri totali osservati a 22 e 37°C, clostridi a 44°C ed actinomiceti (Spearman's rho > 0,6; p < 0,05).

L'IGCM ha un valore inferiore a 1.000 per tutti i siti tranne che per il sito confinato dell'impianto M, evidenziando, secondo la tabella di valutazione proposta [Dacarro, 2000], una bassa contaminazione dell'aria. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che, trattandosi di ambienti completamente outdoor o semi-confinati sono caratterizzati da un buon livello di dispersione.

Nel capannone di stoccaggio biomassa e carico tramoggia dell'impianto M, l'IGCM ha un valore superiore a 30.000 mentre l'ICM è pari a 0,2, evidenziando una contaminazione dell'aria molto alta, classe G. Tale

valore è probabilmente da imputarsi al fatto che l'ambiente in cui è stato effettuato questo campionamento è confinato, con conseguente scarsa dispersione.

Nel sito di campionamento indoor dell'impianto M, si evidenzia una maggiore concentrazione totale di endotossine rispetto al sito d'uscita; ciò è in accordo con le determinazioni microbiologiche, in quanto, nello stesso sito, si è riscontrata una maggiore contaminazione da Enterobacteriaceae, indicatore della presenza di batteri Gram-negativi, da cui hanno origine le endotossine.

4. Conclusioni

I componenti del particolato aerodisperso negli impianti oggetto di studio includono prevalentemente particelle di suolo, componenti della biomassa stoccata e movimentata, materiale fecale, frammenti di mangime così come batteri, miceti e virus e parti di essi. Negli spazi dedicati allo stoccaggio e movimentazione della biomassa vengono generate particelle per la maggior parte con un diametro aerodinamico maggiore di 7.2 μm o inferiori a 0.49 μm .

L'esposizione umana per inalazione in ambienti confinati e non in cui ci sia stoccaggio di biomassa da avviare al processo di digestione anaerobica è simile, in relazione al tipo di processo, all'esposizione che si determina dove si allevano animali in modo intensivo (*Concentrated Animal Feeding Operations, CAFOs*), agli impianti di lavorazione delle granaglie e/o agli impianti di compostaggio. Tale esposizione coinvolge una complessa miscela di gas e particolato che include allergeni, microrganismi, antibiotici, ed irritanti polmonari (tra i quali ammoniaca e acido solfidrico). Gli effetti delle possibili interazioni tra queste miscele sono scarsamente conosciute e possono variare da azienda ad azienda in relazione al tipo di biomassa trattata, alle caratteristiche del processo di digestione attuato, all'esperienza maturata nella conduzione dell'impianto e nella gestione del rischio connesso alle varie operazioni.

Il rischio biologico risulta essere limitato con l'eccezione dei siti confinati in cui è necessario adottare delle misure cautelative, come adeguato ricambio d'aria, dotazione di apposite attrezzature (cabine degli automezzi dotate di filtri) e dispositivi di protezione individuale (indumenti dedicati, mascherina, guanti). L'esposizione a PM10 ed endotossine risulta essere estremamente limitata, tendenzialmente trascurabile a meno che non si presenti una modifica tale del processo per quel che concerne le biomasse impiegate o le mansioni lavorative, tali da comportare un approfondimento.

I campionamenti, in entrambi gli impianti oggetto di studio, non sono stati effettuati durante lo svolgimento di operazioni di manutenzione ordinarie e/o straordinarie, che avvengono con cadenza occasionale; tali condizioni sfuggono al monitoraggio effettuato, per cui non si è in grado di produrre una valutazione del rischio biologico in relazione a tali attività. Sarebbe opportuno, quindi, effettuare campionamenti dedicati.

I dati prodotti nel presente studio possono contribuire all'integrazione ed all'arricchimento del programma di sorveglianza sanitaria prevista dalla normativa vigente (D.Lgs. 81/2008), che non può prescindere dalla valutazione del rischio biologico.

In conclusione, possiamo affermare che la valutazione del rischio per i lavoratori del comparto verde risulta essere un campo nuovo ed emergente, da approfondire in svariati e differenti aspetti; il presente studio, rappresenta un primo tentativo di valutazione del rischio biologico per i lavoratori degli impianti di digestione anaerobica. È, inoltre, importante considerare il fatto che, dal punto di vista della contaminazione

microbiologica, sussistono forti differenze tra i vari impianti di digestione anaerobica. I dati esposti consentono di definire il rischio relativo a PM₁₀ ed endotossine estremamente marginale ed in condizioni normali trascurabile.

BIBLIOGRAFIA

- UNEP. Green Jobs: Towards decent work in a sustainable, low-carbon world; 2012; 352.
- R.E.R. ErmesAmbiente. Guida ai green jobs; 2012.
- Fabbri C. SM, Piccinini S. Il biogas accelera la corsa verso gli obiettivi 2020, Supplemento a L'Informatore Agrario 26; 2011.
- Traversi D, Bonetta S, Degan R, Villa S, Porfido A, Bellerio M, Carraro E, Gilli G. Environmental advances due to the integration of food industries and anaerobic digestion for biogas production: perspectives of the Italian milk and dairy product sector. *Bioenergy Research*. 2013;6(3):851-63.
- World Health Organization. WHO Air Quality Guidelines. Global update 2005; 2006.
- ACGIH *TLVs® and BEIs®*. Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2006.
- Traversi D, Alessandria L, Schilirò T, Gilli G. Size-fractioned PM₁₀ monitoring in relation to the contribution of endotoxins in different polluted areas. *Atmospheric Environment*. 2011; 45:3512-21.
- INAIL. Il monitoraggio microbiologico negli ambienti di lavoro. Campionamento e analisi. Linee Guida CONTARP; 2010.
- Grisoli P, Rodolfi M, Villani S, Grignani E, Cottica D, Berri A, Picco AM, Dacarro C. Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant. *Environ Res*. 2009;109:135-42.
- Caggiano R, Macchiato M, Trippetta S. Levels, chimica composition and sources of fine aerosol particles (PM₁) in an area of the Mediterranean basin. *Sci. Total Environ*. 2010;408:884-95.
- OSHA PEL Project Documentation; 1988.
- Eduard W, Heederik D, Duchaine C, Green BJ. Bioaerosol exposure assessment in the workplace: the past, present and recent advances. *J Environ Monit*. 2012;14:334-9.
- Health Council of The Netherlands. Dutch Expert Committee on Occupational Standards (DECOS). Endotoxins. Rijswijk: Health Council of the Netherlands, publication no. 1998/03 WGD; 1998.
- Dacarro C, Grignani E, Lodola L, Grisoli P, Cottica D. Proposed microbiological indexes for the assessment of air quality in buildings. *G Ital Med Lav Ergon*. 2000;22:229-35.

LA RICERCA DI FRONTIERA NEL SETTORE

Aspetti a confronto della produzione del butandiolo da petrolio e da biomasse

Luca Di Palma, Roberto Bubbico, Emanuela Capogrosso

Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente, Roma

Introduzione

In questo lavoro ci si è soffermati sull'analisi delle tecnologie tradizionali (chimiche) e innovative (biochimiche) per la produzione dell'1-4 butandiolo, sostanza intermedia per un gran numero di processi chimici. Si è provveduto ad una analisi dettagliata delle principali operazioni di processo che riguardano le due tecnologie, considerando come riferimento per il processo chimico la tecnologia Davy, attualmente la più utilizzata in campo industriale. Basandosi su informazioni reperibili in letteratura si è provveduto ad effettuare una analisi di dettaglio delle operazioni condotte nei due processi evidenziandone i possibili impatti ambientali e i rischi in materia di sicurezza sul lavoro. L'analisi effettuata ha avuto come obiettivo quello di individuare le operazioni, che presentano le maggiori criticità, in vista di fornire uno strumento per lo sviluppo di norme di sicurezza proattive all'interno di tutti i siti industriali, anche di natura diversa.

Lo studio effettuato riguarda la valutazione delle problematiche di gestione impiantistica per gli aspetti relativi all'impatto ambientale e alla sicurezza connesse alla produzione dell'1,4 butandiolo.

Il butandiolo è un alcol che presenta diversi isomeri (1-2 butandiolo, 1-3 butandiolo, 1-4 butandiolo e 2-4 butandiolo), prodotto industrialmente fin dagli anni '30, e utilizzato in genere come solvente ma la cui principale applicazione è come intermedio chimico per la produzione di numerosi composti, tra i quali:

- il tetraidrofurano (THF), a sua volta utilizzato come precursore per l'ottenimento di altri composti chimici come PTMEG (politetrametiletere glicole) precursore per la produzione di fibre;
- il gamma butirrolattone, utilizzato principalmente come solvente;
- il 2-pirrolidone, utilizzato come solvente e intermedio di interesse dell'industria farmaceutica, oltre che utilizzato per la sintesi del n-vinilpirrolidone (NPV) impiegato a sua volta per ottenere il polivinilpirrolidone (PVP);
- il butadiene, fondamentale per l'ottenimento delle gomme sintetiche per polimerizzazione.

Di particolare interesse, inoltre, è il fatto che il potere calorifico del butandiolo 27,2 MJ/kg è simile a quello dell'etanolo, il che ha portato all'apertura di una nuova strada per l'utilizzo di tale prodotto anche come biocombustibile. Tale ultima possibilità ha pertanto incentivato la ricerca a trovare strade diverse da quella chimica per la produzione del butandiolo. In particolare, negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche di produzione biochimica, messe a punto nell'ottica di una produzione di un biocarburante ad emissioni zero.

In tale prospettiva, si rivela pertanto utile operare uno studio finalizzato alla valutazione delle diverse tecnologie di sintesi del butandiolo, al fine di evidenziarne l'impatto ambientale e le problematiche connesse con la sicurezza.

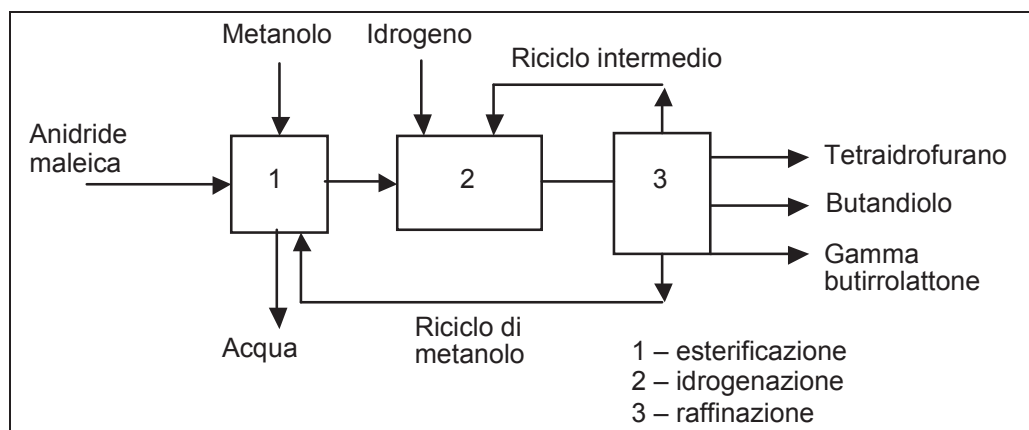
In questo lavoro, sulla base di dati di letteratura, si è operato un primo confronto tra la tecnologia tradizionale e quella innovativa, in modo da mettere in risalto i vantaggi e i limiti di entrambe le tecnologie.

1. Processi di produzione dell'1-4 butandiolo

1.1 Il processo chimico

Il processo di produzione tradizionale dell'1-4 butandiolo più utilizzato prevede la conversione del butano in due fasi in serie. È necessaria infatti la produzione di un intermedio chimico, l'anidride maleica, sebbene essa non sia l'unico intermedio possibile. Quando il *feedstock* è costituito da olefine (in particolare butano) l'anidride maleica è il risultato di un'ossidazione parziale in fase vapore condotta in presenza di un catalizzatore. Il primo *step* di processo prevede quindi una alimentazione proveniente da materie prime fossili (butano) e porta alla produzione dell'anidride maleica (Tuck et al., 2000). Quest'ultima viene successivamente alimentata ad una fase di transesterificazione, necessaria per la produzione del dimetilmaleato, che viene poi a sua volta alimentato al vero e proprio processo di produzione del butandiolo, costituito da due fasi di reazione, il primo operante ad alta pressione il secondo ad una pressione più bassa, secondo lo schema a blocchi riportato in Figura 1.

Figura 1 - Schema a blocchi del processo Davy per la produzione di 1,4 butandiolo



1.2 Il processo biochimico

Le possibili vie per la produzione biologica del BDO sono essenzialmente due: la prima passa attraverso l'ottenimento di intermedi di fermentazione di zuccheri, come l'acido succinico (Beauprez et al., 2010; Jiang et al., 2010), utilizzato poi nella sintesi standard del BDO; la seconda via prevede l'ottenimento diretto di quest'ultimo attraverso l'utilizzo di batteri geneticamente modificati (de Barros et al., 2013).

Nel presente lavoro, entrambe le strade sono state valutate, considerando come tecnologia di produzione biochimica, sia il processo che prevede la produzione di acido succinico, sia il processo di fermentazione diretta.

In ogni caso le materie prime sono costituite da zuccheri a 5-6 atomi di carbonio, ottenuti a loro volta da scarti agricoli (biomasse), quali canna da zucchero o amido di mais (Cheng et al., 2010).

La biomassa è costituita da cellulosa, emicellulosa e lignina. La cellulosa è costituita da lunghe catene di glucosio organizzate in fasci cristallini. L'emicellulosa è costituita principalmente da xilosio, zucchero costituito da 5 atomi di carbonio. La lignina è costituita principalmente da composti fenolici e lega tra di loro i fasci di cellulosa. Questa complessa struttura rende la biomassa molto difficile da attaccare e quindi risulta

difficile estrarne zuccheri di base: ciò rende indispensabili dei pretrattamenti, che rappresentano una fase molto onerosa per l'impianto stesso dal punto di vista economico.

Il pretrattamento principale in entrambi i casi è l'idrolisi della biomassa, che serve ad attaccare la complessa struttura separando la lignina (Song and Lee, 2006). L'idrolisi può essere realizzata tramite acidi, diluiti o concentrati, ovvero impiegando enzimi. Il primo metodo, che consiste in un trattamento con acido solforico ad una temperatura variabile in funzione della concentrazione dell'acido (200°C se acido concentrato, 100°C se acido diluito), è il più utilizzato in virtù del costo inferiore. Nella produzione biologica di BDO, tuttavia, l'utilizzo di acidi rappresenta comunque un legame con la via petrolchimica, in quanto l'acido solforico è prodotto a partire da zolfo, a sua volta prodotto della raffinazione del petrolio.

L'alternativa al trattamento acido è l'idrolisi enzimatica, processo a minor impatto ambientale e che permette di realizzare il trattamento in condizioni meno acide, consentendo delle migliori conversioni, ed evitando al contempo la produzione di sottoprodotti tossici per la successiva fase di fermentazione.

2. Analisi dell'impatto ambientale e della sicurezza

2.1 Il processo chimico

I risultati dell'analisi effettuata sul processo chimico sono riportati nelle tabelle seguenti da 1 a 4, non considerando l'assorbimento di energia e gli impatti ambientali a monte del processo o legati alle utenze.

Per quanto riguarda lo studio dell'impatto ambientale, in particolare nella sezione di processo relativa alla produzione dell'anidride maleica, si evidenzia innanzi tutto l'utilizzo del butano come materia prima. Tale materia prima è generalmente prodotta per via petrolchimica, per cui nella valutazione dell'impatto ambientale, bisogna tener presente tutte le cause di impatto ambientale legate all'impianto a monte della materia prima per la produzione della stessa.

L'impianto relativo alla produzione dell'anidride maleica, genera delle acque di scarico a valle della colonna di separazione, che richiedono un apposito sistema di smaltimento, in quanto le stesse risultano essere classificate come rifiuto. Nella sezione di processo relativa alla produzione dell'1-4 butandiolo si pone particolare attenzione sul fatto che in tale impianto avviene la produzione di un prodotto indesiderato in piccola quantità, l'aldeide THF. Tale sottoprodotto risulta particolarmente importante dal punto di vista dell'analisi relativa all'impatto ambientale, in quanto risulta essere un rifiuto speciale che necessita di trattamenti specifici per lo smaltimento. Inoltre tale impianto prevede la produzione di una notevole quantità di CO₂ che genera inevitabilmente un impatto ambientale proprio dell'impianto, proporzionale alla quantità prodotta.

Per quel che concerne lo studio sugli aspetti legati alla sicurezza, tra le criticità relative all'impianto Davy vi è l'utilizzo del butano come materia prima. Tale sostanza è infiammabile e, quando miscelata con aria, è necessario che la miscela rispetti rapporti di diluizione (20:1) tali da mantenerla al di fuori dei limiti di infiammabilità. Per questioni di sicurezza legate alle sostanze impiegate è necessario che il reattore di produzione dell'anidride maleica, sia inertizzato con azoto, al fine di eliminare il rischio di formazione di miscele esplosive all'interno del reattore stesso in fase di manutenzione. Per la sezione di processo relativa allo step di produzione dell'1-4 butandiolo bisogna porre particolare attenzione sul fatto che tutte le sostanze in forma vaporizzata che potrebbero essere scaricate dalle apparecchiature in condizioni di emergenza

devono essere smaltite tramite convogliamento in apposito sistema di scarico (torcia o *blow down*) al fine di eliminare il rischio di dispersione di sostanze esplosive e infiammabili.

Tabella 1 - Studio dell'impatto ambientale relativo all'impianto di produzione chimica dell'anidride maleica - valutazione relativa alle sostanze utilizzate e alle condizioni operative

Operazioni	Prodotti/ materie prime	Impatto ambientale
Riscaldamento butano	Butano 350°C - 450°C	Emissioni di CO ₂ legate al sistema di riscaldamento
Compressione aria	Aria 1-3 bar	-
Reattore	Butano, aria, pentossido di vanadio, anidride maleica, O ₂ , CO, N ₂ , Acido formico, acetico acrilico. Refrigerante: Sali fusi 350°C - 450°C, 1-3 bar	Sfiati del reattore in torcia. Emissione CO ₂ e VOC. Fluido refrigerante operante in un circuito chiuso e successivamente inviato ad apposito impianto di trattamento
Unità di raffreddamento	Stream prodotto e acqua di raffreddamento. Fino a 160°C steam prodotto Fino a 60°C H ₂ O raffreddamento	Spurgo acque di raffreddamento (temperatura e eventuali agenti chimici per il trattamento) Il sistema di riscaldamento prevede emissioni in CO ₂ proporzionali al carico termico
Lavaggio- recupero solvente	Fluido di lavaggio (dibutilftalato); sottoprodotti: acido maleico, fumarico, butano.	Sversamento, spillaggio da apparecchiature e tubazioni
Colonna di separazione	<i>Light ends</i> , anidride maleica e corrente di ricircolo	La frazione leggera è inviata a torcia. Emissione CO ₂ e VOC

Tabella 2 - Studio dell'impatto ambientale relativo all'impianto di produzione chimica dell'1-4 butandiolo - valutazione relativa alle sostanze utilizzate e alle condizioni operative

Operazioni	Prodotti - materie prime/ condizioni operative	Impatto ambientale
Pre frazionamento	Anidride maleica	Sversamento, spillamento
Reattore esterificazione	H ₂ O, metanolo, dimetilmaleato 65-135°C; 1-3 bar	Emissioni di CO ₂ legate al circuito di riscaldamento. Reflui (l'acqua residua è catalogata come rifiuto pericoloso)
Colonna separazione leggeri	H ₂ O, metanolo	Reflui (l'acqua residua è catalogata come rifiuto pericoloso) Emissioni torcia (CO ₂ , VOC)
Colonna separazione pesanti	Anidride maleica dimetilmaleato	Reflui (l'acqua residua è catalogata come rifiuto pericoloso) Emissioni torcia (CO ₂ , VOC)
Reattore L.P.	H ₂ , succinato 130-140°C; 30 bar	Impatto legato alla tipologia di fornitura dell'idrogeno.
Separatore L.P.	Metanolo, butanolo, metilbutirrato metossibutirrato	Residuo inviato allo smaltimento rifiuti organici pericolosi
Compressore di ricircolo	-	-
Reattore H.P.	H ₂ , succinato, tetraidrofurano gammabutirrolattone, 1-4 butandiolo 170 - 180°C; 70-80 bar	Impatto legato alla tipologia di fornitura dell'idrogeno.
Separatore H.P.	Dimetilsuccinato, idrossibutirrato, metile DMS, aldeide THF	Residuo inviato allo smaltimento rifiuti organici pericolosi Sversamenti, spillaggio Per l'aldeide del THF sono necessari specifici sistemi di smaltimento
Compressore ricircolo H.P.	-	-

Tabella 3 - Analisi delle criticità in materia di sicurezza relativa all'impianto per la produzione chimica di anidride maleica

Operazioni	Prodotti/ materie prime; condizioni operative	Principali criticità in materia di sicurezza
Riscaldamento butano	350°C - 450°C	Butano: esplosivo e infiammabile. Alta temperatura. Miscela aria-butano esplosiva: necessari controllo delle portate e adozione di sistemi di controllo P e T di riscaldamento. Apparecchiatura in pressione. Area classificata ATEX. Rilasci in atmosfera
Compressione aria	Aria 1-3 bar	Protezione motore compressore; necessaria adozione di sistemi di controllo e di interblocco
Miscelamento delle correnti	Aria; butano	Miscela infiammabile: possibilità di innesco. Area classificata ATEX. Rilasci in atmosfera
Reattore	Butano, aria, pentossido di vanadio, anidride maleica O ₂ , CO, N ₂ , acido formico, acetico acrilico 350°C - 450°C; 1-3 bar Sali fusi	Apparecchiatura in pressione; runaway; eccesso di flusso; mancanza di azoto per inertizzazione; controllo termico; stoccaggio e trasporto sali fusi. Rilasci in atmosfera
Unità di raffreddamento	Fino a 160°C steam prodotto Fino a 60°C H ₂ O raffreddamento	Alta temperatura; circuito in pressione
Lavaggio - recupero solvente	Fluido lavaggio (dibutilftalato) sottoprodotti: acido maleico, fumarico, butano e sottoprodotti	Stoccaggio solvente; rilasci in atmosfera di infiammabili e nocivi. Alta temperatura. Sfiati con emissione in atmosfera (vaso di espansione)
Colonna di separazione	Light ends, anidride maleica e corrente di riciclo	Apparecchiatura in pressione (in caso di sovrappressione o mal funzionamento i light ends sono scaricati in torcia). Alta temperatura. Rilasci in atmosfera

Tabella 4 - Analisi delle criticità in materia di sicurezza, relativa all'impianto per la produzione dell'1-4 butandiolo

Operazioni	Prodotti/ materie prime; condizioni operative	Principali criticità in materia di sicurezza
Pre-frazionamento	anidride maleica	Apparecchiatura in pressione. Eccesso di flusso (una variazione di portate può generare una sovrappressione che si ripercuote sul reattore)
Reattore esterificazione	H ₂ O, metanolo, dimetil maleato	Apparecchiatura in pressione; eccesso di flusso; alta temperatura; <i>runaway</i> . Rilasci in atmosfera
Colonna separazione leggeri	H ₂ O metanolo	Apparecchiatura in pressione. Alta temperatura. Rilasci in atmosfera
Colonna separazione pesanti	Anidride maleica dimetilmaleato	Apparecchiatura in pressione. Alta temperatura. Rilasci in atmosfera
Reattore L.P.	H ₂ , succinato 130-140°C 30 bar	Stoccaggio e dosaggio H ₂ ; apparecchiatura in pressione; controllo temperatura. Rilasci in atmosfera
Separatore L.P.	-	Apparecchiatura in pressione. Eccesso di flusso. Rilasci in atmosfera
Compressore di ricircolo	-	Protezione motore compressore; adozione di sistemi di controllo e di interblocco
Reattore H.P.	H ₂ , dimetil succinato tetraidrofurano gammabutirrolattone 1-4 butandiolo	Apparecchiatura in pressione; alta temperatura; mancanza azoto per inertizzazione; eccesso di flusso; e rilasci in atmosfera
Separatore H.P.	-	Apparecchiatura in pressione
Compressore ricircolo H.P.	-	Protezione motore compressore; adozione di sistemi di controllo e di interblocco

2.2 Il processo biochimico

I risultati dell'analisi effettuata sul processo biochimico sono riportate in Tabella 5.

Per quanto riguarda lo studio dell'impatto ambientale e della sicurezza di un processo biologico per la produzione dell'1-4 butandiolo si pone particolare attenzione sul fatto che alla preparazione della biomassa è associata una inevitabile produzione di polveri, particolato e liquidi di lavaggio. Questi ultimi possono tuttavia essere smaltiti con metodologie tradizionali. Relativamente ai due fermentatori previsti (il primo atto alla produzione biologica di acido succinico, il secondo alla produzione del BDO), è necessario porre particolare attenzione sul rischio biologico ad essi associato, e alla conseguente gestione dei residui di fermentazione.

Tabella 5 - Impatto ambientale e sicurezza nella produzione biochimica dell'1.4 butandiolo

Operazioni	Impatto ambientale	Principali criticità in materia di sicurezza
Preparazione biomassa	Emissioni di particolato, produzione di reflui liquidi (acque di lavaggio). Emissioni dai motori dei nastri trasportatori.	Gestione polveri in fase di carico. Sversamento acque di lavaggio.
Fermentatore per produzione di acido succinico	Problemi di gestione dei residui di fermentazione; trattamento delle acque di lavaggio	Rischio biologico nelle operazioni di pulizia e smaltimento residui. Controllo formazione atmosfere esplosive; utilizzo di acidi o basi per la pulizia
Separazione cristalli: <ul style="list-style-type: none"> • Distillazione • Estrazione liq/liq • Cristallizzazione 	Nessuna emissione, dalle correnti si ottiene acido succinico e il sottoprodotto è completamente riciclato.	Apparecchiatura in pressione. Alta temperatura.
Fermentazione	Problemi di gestione dei residui di fermentazione; trattamento delle acque di lavaggio	Rischio biologico nelle operazioni di pulizia e smaltimento residui. Controllo formazione atmosfere esplosive; utilizzo di acidi o basi per la pulizia
Separazione a membrana (UF)	Previsti periodici trattamenti per la pulizia delle stesse: smaltimento effluenti.	Controllo della pressione.
Separazione (distillazione)	Liquidi di lavaggio, sfiati in atmosfera	Apparecchiatura in pressione. Alta temperatura.

BIBLIOGRAFIA

- Accardi DS, Bubbico R, Di Palma L, Pietrangeli B. Environmental and safety aspects of integrated biorefineries (IBR) in Italy, Chem Eng Trans, 2013;32: 169-174.
- Beauprez JJ, De Mey M, De Soetaert WK. Microbial succinic acid production: Natural versus metabolic engineered producers, Process Biochem, 2010;45: 1103-1114.
- Cheng K-K, Zhao X-B, Zeng J, Zhang J-A. Biotechnological production of succinic acid: current state and perspectives, Biofuel Bioprod Bior, 2012;6: 302-318.
- De Barros M, Freitas S, Padilha GS, Alegre RM. Biotechnological Production of Succinic Acid by Actinobacillus Succinogenes Using Different Substrate, Chem Eng Trans 2013;32: 985-990.
- Jiang M, Chen K, Liu Z, Wei P, Ying H, Chang H. Succinic acid production by Actinobacillus succinogenes using spent brewr's yeast hydrolysate as a nitrogen souce, Appl Biochem Biotechnology 2010;160: 244-254.
- Song H, Lee SY. Production of succinic acid by bacterial fermentation, Enzyme and Microb Tech, 2006;39: 352-361.
- Tuck MWM, Wood MA, Hiles AG. Process for the production of butanediol, y_butyr()lact()ne and tetrahydrofuran, 2000, US Patent n. 6100410.

Processi innovativi per la produzione di polimeri biodegradabili a partire da scarichi municipali o industriali

Francesco Valentino, Marianna Villano, Sabrina Campanari, Mauro Majone

Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Chimica, Roma

Introduzione

I poliidrossialcanoati (PHA) sono poliesteri sintetizzati biologicamente e hanno il duplice vantaggio di poter essere prodotti da fonti rinnovabili ed essere completamente biodegradabili (Jendrossek and Handrick, 2002). Inoltre, i diversi copolimeri di PHA sintetizzati mostrano una vasta gamma di proprietà termoplastiche ed elastomeriche che li rendono potenzialmente adatti a molte applicazioni: imballaggi, produzione per svariati articoli monouso di utilizzo quotidiano, utilizzo in ambito biomedico (Bucci et al., 2005). Tuttavia, ad oggi l'unico copolimero che ha trovato larga applicazione è il P[3-(HB)-co-3-(HV)], costituito esclusivamente dai monomeri 3-idrossibutirrato (3-HB) e 3-idrossivalerato (3-HV).

Attualmente la produzione industriale di PHA si basa su processi fermentativi che utilizzano colture pure (*Cupriavidus Necator*, *Pseudomonas oleovorans*, *Protomonas extorquens* o *Escherichia coli* ricombinanti; Chen, 2010; Shi et al., 1997) alimentate con substrati formulati ad hoc (tipicamente glucosio ed acido propionico) in mezzo carente di azoto. Negli ultimi anni c'è stato un notevole interesse nel cercare vie alternative che limitassero i costi di produzione. Molti studi in scala di laboratorio sono stati mirati all'investigazione sull'uso di substrati di scarto e colture microbiche miste (MMCs) (Beccari et al., 2002; Chua et al., 2003; Dionisi et al., 2004, 2006; Reis et al., 2003; Salehizadeh et al., 2004). L'uso di MMCs consente di limitare i costi relativi alla gestione del processo, e non richiede alcuna sterilizzazione, necessaria invece per le colture pure; ma richiede una preventiva selezione della coltura finalizzata a stimolare in essa la capacità di produrre polimero. Solitamente, la sintesi intracellulare di polimero (stoccaggio) è indotta da condizioni dinamiche di alimentazione del substrato carbonioso, denominate *feast-famine* (FF). Tale condizione consiste nella ciclica alternanza di abbondanza (*feast*) e carenza di substrato (*famine*) ai fini di una pressione selettiva efficace sull'arricchimento di microrganismi abili a stoccare polimero. Il regime di FF è solitamente applicato in reattori sequenziali aerobici (*sequencing batch reactor*, SBR).

1. Processo a tre stadi basato su MMCs per la produzione di PHA

Il processo più consolidato basato sulla selezione/arricchimento di colture miste a partire da scarti organici fermentabili, comprende complessivamente 3 stadi (Figura 1): un primo stadio anaerobico in cui il refluo organico viene fermentato (per l'ottenimento di acidi grassi volatili, VFA, facilmente convertibili in PHA); una successiva fase aerobica di selezione della biomassa in reattore SBR (sotto regime FF), e un'ultima fase aerobica per l'accumulo di PHA; infine il polimero viene estratto dalle cellule e purificato. Come detto, il processo così concepito non necessita di alcuna sterilizzazione e può operare con apparecchiature relativamente semplici e di più facile gestione rispetto ai processi basati su coltura pura.

In Tabella 1 sono riportati alcuni dei reflui a basso costo investigati nel processo basato su MMCs.

Il rapporto carbonio/azoto (C/N) di tali reflui ha effetti notevoli sulla risposta stoccaggio della biomassa, sia in fase di selezione che di accumulo. Reflui poveri di azoto comportano solitamente un maggior contenuto intracellulare di PHA in fase di accumulo; il rifornimento di quantità sufficienti di azoto è tuttavia necessario per sostenere la crescita cellulare in fase di selezione. Viceversa, utilizzando reflui ricchi in azoto, non si presenta alcuna necessità di aggiunta esterna per la selezione, ma la risposta di stoccaggio in fase di accumulo dipende solo dall'efficienza di selezione nel reattore SBR. In queste condizioni il contenuto finale di PHA può essere minore di quando l'accumulo viene effettuato in carenza di azoto.

Figura 1 - Processo a tre stadi per la produzione di PHA da MMC e scarti dell'industria agro-alimentare

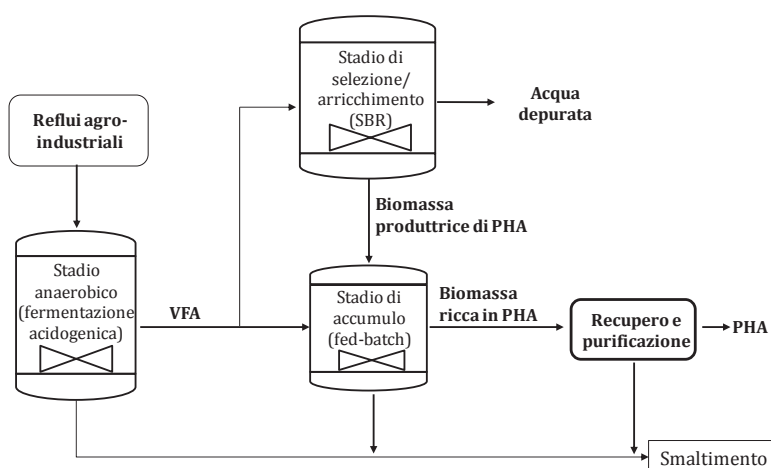


Tabella 1 - Elenco delle più comuni fonti rinnovabili investigate per la produzione di PHA (2006 – 2013)

Substrato rinnovabile	Riferimento bibliografico
Acque di vegetazione dall'industria olearia	Dionisi et al., Wat Res 2005; Beccari et al., J Chem Technol Biotechnol 2009; Ntaikou et al., Biores Technol 2009
Sansa dall'industria olearia	Waller et al., Biores Technol 2012
Melassa da canna da zucchero	Albuquerque et al., J Biotechnol 2007
Effluenti di cartiera	Bengtsson et al., Biores Technol 2008
Effluenti da frantoi dell'olio di palma	Marsudi et al., Appl Microb Biotechnol 2008; Md Din et al., Wat Sci Technol 2006;
Effluenti dall'industria di conservazione del pomodoro	Liu et al., Wat Environ Res 2008
Succo di barbabietola da zucchero	Wang et al., Industrial Crops and Product 2013
Siero di latte	Duque et al., New Biotechnol 2013
Cellulosa e suoi idrolizzati	Nduko et al., J Biosci Bioeng 2012
Scarti agro-industriali ed amido	Shamala et al., Brazilian J Microb 2012
Amido e suoi idrolizzati	Chakraborty et al., J Biomed Biotechnol 2012
Amido di tapioca	Setyawaty et al., World Appl Sci J 2011
Fango municipale	Morgan-Sagastume et al., Wat Res 2010; Mengmeng et al., Biores Technol 2008

In base ai dati di letteratura, lo schema di processo sopra illustrato consente di ottenere buone prestazioni in termini di produttività volumetrica di PHA (fino a $6.0 \text{ gPHA L}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Dionisi et al., 2006) e contenuto finale di PHA (65 % gPHA gTSS^{-1} , Serafim et al. 2004). Tuttavia, la resa di PHA su substrato è piuttosto bassa (di solito non più del 10-15%), perché una frazione consistente di carbonio organico veniva consumato durante la fondamentale fase di selezione della biomassa, tramite il ciclico alternarsi delle fasi *feast-famine*.

1.1 Stadio di selezione/arricchimento della biomassa produttrice di PHA (reattore SBR)

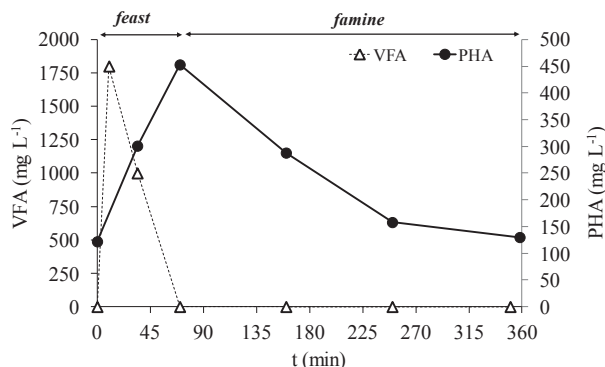
L'efficienza dello stadio di selezione, ovvero la pressione selettiva sui microorganismi abili a stoccare PHA, è determinante per l'ottenimento di elevate prestazioni di stoccaggio nel successivo stadio di accumulo. In Figura 2 è riportato un profilo dei VFA consumati e PHA prodotto in un tipico ciclo operativo di un reattore SBR operante ad alto carico ($8.5 \text{ gCOD L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e basso SRT (1 d), in presenza di biomassa acclimatata, alimentata con miscela sintetica di VFA (Valentino et al., 2013). L'alternanza ciclica delle fasi di *feast* e *famine*, provoca una competizione tra i microorganismi che riescono a stoccare più velocemente PHA nella fase *feast* (consumando substrato), per poi utilizzarlo come fonte di carbonio ed energia, necessarie per la crescita durante la successiva fase di *famine*. La selezione del consorzio misto è garantita da fasi *feast* sufficientemente brevi; infatti bassi valori del rapporto "feast/lunghezza del ciclo" (F/CL), favoriscono un adattamento fisiologico della biomassa, promuovendo lo stoccaggio al ciclico susseguirsi di ogni fase *feast*. I parametri che possono regolare la risposta della coltura durante la fase *feast* (stoccaggio o crescita) sono stati ampiamente investigati; la risposta di stoccaggio del consorzio selezionato è stata relazionata alla variazione di molti parametri di processo (età del fango SRT, pH, T, lunghezza del ciclo operativo, OLR, concentrazione del substrato, ecc.; Dionisi et al., 2006-2007; Villano et al., 2010; Albuquerque et al., 2010; Serafim et al., 2004; Krishna e van Loosdrecht 1999). Elevati valori di F/CL possono essere tipicamente causati da elevati OLR, concentrazione dell'influente o durata del ciclo operativo troppo breve, e causano una parziale o completa perdita di questo adattamento fisiologico, con una prevalente conversione del substrato in nuove cellule (risposta di crescita).

In linea generale, bassi valori di OLR garantiscono bassi rapporti F/CL e favoriscono pertanto la selezione richiesta nel reattore SBR (Serafim et al., 2004; Beun et al., 2002). Tuttavia, la coltura deve anche essere arricchita con velocità di crescita relativamente alte (produttività volumetriche di biomassa), in pratica assicurando un'elevata densità cellulare. Per questo è opportuno comunque operare ad alto carico organico (OLR) e basse età del fango (SRT), mantenendo però un'adeguata pressione selettiva tramite il regime di FF (Reis et al., 2011).

In studi precedenti di questo gruppo di ricerca, l'effetto del carico OLR sulla selezione della biomassa è stato studiato sia variando la concentrazione dell'influente, che la lunghezza del ciclo (concomitante alla variazione di SRT) (Dionisi et al., 2006; Villano et al., 2010). In Figura 3-A è mostrato l'incremento del rapporto F/CL (h h^{-1}) in seguito all'aumento del carico OLR applicato. Quest'ultimo, veniva incrementato da 8.5 a $40.8 \text{ gCOD L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in seguito alla diminuzione della lunghezza del ciclo (e di SRT), e da 8.5 a $31.25 \text{ gCOD L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in seguito all'incremento della concentrazione della soluzione di alimentazione. L'incremento del rapporto F/CL causava una perdita progressiva della pressione selettiva richiesta per l'arricchimento di biomassa ad alta risposta di stoccaggio. Infatti, incrementando il carico applicato (in entrambe le modalità),

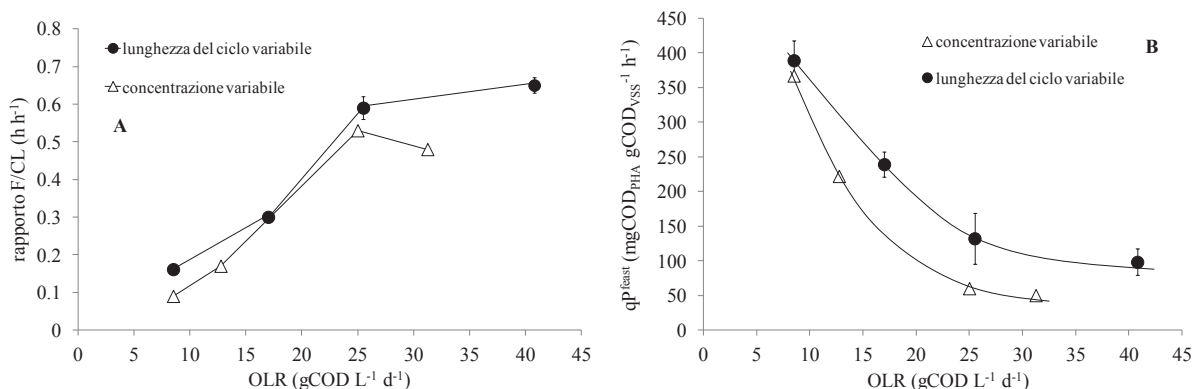
la velocità specifica di stoccaggio della biomassa selezionata (qP^{feast} , calcolata nella fase *feast*) diminuiva drasticamente (Figura 3-B). Questo dimostrava che il carico OLR influenzava in modo significativo l'entità della pressione selettiva, e che rapporti F/CL superiori al 25-30% causavano un notevole abbassamento della risposta di stoccaggio.

Figura 2 - Profili di VFA e PHA in un tipico ciclo operativo di un reattore SBR



Fonte: Valentino et al., 2013

Figura 3 - Andamento di F/CL (A) e di qP^{feast} (B) in funzione del carico OLR applicato nel reattore SBR



Fonte: Dionisi et al., 2006; Villano et al., 2010

1.2 Stadio di accumulo intracellulare di PHA

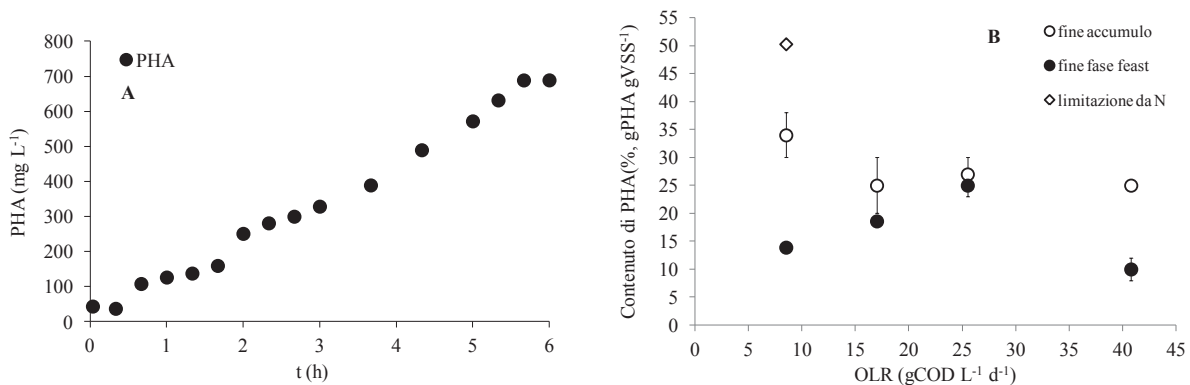
Le performance di accumulo quali il contenuto intracellulare di PHA, rendimento di stoccaggio $Y_{P/S}^{batch}$, produttività volumetriche e/o specifiche, dipendono strettamente dalla risposta di stoccaggio che la biomassa sviluppa nella stadio di selezione, oltre che dall'ottimizzazione dello stadio di accumulo stesso.

Considerando le migliori performance ottenute con substrati reali, i valori di $Y_{P/S}^{batch}$ reperibili in letteratura sono compresi tra 0.53 e 0.84 $COD_{PHA} COD_{S}^{-1}$ (Serafim et al., 2008); la variabilità riscontrata può essere attribuita alla composizione del substrato utilizzato. Tali valori sono inferiori rispetto a quello riportato da Serafim et al. (2004) ottenuto su acetato (0.87 $COD_{PHA} COD_{S}^{-1}$). Tale differenza è causata dalla composizione stessa dei substrati, i quali, essendo caratterizzati da acidi a più lunga catena rispetto al solo

acetato, richiedono decarbossilazione per essere inglobati nei *pathways* metabolici per la sintesi di PHA. Il contenuto di PHA intracellulare è uno dei parametri più importanti nella valutazione dell'efficienza del processo, dato che ha un forte impatto sul successivo stadio di estrazione. Le strategie indirizzate all'incremento di tale parametro consistevano nel modificare le condizioni del processo produttivo: modalità di alimentazione (Pisco et al., 2009), concentrazione dei nutrienti (in particolare azoto ammoniacale, Serafim et al., 2004; Bengtsson et al., 2008), OLR (Dionisi et al., 2006), pH (Serafim et al., 2004), T (Krishna e van Loosdrecht 1999). Operando con substrati sintetici con un limitato contenuto di ammonio, ed aggiungendo il substrato in frequenti impulsi successivi si otteneva un elevato contenuto di PHA intracellulare (65% su peso secco, Serafim et al., 2004). In riferimento al caso riportato nel precedente paragrafo, l'aumento del carico applicato (da 8.5 a 40.8 gCOD L⁻¹ d⁻¹) non favoriva la risposta di stoccaggio; di conseguenza, la concentrazione di PHA incrementava sostanzialmente utilizzando biomassa selezionata ad un carico inferiore (8.5 gCOD L⁻¹ d⁻¹), fino a circa 700 mg L⁻¹ in 6 ore (Figura 4-A), corrispondenti al 35% in peso secco (Figura 4-B) (Villano et al., 2010). La limitazione di azoto ammoniacale imposta nella fase di accumulo favoriva ulteriormente la risposta di stoccaggio sulla crescita, incrementando così il contenuto intracellulare di PHA fino al 50% (Figura 4-B).

Pur essendo un parametro fondamentale, il raggiungimento di un elevato contenuto di PHA intracellulare non è una condizione sufficiente affinché il processo possa essere considerato applicabile in piena scala. Infatti, considerando gli stadi di selezione (SBR) e di accumulo (*batch*) per il caso riportato in figura 4, la produttività volumetrica massima (2.81 gPHA L⁻¹ d⁻¹) è stata ottenuta in corrispondenza di OLR pari a 25.5 gCOD L⁻¹ d⁻¹, a causa di un'elevata produttività di biomassa (13.2 gVSS L⁻¹ d⁻¹) ottenuta grazie all'alto OLR applicato (Villano et al., 2010).

Figura 4 - Andamento del PHA (A) in una tipica prova batch; contenuto intracellulare di PHA in funzione di OLR (B)



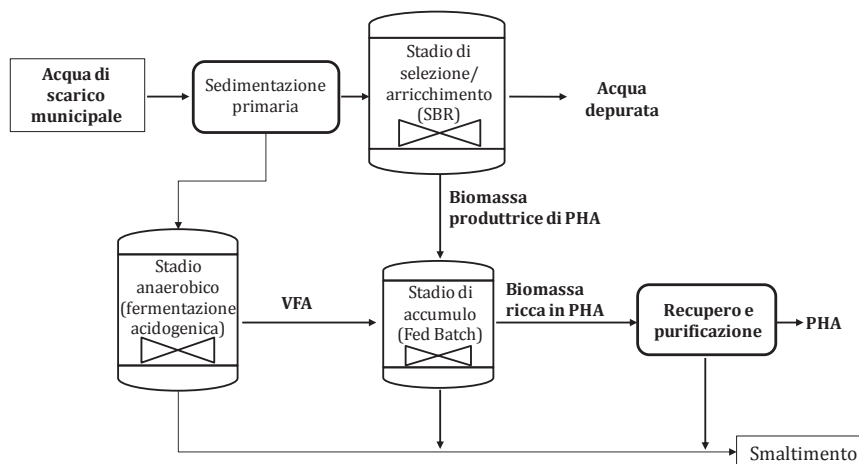
Fonte: Villano et al., 2010

2. Processo per la produzione di PHA a partire da MMCs ed acque di scarico municipali

In Figura 5 è riportato uno schema più recente di produzione di PHA, basato principalmente sull'utilizzo di acque di scarico municipali e fanghi primari (Morgan-Sagastume et al., 2014). Diversamente dallo schema illustrato in Figura 1, la corrente ricca in VFA provenienti dalla fermentazione acidogenica del fango primario viene utilizzata esclusivamente nella fase di accumulo, limitandone così lo "spreco" per lo stadio di selezione

(SBR). Quest'ultimo viene eseguito utilizzando acque di scarico municipali non fermentate come fonte di carbonio, utilizzate in cicli operanti in modalità *feast-famine* che consentono la selezione/arricchimento di biomassa produttrice di PHA ed allo stesso tempo un abbattimento del carico inquinante del refluo da trattare. Inoltre, per quanto riguarda la gestione dei fanghi e la loro minimizzazione, il processo proposto ha il vantaggio di ridurre considerevolmente il fango primario tramite conversione dei solidi organici in VFA (attraverso la fermentazione acidogena), e di riutilizzare il fango secondario arricchito (con una migliorata capacità di stoccaggio) nella fase di accumulo, recuperando parte di esso sotto forma di PHA. I primi risultati ottenuti sfruttando questo schema di processo ne hanno dimostrato la fattibilità; tuttavia i benefici ottenibili sono controbilanciati da una parziale perdita della risposta di stoccaggio rispetto a quella ottenibile nel processo tradizionale più consolidato, in cui la selezione avviene sul substrato d'elezione, ovvero i VFA, utilizzati nei cicli operativi del reattore SBR.

Figura 5 - Processo per la produzione di PHA a partire da MMC ed acque di scarico municipali



3. Conclusioni

Ad oggi, le produzioni industriali in piena scala sono piuttosto limitate e fondamentalmente basate sull'utilizzo di colture pure, che assicurano elevate produttività di biomassa (fino a 80g L^{-1} , Lee et al., 1999) e di conseguenza elevate produttività volumetriche di PHA. I processi basati su MMC presentano il grosso limite della concentrazione di solidi relativamente bassa raggiungibile, di cui il massimo valore di 6.1 g L^{-1} è stato riportato da Dionisi et al. (2006). Tuttavia le inferiori produttività possono essere compensate dai concreti vantaggi ottenibili dall'uso (e valorizzazione) di substrati di scarto e di colture microbiche che non richiedono condizioni sterili di mantenimento e di crescita. La tecnologia è quindi molto promettente ma il suo sviluppo richiede un'ampia sperimentazione in scala pilota (ad oggi limitata), che consenta sia di acquisire dati di valutazione tecnico-economica che la produzione del polimero in quantità sufficiente per test di lavorabilità su scala industriale con conseguenti test di mercato.

BIBLIOGRAFIA

- Albuquerque MGE, Eiroa M, Torres C, Nunes BR, Reis MAM. Strategies for the development of a side stream process for polyhydroxyalkanoate (PHA) production from sugar cane molasses. *J Biotech.* 2007;130:411-21.
- Albuquerque MGE, Torres C, Reis MAM. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production by a mixed microbial culture using sugar molasses: Effect of the influent substrate concentration on culture selection. *Wat Res.* 2010;44:3419–33.
- Beccari M, Dionisi D, Giuliani A, Majone M, Ramadori R. Effect of different carbon sources on aerobic storage by activated sludge. *Wat Sci Technol.* 2002;45:157-68.
- Beccari M, Bertin L, Dionisi D, Fava F, Lampis S, Majone M, Valentino F, Vallini G, Villano M. Exploiting olive oil mill effluents as a renewable resource for production of biodegradable polymers through a combined anaerobic-aerobic process. *J Chem Technol Biotech.* 2009;84:901-8.
- Bengtsson S, Werker A, Christensson M, Welander T. Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge treating a paper mill wastewater. *Biores Technol.* 2008;99:509-16.
- Beun JJ, Dircks K, Van Loosdrecht MCM, Heijnen JJ. Poly- β -hydroxybutyrate metabolism in dynamically fed mixed microbial cultures. *Wat Res.* 2002;36:1167-80.
- Bucci DZ, Tavares LBB, Sell I. PHB packaging for the storage of food products. *Polym Test.* 2005;24: 564-71.
- Chakraborty P, Gibbons W, Muthukumarappan K. Conversion of volatile fatty acids into polyhydroxyalkanoate by *Ralstonia eutropha*. *J Appl Microb.* 2009;106:1996-2005.
- Chanprateep S. Current trends in biodegradable polyhydroxyalkanoates. *J Biosci Bioeng.* 2010;110:621-32.
- Chen GQ. *Plastics from bacteria, nature functions and application.* Berlin-Heidelberg: Springer 2010.
- Chua ASM, Takabatake H, Satoh H, Mino T. Production of polyhydroxyalkanoates (PHA) by activated sludge treating municipal wastewater: effect of the pH, sludge retention time (SRT), and acetate concentration in the influent. *Wat Res.* 2003;37:3602-11.
- Din MFMD, Ujang Z, Van Loosdrecht MCM, Ahmad A, Sairan MF. Optimization of nitrogen and phosphorus limitation for better biodegradable plastic production and organic removal using single fed-batch mixed cultures and renewable resources. *Wat Sci Technol.* 2006;53:15-20.
- Dionisi D, Majone M, Papa V, Beccari M. Biodegradable polymer from organic acids by using activated sludge enriched by aerobic periodic feeding. *Biotechnol Bioeng* 2004;85:569-79.
- Dionisi D, Carucci G, Petrangeli Papini M, Riccardi C, Majone M. Olive oil mill effluents as a feedstock for production of biodegradable polymer. *Wat Res.* 2005;39:2076-84.
- Dionisi D, Majone M, Vallini G, Di Gregorio S, Beccari M. Effect of the applied organic load rate on biodegradable polymer production by mixed microbial cultures in a sequencing batch reactor. *Biotechnol Bioeng* 2006;93:76-88.
- Dionisi D, Majone M, Vallini G, Di Gregorio S, Beccari M. Effect of the length of the cycle on biodegradable polymer production and microbial community selection in a sequencing batch reactor. *Biotechnol Prog.* 2007;23:1064-73.

- Duque AF, Oliveira CSS, Carmo ITD, Gouveia AR, Pardelha F, Ramos AM, Reis MAM. Response of a three-stage process for PHA production by mixed microbial cultures to feedstock shift: impact on polymer composition. *New Biotechnol.* *In press* (2013).
- Jendrossek D, Handrick R. Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates. *Ann Rev Microb.* 2002;56:403-32.
- Krishna C, Van Loosdrecht MCM. Substrate flux into storage and growth in relation to activated sludge modeling. *Wat Res.* 1999;33:3149-61.
- Lee SY, Choi JI, Wong HH. Recent advanced in polyhydroxyalkanoate production by bacterial fermentation: mini-review. *Int J Biolog Macrom.* 1999;25:31-6.
- Liu HY, Hall PV, Darby JL, Coats ER, Green PG, Thompson DE, Loge FJ. Production of polyhydroxyalkanoates during treatment of tomato cannery wastewater. *Wat Environ Res.* 2008;80:367-72.
- Marsudi S, Unno H, Hori K. Palm oil utilization for the simultaneous production of polyhydroxyalkanoates and rhamnolipids by *Pseudomonas aeruginosa*. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2008;78:955–61.
- Mengmeng C, Hong C, Qingliang Z, Shirley SN, Jie R. Optimal production of polyhydroxyalkanoates (PHA) in activated sludge fed by volatile fatty acids (VFAs) generated from alkaline excess sludge fermentation. *Biores Technol.* 2009;100:1399-405.
- Morgan-Sagastume F, Karlsson A, Johansson P, Pratt S, Boon N, Lant P, Werker A. Production of polyhydroxyalkanoates in open, mixed cultures from a waste sludge stream containing high levels of soluble organics, nitrogen and phosphorus. *Wat Res.* 2010;44:5196-211.
- Morgan-Sagastume F, Valentino F, Hjort M, Cirne D, Karabegovic L, Gerardin F, Johansson P, Karlsson A, Magnusson P, Alexandersson T, Bengtsson S, Majone M, Werker A. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production from sludge and municipal wastewater treatment. *Wat Sci Technol.* 2014;69:177-84.
- Nduko JM, Suzuki W, Matsumoto K, Kobayashi H, Ooi T, Fukuoka A, Taguchi S. Polyhydroxyalkanoates production from cellulose hydrolysate in *Escherichia coli* LS5218 with superior resistance to 5-hydroxymethylfurfural. *J Biosci Bioeng.* 2012;113:70-2.
- Ntaikou I, Kourmentza C, Koutrouli EC, Stamatelatou K, Zampraka A, Kornaros M, Lyberatos G. Exploitation of olive oil mill wastewater for combined biohydrogen and biopolymers production. *Biores Technol.* 2009;100:3724-30.
- Pisco AR, Bengtsson S, Werker A, Reis MAM, Lemos PC. Community Structure Evolution and Enrichment of Glycogen-Accumulating Organisms Producing Polyhydroxyalkanoates from Fermented Molasses. *Appl Environm Microbiol.* 2009;75:4676-86.
- Reis MAM, Serafim LS, Lemos PC, Ramos AM, Aguiar FR, van Loosdrecht MCM. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed microbial cultures. *Biopr Biosyst Engin.* 2003;25:377-85.
- Reis MAM, Albuquerque MGE, Villano M, Majone M. Mixed culture processes for polyhydroxyalkanoate production from agro-industrial surplus/wastes as feedstocks. *Comprehensive Biotechnology* 2011;6:669-83.
- Salehizadeh H, Van Loosdrecht MCM. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance. *Biotech Adv.* 2004;22:261-79.

- Serafim LS, Lemos PC, Oliveira R, Reis MAM. Optimization of polyhydroxyalkanoates production by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding conditions. *Biotechnol Bioeng.* 2004;87:145-60.
- Serafim LS, Lemos PC, Torres C, Reis MAM, Ramos AM. The Influence of Process Parameters on the Characteristics of Polyhydroxyalkanoates Produced by Mixed Cultures. *Macromol Biosci.* 2008;8:355-66.
- Shamala TR, Vijayendra SVN, Joshi GJ. Agro-industrial residues and starch for growth and co-production of polyhydroxyalkanoate copolymer and α -amylase by bacillus SP. CFR-67. *Braz J Microb.* 2012;43:1094-102.
- Shi HD, Shiraishi M, Shimizu K. Metabolic flux analysis for biosynthesis of poly(beta-hydroxybutyric acid) in *Alcaligenes eutrophus* from various carbon sources. *J Ferment Bioeng* 1997;84:579-87.
- Setyawaty R, Katayama-Hirayama K, Kaneko H, Hirayama K. Current tapioca starch wastewater (TSW) management in Indonesia. *World Appl Sci J.* 2011;14:658-65.
- Valentino F, Beccari M, Fraraccio S, Zanaroli G, Majone M. Feed frequency in a Sequencing Batch Reactor strongly affects the production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from volatile fatty acids. *New Biotechnol. In press* (2013).
- Villano M, Majone M, Vallini G, Lampis S, Valentino F, Beccari M. Effect of hydraulic and organic loads in a sequencing batch reactor on microbial ecology of activate sludge and storage of polyhydroxyalkanoates. *Chem Engin Trans.* 2010;20:187-92.
- Waller JL, Green PG, Loge FG. Mixed-culture polyhydroxyalkanoate production from olive oil mill pomace. *Biores Technol.* 2012;120:285-9.
- Wang B, Sharma-Shivappa RR, Olson JW, Khan SA. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by *Alcaligenes latus* using sugarbeet juice. *Industrial Crops Prod.* 2013;43:802-11.

Processi biotecnologici per la produzione di energia elettrica mediante sistemi biofotovoltaici (BPVs)

Antonella Di Battista, Paolo De Filippis

Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente, Roma.

Introduzione

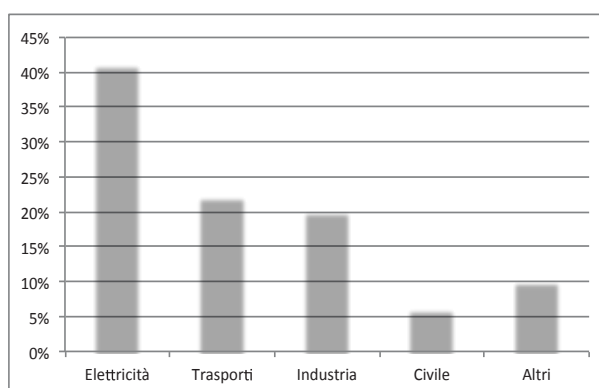
I combustibili fossili (CF) sono e rimarranno le fonti dominanti di energia ancora per molti anni. Ciò, insieme alla continua crescita della domanda energetica dovuta al rapido sviluppo di nuove realtà industriali quali quelle del sud e dell'est del mondo, avrà l'inevitabile conseguenza di un aumento delle emissioni di CO₂ che potrebbero raggiungere livelli insostenibili. Già nel 2010, il 43% delle emissioni di CO₂ nel mondo sono state prodotte proprio dai CF [IEA, 2012] utilizzati tanto per il trasporto quanto per la generazione di energia elettrica. Quest'ultima voce, in particolare, rappresenta, per i Paesi industrializzati, la più grande fonte di emissioni di CO₂ che negli US ha determinato circa il 38% delle emissioni totali nel 2011 [EPA, 2011]. Sia l'esaurimento di CF che il contributo che questi forniscono per l'accumulo di biossido di carbonio nell'atmosfera, hanno fatto sì che diventi una priorità trovare nuove fonti energetiche, per la sostenibilità ambientale ed economica.

Recentemente, oltre allo sviluppo di diverse tecnologie per la cattura e lo stoccaggio della CO₂, riportandola in formazioni chimiche ove non può più contribuire al riscaldamento globale, si stanno studiando nuove forme innovative di energia rinnovabile legate alle potenzialità dei microorganismi quale generatori di bioelettricità. Tra questi sistemi i più innovativi sono quelli biofotovoltaici (BPVs), che sfruttano la naturale capacità dei microrganismi fotosintetici, come le microalghe, di catture la CO₂, e da questo processo si potrebbe riuscire a produrre bioelettricità [McCormick et al., 2011].

1. Bioelettricità Vs. CO₂

Nel 2010, due settori hanno prodotto quasi 2/3 delle emissioni globali di CO₂: la generazione di energia elettrica con il 41% delle emissioni e il trasporto con il 22%. La distribuzione completa delle emissioni nei diversi settori è riportata nel Grafico 1.

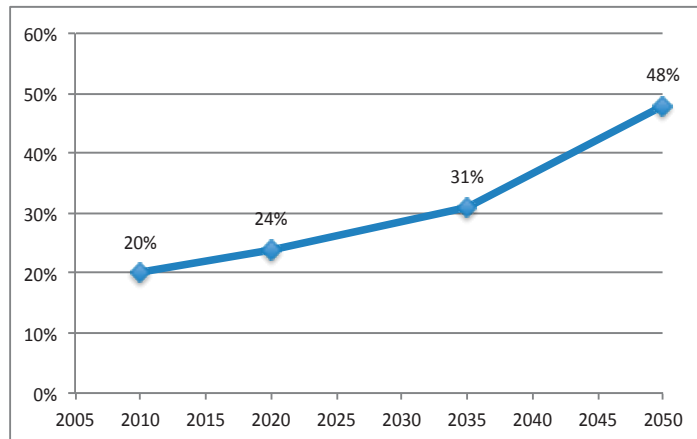
Grafico 1 - Le percentuali di emissioni di CO₂ del mondo nel 2010 suddivise per settore



Fonte: dati IEA, Word Energy Outlook, 2010.

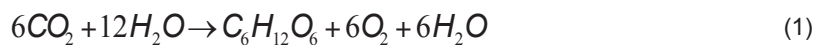
Si prevede che entro il 2035, [IEA, 2010] la domanda di elettricità sarà più del 70% superiore alla domanda attuale. Questa richiesta sarà guidata da una rapida crescita della popolazione e del reddito nei Paesi in via di sviluppo, dal continuo aumento del numero di dispositivi elettrici utilizzati nelle case e negli edifici commerciali, e dalla crescita dei processi industriali azionati elettricamente. Nel corso dei prossimi 25 anni, ci si aspetta che la produzione di energia elettrica basata su fonti rinnovabili continui a crescere, conseguenza del fatto che ci saranno più sostegni pubblici, il calo dei costi di investimento e l'aumento dei prezzi dei combustibili fossili. Nell'ambito di questi tre scenari, le stime sulla quota delle fonti rinnovabili nella produzione totale di energia elettrica aumenteranno fino al 48% nel 2050 (Grafico 2).

Grafico 2 - Previsione dell'andamento della produzione di energia da fonti rinnovabili nel mondo

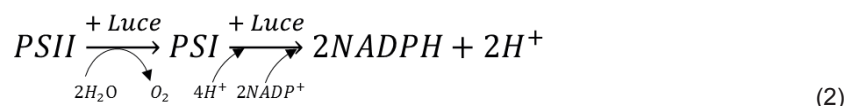


Fonte: dati IEA, Word Energy Outlook, 2010.

L'energia solare può essere catturata e immagazzinata direttamente nei legami chimici di un materiale biologico, o "combustibile solare", e poi utilizzata quando necessario. La fotosintesi è alla base del processo che genera bioelettricità utilizzando la luce solare. Questo processo naturale è alla base della fisiologia di tutti gli organismi fotosintetici che utilizzano l'energia solare per convertire l'acqua e anidride carbonica in ossigeno e zuccheri. La reazione di fotosintesi è descritta nell'equazione:



La fotosintesi avviene nel cloroplasto, un tipo di organulo presente nel citosol che si presenta generalmente come un disco appiattito. In questi organelli sono presenti i pigmenti fotosintetici (principalmente la clorofilla) che sono circondati da complessi proteici chiamati fotosistemi: fotosistema I (PSI) e fotosistema II (PSII). Ogni fotosistema contiene da 250 a 400 molecole di clorofilla nelle sue due componenti: il complesso antenna e il centro di reazione. I due fotosistemi assorbono l'energia luminosa attraverso le molecole di clorofilla. Quando una molecola di clorofilla, all'interno del centro di reazione del PSII, assorbe un fotone, un elettrone in questa molecola raggiunge un livello energetico superiore. Poiché questo stato dell'elettrone è molto instabile, l'elettrone viene trasferito ad un'altra molecola creando una catena di reazioni redox, chiamato catena di trasporto degli elettroni (ETC). Il flusso di elettroni va da PSII al citocromo b6f al PSI. Nel PSI, l'elettrone ottiene l'energia da un altro fotone. L'accettore finale di elettroni è NADP [McGraw-Hill, 2007]. La reazione completa è descritta nell'equazione:



Dunque i centri di reazione fotosintetica delle piante verdi, alghe e cianobatteri, sono visti come un sistema fotovoltaico in nanoscala [Pisciotta et al., 2011]. Recentemente sono state sviluppate nuove tecnologie, Celle Solari Microbiche (MSCs), che utilizzano l'energia solare per produrre bioelettricità o prodotti chimici. MSCs utilizzano microrganismi fotoautotrofi o piante superiori per raccogliere l'energia solare, e in cooperazione con microrganismi elettrochimicamente attivi, per generare corrente elettrica. In una MSC, gli organismi fotosintetici utilizzano la luce solare per produrre materia organica che viene ulteriormente convertito in elettricità usando le più famose *microbial fuel cells* (MFCs). [Niachou et al., 2001; Strik et al., 2008; Strik et al., 2010].

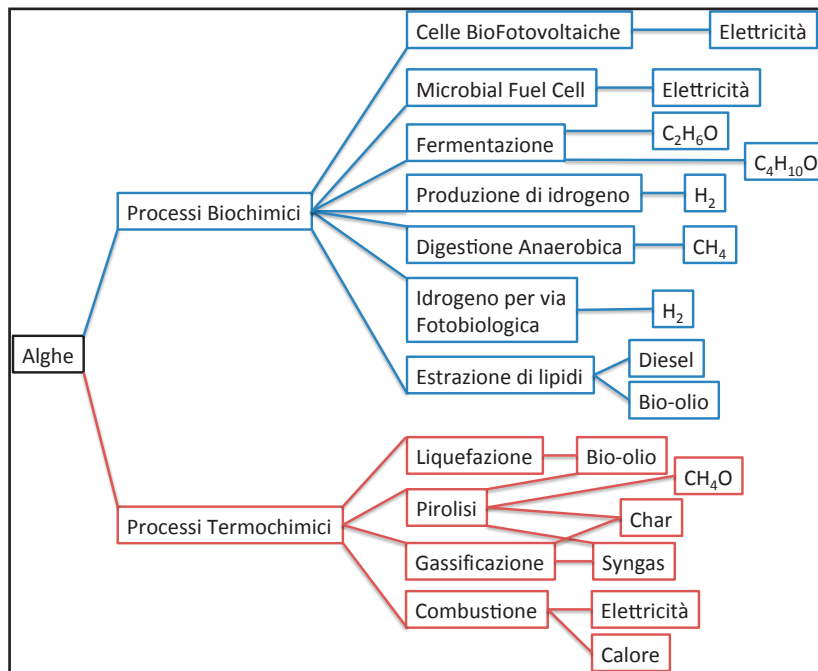
Dunque questi sistemi biotecnologici permettono, da una parte la cattura della CO₂ per la crescita degli organismi fotosintetici (piante o alghe) e il successivo utilizzo di questa biomassa per la produzione di bioenergia, tra cui la bioelettricità [Lakaniemi, 2012].

2. Sistemi biofotovoltaici (BPV)

Particolari MSCs sono i sistemi biofotovoltaici (BPVs), apparati elettrochimici che sfruttano la presenza di microrganismi fotoautotrofi, microalghe, per generare corrente elettrica. Nei prossimi paragrafi verrà descritta una BPV utilizzata dal nostro gruppo di ricerca e i primi risultati da essa ottenuti [De Caprariis et al., 2014].

2.1 Microalghe

Le microalghe sono microrganismi fotosintetici, planctonici o bentonici, ubiquitari degli ecosistemi acquatici (dove costituiscono il fitoplancton) e presenti anche negli habitat più disparati. Sono specie unicellulari che esistono singolarmente. A differenza di piante superiori, le microalghe non hanno radici, steli e foglie e sono, in grado di svolgere la fotosintesi. Esse producono circa la metà dell'ossigeno atmosferico utilizzando, l'anidride carbonica [McGraw-Hill, 2007]. Negli ultimi anni, sono stati diversi gli utilizzi di questi microrganismi per la produzione di energia rinnovabile. La conversione di biomassa algale comprende diversi processi ordinariamente utilizzati per la conversione della biomassa [McKendry, 2002]. Le tecnologie di conversione che utilizzano la biomassa microalgale, possono essere separate in due categorie: processi biochimici e processi termochimici (Figura 1).

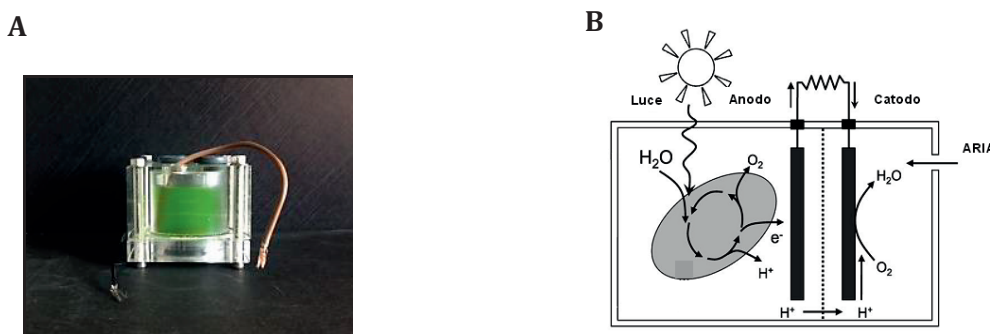
Figura 1 - Schema a blocchi con la suddivisione dei principali processi per la produzione di *biofuel* dalle microalghe


Gli impieghi delle alghe sono numerosi, non solo in campo energetico, ma anche nell'industria farmaceutica e nutraceutica [Mata et al., 2010]. A seconda della specie di microalghe possono essere estratti vari composti chimici ad alto valore aggiunto come ad esempio pigmenti, antiossidanti, β -carotene, polisaccaridi, trigliceridi, acidi grassi, vitamine. Inoltre, possono essere prodotti idrocolloidi, alginati, agar e carragenina che vengono utilizzati come agenti modificatori di viscosità degli alimenti e di prodotti farmaceutici [Barrow et al., 2008]. Alla luce delle motivazioni sopra elencate, ogni singola specie algale si presenta come una sorta di micro-bioraffineria, capace di una produzione estremamente differenziata se rapportata alla semplicità della sua struttura. Non può, quindi, che risultare ovvio che i processi di estrazione e conversione dei prodotti richiedano, con il dovuto *scale-up*, lo sviluppo di bioraffinerie capaci di valorizzare la poliedricità di tali organismi vegetali.

2.2 Apparato sperimentale

Le celle BPVs, come altre celle bioelettrochimiche sono composte da due compartimenti: la camera anodica, dove viene alloggiata la sospensione algale, *Chlorella Vulgaris* e la camera catodica aperta all'aria per garantire la presenza di ossigeno atmosferico richiesta per la reazione catodica. Tra le due semicelle è presente una membrana a scambio protonico (PEM) (Figure 2 A e B).

Figura 2 - (A) Foto dell'apparato sperimentale (BPV); (B) Schema del processo che avviene all'interno della BPV



Questi organismi fotosintetici sono in grado di utilizzare l'energia della luce per guidare l'ossidazione dell'acqua, e una frazione degli elettroni prodotti da questa reazione, sono trasferiti nell'ambiente extracellulare e successivamente trasferiti all'anodo. La corrente elettrica prodotta deriva, quindi, dal trasferimento degli elettroni e dei protoni, provenienti dall'ossidazione della nicotinamide adenina dinucleotide fosfato (NADPH) generato durante la fotosintesi, dall'anodo al catodo, dove ridurranno l'ossigeno presente in atmosfera per formare H₂O, [Rosenbaum and Schröder, 2010]. I microorganismi fotoautotrofi sono in grado di ridurre il NADP attraverso i fotosistemi a partire dalla fotolisi dell'acqua. All'interno del compartimento anodico, l'assenza di CO₂, permette alle molecole di NADP ridotto di venire ossidate attraverso una lunga serie di tilacoidi e complessi enzimatici usando come accettore finale di elettroni, l'anodo [Zou et al., 2010]. Le reazioni che avvengono sono:

Reazione Anodica



Reazione Catodica

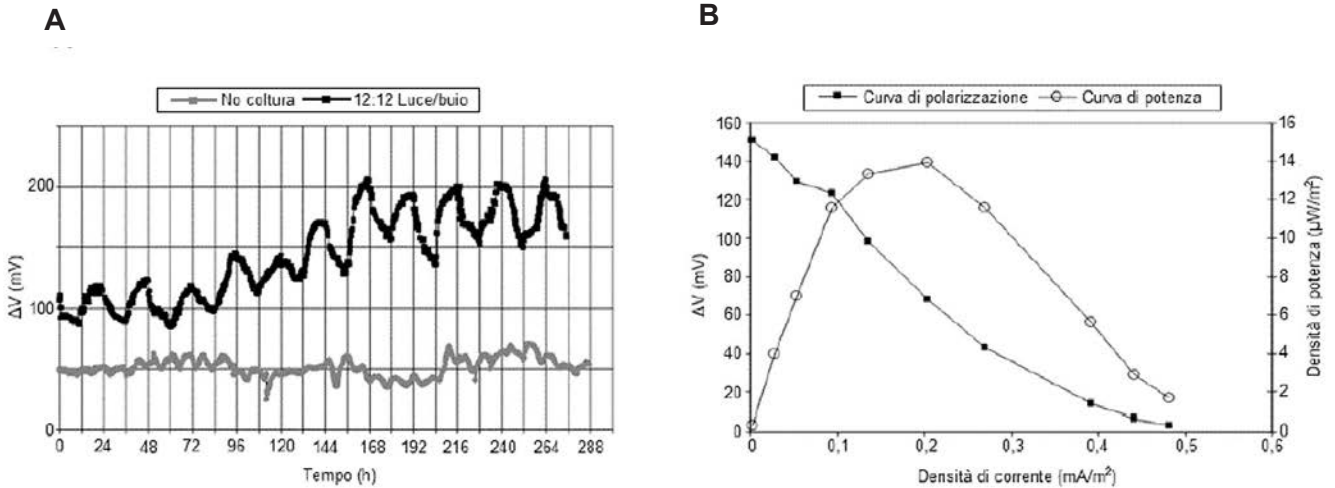


2.3 Dati sperimentali

L'obiettivo delle prove è stato quello di valutare le prestazioni della sospensione algale come anodo all'interno della BPV, a tal fine sono state effettuate misure di open circuit voltage (OCV) [Logan et al., 2006]; in tali condizioni la variazione del potenziale sarà determinata dal solo metabolismo esoelettrogenico di *C. vulgaris*, ed il valore della differenza di potenziale dipenderà dalla quantità di NADPH prodotto. Per valutare la risposta di *Chlorella vulgaris* all'illuminazione, le prove sono state condotte su una cella contenente la sospensione algale e su una cella contenente una soluzione priva di alghe ed applicando ad esse un fotoperiodo 12:12 ore luce/buio. Da queste prove è stato possibile valutare la risposta positiva del potenziale generato da *C. vulgaris* sottoposta a fotoperiodo. Nella fase di illuminazione il potenziale della cella aumenta, probabilmente, poiché il processo fotosintetico riduce il NADP a NADPH, aumentandone la concentrazione nel comparto anodico e la successiva reazione anodica (Eq 3). Successivamente, nella fase oscura, si registra la caduta del potenziale accelerata dal consumo di NADPH, e questo si ripete per tutti cicli

(Grafico 3 A). Dalla realizzazione della curva di polarizzazione e dalla curva di potenza, è stato inoltre possibile valutare la potenza massima prodotta da questo dispositivo, che è risultata essere di $14 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (Grafico 3 B).

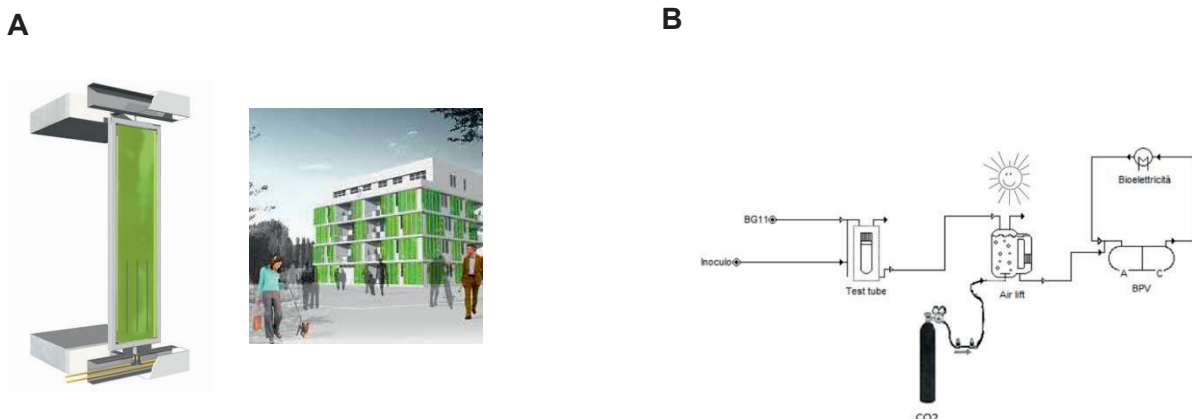
Grafico 3 - (A) Andamento dell'OCV con fotoperiodo 12:12; (B) Curva di polarizzazione e densità di potenza



3. Conclusioni

Lo sviluppo dei sistemi BPV ha sicuramente un importante impatto sia sul problema energetico, sia su quello ambientale. Per quanto detto prima, gli aspetti più interessanti di questi sistemi possono essere colti sulla capacità naturale di sequestrare la CO_2 impiegando questo gas serra, nel proprio ciclo vitale per la crescita e la produzione di bioelettricità. Questi sistemi innovativi possono essere facilmente incorporati in paesaggi o in aree urbane della città (Figura 3A). L'utilizzo di organismi permette di non avere la necessità di speciali catalizzatori, che possono essere costosi o tossici [Kazmerski, 2006]; è possibile utilizzare questi dispositivi in sistemi integrati (Figura 3B) in continuo, ossia associare la produzione di microalghe in fotobioreattori con le BPVs [Strik et al., 2008], ed a valle del recupero di bioelettricità possono produrre anche una vasta gamma di combustibili e prodotti chimici [Hamelers et al., 2010].

Figura 3: (A) Rappresentazione ideale di una possibile conformazione reattoristica per la crescita algale che associa design moderni ed ecosostenibili; (B) Possibile *flowsheet* di un processo industriale per la produzione di bioelettricità e sostanze chimiche al alto valore aggiunto.



Tenendo conto che l'apporto energetico che il sole fornisce in un'ora alla terra, è maggiore della somma dei contributi energetici derivanti dall'uso di combustibili fossili, nucleare e rinnovabili stimati nell'arco di un intero anno [De Vriend and Purchase, 2012], il suo potenziale come fonte di energia rinnovabile è pertanto enorme. Se siamo in grado di sviluppare sistemi per utilizzare l'energia solare per produrre carburanti e bioelettricità su larga scala, questo potrà trasformare le nostre scelte energetiche future.

BIBLIOGRAFIA

- Barrow C, Shahidi F. Marine nutraceuticals and functional foods. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2008.
- De Caprariis B, De Filippis P, Di Battista A, Di Palma L, Scarsella M. Exoelectrogenic activity of a green microalgae, *Chlorella vulgaris*, in a Bio-Photovoltaic Cells (BPVs). *Chemical engineering transactions*, vol. 38; 2014. In press.
- De Vriend H, Purchase R. Solar fuels and artificial photosynthesis. *Science and innovation to change our future energy option. Biosolar cells*; 2012.
- Environmental Protection Agency. Overview of greenhouse gases; 2011 [consultato gennaio 2014]. URL: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html>.
- Hamelers HVM, Heijne AT, Sleutels THJA, Jeremiasse AW, Strik DPBTB, Buisman CJN. New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology* 85; 2010. p. 1673-85.
- International Energy Agency. *World Energy Outlook*; 2010. [consultato gennaio 2014]. URL: <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2010sum>.
- International Energy Agency. *Annual Report*; 2012. [consultato gennaio 2014]. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_Annual_Report_publicversion.
- Kazmerski L. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150; 2008. p. 105-35.
- Lakaniemi AM. Microalgal cultivation and utilization in sustainable energy production. Tampere University of Technology, publication 1034; 2012.
- Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schroder U, Keller J, Freguia S, Aelterman P, Verstraete W, Rabaey K. Microbial fuel cells: Methodology and technology, *Environ. Sci. Technol.* 40; 2006. p. 5181-92.
- Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14; 2010. p. 217-32.
- McCormick, AJ, Bombelli, P, Scott AM, Philips AIJ, Smith AG, Fisher AC, Howe CJ. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energy & Environmental Science* 4(11); 2011. p. 4699-5710.
- McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology 13. Photosynthesis. New York: McGraw-Hill; 2007.
- McKendry P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*; 2002. p. 47-54

- Niachou A, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsangrassoulis A, Mihalakakou G. Analysis of the roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33; 2011. p. 719-29
- Pisciotta, JM, Zou, Y, Baskakov IV. Role of the photosynthetic electron transfer chain in electrogenic activity of cyanobacteria, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 91; 2011. p. 377-85.
- Rosenbaum M, Schröder U. Photomicrobial Solar and Fuel Cells *Electroanalysis*, 22; 2010. p. 7-8.
- Strik DPBTB, Hamelers HVM, Buisman CJN. Solar energy powered microbial fuel cell with a reversible bioelectrode. *Environmental Science and Technology* 44; 2010. p. 532-37.
- Strik DPBTB, Hamelers HVM, Snel JFH, Buisman CJN. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research* 32; 2008. p. 870-76.
- Zou Y, Pisciotta J, Baskakov IV. Nanostructured polypyrrole-coated anode for sun-powered microbial fuel cells, *Bioelectrochemistry* 79; 2010. p. 50-56.

ALLEGATO

Check list per la sicurezza degli impianti di produzione di biogas

CHECK LIST SICUREZZA - IMPIANTO BIOGAS

Cod.	Riscontro	Note	Documenti di riferimento
A - Rischio Biologico			
A.1 - Attività Lavorative			
A.1.1	<input type="checkbox"/>	L'area per la produzione di biogas è ben separata dalle altre zone dell'impianto o i lavoratori possono entrare in contatto diretto ad es. con gli animali stabulati	
A.1.2	<input type="checkbox"/>	Sono presenti fasi di grigliatura, centrifugazione, triturazione, o altro pretrattamento della biomassa che possono generare aerosol o dispersione di particolato (specificare se tali attività vengono svolte in ambienti chiusi e/o aperti)	
A.1.3	<input type="checkbox"/>	Sono presenti operazioni di carico e scarico di biomassa da avviare al trattamento, che generano dispersioni di polveri. Specificare se tali attività vengono svolte in ambienti chiusi e/o aperti	
A.1.4	<input type="checkbox"/>	Sono presenti altre operazioni che comportino il contatto diretto con liquami, fanghi di origine animale o civile, rifiuti, farine, insilati o altre biomasse	
A.2 - Lavoratori			
A.2.1	<input type="checkbox"/>	Si fa in modo che i lavoratori siano consapevoli dei pericoli biologici ai quali possono essere esposti	
A.2.2	<input type="checkbox"/>	Ci sono misure specifiche per i lavoratori particolarmente a rischio di contrarre malattie ad eziologia biologica: lavoratori con basse difese immunitarie, predisposizione allo sviluppo di allergie, asma, donne in gravidanza	
A.2.3	<input type="checkbox"/>	I lavoratori sono a conoscenza delle possibili vie di esposizione agli agenti biologici (inalatoria, dermica, digerente)	
A.2.4	<input type="checkbox"/>	Esiste personale, addetto alla pulizia dell'impianto e/o alla manutenzione, che può entrare in contatto con agenti di origine biologica o che possono contenere agenti biologici (polveri organiche, bioaerosol, farine, liquami, ecc.)	

A.2.5	Esistono delle procedure operative per la pulizia dell'impianto. Sono definite la frequenza delle operazioni e le procedure da osservare	<input type="checkbox"/>		
A.2.6	Esiste la corretta segnaletica relativamente agli obblighi da osservare (divieto di fumare, mangiare) e di indossare gli idonei dispositivi di protezione nell'area specifica (se del caso)	<input type="checkbox"/>		
A.2.7	I lavoratori sono sottoposti a monitoraggio biologico specifico in funzione dei rischi biologici identificati	<input type="checkbox"/>		
A.2.8	I lavoratori sono informati sul significato degli accertamenti sanitari e sul risultato degli stessi	<input type="checkbox"/>		
A.3 - Luogo di lavoro ed attrezzature				
A.3.1	Le aree di lavoro sono pulite con regolarità	<input type="checkbox"/>		
A.3.2	I lavoratori hanno a disposizione aree separate dedicate alle attività di riposo	<input type="checkbox"/>		
A.3.3	Gli automezzi, circolanti nell'area dedicata alla produzione del biogas, sono sottoposti a lavaggio con regolarità	<input type="checkbox"/>		
A.3.4	Si provvede alla manutenzione dei filtri delle autopale di caricamento delle biomasse al digestore con cabina isolata (se del caso) e si annota la stessa su apposito registro	<input type="checkbox"/>		
A.4 - Organizzazione del lavoro				
A.4.1	Esiste un programma di informazione ai lavoratori sui pericoli di natura biologica e sulle misure di prevenzione e protezione da adottare	<input type="checkbox"/>		
A.4.2	Esiste una codifica scritta delle procedure (se del caso) da osservare per limitare l'esposizione ad agenti biologici	<input type="checkbox"/>		
A.4.3	Viene verificato che le procedure vengano effettivamente osservate dai lavoratori	<input type="checkbox"/>		

A.5 - Dispositivi di protezione individuale			
A.5.1	Si utilizzano mascherine protettive FFP3, tute in Tyvek, quando sono svolte attività manuali di movimentazione delle farine	<input type="checkbox"/>	
A.5.2	I lavoratori, che svolgono l'attività in prossimità dei silos per insilato, adottano mascherine protettive FFP2	<input type="checkbox"/>	
A.5.3	I lavoratori, che svolgono attività manuali che comportano possibile esposizione a liquami e/o rifiuti, indossano tute in Tyvek, occhiali, guanti e mascherine protettive FFP1	<input type="checkbox"/>	
A.5.4	I lavoratori sanno correttamente usare i DPI forniti loro	<input type="checkbox"/>	
A.6 - Norme igieniche			
A.6.1	È espressamente fatto divieto di mangiare, bere e fumare nell'area dell'impianto di produzione del biogas	<input type="checkbox"/>	
A.6.2	Sono disponibili servizi per il lavaggio delle mani nelle vicinanze delle postazioni di lavoro	<input type="checkbox"/>	
A.6.3	L'abbigliamento utilizzato in ambiente lavorativo è gestito separatamente dall'abbigliamento personale	<input type="checkbox"/>	
A.7 – Gestione delle emergenze/ pronto soccorso			
A.7.1	Esiste il kit di pronto soccorso nell'area dedicata alla produzione di biogas	<input type="checkbox"/>	
A.7.2	Esiste una procedura operativa che descriva le operazioni da compiere in caso di contaminazione accidentale con materiale potenzialmente contaminato	<input type="checkbox"/>	
A.7.3	Esiste un sistema di registrazione degli incidenti e/o degli episodi di contaminazione con agenti biologici (anche lievi)	<input type="checkbox"/>	
A.7.4	I lavoratori sono informati dell'importanza di registrare tali eventuali episodi di contaminazione	<input type="checkbox"/>	

B - Rischio Incendio

B.1 - Misure di prevenzione

B.1.1	Viene assicurato che il biogas non possa ristagnare in alcun punto del complesso industriale	<input type="checkbox"/>		
B.1.2	In tutte le aree dell'impianto le tubazioni del biogas sono isolate per garantire un'adeguata protezione da fiamme prolungate nel tempo e sono provviste di deflettori di protezione dalle fiamme	<input type="checkbox"/>		
B.1.3	Viene assicurato che l'accumulatore pressostatico possa essere isolato dal resto dell'impianto	<input type="checkbox"/>		
B.1.4	Qualora si dovesse provvedere alla sua esclusione dal resto dell'impianto, i dispositivi di intercettazione sono visivamente ben individuabili e facilmente accessibili	<input type="checkbox"/>		
B.1.5	Sono previsti dispositivi appropriati per la misura del volume del biogas stoccato	<input type="checkbox"/>		
B.1.6	I materiali impiegati nella realizzazione dell'accumulatore pressostatico sono conformi ai requisiti prescritti dalle norme specifiche (caratteristiche meccaniche, rigidità, resistenza ad alta e bassa temperatura, resistenza agli agenti atmosferici ed ai liquami organici)	<input type="checkbox"/>		
B.1.7	Le membrane dell'accumulatore pressostatico evitano la formazione di cariche elettrostatiche	<input type="checkbox"/>		
B.1.8	Le membrane dell'accumulatore pressostatico sono realizzate conformemente alle disposizioni previste dalla Norma DIN 4102 B1 (resistenza al fuoco)	<input type="checkbox"/>		
B.1.9	Sono previsti trattamenti superficiali fungicidi della membrana interna dell'accumulatore pressostatico, che le conferiscano adeguate caratteristiche di resistenza	<input type="checkbox"/>		
B.1.10	Sono previsti dispositivi di protezione dalle sovrappressioni e dalle depressioni, che potrebbero verificarsi nell'accumulatore pressostatico	<input type="checkbox"/>		

B.1.11	I dispositivi di sicurezza sono certificati dal costruttore in base agli standard previsti	<input type="checkbox"/>		
B.1.12	Gli impianti elettrici sono eseguiti a regola d'arte (Norme CEI) e sono dotati di messa a terra	<input type="checkbox"/>		
B.1.13	Sono previsti impianti di protezione contro le scariche atmosferiche	<input type="checkbox"/>		
B.2 - Misure di protezione attiva				
B.2.1	Gli idranti rispondono ai requisiti sanciti dalla Norma UNI 45 (pressione e portata del getto)	<input type="checkbox"/>		
B.2.2	Nell'impianto vi è un numero adeguato di estintori	<input type="checkbox"/>		
B.2.3	Gli estintori utilizzano polveri come sostanza estinguente	<input type="checkbox"/>		
B.2.4	Vi è un numero adeguato di estintori portatili nella zona del gruppo di cogenerazione	<input type="checkbox"/>		
B.2.5	Gli estintori sono ben visibili e raggiungibili con facilità	<input type="checkbox"/>		
B.2.6	Sono previsti impianti di rivelazione automatica di incendio ed impianti di allarme, che segnalino al personale la presenza di un incendio	<input type="checkbox"/>		
B.2.7	Sono previsti impianti di alimentazione di sicurezza in grado di garantire l'erogazione dell'energia elettrica necessaria per l'attivazione degli impianti antincendio	<input type="checkbox"/>		
B.3 - Misure di protezione passiva				
B.3.1	I depositi di accumulo del biogas sono classificati in base alle prescritte categorie di appartenenza (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		

B.3.2	Viene rispettata la distanza di protezione prevista per i depositi di accumulo del biogas (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		
B.3.3	Viene rispettata la prevista distanza di sicurezza interna tra i depositi di accumulo del biogas e gli elementi pericolosi dell'impianto (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		
B.3.4	Viene rispettata la prevista distanza di sicurezza esterna tra i depositi di accumulo del biogas ed il perimetro del più vicino fabbricato esterno allo stabilimento industriale (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		
B.3.5	Viene rispettata la prevista distanza di sicurezza tra i depositi di accumulo del biogas ed i fabbricati destinati ad uffici e servizi inerenti le attività dell'impianto di produzione del biogas (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		
B.3.6	Le zone di protezione da incendi sono prive di edifici	<input type="checkbox"/>		
B.3.7	Le reti metalliche di recinzione sono correttamente dimensionate	<input type="checkbox"/>		
B.3.8	Sono previste vie di fuga (porte) verso l'esterno (in caso di gasometri contenuti in capannoni/edifici)	<input type="checkbox"/>		
B.3.9	Sono presenti adeguate e segnalate vie di accesso per i veicoli dei vigili del fuoco	<input type="checkbox"/>		
B.4 - Misure relative all'organizzazione				
B.4.1	È stata designata una persona responsabile della gestione delle misure di protezione da incendi	<input type="checkbox"/>		
B.4.2	Viene eseguita una corretta manutenzione delle apparecchiature elettriche e meccaniche	<input type="checkbox"/>		
B.4.3	Lo stoccaggio di liquidi e gas infiammabili è limitato alle quantità strettamente necessarie	<input type="checkbox"/>		

B.4.4	Esiste una procedura interna di controllo periodico sull'integrità dell'impianto e sulla funzionalità dei dispositivi di sicurezza	<input type="checkbox"/>		
B.4.5	Viene richiesto il rinnovo periodico della conformità antincendio ai sensi dell'art.5, comma 1, del D.P.R. 151/2011	<input type="checkbox"/>		
B.4.6	L'azienda dispone di un Certificato Prevenzione Incendi	<input type="checkbox"/>		
B.4.7	Gli estintori portatili sono provvisti del rilascio dei certificati di prova (art. 5, comma 1, del D.M. 7/1/2005)	<input type="checkbox"/>		
B.4.8	Gli estintori portatili sono provvisti del documento di omologazione (art.6, comma 1, del D.M. 7/1/2005)	<input type="checkbox"/>		
B.4.9	Gli impianti di estinzione sono sottoposti a verifiche, controlli e a manutenzione periodica e vengono trascritte in un apposito registro le date di tali interventi (art.6, comma 2, del D.P.R. 151/2011)	<input type="checkbox"/>		
B.4.10	I lavoratori sono formati in merito al comportamento da osservare nelle aree a rischio specifico di incendio	<input type="checkbox"/>		
B.4.11	Sono previsti divieti di fumare, di accendere fuochi e di stoccare materiali infiammabili in tutta l'area dell'impianto	<input type="checkbox"/>		
B.4.12	Vi sono estintori disponibili quando si effettuano lavori di saldatura, di brasatura o attività, che implicano l'utilizzo di fiamme libere	<input type="checkbox"/>		
B.4.13	Sono segnalate le aree potenzialmente pericolose e le aree di sicurezza	<input type="checkbox"/>		
B.4.14	Vengono svolte regolarmente le esercitazioni anti-incendio	<input type="checkbox"/>		
B.4.15	Vengono mantenute sgombrare le vie di fughe e le vie di accesso dei mezzi VVF	<input type="checkbox"/>		

B.4.16	Viene evitato lo spandimento di liquidi infiammabili	<input type="checkbox"/>		
C - Rischio Esplosione				
1 - Misure tecniche: Costruzione				
C.1.1	Le tubazioni contenenti il biogas sono protette da fattori chimici e da danni meccanici (urti e sovriscaldamento)	<input type="checkbox"/>		
C.1.2	È installato un pressostato (con soglie di allarme per alta ed altissima pressione) per la misura della pressione del biogas contenuto nell'accumulatore pressostatico	<input type="checkbox"/>		
C.1.3	È previsto un sistema di protezione dalle sovrappressioni (relativo alle condizioni di esercizio dell'accumulatore pressostatico) mediante valvole di sicurezza a taratura variabile o guardie idrauliche. In questo ultimo caso il livello dell'acqua di riempimento viene monitorato con apposite soglie di allarme	<input type="checkbox"/>		
C.1.4	Il camino esalatore della guardia idraulica è provvisto di griglia rompifiamma	<input type="checkbox"/>		
C.1.5	È previsto un pressostato di minima per il monitoraggio della depressione dell'accumulatore pressostatico (con apposite soglie di allarme)	<input type="checkbox"/>		
C.1.6	È prevista una recinzione di adeguata altezza e provvista di specifiche aperture (almeno due) per garantire l'accesso all'impianto dei mezzi di soccorso e l'esodo del personale (D.M. 24/11/1984)	<input type="checkbox"/>		
C.1.7	È previsto un sistema di ventilazione dell'aria esausta da sotto il soffitto nei gasometri e nei cogeneratori contenuti in capannoni	<input type="checkbox"/>		
C.1.8	Sono previste valvole di arresto di emergenza in caso di anomalie di funzionamento del cogeneratore	<input type="checkbox"/>		

C.1.9	Sono installati componenti e strumenti elettrici sigillati, certificati ATEX in base alla classificazione delle zone a rischio di esplosione	<input type="checkbox"/>		
C.1.10	È prevista la messa a terra di tutte le parti metalliche dei componenti	<input type="checkbox"/>		
C.1.11	Tutte le parti dell'impianto sono facilmente accessibili, sufficientemente stabili, posizionate al di sopra del livello del terreno in modo che gas nocivi non possano stazionare o sono ben ventilate	<input type="checkbox"/>		
C.1.12	Gli eventuali edifici, dove sono alloggiati gli impianti, rispettano le fondamentali norme di prevenzione incendi (materiali ignifughi, tagliafiamme, ecc.)	<input type="checkbox"/>		
2 - Misure Tecniche: Esercizio				
C.2.1	Le operazioni di manutenzione e di verifica dell'impianto elettrico sono effettuate secondo le disposizioni del D.P.R. 462/2001	<input type="checkbox"/>		
C.2.2	È garantito, mediante un adeguato monitoraggio, un livello minimo di sovrappressione del biogas rispetto al valore della pressione atmosferica (per evitare infiltrazioni di aria)	<input type="checkbox"/>		
C.2.3	Le operazioni di manutenzione ordinaria possono essere eseguite con la dovuta facilità (per esempio sostituzione cartucce filtri)	<input type="checkbox"/>		
C.2.4	Sono previste misure finalizzate a prevenire la penetrazione dell'aria all'interno della tubazione di trasporto del biogas	<input type="checkbox"/>		
C.2.5	Le aree a rischio di esplosione sono segnalate con appositi cartelli a fondo giallo con scritta nera	<input type="checkbox"/>		
C.2.6	È disponibile, fra gli strumenti a disposizione, un esplosimetro per la rilevazione delle eventuali fughe del biogas	<input type="checkbox"/>		
C.2.7	Il sistema di allarme relativo alle eventuali perdite del biogas emette un suono forte in caso di emergenza	<input type="checkbox"/>		

C.2.8	La segnaletica di sicurezza è conforme al D.Lgs. 81/2008	<input type="checkbox"/>		
C.2.9	Entra in azione automaticamente la ventilazione forzata	<input type="checkbox"/>		
C.2.10	Sono evitate le situazioni di potenziale innesco? Quali: - veicoli senza i dispositivi anti scintilla nell'area dell'impianto; - elevatori a tazze che raschiano i muri esterni; - pale dell'agitatore che raschiano le pareti interne; - ecc.	<input type="checkbox"/>		
C.2.11	È evitato il raggiungimento del punto di congelamento per il sistema a guardia idraulica	<input type="checkbox"/>		
C.2.12	Nello stoccaggio di materiale fermentescibile in serbatoi chiusi sono previsti dispositivi di protezione dalle depressioni e dalle sovrappressioni	<input type="checkbox"/>		
C.2.13	La zona dello sfiato della valvola di sovrappressione (accumulatore pressostatico) del biogas è classificata come zona ATEX 1	<input type="checkbox"/>		
C.2.14	È prevista una torcia di emergenza per evitare sovrappressioni del biogas in caso di guasto del cogeneratore	<input type="checkbox"/>		
C.2.15	La torcia è provvista di un dispositivo di rilevamento automatico della fiamma	<input type="checkbox"/>		
C.2.16	La torcia è provvista di un doppio sistema di accensione	<input type="checkbox"/>		
C.2.17	Sono previsti dispositivi volti a minimizzare la portata di gas da smaltire in caso di guasto delle utenze (cogeneratore, utenza termica)	<input type="checkbox"/>		
C.2.18	Sono previste misure per la riduzione della produzione del biogas come l'interruzione dell'alimentazione del substrato o del riscaldamento del digestore	<input type="checkbox"/>		

C.2.19	È garantita l'accessibilità al cogeneratore per effettuare operazioni di manutenzione	<input type="checkbox"/>		
C.2.20	Sono evitati spandimenti sul pavimento di oli dall'unità di cogenerazione	<input type="checkbox"/>		
C.2.21	In caso di sovrallimentazione del cogeneratore sono previste misure volte a prevenire la formazione di miscele esplosive	<input type="checkbox"/>		
3 - Misure relative all'organizzazione				
C.3.1	L'esercizio e le operazioni di manutenzione dell'impianto di produzione del biogas sono affidate a personale appositamente qualificato	<input type="checkbox"/>		
C.3.2	Nell'area dell'impianto vengono fatti valere i divieti di fumare, usare fiamme libere, usare telefoni cellulari ed altri dispositivi elettronici privi di certificazione ATEX	<input type="checkbox"/>		
C.3.3	Nei punti di maggior transito dell'impianto sono esposti cartelli, che riportino il divieto di fumare, accendere fuochi ed usare telefoni cellulari	<input type="checkbox"/>		
C.3.4	Gli operatori sono informati della necessità di non usare macchine o di non svolgere attività, che possano ledere l'integrità strutturale dell'impianto	<input type="checkbox"/>		
C.3.5	Nel caso di lavori a caldo (tagli, saldature, ecc.) è prevista una specifica procedura di messa in sicurezza dell'impianto (comprensiva di svuotamento gas, ciecatura delle tubazioni, verifica con esplosimetro)	<input type="checkbox"/>		
C.3.6	È previsto un registro riepilogativo, che riporti giornalmente le misurazioni, i controlli, le verifiche e le operazioni di manutenzione eseguite sull'impianto	<input type="checkbox"/>		
C.3.7	Il gruppo di cogenerazione viene sottoposto a periodici interventi di manutenzione da parte di personale specializzato, conformemente alle prescrizioni temporali fornite dal costruttore	<input type="checkbox"/>		
C.3.8	Viene impiegata acqua e non aria compressa per il lavaggio delle tubazioni dai fanghi/melme	<input type="checkbox"/>		

C.3.9	I manuali di funzionamento vengono attentamente letti dagli operatori e sono a portata di mano quando si devono svolgere operazioni sull'impianto	<input type="checkbox"/>		
C.3.10	Sui manuali è riportato che i dispositivi di sicurezza debbano essere controllati ogni settimana e dopo ogni eventuale anomalia di funzionamento	<input type="checkbox"/>		
C.3.11	Le istruzioni relative alla conduzione dell'impianto sono prontamente disponibili, facili da reperire e da comprendere	<input type="checkbox"/>		

