



scienza attiva®

EDIZIONE 2015/2016

AGRICOLTURA, ALIMENTAZIONE E SOSTENIBILITA'

Biogas e fuel cells

Marta Gandiglio

Politecnico di Torino



Documento di livello: B

Un progetto di


agorà scienza
centro interuniversitario



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO


scienza attiva®

Sommario

1. Cos'è il biogas? Perché il biogas?	3
Colture energetiche	5
Biogas da fanghi di depurazione	6
FORSU e biogas da discarica	6
Reflui zootecnici	9
Residui agricoli	11
Residui industriali	12
Commenti sul biogas	15
2. Cosa sono le fuel cell? Perché le fuel cell?	17
3. Perché le fuel cell e il biogas?	21
4. Il progetto DEMOSOFC	24
5. Conclusioni.....	25
6. Bibliografia.....	26

1. Introduzione

Perché al Politecnico di Torino riteniamo che questo argomento sia importa e possa interessare a tutti?

Perché quando parliamo di biogas non intendiamo solo la classica fattoria che utilizza gli effluenti zootecnici per la digestione anaerobica, concetto ben visibile se si effettua un giro nella meraviglia campagna Piemontese. Il biogas si può fare, e si fa, anche da molti nostri scarti.

Dal sacchetto dell'organico, raccolto in molte parti della ragione porta a porta, si può fare biogas, ed è quel che succede per esempio ad AceaPinerolese. Dalle nostre acque di scarico, raccolte attraverso la fognatura, si ottiene biogas attraverso un processo di depurazione che genera prodotti di scarto (come accade in tutti i depuratori SMAT del Piemonte). Il biogas è quindi un modo sostenibile e innovativo di ridare vita agli scarti della nostra quotidianità, e della produzione industriale, e produrne energia elettrica e calore. Ma produrre energia elettrica e calore come? Solitamente con i classici motori a combustione interna (parenti di quelli delle nostre autovetture) o con una semplice caldaia (come quella di casa). Il problema di queste tecnologie è legato però al rilascio di sostanze inquinanti in atmosfera come particolato, NOx, SOx e tanti altri composti di cui spesso sentiamo parlare. È quindi importante cercare di sfruttare un combustibile rinnovabile come il biogas all'interno di una tecnologia "pulita" ed "efficiente", con vantaggi ambientali ed energetici. Le fuel cell o celle a combustibile cercano di dare una risposta a questo bisogno. Vediamo come.

2. Cos'è il biogas? Perché il biogas?

“I bio-gas sono una miscela di vari tipi di gas composti principalmente da metano, prodotti dalla fermentazione batterica in anaerobiosi (assenza di ossigeno) dei residui organici provenienti da residui vegetali o animali.

I residui utili possono avere più origini: scarti dell'agroindustria (trinciato di mais, sorgo o altre colture), dell'industria alimentare (farine di scarto o prodotti scaduti), dell'industria zootecnica (reflui degli animali o carcasse), si possono utilizzare anche colture appositamente coltivate allo scopo di essere raccolte e trinciate per produrre "biomassa", come mais, sorgo zuccherino, grano, bietole, attualmente sono in corso delle ricerche per l'utilizzo di alghe.” Da Wikipedia.

L'intero processo vede la decomposizione del materiale organico da parte di alcuni tipi di batteri, producendo anidride carbonica, idrogeno molecolare e metano (metanizzazione dei composti organici).

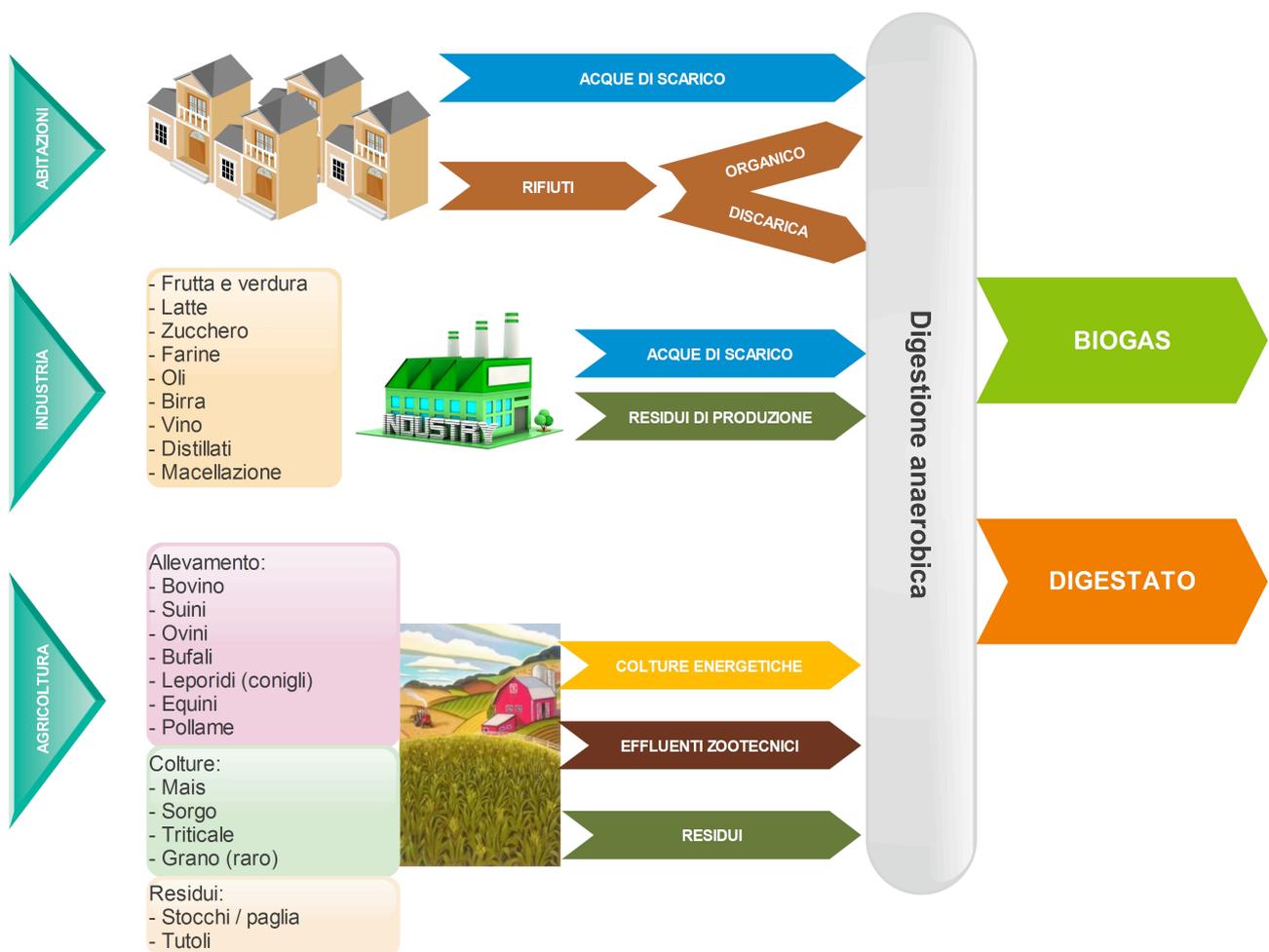


Figura 1. Schema produzione biogas.

Il seguente capitolo è dedicato alla trattazione dei possibili substrati per la produzione di biogas.

Colture energetiche

Nonostante siano una biomassa molto discussa, le colture energetiche costituiscono la più alta quota per la produzione potenziale di biogas.

L'elevata resa in metano è dovuta proprio al fatto che tali biomasse non sono un rifiuto e hanno quindi al loro interno tutto il potenziale energetico e nutrizionale che deriva dalla pianta stessa. Le stesse piante, se digerite da un capo animale che ne preleva i contenuti nutritivi, presentano un potenziale energetico ovviamente ridotto.

È fondamentale sottolineare inoltre che i seguenti dati sono riferiti ad insilati di cereali, in cui tutta la pianta (spiga/pannocchia e fusto) viene raccolta con un'apposita macchina e inviata alla digestione anaerobica. Differente è il caso in cui il cereale venga raccolto per fini alimentari (spiga e pannocchia utilizzati per farine) e gli scarti (fusto e altre parti) siano inviate alla digestione. Questo secondo caso verrà trattato nel paragrafo dedicato ai residui da attività agricole.

Tra le varie colture possibili, i substrati solitamente utilizzati risultano comunque essere mais, sorgo e triticale. Un ulteriore punto da sottolineare è la stagionalità dei cereali utilizzati:

- Mais, riso e sorgo sono cereali estivi, intolleranti alle basse temperature, e vengono quindi piantati in primavera e raccolti a settembre.
- Grano, triticale e orzo sono invece cereali autunno-vernini, che vengono piantati in autunno e raccolti in primavera.

Dall'analisi delle stagionalità è quindi chiaro che, con opportune tecniche, è possibile produrre nello stesso terreno e nello stesso anno sia una coltura estiva e sia una coltura autunno-vernina. Questa è un'opzione che viene adottata da impianti intensivi a biogas.

A causa della richiesta di fertilizzanti e irrigazione, le colture energetiche possono risultare costose per i soli fini energetici, a meno della presenza di incentivi ad hoc. Dall'altro lato, però, il loro ridotto valore per usi alimentari è purtroppo spesso causa del loro utilizzo per biogas. Spesso vengono aggiunti in mix con altri substrati (letami/liquami, rifiuti, scarti, etc.) per incrementare la resa totale del digestore.

Le tabelle sotto presentate riportano le rese di biogas dal database TPenergy [8].

Tabella 1. Rese di alcune colture espresse come m3 di biogas per tonnellata di tal quale. [8]

Insilato di sorgo	1t	150
Insilato di erba	1t	157
Insilato d'erba, 1o taglio, mezza fioritura	1t	170
Insilato di frumento	1t	160
Insilato di mais, ammontare alto di grani	1t	200
Insilato di mais, ammontare medio di grani	1t	155

Biogas da fanghi di depurazione

Dal trattamento delle acque di scarico domestiche e industriali vengono prodotti dei fanghi di depurazione quali sub-prodotto del processo. A causa del loro elevato contenuto biologico attivo, questi vengono normalmente sottoposti a digestione anaerobica per ridurre il carico organico ed avere un digestato più facile da smaltire.

La resa in biogas dei fanghi di trattamento è stata ricavata dall'analisi degli impianti di depurazione di proprietà di SMAT, l'azienda che gestisce la potabilizzazione e la gestione delle acque della provincia di Torino. La resa in biogas è pari a 390 Nm³ biogas per tonnellata di SV. La % di ST è 1.34% e il ratio SV/ST è pari a 0.7.

Tale valore è strettamente legato al numero di abitanti che vengono gestiti. Sempre dall'analisi degli impianti SMAT è stata stimata la produzione per capita rappresentata in tabella.

Tabella 2. Resa fanghi di depurazione.

Acqua di scarico	220	l/giorno/persona
Fanghi di depurazione	0,50	m ³ /giorno/persona
Biogas	2,62	Nm ³ /giorno/persona

FORSU e biogas da discarica

I rifiuti domestici generati vengono generalmente riciclati o inviati in discarica. La quota riciclata, derivante dalla raccolta differenziata, è poi composta da differenti quote quali plastica, vetro, carta, metallica e frazione organica (FORSU).

Il biogas può essere "biogas da discarica" quando viene generato e prelevato direttamente dalla discarica o "biogas da FORSU" quando deriva dalla digestione anaerobica della frazione organica

Da [10], sono disponibili dati sulla composizione dei rifiuti solidi urbani (RSU).

	14th SOG survey [3,4]		USEPA 2001 survey [5]	
	Million tonnes/yr	(%)	Million tonnes/yr	(%)
Amount generated	336	100	211	100
Amount recycled and composted	90	26.7	65	30.8
Amount to waste-to-energy	26	7.7	27	12.8
Amount landfilled	220	65.6	119	56.4

Figura 2 [10]

Dalla tabella sopra riportata si evince come circa il 30% dei RSU sia riciclato, il 13% utilizzato a fini energetici (spesso incenerimento) e il 55% mandato in discarica. La situazione è leggermente differente in Europa dove la Germania e la Danimarca hanno superato il 50% dei rifiuti differenziati [11] [12] e l’Austria è prossima al 60% [13]. In Italia il valore è 34.9 % riferito al 2012 con massimo di 79.5% a Pordenone e minimo di 3% a Siracusa¹. Il valor medio per l’Europa è di circa il 36%²³.

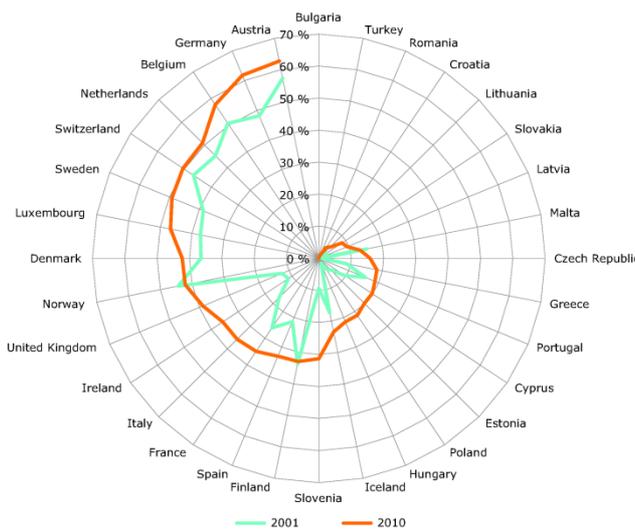


Figura 3. Percentuale di riciclo in diversi stati Europei. [14].

Per quanto riguarda il biogas da discarica, la difficoltà nel valutarne la resa è la non costanza nel tempo della produzione di gas. La discarica è soggetta infatti ad un proprio ciclo di vita, come rappresentato in figura, con un primo periodo di lenta crescita fino al raggiungimento di una massimo stabile di produzione, seguito poi da una decrescita.

¹ http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCCV_INDRACDIFF

² <http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/highest-recycling-rates-in-austria>

³ http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

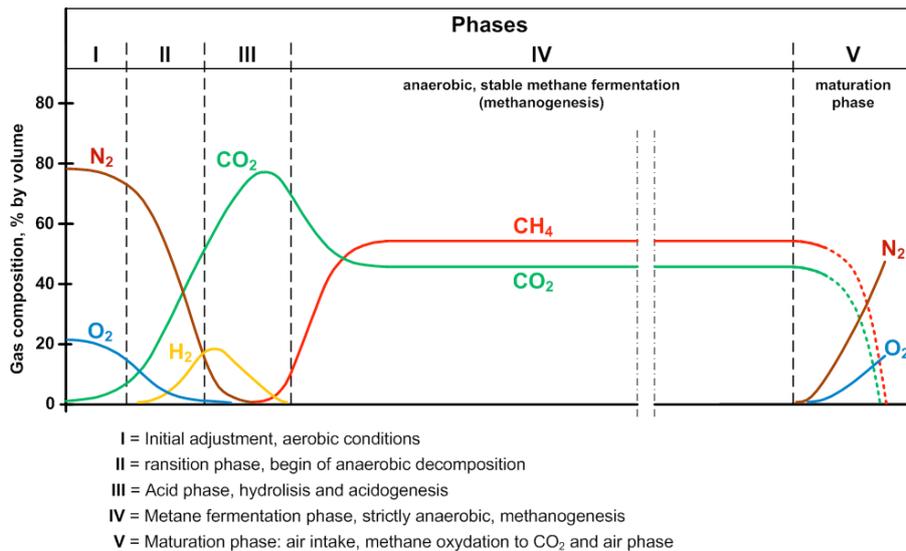


Figura 4. Andamento tipico della vita di una discarica. [15]

Inoltre, la quota prodotta di gas è raramente riferita alla quantità di RSU in ingresso dal momento che tale valore è discontinuo nel tempo. I riferimenti trovati in letteratura sono:

- [16] 30 m³ biogas/t RSU, calcolata utilizzando una % di CH₄ relativamente elevata per una gas da discarica, pari al 50%.
- [17] 59.9 m³ biogas/t RSU, calcolata con la stessa % di CH₄.
- [18] 39.4 m³ biogas/ t RSU.

Un valor medio di 43.1 m³ biogas/ t RSU è stato scelto. La produzione di RSU pro-capite per i diversi paesi europeo è raffigurata nell'immagine sottostante.

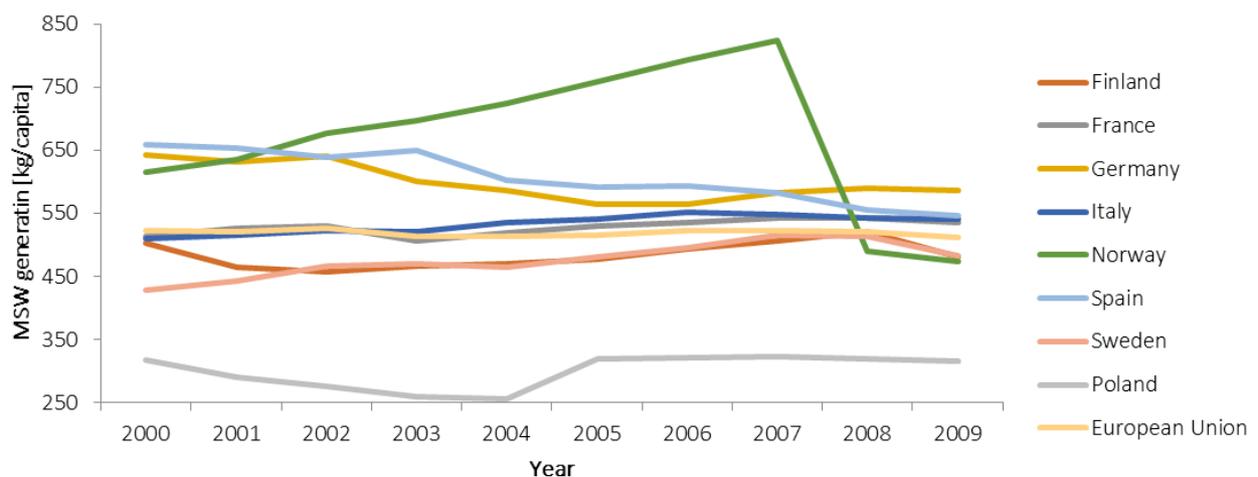


Figura 5. Generazione di rifiuti RSU pro capite in diversi paesi europei.

La quota di FORSU può essere determinata all'interno dei rifiuti separati e riciclati. Dopo aver analizzato diverse fonti tra cui [19] [11] [20] e ⁴, è stata scelta un valor medio del 15% riferito al FORSU. Solo alcune paesi particolarmente virtuosi, come per esempio l'Austria [13], la quota di FORSU raggiunge il 30%.

Per il FORSU è stata scelta una resa pari a 123 m³ biogas per ton FORSU [21], confermata dal report sulla mappatura delle biomasse in Trentino [3] dove viene proposto un valore di 100-120 m³ di biogas per tonnellate di biomasse, e dai dati del sito di trattamento FORSU "Acea Pinerolese", che riferisce una resa di 134 m³ biogas per tonnellata di biomassa [22].

Reflui zootecnici

La resa in biogas dei reflui zootecnici è normalmente più bassa rispetto alle altre biomasse, se non si effettuano pre-trattamento sulla parte di lignina, ma nonostante questo la digestione anaerobica è una via spesso utilizzata per risolvere i problemi di smaltimento che possono insorgere per gli allevatori.

Nonostante la maggiore parte degli impianti con reflui abbia solitamente una quota di co-fermentazione con colture energetiche, sono presenti anche innovativi impianti alimentati con 100% reflui zootecnici.

Tabella 3. Resa in biogas di effluenti zootecnici tipici.

Suini		
Peso medio	180	kg
Effluenti medi	10,35	kg/day
Quantità organica (SV) negli effluenti	0,714	kgSV/day
Bovini		
Peso medio	600	kg
Effluenti medi	42,6	kg/day
Quantità organica (SV) negli effluenti	4,463	kgSV/day
Avicoli		
Peso medio	5	kg
Quantità organica (SV) negli effluenti	0,0015	kgSV/day
Cavalli		
Peso medio	450,0	kg

⁴ <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/>

Effluenti medi	40	kg/day
Quantità organica (SV) negli effluenti	2,700	kgSV/day
Ovini		
Peso medio	57,5	kg
Effluenti medi	3,675	kg/day
Quantità organica (SV) negli effluenti	0,303	kgSV/day

I problemi legati allo smaltimento dei reflui sui terreni agricoli sono nati dall'applicazione della direttiva EU 91/676/CEE [23] su nitrati e sul controllo degli odori. La direttiva stabilisce infatti un massimo di kg di N per ettaro a seconda della zona di interesse. Nella digestione anaerobica invece i composti ammoniacali, generalmente responsabili dei cattivi odori, vengono abbattuti e viene generato un digestato comunque disponibile per la fertilizzazione.

Per ogni specie animale è stata valutata la produzione in kg/capo/giorno di effluenti, che possono essere liquami (non palabili) o letami (palabili). I dati sono ricavati da [3] e [1].

Generalmente i substrati che vengono utilizzati per la digestione anaerobica sono il letame e liquame bovino e il liquame suino. Quest'ultimo spesso presenta basse rese essendo molto diluito a causa dei sistemi di lavaggio delle stalle. Anche la tecnologia di raccolta dell'effluente è quindi fondamentale per determinarne la resa.

	Resa in biogas [Nm ³ /t SV]	CH ₄ nel biogas [%]
Liquame da trascinamento	392	68,5
Liquame da vacuum system	557	67,2

Figura 6. Confronto tra la resa in biogas di liquami raccolti con due differenti sistemi di prelievo.

Gli effluenti avicoli e ovini sono solitamente meno considerati dal momento che vengono prodotti in quantità minori e hanno più problemi di acidità. Vengono quindi generalmente usati in co-digestione con altri substrati.

Dal database di TPenergy, molto dettagliato, sono disponibili anche le seguenti rese, espresso in tonnellate di tal quale, per differenti reflui zootecnici.

Tabella 4. Dati su resa effluenti zootecnici espressi come m3 di biogas per tonnellata di tal quale. [8]

Letame bovino (fresco)	1t	80
Letame equino (fresco)	1t	70
Letame ovino (fresco)	1t	100
Letame pollame (fresco)	1t	55
Letame pollame (solido)	1t	110
Letame suino (fresco)	1t	70
Liquame bovino	1t	25
Liquame pollame	1t	70
Liquame suino	1t	15
Pollina	1 mc	225
Deiezioni di coniglio	1t	100

Figura 7. [9]

Residui agricoli

Come residui agricoli si intendono le parti residue dalla raccolta dei cereali per altre produzioni (industria alimentare). Queste includono solitamente fusto, stocchi e tutoli del mais, paglia. Tali residui, sebbene siano molto leggeri e presentino rese in biogas limitate, sono un substrato “gratis” per la digestione anaerobica e vengono quindi solitamente utilizzati nei digestori tradizionali. Per la loro raccolta è necessario attrezzare la macchina per la mietitura/trebbiatura in modo che non rilasci a terra tali residui ma li separi e li raccolga in un apposito serbatoio. Come le colture energetiche, tali substrati possono essere inoltre facilmente stoccati e utilizzati in modo costante durante tutto l’anno.

Tabella 5. Resa di alcuni residui agricoli espressi come m3 di biogas per tonnellata di tal quale [8].

Paglia d'avena	1t	260
Paglia di colza	1t	180
Paglia di frumento (0.2-0.5 mm)	1t	270
Paglia di frumento (3 cm)	1t	170
Paglia di Mais	1t	310
Paglia di segale (0.2-0.5 mm)	1t	300
Paglia di segale (3 cm)	1t	200
Paglia d'orzo	1t	310
Fieno, inizio fioritura	1t	400
Trifoglio	1t	90
Stocchi di mais	1t	110

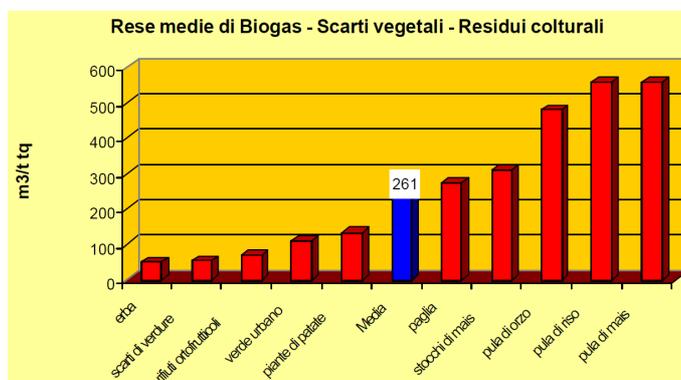


Figure 8. [9]

Residui industriali

L'analisi dei reflui agro-industriali adatti alla produzione di biogas è stata condotta in modo da analizzare tutti i possibili substrati:

- Produzione latte / industria casearia
- Lavorazione della frutta e della verdura
- Produzione vino
- Produzione birra
- Produzione distillati
- Macellazione
- Industria cerealicola

Produzione latte / industria casearia

L'industria del latte è legata al trattamento del latte fresco per la produzione e la fornitura di latte a lunga conservazione, formaggio, yogurt e burro.

Dalla produzione del formaggio viene generato un residuo chiamato siero con un elevato carico organico, solitamente inviato agli impianti di trattamento acqua. A causa però dell'elevato carico organico, il siero deve essere trattato prima di essere inviato al trattamento in accordo con il D. Lgs 22/1997, costituendo quindi un costo per il produttore. Il siero è quindi un ottimo substrato per la produzione di biogas, come menzionato anche nella direttiva CE 1774/2002 secondo cui, prima di essere inviato alla digestione, deve subire un processo di pastorizzazione a 70 °C.

Dalla produzione del burro e dello yogurt si generano altri residui liquidi che vengono anch'essi inviati ad impianti di trattamento acqua o utilizzati per la produzione di mangime o compost.

Tutti questi residui sono classificati, come accade per gli effluenti zootecnici, come "sottoprodotti di origine animale" e sono solitamente premiati con elevati incentivi in caso di produzione di biogas. La generazione di tali residui è però variabile nel corso dell'anno a causa della variabile richiesta di mercato: nel caso di digestione anaerobica sarebbe quindi necessario pensare ad una co-digestione o ad un sistema di stoccaggio tale da garantire un funzionamento continuo dell'impianto.

Lavorazione della frutta e della verdura

Dalla lavorazione di frutta e verdura vengono generati molti residui.

Escludendo il trattamento di prodotti per la vendita fresca, dove i residui sono minimi, quando si producono succhi di frutta, polpe, zuppe e centrifugati vengono prodotti diversi residui come pelli,

bucce, semi, scarti e residui di filtrazioni. Tali residui vengono generalmente utilizzati nell'industria dei mangimi, per la produzione di compost, bruciati in caldaie o infine inviati a digestione anaerobica. La stima della produzione di residui è fortemente vincolata sia al tipo di prodotto sia al processo che esso subisce. I frutti rossi, per esempio, hanno una produzione specifica di residui molto ridotta e non è quindi pensabile il loro recupero energetico. I prodotti che possono portare a scarti elevati e adatti per AD sono generalmente:

- Pomodori
- Cipolle
- Patate
- Olive
- Piselli, fagiolini ...
- Agrumi
- Mele, pere, kiwi, pesche e drupe in generali, prugne ...

Produzione del vino

L'industria del vino genera anch'essa numerosi residui dalla fermentazione del grappolo in vino. Questi sono costituiti da bucce e raspi e vengono solitamente inviati all'industria della distillazione (in accordo con CE 479/2008 e CE 555/2008 è obbligatorio inviare una quota dei residui all'industria della distillazione) o utilizzati per fini agronomici.

Distillerie

Le distillerie processano residui di frutta o vino per la produzione di alcolici distillati.

Questo processo genera residui differenti in base alla sostanza in ingresso: se si utilizzano raspi dell'uva, il residuo è solido e con un buon potere calorifico (solitamente usati in caldaia per produrre energia termica o per mangimi), se si utilizza frutta il residuo è un liquido e viene solitamente inviato ad impianti di trattamento acqua.

Macellazione

Il potenziale legato all'industria della macellazione per la produzione di biogas presenta substrati con elevate rese. I principali residui sono:

- Contenuti ruminanti
- Sangue
- Stomaco

Altri residui sono prodotti durante la macellazione ma il loro uso non è consentito per fini energetici in relazione alla direttiva CE 1774/2002 e CE 1069/2009, secondo cui solo le categorie II e III di sottoprodotti animali possono essere usate per AD. Inoltre, tali prodotti devono essere pastorizzati a

70 °C per 60 minuti prima di essere inviati all'impianto. Se la richiesta di pastorizzazione era meno impattante nell'industria casearia, dove sono già normalmente presenti pastorizzatori, la richiesta potrebbe essere più complessa nel caso di un macello. Tali residui vengono attualmente utilizzati per mangimi, fertilizzanti o nell'industria chimica.

Industria birraia

Dalla produzione della birra vengono generati due residui principali:

- Malto residuo (trebbie) proveniente dalla procedura di ammostamento, costituito principalmente dalla buccia del seme di malto.
- Lievito, proveniente dalla fermentazione della birra.

Entrambi i residui vengono impiegati per l'industria dei mangimi o per processi chimici (per es. estrazione della vitamina B12 dal lievito).

Industria cerealicola

Tale settore si occupa della trasformazione dei cereali per la produzione di farine, mangimi e cereali per la colazione. Molti residui vengono generati anche in questo settore, specialmente durante la macinazione. Tale residuo è chiamato crusca.

Solitamente essa viene usata per la produzione di mangimi: tale pratica non è però sempre conveniente a causa del basso valore commerciale del residuo e degli elevati costi di trasporto.

Industria dolciaria e del pane

La produzione di prodotti da forno, pane e dolci genera un numero di residui elevato: pane vecchio, residui dalla produzione (farina, impasto), olio di frittura. Eccetto l'olio, tali prodotti hanno generalmente un elevato valore nutritivo e sono quindi molto richiesti dall'industria dei mangimi.

Il pane vecchio e l'olio esausto, inoltre, come i rifiuti e tutti i substrati presentati in figura 15, necessitano di autorizzazione per il loro trattamento.

Industria dello zucchero

Lo zucchero può essere prodotto dalla canna o dalla barbabietola. Le barbabietole da zucchero sono già utilizzate per la produzione di bio-fuels o bio-oils. Inoltre, dal trattamento dello zucchero per usi alimentari, vengono prodotti alcuni residui tra cui la melassa è quello principale sia per peso che per valore nutrizionale.

La molassa dalla canna da zucchero viene generalmente utilizzata per la produzione del rum o della vodka, mentre quella da barbabietola è meno preziosa e viene generalmente usata per la produzione di mangimi o lievito di birra.

In [24] and [25] vengono analizzati anche ulteriori residui quali le vinacce, la bagasse, il residuo dei filtri e il fusto.

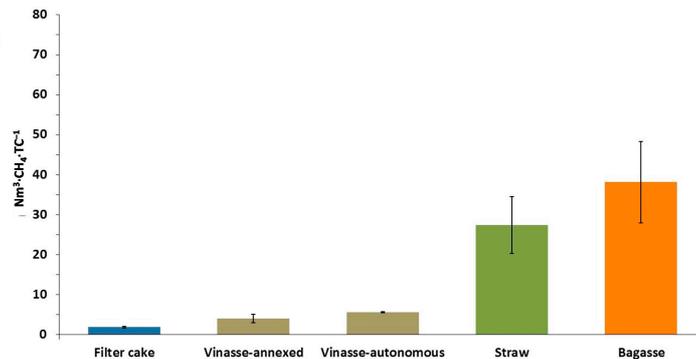


Figure 9. produzione di metano da diversi residui ($\text{Nm}^3 \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{TC}^{-1}$) [24]

Altri studi [26] [27] trattano infine la produzione di biogas dall'acqua residua dalla produzione dello zucchero.

Commenti sul biogas

A valle dell'analisi dei substrati disponibili, possono essere effettuate alcune ulteriori considerazioni:

- È spesso ottimale avere a disposizione più di un solo substrato, così da variare la “ricetta” in ingresso al digestore. Avere substrati con tenori di solido troppo elevato si riflette in elevati costi di movimentazione della biomassa nel digestore (coclea, bracci meccanici). Al contrario, se il substrato è troppo liquido, la spesa termica per il riscaldamento del digestore è elevata. Un adeguato mix consente invece di mediare le due situazioni.
- Ad ogni substrato corrisponde un costo/guadagno. Se si tratta di rifiuti o di residui difficilmente smaltibili, l'utilizzo per biogas diventa doppiamente conveniente in quanto anche il substrato genera guadagno. Se si tratta di residui poveri il costo sarà legato agli utilizzi alternativi, mentre per le colture energetiche il costo è maggiore in quanto legato alla loro produzione e trattamento (irrigazione e fertilizzazione). È quindi importante valutare anche l'aspetto economico operativo (costi e guadagni durante la vita utile dell'impianto) nella scelta della ricetta inviata al digestore (vedi Figura 19).

- Oltre al costo de subastato, fondamentale è la presenza degli incentivi sulla produzione di energia elettrica da biomasse. Tali incentivi dipendono dal substrato e sono maggiori in caso di sottoprodotti di origine biologica (reflui zootecnici, scarti agro-alimentari, etc). Vi sono inoltre bonus cumulabili per il recupero dell'azoto e la cogenerazione ad alto rendimento. Tale incentivo è applicato alla quota di energia elettrica ceduta alla rete.
- Il digestato, altro prodotto della AD oltre al biogas, può essere utilizzato come fertilizzante in agricoltura o avviato a produzione compost o ad essiccamento spinto per altri utilizzi (per es. cementifici). Tale processo dipende anche dalla scelta sulla biomassa in ingresso e va valutato in fase di progetto.

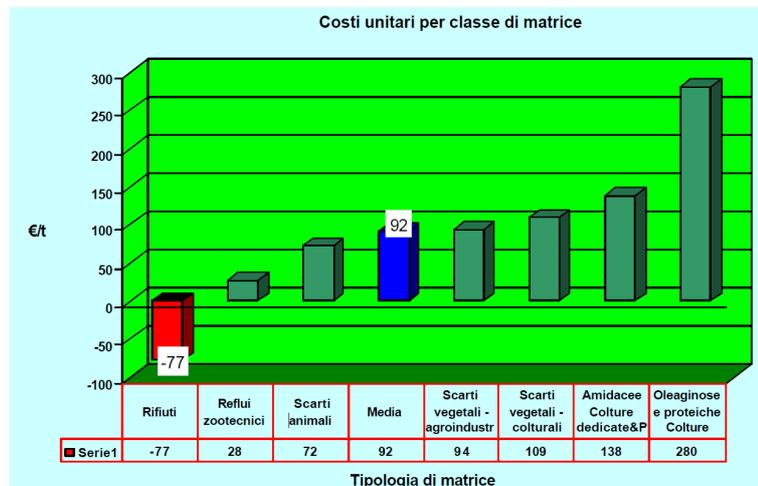


Figura 10. Costi unitari per classe di matrice [9]

3. Cosa sono le fuel cell? Perché le fuel cell?

“Una pila a combustibile (detta anche cella a combustibile dal nome inglese fuel cell) è un dispositivo elettrochimico che permette di ottenere elettricità direttamente da certe sostanze, tipicamente da idrogeno ed ossigeno, senza che avvenga alcun processo di combustione termica.”

Da Wikipedia.

Come un accumulatore, una cella a combustibile comprende molti strati di elementi, raggruppati insieme a formare una pila di celle a combustibile. Ogni singola cella contiene un anodo ed un catodo separati da uno strato di elettrolita.

Quando un combustibile ricco di idrogeno, come un gas naturale pulito o il biogas rinnovabile, entra nella pila a celle a combustibile, reagisce elettro-chimicamente con il comburente costituito dall'ossigeno contenuto nell'aria dell'ambiente e produce corrente elettrica. I fumi di scarico delle celle a combustibile comprendono vapore acqueo, anidride carbonica ed azoto, tuttavia sono virtualmente assenti composti SOx ed NOx.

Mentre un comune accumulatore è in grado di fornire una quantità fissa di energia in un tempo limitato, le pile di Fuel Cell generano elettricità in continuazione, fino a quando viene fornito loro il combustibile.

Nel caso di gas naturale come il metano (CH₄), il processo che avviene nel momento in cui esso viene a contatto con l'elettrolita e con l'aria (processo chiamato “reforming interno”), genera idrogeno (H₂) che viene smaltito come combustibile esaurito all'anodo ed anidride carbonica (CO₂) che viene smaltita al catodo con contemporanea produzione di ossigeno (O₂) e vapore acqueo (H₂O).

Il flusso di elettroni liberati all'anodo dal reforming del metano costituisce l'energia elettrica prodotta dalla cella che, essendo formata da un polo positivo ed uno negativo, è ceduta in forma di corrente continua (DC), poi trasformabile in corrente alternata (AC).

Grazie all'alta temperatura alla quale si sviluppa il processo di reforming, la quantità di anidride carbonica finale emessa è alquanto ridotta, in quanto essa si combina con l'idrogeno producendo molecole di acqua allo stato gassoso (vapore).

L'ossidazione del combustibile nella cella è, quindi, costituita unicamente da un processo elettrochimico, non essendo presente una vera combustione come in un motore ad accensione indotta o spontanea. Tale situazione rende il processo della Fuel Cell esente dalla produzione di

inquinanti quali ossidi di azoto (NOX), ossidi di zolfo (SOX) e particolato (PM). Nella figura seguente è schematicamente indicato il funzionamento della Fuel Cell e le reazioni elettrochimiche del reforming.

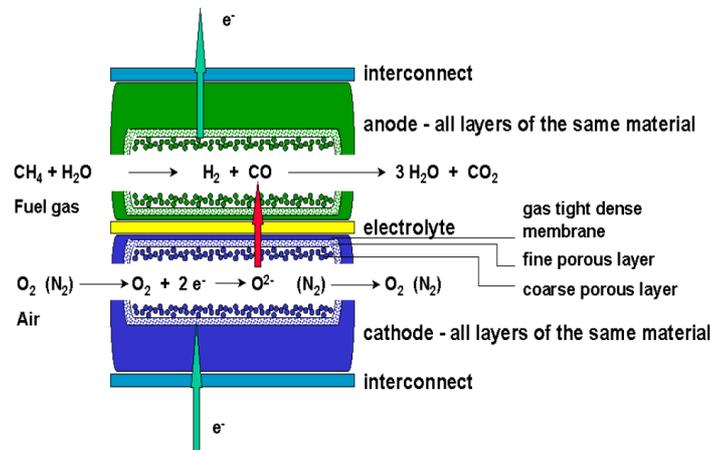


Figura 11.

Le fuel cell sono impianti studiati da anni e in diversi istituti di ricerca proprio per i due principali vantaggi sopra enunciati sopra:

- elevata efficienza elettrica
- zero emissioni in atmosfera

All'interno delle politiche comunitarie e internazionali, infatti, la produzione di energia con sistemi efficienti e puliti è uno degli obiettivi principali. L'Unione Europea fissa obiettivi futuri in termini di efficienza, sostenibilità ed emissioni. Vengono sotto riportati i principali target per i prossimi decenni.

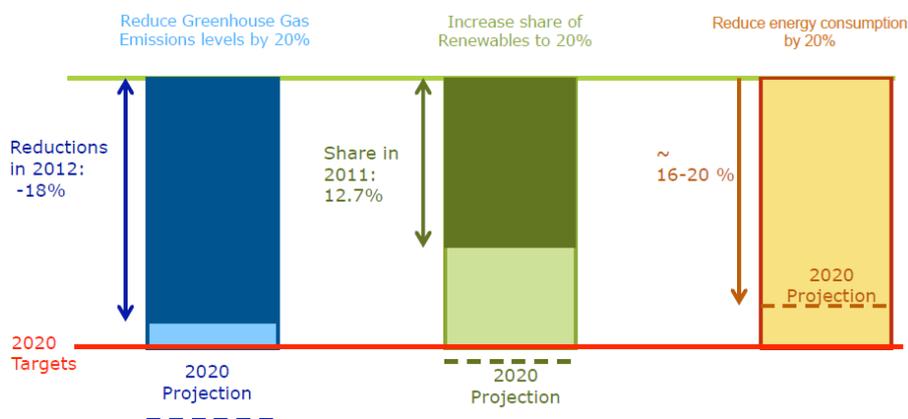


Figura 12. Obiettivi EU per il 2020.

Gli obiettivi sono quindi definiti in termini di:

- riduzioni delle emissioni di gas serra (CO2)
- incremento nell'uso di fonti rinnovabili
- riduzione dei consumi energetici, o incremento dell'efficienza energetica dei sistemi

L'installazione di sistema con celle a combustibile porterebbe quindi vantaggi in più filoni tra quelli di interesse per la comunità europea.

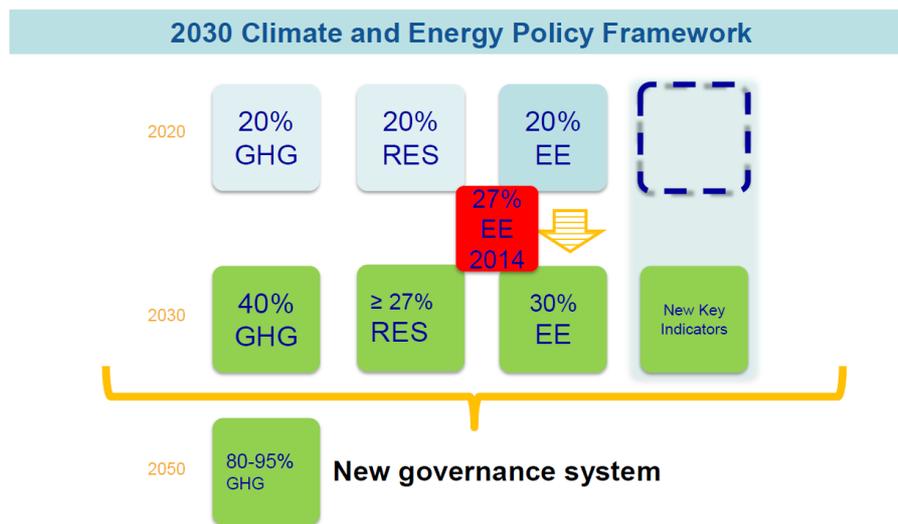


Figura 13. Obiettivi EU 2030.



Figura 14. I "perché" dell'Unione Europea sulle rinnovabili.

L'utilizzo delle celle a combustibile è legato a diversi settori:

- settore residenziale: utilizzo come cogeneratori alimentati a metano da rete per produrre energia elettrica (e quindi ridurre la quota acquistata dalla rete) e calore (e quindi ridurre i consumi legati alla caldaia).
- Settore automotive: vengono utilizzate per la trazione, spesso alimentate ad idrogeno, sebbene questo richieda la nascita di infrastrutture per l'idrogeno, con relativi costi e tempi.
- Settore stazionario: celle di media-grossa taglia vengono utilizzate per la produzione di energia elettrica ed eventualmente calore.

Esistono diverse tipologie di fuel cells, che si differenziano in base alla temperatura di lavoro (celle ad alta o bassa temperatura) e in base al tipo di elettrolita che viene utilizzato per la reazione elettrochimica. Tra di esse vi sono:

- Pile a membrana a scambio protonico (PEM): L'uso dell'acqua impone che la pila rimanga sempre al di sotto dei 100 °C, o li superi solo se opportunamente pressurizzata; ciò causa problemi per quanto riguarda il raffreddamento della pila, che richiede un circuito di raffreddamento opportuno se la potenza prodotta supera un certo livello. Il catalizzatore al platino è molto sensibile all'avvelenamento da monossido di carbonio, e il livello di questo deve essere mantenuto al di sotto di 1 ppm. Con l'uso di catalizzatori al platino e rutenio, si può arrivare a una tolleranza di 10 ppm. Il monossido di carbonio può accompagnare l'idrogeno se esso arriva da una fase di reforming di altri combustibili (principalmente metanolo e metano).
- Pile a ossido solido (SOFC): Le pile a ossido solido (SOFC) lavorano ad altissime temperature (da 700 a 1000 °C) e sono costituite da materiali ceramici, la cui fragilità di solito ne sconsiglia l'uso in applicazioni mobili; inoltre, il loro avvio è molto lento, e necessita di circa 8 ore. Sono quindi pensate soprattutto per la generazione stazionaria di elettricità. In esse, l'ossigeno passa attraverso un materiale ceramico (zirconia drogata con ossido d'ittrio) per raggiungere il combustibile. I combustibili nelle pile a ossido solido possono essere diversi: oltre all'idrogeno, anche gli idrocarburi e perfino il monossido di carbonio possono generarvi elettricità. Gli idrocarburi possono effettuare il cosiddetto "reforming interno", grazie alle alte temperature raggiunte. L'alta temperatura può anche essere utilizzata a valle della pila in un ciclo termico, ottenendo un impianto combinato.
- Le pile ad acido fosforico (PAFC), considerate una tecnologia "matura" e dalla quale non ci si aspettano ulteriori avanzamenti
- Le pile alcaline (AFC), che non sono più considerate pratiche perché non tollerano la presenza di CO₂, presente normalmente nell'atmosfera. Sono state usate nelle missioni Apollo e nello Space Shuttle.
- Le pile a carbonato fuso (MCFC), ad alta temperatura (circa 600 °C) presentano problemi nella gestione di un liquido corrosivo ad alta temperatura.
- Le pile a metanolo diretto (DMFC), a bassa temperatura, utilizzano un combustibile liquido (metanolo CH₃OH) ed aria in ingresso preriscaldata a circa 80 °C.

4. Perché le fuel cell e il biogas?

Dopo aver brevemente descritto cos'è il biogas e cosa sono le fuel cell, due concetti ben noti alla comunità scientifica, è ora il momento di analizzare le motivazioni che portano all'utilizzo di fuel cell nel settore del biogas.

Per prima cosa, note le fonti di produzione del biogas, è necessario rispondere ad una domanda: come viene attualmente utilizzato tale combustibile? I principali utilizzi di questa fonte sono due:

- Combustione in caldaia. Il biogas viene quindi utilizzato per produrre solo calore/ energia termica. Questa soluzione è conveniente nel momento in cui sia abbia tutto l'anno un'utenza che richieda tale calore. Negli impianti standard di piccola media taglia non è così. Tale scelta comporta comunque dei costi di investimento molto ridotti.
- Cogenerazione con motori a combustione interna. Anche grazie ai numerosi incentivi erogati dallo stato italiano negli ultimi anni, questa è la scelta più diffusa in Italia. I motori a combustione interna funzionano proprio come il motore delle auto, ma sono qui stazionario cioè utilizzano la potenza meccanica generata tramite l'espansione/compressione del pistone per produrre energia elettrica attraverso un alternatore. Tali sistemi sono ormai assodati e ben noti al mercato, e presentano quindi costi di investimento performanti, specialmente per tagli elevate. Rimangono però alcuni problemi nella gestione di tali sistemi
 - o Decadimento delle performance e aumento dei prezzi nella piccola taglia. Mentre un grande motore da 1 MW ha costi specifici ridotti e performance mediamente elevate, se scendiamo nella taglia di centinaia di kW o inferiore, tali prestazioni tendono a degradare. I costi per kW installato aumentano nettamente e le performance si riducono.
 - o Emissioni in atmosfera. Soprattutto in vista delle numerose normative in fatto di emissioni sia a livello nazionale che regionale, le emissioni dai motori tradizionali risultano spesso essere fuori dai limiti imposti. Per tale motivo, spesso vengono installati sistemi di post-combustione per eliminare i composti metanici, incrementando quindi i costi e i consumi dell'impianto.

Rimane a questo punto una domanda: perché le fuel cell?

- Le celle a combustibile permettono di produrre energia con un'efficienza elettrica del 53% (valori da moduli in commercio) per qualsiasi taglia, da 50 kW a 1 MW, mentre i motori si attestano al 35-38% nella scala sub-MW e raggiungono valori massimi del 42% sopra il

MW. Più efficienza significa, a parità di combustibile disponibile, produrre più energia elettrica e/o calore.

- Le celle a combustibile presentano inoltre emissioni in atmosfera vicine allo zero, come visibile nella tabella sotto, garantendo quindi il rispetto dei limiti normativi presenti e futuri.

Sebbene in Italia, e in generale in Europa, si senta a parlare di celle a combustibile spesso solo a livello di ricerca, nel mondo vi sono prodotti commerciali e installazioni di dimensioni importanti. In tabella sono riportati gli impianti con celle a combustibile alimentate da biogas da trattamento acque nel solo stato della California (USA), dove lo stato da anni è all'avanguardia nell'incentivazione di sistemi innovativi. In Korea, inoltre, è stata installato negli ultimi anni il più grande impianti con fuel cell del mondo: 60 MW di fuel cell tipologia MCFC alimentate a gas naturale per la produzione di energia elettrica.

Tabella 6. Impianti con celle a combustibile

Impianto	Potenza installata
Inland Empire Utilities Agency (IEUA)	2.8 MW
City of Riverside Water Quality Control Plant - 5950 Acorn Dr. - Riverside, CA	2.2 MW
South Bay Wastewater Treatment Facility - 2411 Dairy Mart Road - San Diego, CA	1.4 MW
Turlock Irrigation District –Waste Water Treatment Plant - 901 S. Walnut St. - Turlock, CA	1.2 MW
City of Tulare Waste Water Treatment Plant - Paige St. - Tulare, CA	900 kW
Dublin San Ramon Services District - Pleasanton, CA	600 kW
Eastern Municipal Water District – 17040 Kitching St. - Moreno Valley, CA	300 kW



Figura 15. Island Empire Utility Agency – MCFC alimentata con biogas da trattamento acque.



Figura 16. Impianto MCFC alimentato con residui da birrificio.

Nella tabella sotto riportata sono inoltre riassunti i vantaggi della scelta di una fuel cell rispetto ad un motore: ridotte emissioni, efficienza elevata per qualsiasi taglia essendo sistemi modulari, possibilità di alimentazione bi-fuel, ridotti costi operativi (macchine automatizzate).

Tabella 7.

	Fuel cell	Motore
Riduzione emissioni	✓✓✓	✓
Efficienza	✓✓✓	✓✓
Recupero termico ad alta T	✓✓✓	✓✓
Flessibilità / Modulazione	✓✓	✓
Alimentazione combinata biogas+GN	✓✓✓	✓✓✓
Costi operativi	✓	✓✓
Costi d'investimento	✓✓✓	✓
Tolleranza agli inquinanti del biogas	✓	✓✓✓

Tabella 8. Confronto tra emissioni motore, fuel celle e imposte dalla legge.

Composto	Motore	Livelli limite da D.Lgs 152/2006	Fuel Cell
Polveri totali	5,31 mg/m ³	10 mg/Nm ³	
Ossidi di azoto totali	469,00 mg/m ³	< 450 mg/Nm ³	< 1,23 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo totali	50,40 mg/m ³	< 50 mg/Nm ³	Trascurabili
Monossido di carbonio	201,00 mg/m ³	< 500 mg/Nm ³ < 800 mg/Nm ³	< 12,31 mg/Nm ³
Acido solforico	< 0,2 mg/m ³	< 2 mg/Nm ³	-
Composti organici volatili C.O.T.	825,00 mg/m ³	< 150 mg/Nm ³	< 2,46 mg/Nm ³
Composti organici totali non metanici	212,67 mg/m ³	< 150 mg/Nm ³	-

Nonostante i numerosi vantaggi descritti, è però legittimo chiedersi: perché non vediamo installazioni di questo tipo in Europa? La risposta è legata ai due principali punti deboli del sistema con fuel cell:

- La necessità di avere in ingresso un biogas molto pulito con contenuti di contaminanti a livello di parti per bilione, costituendo quindi un ulteriore costo nell'installazione.
- Gli elevati costi di investimento per le fuel cell stesse, le quali ad oggi presentano costi in €/kW nettamente superiori a quelli dei motori. Tale differenza è dovuta principalmente alla mancanza di un mercato e quindi di una produzione tale da ridurre i costi. Studi americani dimostrano infatti come i costi potrebbero subire una drastica diminuzione in caso di aumento dei volumi richiesti dal mercato.

Per sopperire a tali problemi, l'Unione Europea, nella figura dell'ente FCH-JU dedicato all'idrogeno e alle celle a combustibile, valuta e finanzia progetti dedicati all'installazione di sistemi con celle a combustibile, al fine di favorire il loro ingresso nel mercato.

Il progetto DEMOSOFC

In Italia, verrà installato il più grande impianto in Europa con celle a combustibile di tipo SOFC alimentato a biogas da trattamento acque, cofinanziato dall'Unione Europea, nello specifico dall'ente pubblico-privato FCH-JU.

Tale sistema produrrà 174 kW di elettricità e presenta un'efficienza del 53% contro il 38% dei motori di pari taglia. L'impianto verrà installato nel depuratore di Collegno, di proprietà di SMAT, l'azienda municipalizzata che gestisce la fornitura e la depurazione delle nostre acque.

5. Conclusioni

Partendo da due concetti diversi come il biogas, un combustibile rinnovabile e proveniente da prodotti di scarto e le celle a combustibile o fuel cell, dispositivi elettrochimici in grado di produrre energia in modo efficiente e pulito, si è giunti quindi ad un sistema integrato che garantisce performance elevate e rispetto dell'ambiente. Lo scopo non è promuovere in modo pubblicitario tali sistemi ma far nascere nel cittadino e nel lettore la consapevolezza che vi sono problemi ambientali legati alle emissioni, alla CO₂ emessa da vari sistemi (riscaldamento, automotive, industria, produzione energia) ma vi sono anche soluzioni innovative, tra cui le fuel cell sono solo uno dei tanti, che cercano di risolvere tali problemi.

6. Bibliografia

- [1] F. Reale, R. Stolica, M. Gaeta, M. Ferri, M. Sarnataro, and V. Vitale, “Analisi e stima quantitativa della potenzialità di produzione energetica da biomassa digeribile a livello regionale . Studio e sviluppo di un modello per unità energetiche Parte 1 - Metodologia,” p. 129, 2009.
- [2] R. Kothari, a. K. Pandey, S. Kumar, V. V. Tyagi, and S. K. Tyagi, “Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 174–195, Nov. 2014.
- [3] P. N. Biocombustibili, “Mappatura delle biomasse anaerobica in Alto Adige avviabili a digestione - Relazione conclusiva - Partner Ministero delle Politiche Agricole , Agrarie e Forestali,” pp. 1–113.
- [4] Aebiom, “A Biogas Road Map for Europe,” p. 22, 2009.
- [5] F. Adani, “I fattori che rendono ottimale la razione per il digestore,” *L'informatore Agrar.*, 2008.
- [6] C. Grignani, L. Zavattaro, S. Pelissetti, G. Bourlot, and M. Di Lena, “Produzione di energia e uso agronomico di biomasse agroalimentari e reflui zootecnici,” pp. 46–49, 2006.
- [7] L. Appels, J. Lauwers, J. Degreve, L. Helsen, B. Lievens, K. Willems, J. Van Impe, and R. Dewil, “Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4295–4301, 2011.
- [8] D. Medi, D. I. Produzione, B. Energia, and E. Termica, “DATI MEDI DI PRODUZIONE BIOGAS - ENERGIA ELETTRICA / TERMICA,” pp. 1–2.
- [9] D. I. Biogas, “La Digestione Anaerobica Di Rifiuti E Biomasse : Rassegna Delle Potenzialità Specifiche Di Produzione,” 2013.
- [10] N. J. Themelis and P. a. Ulloa, “Methane generation in landfills,” *Renew. Energy*, vol. 32, pp. 1243–1257, 2007.
- [11] B. Kjaer, “Municipal waste management in Denmark,” no. February, 2013.
- [12] C. Fischer, “Municipal waste management in Germany,” no. February, 2013.
- [13] M. Herczeg, “Municipal waste management in Austria,” no. February, 2013.
- [14] European Environmental Agency (EEA), *Managing municipal solid waste*, no. 2. 2013.
- [15] Green Energy, “Landfill gas to energy,” 2014.
- [16] “Landfill biogas.”
- [17] D. Surroop and M. Romeela, “Power Generation From Landfill Gas,” *2nd Int. Conf. Environ. Eng. Appl.*, vol. 17, no. November 1997, pp. 238–241, 2011.
- [18] A. Lohila, T. Laurila, J.-P. Tuovinen, M. Aurela, J. Hatakka, T. Thum, M. Pihlatie, J. Rinne, and T. Vesala, “Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill.,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 8, pp. 2717–2722, 2007.

- [19] R. Erler, "Sustainable Biogas Potentials in Germany."
- [20] Novamont S.p.a., "RIFIUTI ORGANICI I sistemi e i contenitori."
- [21] S. Cvetković, T. Kalucrossed D Signerović Radoičić, B. Vukadinović, and M. Kijevčanin, "Potentials and status of biogas as energy source in the Republic of Serbia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 407–416, 2014.
- [22] D. F. Organica and I. L. C. Territoriale, "Il polo ecologico acea: un esempio all'avanguardia nel trattamento della frazione organica," pp. 1–3.
- [23] C. C. Directive, "Directive 91/676/CEE concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources," *Off. J. Eur. Communities*, pp. 1–8, 1991.
- [24] L. Janke, A. Leite, M. Nikolausz, T. Schmidt, and J. Liebetrau, "Biogas Production from Sugarcane Waste : Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing," pp. 20685–20703, 2015.
- [25] S. N. M. de Souza, R. F. Santos, and G. P. M. Fracaro, "Potential for the Production of Biogas in Alcohol and Sugar Cane Plants for Use in Urban Buses in the Brazil," *Production*, pp. 418–424, 2011.
- [26] S. M. Hossain and M. Das, "Anaerobic biogas generation from sugar industry wastewaters in three-phase fluidized-bed bioreactor," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 88, no. 6, pp. 1085–1090, 2010.
- [27] A. Yasar, A. Ali, A. B. Tabinda, and A. Tahir, "Waste to energy analysis of shakarganj sugar mills; biogas production from the spent wash for electricity generation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 126–132, 2015.