



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Screening di tecnologie di riduzione dei fanghi integrate alla linea acque o fanghi, con impatto sostenibile sul bilancio energetico complessivo dell'impianto di depurazione integrato

R. Ferrentino, L. Fiori, G. Andreottola



Report RdS/PTR2020/100

SCREENING DI TECNOLOGIE DI RIDUZIONE DEI FANGHI INTEGRATE ALLA LINEA ACQUE O FANGHI, CON IMPATTO SOSTENIBILE SUL BILANCIO ENERGETICO COMPLESSIVO DELL'IMPIANTO DI DEPURAZIONE INTEGRATO

R. Ferrentino, L. Fiori, G. Andreottola
(Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica – Università di Trento)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 5 - Efficientamento energetico degli impianti di depurazione municipale e del trattamento delle acque reflue in ambito industriale

Linea di attività: LA5.10 Screening di tecnologie di riduzione dei fanghi con impatto sostenibile sul bilancio energetico dell'impianto di depurazione integrato

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Davide Mattioli, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Tecnologie per la riduzione dei fanghi di depurazione con impatto sostenibile sul bilancio energetico complessivo dell'impianto di depurazione integrato”*

Responsabile scientifico ENEA: Michela Langone

Responsabile scientifico: Prof. Gianni Andreottola

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DEFINIZIONE DEI CRITERI DI SCREENING DELLE TECNOLOGIE E DEGLI INDICATORI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI (RIDUZIONE FANGHI E PERFORMANCE ENERGETICHE).....	6
3 SCREENING DELLE TECNOLOGIE DI RIDUZIONE DEI FANGHI APPLICATE IN MODO INTEGRATO ALLA LINEA ACQUE O ALLA LINEA FANGHI DELL’IMPIANTO DI DEPURAZIONE.....	7
3.1 SCREENING DELLE TECNOLOGIE DI RIDUZIONE FANGHI APPLICATE ALLA LINEA ACQUE	7
3.1.1 <i>Trattamenti meccanici</i>	8
3.1.2 <i>Trattamenti chimici</i>	11
3.1.3 <i>Trattamenti biologici</i>	12
3.1.4 <i>Trattamenti termici ed elettrici</i>	14
3.2 SCREENING DELLE TECNOLOGIE DI RIDUZIONE FANGHI APPLICATE ALLA LINEA FANGHI	15
3.2.1 <i>Trattamenti fisici</i>	16
3.2.2 <i>Trattamenti termici</i>	18
3.2.3 <i>Trattamenti termochimici</i>	22
3.2.4 <i>Idrolisi termochimica a bassa temperatura (< 100°C)</i>	24
3.2.5 <i>Trattamenti chimici</i>	24
3.2.6 <i>Trattamenti biologici</i>	25
3.3 VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE TECNOLOGIE DESCRITTE	25
4 ACQUISIZIONE DATI SUI COSTI DI INVESTIMENTO E DI ESERCIZIO	28
5 SINTESI DELLE PERFORMANCE.....	33
6 DISSEMINAZIONE	35
7 OUTPUT DEL PROGETTO	35
8 CONCLUSIONI.....	37
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	37
CURRICULUM VITAE	42

Sommario

Negli ultimi anni, crescente attenzione è stata posta verso il problema della produzione di fanghi negli impianti di depurazione, tema di rilievo sia ambientale che economico. Il costo della gestione e dello smaltimento dei fanghi può incidere fino al 65% sul bilancio economico complessivo di un impianto di depurazione, rappresentando, quindi, la principale voce di costo di un impianto di depurazione. La seconda voce di costo più influente, trascurando il costo per il personale, è il consumo energetico. Pertanto, sarebbe opportuno implementare tecnologie in grado di ridurre la produzione dei fanghi e di assicurare un effetto positivo sul bilancio energetico e di materia dell'intero impianto di depurazione.

Obiettivo del presente studio è lo screening delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi, integrate sia alla linea acque che alla linea fanghi di un impianto di depurazione municipale, con impatto sostenibile sul bilancio complessivo dell'impianto stesso. Le tecnologie oggetto dello screening sono state individuate in funzione della loro integrabilità al trattamento convenzionale a fanghi attivi, per la linea acque, e al processo di digestione anaerobica, per la linea fanghi; sono stati considerati trattamenti meccanici, termici, chimici, termochimici, elettrici e biologici. Le performance dei diversi trattamenti sono state confrontate tra loro sulla base della riduzione della produzione di fanghi, dell'incremento della produzione di biogas, dove presente, e del consumo energetico.

Dallo screening delle tecnologie integrate alla linea acque è emerso che i trattamenti meccanici consentono di ridurre maggiormente la produzione dei fanghi rispetto a quelli biologici a fronte, però, di un maggiore consumo energetico. I trattamenti termici, invece, consentono la più elevata riduzione della produzione di fanghi per le tecnologie integrate alla linea fanghi e, pur presentando valori elevati di consumi energetici in termici elettrici e di calore, gli stessi sono parzialmente compensati dall'incremento della produzione di biogas che può essere anche superiore al 50%.

1 Introduzione

Ad oggi, la maggior parte degli impianti di depurazione presentano processi biologici applicati sia in linea acque, dove avviene la rimozione dei composti organici e dei nutrienti, che in linea fanghi, dove gli stessi vengono trattati per ridurre la massa e il volume. Sebbene tali impianti consentano di ottenere un'elevata efficienza nella rimozione dei contaminanti, di contro, causano la produzione di un'ampia quantità di fanghi di depurazione. La produzione media annuale di fanghi di depurazione in Europa, USA e Cina varia dai 18 ai 33 milioni di tonnellate come peso secco [1]. Tale quantità è destinata ad aumentare visti i limiti normativi sempre più stringenti e l'incremento della popolazione. Ad oggi, i principali metodi per lo smaltimento dei fanghi di depurazione sono l'incenerimento, il riutilizzo in agricoltura, laddove consentito dalla normativa, e lo smaltimento in discarica. Tuttavia, in alcuni paesi, specialmente dove risulta complicato individuare nuovi siti, il collocamento in discarica è limitato mentre l'incenerimento rimuove solo il 70% dei solidi producendo ceneri con un alto contenuto di metalli [2]. Entrambi questi approcci determinano costi di smaltimento elevati che influenzano il costo complessivo della gestione dei fanghi [3]. Inoltre, per riutilizzare i fanghi in agricoltura è necessario soddisfare rigorosi standard normativi per garantire che i fanghi non contengano tracce di composti organici, come prodotti farmaceutici e pesticidi, e metalli pesanti che possono essere trasferiti al suolo e causare effetti negativi sulla salute umana [4]. Pertanto, anche questo approccio è stato limitato e, in alcuni paesi, completamente vietato.

Considerando che in Europa il costo per lo smaltimento dei fanghi varia tra 30 e 100 euro per tonnellata di fango secco e che la produzione annuale di fanghi ammonta a circa 20,000 tonnellate di sostanza secca per milione di persone ne consegue un'incidenza sostanziale del costo per lo smaltimento dei fanghi sui costi complessivi di gestione di un impianto di depurazione, con percentuali variabili dal 20 al 50%. Di conseguenza, le attività connesse alla gestione e allo smaltimento dei fanghi sono diventate sempre più un problema ambientale nonché economico, spingendo la ricerca scientifica verso lo sviluppo di soluzioni e tecnologie in grado di **ridurre la produzione di fanghi** in maniera considerevole.

Fattore determinante nella scelta della tecnologia di riduzione della produzione di fanghi è il **consumo energetico** che, non considerando il costo per il personale, rappresenta la seconda voce di costo più influente nel bilancio complessivo di un impianto di depurazione. Infatti, l'incidenza del costo energetico sul costo complessivo di un impianto di depurazione varia dal 7 al 33%.

Di conseguenza, maggiore è la produzione di fanghi, maggiore sarà l'energia necessaria per il suo trattamento.

La soluzione ottimale, quindi, è quella di implementare una tecnologia, o una combinazione di tecnologie, che consenta di **ridurre la produzione di fanghi** e, al contempo, di **contenere i consumi energetici** dell'impianto, oppure di valorizzare il più possibile il **recupero di energia e di materia**.

Le tecnologie che consentono di ottenere una riduzione della produzione di fanghi possono essere suddivise in due tipologie: tecnologie integrate alla linea acque e tecnologie integrate alla linea fanghi.

In genere, esse non vengono applicate simultaneamente allo stesso impianto di depurazione. Le tecnologie integrate alla linea acque sono applicate in piccoli impianti di depurazione dove non è presente un comparto di digestione anaerobica, mentre quelle integrate alla linea fanghi sono implementate in impianti di trattamento di medio-grandi dimensioni, dove è presente il trattamento di digestione anaerobica dei fanghi.

Obiettivo del presente lavoro è realizzare uno screening delle tecnologie di riduzione della produzione dei fanghi che abbiano un impatto energetico positivo sulla gestione dell'interno impianto di depurazione. Ciò significa, non solo considerare i consumi energetici della singola tecnologia ma valutare anche eventuali vantaggi nell'applicazione della stessa quali, ad esempio, l'incremento della produzione di biogas.

A tal fine, lo schema di impianto di depurazione preso come riferimento è costituito da un trattamento convenzionale a fanghi attivi, in linea acque, e da un comparto di digestione anaerobica, in linea fanghi. Sono state considerate, quindi, le tecnologie di riduzione della produzione di fango che possono essere integrate nel predetto schema impiantistico. Per ciascuna tecnologia, sono evidenziati i dati di produzione di fanghi, o le percentuali di riduzione della stessa, e i consumi energetici. Si precisa che i dati riportati nel presente

documento fanno riferimento a dati di letteratura relativi ad applicazioni a scala reale e a dati commerciali forniti direttamente dalle società detentrici della relativa tecnologia.

2 Definizione dei criteri di screening delle tecnologie e degli indicatori di valutazione delle prestazioni (riduzione fanghi e performance energetiche)

Il primo step dell'attività di ricerca è stato incentrato sulla definizione e individuazione dei principali indicatori relativi alla riduzione della produzione di fanghi e alle prestazioni energetiche delle tecnologie attualmente disponibili per il trattamento dei reflui.

Relativamente alla produzione di fanghi, il parametro che maggiormente evidenzia l'efficienza di una tecnologia in termini di riduzione dei fanghi è il **tasso di produzione specifica di fanghi** (Y_{obs}) che rappresenta il rapporto tra la quantità di fanghi prodotta, espressa in kg di solidi totali, e la quantità di substrato rimosso, espressa in termini di kg di COD (Eq. (1)).

$$Y_{obs} = \frac{\text{Produzione cumulata di fanghi}}{\text{Consumo cumulato di substrato}} \quad (1)$$

La produzione cumulata di fanghi può essere indicata come segue (Eq. (2)):

$$\text{Produzione cumulata di fanghi} = \Delta X_{LA} V_{LA} + \Delta X_{LF} V_{LF} + \sum (X_S Q_{sup} + X_{eff} Q_{eff}) \cdot \Delta t \quad (2)$$

dove ΔX_{LA} , ΔX_{LF} rappresentano la variazione della concentrazione di solidi, rispettivamente, nel comparto di linea acque, di linea fanghi, X_S e X_{eff} la concentrazione dei solidi, rispettivamente, nei fanghi di supero e nell'effluente; V_{LA} e V_{LF} sono i volumi, rispettivamente, del comparto di linea acque e di linea fanghi; Q_{sup} e Q_{eff} rappresentano le portate, rispettivamente, di fanghi di supero e di effluente; Δt indica, infine, l'intervallo temporale di analisi. Di conseguenza, la produzione specifica di fanghi considera non solo i fanghi prodotti e allontanati dall'impianto come fanghi di supero, ma anche i fanghi accumulati all'interno dell'impianto di trattamento.

Il consumo cumulato di substrato è dato dalla seguente equazione (Eq. 3):

$$\text{Consumo cumulato di substrato} = \sum (S_{in} Q_{in} - S_{eff} Q_{eff}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

dove S_{in} e S_{eff} sono le concentrazioni di substrato presenti, rispettivamente, nell'influente e nell'effluente mentre Q_{in} e Q_{eff} rappresentano la portata influente ed effluente.

Il valore di Y_{obs} varia in base alla tecnologia applicata. In genere, Y_{obs} per impianti di depurazione dove è presente un trattamento convenzionale a fanghi attivi seguito da un trattamento di digestione aerobica dei fanghi è pari a 0.30 ± 0.07 kgTS/kgCOD_{rim} [5].

In genere, il valore di Y_{obs} viene presentato insieme alla **percentuale di riduzione della produzione di fanghi** dove il valore di Y_{obs} , relativo alla tecnologia di riduzione della produzione di fanghi, viene rapportato al valore Y_{obs} riferito allo schema di trattamento precedente all'inserimento della tecnologia di riduzione dei fanghi. In alcuni casi, quando non è possibile determinare il valore di Y_{obs} , l'efficienza della tecnologia di riduzione dei fanghi viene espressa solo come percentuale di riduzione calcolata sulla base dei kg di solidi totali prodotti e inviati allo smaltimento.

Le prestazioni energetiche di una tecnologia, invece, vengono valutate considerando il **consumo energetico** della stessa, espresso in kWh elettrici (kWh_{el}) o termici (kWh_{heat}). I consumi energetici sono legati alla tipologia di trattamento effettuato, al quantitativo di refluo trattato e anche al carico organico rimosso. In

genere, il consumo energetico viene riferito all'unità di **carico organico** (kW/kg BOD_{rimosso} oppure kWh/kg COD_{rimosso}), oppure al numero di **abitanti equivalenti serviti per anno** (kWh/AE) oppure all'unità di **volume trattato** (kWh/m³). In questo caso, si parla, quindi, di consumo energetico specifico.

I consumi energetici specifici riferiti all'unità di carico organico variano in un ampio range di valori pari a 1.5 – 40 kWh_{el}/ kg BOD_{rimosso} con una media pari a 4.5 kWh_{el}/kg BOD_{rimosso}. Tale consumo è legato, ovviamente, alla portata in ingresso all'impianto e alla tipologia di trattamento secondario. In generale, per un impianto a fanghi attivi, il consumo energetico specifico varia da 9.0 kWh_{el}/kg BOD_{rimosso} per impianti con portata in ingresso inferiore a 4000 m³/d fino a 4.4 kWh_{el}/ kg BOD_{rimosso} per impianti che trattano una portata in ingresso superiore a 285,000 m³/d [6].

Il consumo specifico per AE varia, invece, tra 15 e 30 kWh_{el}/AE anno per impianti con trattamento convenzionale a fanghi attivi con una rimozione spinta del COD e dei nutrienti [6].

Infine, il consumo elettrico specifico, espresso in kWh_{el}/m³, è funzione non solo della portata trattata ma anche del livello di trattamento effettuato negli impianti. Kenway et al. [7] hanno stimato un valore medio di consumo energetico in base alla tipologia di trattamento eseguito. Per un trattamento primario, il valore medio di consumo energetico risulta pari a 0.22 kWh_{el}/m³, mentre per i trattamenti secondari e terziari i consumi energetici medi sono pari, rispettivamente, a 0.46 kWh_{el}/m³ e 0.90 kWh_{el}/m³. Per un sistema a fanghi attivi che include, per la linea acque la grigliatura, la dissabbiatura, la sedimentazione primaria, l'ossidazione, la sedimentazione secondaria e la disinfezione con clorazione e, per la linea fanghi, invece, l'ispessimento, la digestione anaerobica e la disidratazione, il consumo energetico specifico varia tra 0.591 kWh_{el}/m³ per una portata in ingresso all'impianto pari a 4,000 m³/d fino a 0.272 kWh_{el}/m³ per una portata influente pari a 380,000 m³/d [6].

3 Screening delle tecnologie di riduzione dei fanghi applicate in modo integrato alla linea acque o alla linea fanghi dell'impianto di depurazione

L'attività di screening delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi è stata prevista all'interno dello step 2. Lo screening è stato eseguito sulla base di dati ottenuti da un'analisi della letteratura scientifica internazionale. Allo scopo di identificare una short list di tecnologie di riduzione della produzione di fanghi sono state considerate sia tecnologie applicate alla linea acque sia quelle applicate alla linea fanghi. Tutte le tecnologie sono state valutate sia dal punto di vista della riduzione della produzione di fanghi di supero sia dal punto di vista energetico. Inoltre, per restringere lo screening, sono state considerate solo tecnologie applicate a scala reale e/o a scala pilota, che consentano una riduzione della produzione di fanghi almeno pari al 20%.

3.1 Screening delle tecnologie di riduzione fanghi applicate alla linea acque

Negli ultimi anni è stata posta grande attenzione verso tecnologie in grado di ottenere una riduzione dei fanghi direttamente nella linea di trattamento delle acque reflue, riducendo così la quantità di fanghi da trattare nella linea fanghi, dopo la loro produzione. Generalmente, questa opzione è preferita per gli impianti di trattamento delle acque reflue di piccole-medie dimensioni, in cui non esiste un comparto di digestione anaerobica dei fanghi. In quest'ottica, la riduzione dei fanghi è ottenuta mediante trattamenti meccanici, chimici, termici e biologici basati sulla lisi cellulare - crescita criptica, sul metabolismo endogeno, sul metabolismo disaccoppiato e sui meccanismi di predazione microbica.

La riduzione della produzione di fanghi integrata alla linea acque avviene mediante l'applicazione delle tecnologie di riduzione sulla linea di ricircolo del fango attivo che viene poi inviato al reattore biologico principale. All'interno di quest'ultimo comparto, i composti organici vengono ulteriormente biodegradati dai batteri secondo il meccanismo della lisi cellulare e crescita criptica.

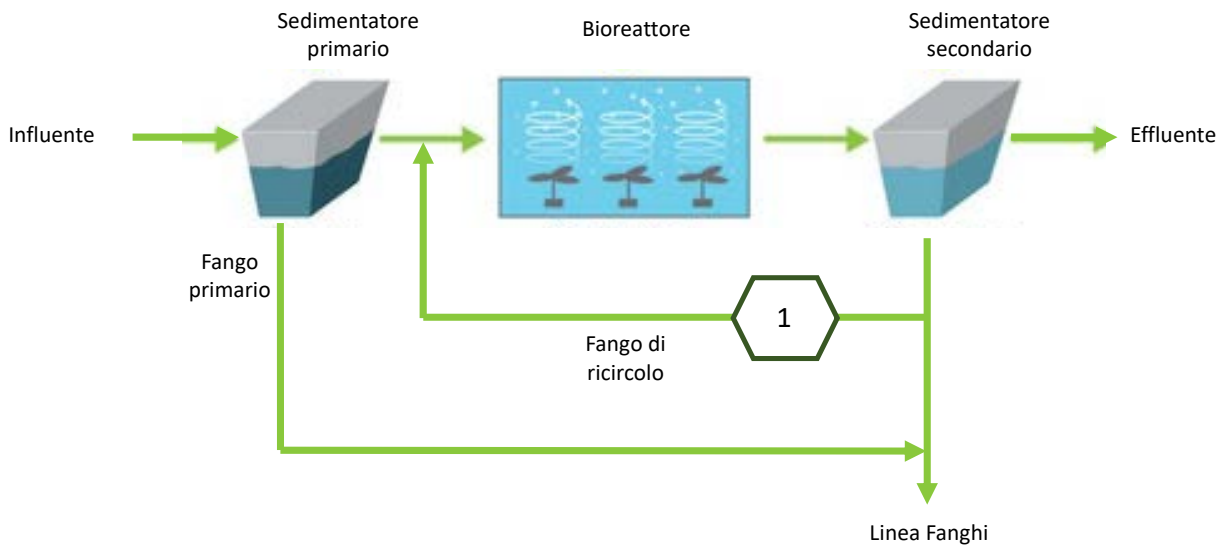


Figura 1. Schema impianto di depurazione. Il numero 1 corrisponde alla localizzazione delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea acque

3.1.1 Trattamenti meccanici

I trattamenti meccanici di riduzione della produzione di fanghi possono essere realizzati utilizzando diversi dispositivi quali mulini a sfere, omogeneizzatori ad alta pressione o altri sistemi in cui l'energia è fornita come pressione oppure come energia rotazionale o traslazionale. L'obiettivo di questi trattamenti è favorire la solubilizzazione del fango, come conseguenza della disintegrazione delle cellule dei batteri e la disaggregazione dei fiocchi di fango. Il trattamento meccanico può essere integrato con il convenzionale processo a fanghi attivi mediante l'inserimento dello stesso sulla linea di ricircolo dei fanghi. Un'aliquota del fango di ricircolo, sottoposto a trattamento meccanico, viene disaggregato e il lisato ottenuto viene riciclato all'interno del comparto biologico principale della linea acque.

Le due principali tecnologie di trattamento meccanico sono gli **ultrasuoni** e l'**omogeneizzazione ad alta pressione**.

Trattamento ad ultrasuoni

Lo schema del trattamento ad **ultrasuoni** integrato con la linea acque è indicato in Figura 2. Una frazione del flusso di ricircolo dei fanghi viene trattato in continuo o in modalità batch in un reattore ad ultrasuoni. Il trattamento ad ultrasuoni si basa sulla cavitazione e sulla formazione di radicali idrossili. Le onde di pressione portano alla formazione di milioni di piccole bolle che, collassando, generano una elevata pressione (500 bar) e temperatura (5,000 K) e condizioni estreme che attaccano meccanicamente i fanghi causandone la loro disintegrazione e la rottura delle cellule microbiche [8,9]. Questo trattamento produce, inoltre, i radicali ossidrilici che sono altamente ossidativi e contribuiscono alla rottura dei fiocchi di fango. L'azione chimico-fisica di lisi indotta dagli ultrasuoni favorisce la solubilizzazione della sostanza organica e l'aumento dei composti biodegradabili che vengono utilizzati nel comparto a fanghi attivi come fonte di carbonio prontamente disponibile.

Il trattamento ad ultrasuoni è influenzato da tre fattori principali:

- 1) l'energia applicata: all'aumentare dell'energia applicata, aumenta l'effetto di disintegrazione del fango;
- 2) la frequenza degli ultrasuoni, generalmente compresa tra 20 e 40 kHz;
- 3) le caratteristiche dei fanghi.

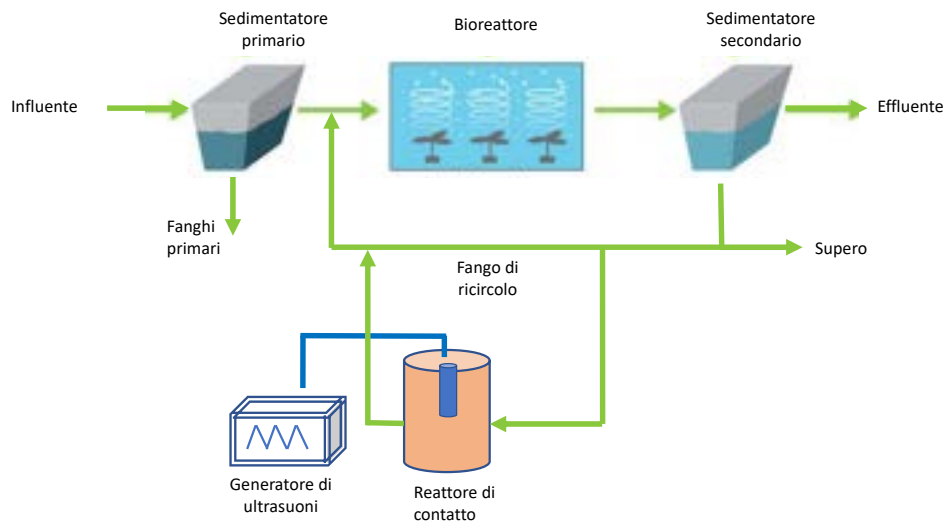


Figura 2. Trattamento ad ultrasuoni integrato alla linea acque

Neis et al. [10] hanno applicato il trattamento ad ultrasuoni a scala reale (54,000 AE) per migliorare il processo di digestione aerobica. Circa il 30% del fango attivo è stato dapprima ispessito e poi inviato al trattamento ad ultrasuoni, infine, ricircolato all'interno del reattore a fanghi attivi. Questo approccio consente di fornire una fonte interna di carbonio in modo da migliorare l'efficienza del processo di denitrificazione. L'utilizzo del fango attivo ispessito e poi sonicato come fonte interna di carbonio allo scopo di migliorare la denitrificazione ha prodotto diversi effetti positivi. In primo luogo, è stata ottenuta una significativa riduzione dell'azoto, il che significa che è stata incrementata l'efficienza del processo di denitrificazione. Inoltre, si sono verificati diversi effetti secondari che hanno contribuito a migliorare l'efficienza complessiva dell'impianto: la produzione di fanghi è stata ridotta del 25% e la disidratazione dei fanghi è stata leggermente migliorata. Dal punto di vista economico, l'investimento per l'installazione del trattamento ad ultrasuoni è stato ripagato con la riduzione della produzione di fanghi e dalla non più necessaria aggiunta di fonti esterne di carbonio.

Mohammadi et al. [8], invece, hanno studiato l'applicazione a scala pilota del trattamento ad ultrasuoni all'interno di un reattore SBR (Sequencing Batch Reactor) per ridurre la produzione di fanghi, agendo sul meccanismo della lisi cellulare e crescita criptica. I risultati dello studio hanno evidenziato che la riduzione della produzione di fanghi è influenzata da una serie di fattori tra cui l'energia specifica applicata alla massa di fanghi, la potenza utilizzata per generare gli ultrasuoni, la durata del trattamento ad ultrasuoni e la percentuale di fanghi trattata. Aumentando l'energia applicata alla massa di fanghi, si osserva un aumento nella riduzione della produzione di fanghi fino a valori pari a 35,000 kJ/kg VSS. Oltre tale soglia, non si registrano effetti significativi in termini di riduzione della produzione di fanghi. Di conseguenza, piuttosto che fornire un'energia specifica elevata risulta essere più conveniente lavorare con bassi valori di energia specifica, ma per un tempo più lungo. I risultati, inoltre, hanno evidenziato una riduzione della produzione di fanghi pari al 78% sottoponendo il 30% dei fanghi al trattamento ad ultrasuoni.

In alcune applicazioni, il fango di ricircolo, prima di essere inviato al trattamento ad ultrasuoni è stato sottoposto ad un processo di ispessimento di tipo dinamico oppure statico. In questo modo, il trattamento ad ultrasuoni è stato applicato ad un flusso di fanghi avente una concentrazione di solidi maggiore, che permette di contenere i consumi energetici e disperdere il meno possibile l'energia trasferita alla fase liquida. Un esempio è l'applicazione della società tedesca Ultrawaves presso l'impianto di depurazione di Bunde (Germania). In questo caso, gli ultrasuoni sono stati utilizzati per disintegrare il fango attivo pre-ispessito ed utilizzarlo come fonte interna di carbonio per migliorare il processo di denitrificazione (Figura 3).

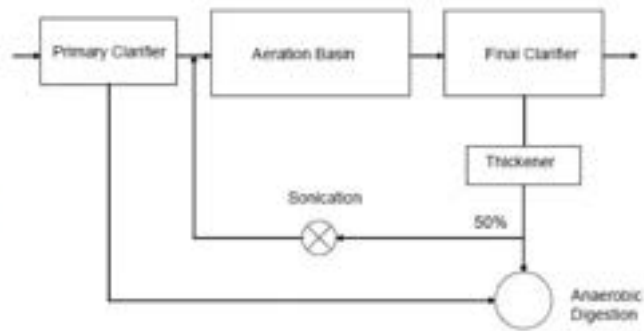


Figura 3. Schema dell’impianto di depurazione di Bunde (Germania) [11]

Una parte del fango ispessito, circa il 50%, viene inviato al reattore ad ultrasuoni e successivamente al comparto biologico della linea acque. I risultati dell’applicazione hanno evidenziato:

- una riduzione significativa della concentrazione di azoto nell’effluente ($N < 3 \text{ mg/L}$);
- la mancanza della necessità di dover ricorrere ad una fonte esterna di carbonio (quale il metanolo);
- una riduzione della massa di fanghi da smaltire pari al 13%;
- un miglioramento della disidratabilità del fango.

Omogeneizzazione ad alta pressione

L’omogeneizzazione ad alta pressione (Figura 4) è un trattamento meccanico alternativo agli ultrasuoni. In genere, un omogeneizzatore ad alta pressione è costituito da una pompa ad alta pressione che comprime il fango, fino a raggiungere pressioni di alcune centinaia di bar, ed una valvola di contropressione, detta anche valvola di omogeneizzazione, in cui avviene la decompressione del fango dalla pressione a cui prima era sottoposto sino alla pressione atmosferica.

Quando il fango viene alimentato all’interno dell’omogeneizzatore ad elevata pressione, viene sottoposto ad un aumento di velocità di oltre 50 volte che induce cavitazione e collisione provocando la disintegrazione del fango e la destrutturazione delle cellule.

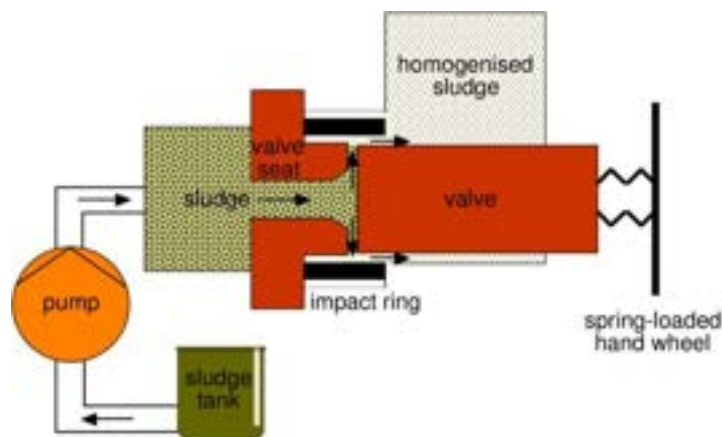


Figura 4. Sezione di una valvola di omogeneizzazione [12]

A differenza del trattamento ad ultrasuoni, l’omogeneizzazione ad alta pressione è stata applicata, al trattamento convenzionale a fanghi attivi, solo a scala pilota [13]. I test in continuo hanno evidenziato una riduzione del valore di Y_{obs} da 0.36 a 0.29 $\text{g TSS}_{prodotti} / \text{g COD}_{rimossi}$ applicando una pressione pari a 300 bar, con una riduzione della produzione di fanghi pari a circa il 20%.

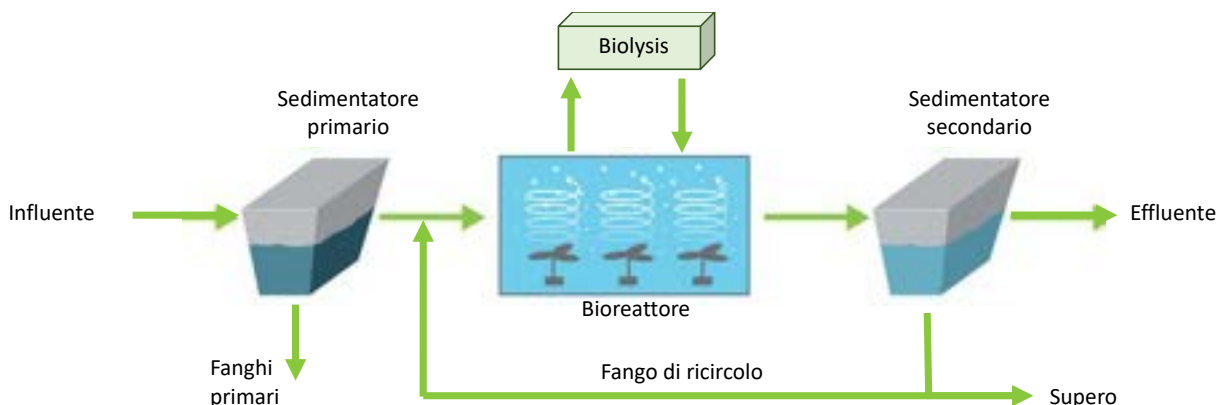


Figura 6. Processo di ozonizzazione integrato alla linea acque - Biolysis®-O

La tecnologia Biolysis®-O è stata applicata all'impianto di Broomhaugh (UK) e ha consentito di ottenere una riduzione della produzione di fanghi in kgSS/g pari al 35% a fronte di una dose di ozono variabile tra 0.13 a 0.23 kg O₃/ kg TS trattati.

In generale, il trattamento con ozono consente di ottenere una riduzione dei fanghi almeno pari al 35 - 45% [14,16–19] fino ad una produzione di fanghi pari anche a zero [20,21] in alcuni casi particolari, di seguito analizzati.

Sakai et al. [20] hanno integrato il trattamento ad ozono con il trattamento convenzionale a fanghi attivi. Durante la sperimentazione, condotta a scala reale, tre percentuali di fango di supero (variabili dal 3 al 15%) sono state inviate al trattamento di ozonolisi eseguito con un dosaggio di ozono pari 0.034 kg O₃/ kg SS. Per l'aliquota di fanghi pari al 15% dei fanghi di supero trattata con l'ozono è stata osservata una produzione di fango pari a zero.

Anche Lee et al. [21] hanno evidenziato una produzione di fanghi pari a zero in un impianto a scala pilota con capacità di trattamento pari a 10 m³/d. Una parte del fango di ricircolo (percentuale non specificata) viene trattata con ozono (0.05 g O₃/g TSS) e, successivamente, all'interno del comparto a fanghi attivi. Gli autori hanno evidenziato che la produzione di fanghi pari a zero può essere ottenuta variando due parametri operativi: la percentuale di fanghi sottoposta al trattamento ad ozono e la frequenza giornaliera di ozonizzazione che dipende, a sua volta, dalla temperatura. I risultati hanno evidenziato che, nel caso di una temperatura pari a 15 °C, la frequenza di ozonolisi (ovvero quante volte trattare la stessa aliquota di fango) varia tra 2.5 e 2.7 ma deve essere raddoppiata per temperature inferiori ai 10°C.

Di contro, lo studio di Romero et al. [14] presenta una riduzione della produzione di fanghi nettamente inferiore agli studi precedenti e pari solo al 10%. In questo studio sono stati riportati dati sperimentali relativi al monitoraggio di un impianto a scala reale con capacità di trattamento pari a 50,000 AE. Una parte del fango di ricircolo, pari a circa il 50%, è stata sottoposta al trattamento con ozono (0.74 g O₃/g TSS) con una quantità di fanghi sottoposto ad ozonolisi pari a 0.5 kg VSS_{trattati}/kg VSS_{biologici} al giorno.

3.1.3 Trattamenti biologici

I trattamenti biologici per la riduzione della produzione di fanghi si basano sulla selezione e l'attività di particolari batteri, generalmente anaerobi, che, in determinate condizioni operative, riescono a degradare la sostanza organica con tasso di crescita ridotto. In generale, questa tipologia di processo prevede l'inserimento di un reattore anaerobico side-stream per il trattamento fanghi sulla linea di ricircolo dei fanghi del comparto a fanghi attivi. In questo modo i fanghi vengono sottoposti ad una alternanza di condizioni aerobiche ed eventualmente anossiche (nel comparto a fanghi attivi) ed anaerobiche (nel reattore side-stream), definita anche "sludge fasting/feasting" cioè alternanza di fame/abbondanza [22].

Questo trattamento, in genere conosciuto con l'acronimo **OSA** (oxic – settling- anaerobic) e/o **ASSR** (Anaerobic Side-Stream Reactor), è stato studiato in molte configurazioni soprattutto a scala di laboratorio e

consente di ottenere fino al 70% di riduzione della produzione di fanghi [23]. Poche, invece, sono le applicazioni a scala reale, per la difficoltà di comprendere chiaramente i meccanismi di riduzione della produzione di fanghi.

Cannibal

La prima applicazione a scala reale è stata quella del processo **Cannibal®**, che combina un approccio biologico ad uno fisico per ridurre la produzione di fanghi [24]. Secondo questo schema, riportato in Figura 7, una parte del fango di ricircolo (generalmente circa il 10% della portata di ricircolo) viene inviato ad una vasca di pre-accumulo per l'unità di trattamento fisico, costituita da un vaglio a tamburo, con luci di 250 µm per separare il materiale celluloso e il materiale inerte, ed un idrociclone per rimuovere le sabbie. Il fango viene poi inviato al reattore biologico anaerobico di interscambio.

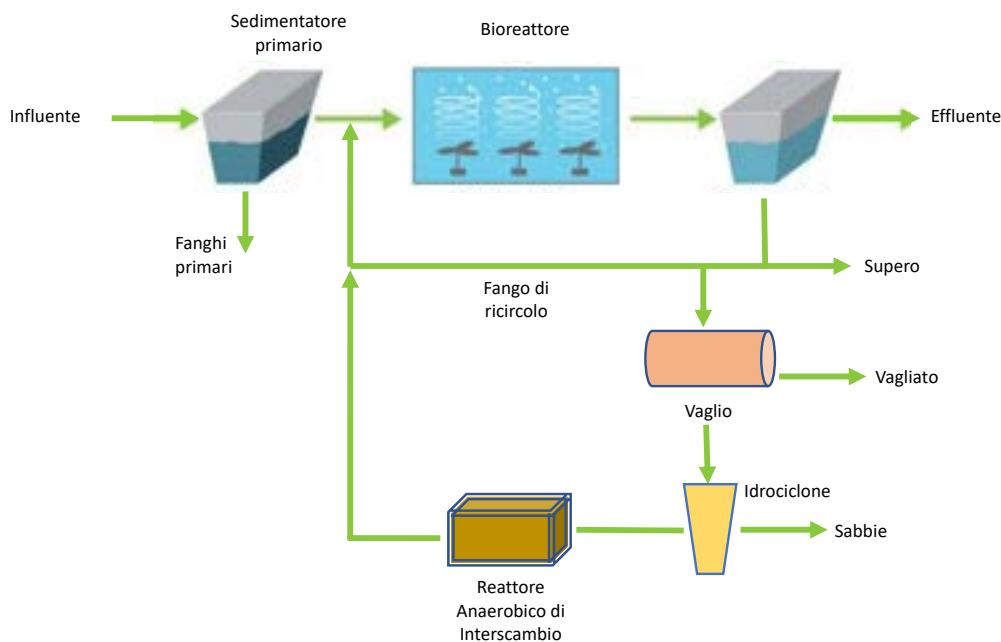


Figura 7. Schema del processo biologico Cannibal®

Nel reattore biologico di interscambio (tempo di ritenzione: 9-10 giorni) si ha un incremento del COD solubile, dell'azoto ammoniacale e degli ortofosfati, che vengono successivamente rimossi nel comparto biologico della linea acque, dove viene ricircolato l'effluente del reattore di interscambio. Nello studio di Novak et al. [24], il processo Cannibal® è stato applicato a scala di laboratorio ottenendo una riduzione della produzione di fanghi del 60% minore rispetto ad un trattamento convenzionale a fanghi attivi. Al contrario, l'applicazione di questo processo a scala reale non ha portato al raggiungimento di una percentuale di riduzione dei fanghi così alta, come evidenziato dagli studi a scala di laboratorio. Velho et al. [25] ha valutato le performance del processo Cannibal®, monitorando un impianto a scala reale per 5 anni. I risultati di questo studio hanno evidenziato che il tasso di produzione di fanghi varia da 0.44 kgTSS/kg COD del trattamento a fanghi attivi a 0.35 kgTSS/kg COD nella configurazione con il processo Cannibal®, ottenendo quindi una riduzione della produzione di fanghi pari solo al 20%. Inoltre, lo studio ha evidenziato che un incremento del 45% del volume del reattore di interscambio non ha effetti benefici sulla riduzione della produzione di fanghi, dimostrando, quindi, che essa non è legata solo al decadimento endogeno che si verifica all'interno del reattore di trattamento fanghi, ma è legata a molteplici aspetti quali, ad esempio, il rapporto di interscambio (IR) e l'età del fango del reattore biologico (SRT_{ASSR}).

UTN System

Recente è l'implementazione di un nuovo schema di trattamento, denominato **UTN System**, che nasce dallo studio a scala di laboratorio, e poi a scala reale, del processo ASSR (Figura 8).

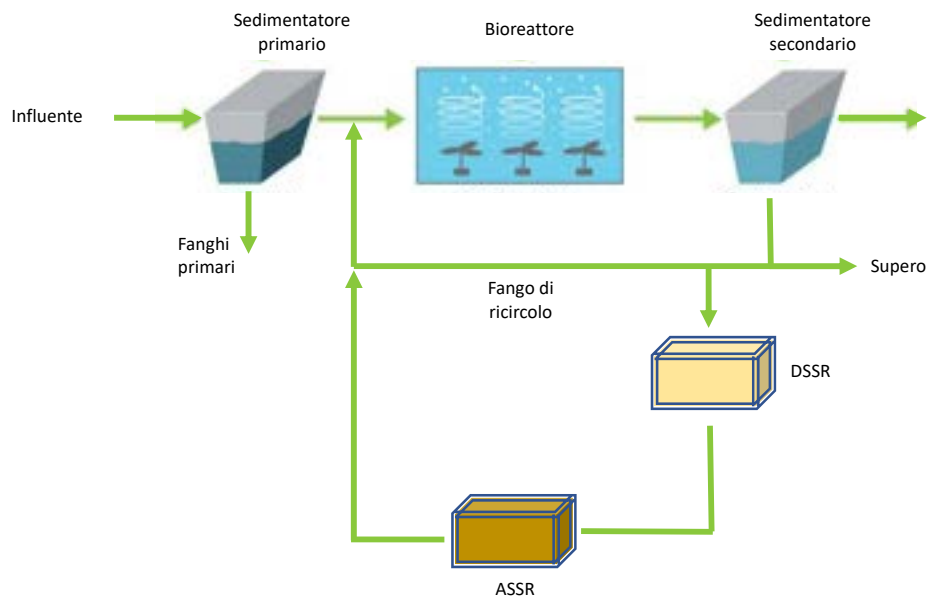


Figura 8. Schema del processo biologico UTN System

A differenza di quanto proposto dai processi Cannibal® e UMass, il processo UTN System basa la sua efficacia, in termini di riduzione della produzione di fanghi, sulla combinazione di diversi meccanismi tra cui la lisi cellulare e la crescita criptica e la selezione, all'interno del comparto anaerobico, di particolari batteri a lenta crescita garantita da specifiche modalità gestionali dell'intero schema impiantistico. Il fango attivo viene inviato dapprima in un comparto di denitrificazione (DSSR) per completare l'eventuale processo di denitrificazione e assicurare una concentrazione di nitrati in ingresso al reattore ASSR inferiore a 5 mg L^{-1} e, inoltre, per ispessire il fango da inviare al comparto side-stream. Dal reattore DSSR, il fango viene poi inviato all'unità ASSR dimensionato con un SRT_{ASSR} pari a 2.5 d (o comunque < 5 giorni) e un IR variabile dal 30 al 100%.

Il processo UTN System è stato applicato a scala reale presso un impianto di depurazione municipale con capacità di trattamento di 6000 AE. Il monitoraggio dell'impianto con la configurazione UTN è stato eseguito per 10 mesi, suddivisi in due periodi di trattamento differenti tra loro per la modalità di addensamento del fango prima di essere alimentato al reattore ASSR. I risultati del monitoraggio sono stati confrontati con un periodo di riferimento di durata analoga dove era previsto uno schema di trattamento convenzionale a fanghi attivi. I risultati hanno evidenziato una produzione di fanghi pari a 0.37 e 0.23 kg TSS/kg COD rimosso per i due periodi di monitoraggio del processo UTN. I dati, quindi, evidenziano una riduzione della produzione di fanghi del 50% e 69% rispetto al trattamento convenzionale (0.75 kg TSS/kg COD rimosso). È stato inoltre stimato il consumo energetico dello schema di trattamento UTN rispetto a quello convenzionale. Il comparto ASSR del processo UTN contribuisce solo per il 15% al consumo complessivo della linea fanghi rispetto al 24% della digestione aerobica [26].

Un'altra tipologia di trattamento biologico è il reattore aerobico termofilo, applicato a scala reale con il processo Biolysis®- E. Lo schema del trattamento è molto simile a quello di Figura 5. Il processo prevede il prelievo del fango dal bacino di aerazione, l'invio dello stesso ad un comparto di ispessimento e il successivo invio al reattore aerobico termofilo dove viene omogeneizzato e miscelato attraverso un sistema di aerazione. Il fango effluente dal reattore termofilo ritorna nel bacino di aerazione dell'impianto. Il processo Biolysis®- E può consentire abbattimenti della produzione di fanghi variabili tra il 15% e il 25% in funzione delle performance del comparto biologico e delle temperature.

3.1.4 Trattamenti termici ed elettrici

I **trattamenti termici** distruggono le pareti cellulari favorendo il rilascio di materiali intracellulari che sono disponibili per la successiva fase di biodegradazione da parte dei batteri. Tuttavia, a causa dell'elevato costo, esistono pochi studi relativi all'applicazione di trattamenti termici applicati in modo integrato alla linea acque

e si riferiscono solo ad applicazioni a scala pilota. In genere, i trattamenti termici vengono eseguiti a temperatura variabile tra i 90 – 95 °C e consentono di ottenere fino al 60% di riduzione della produzione di fanghi [27,28].

Camacho et al. [28] ha studiato la combinazione di un trattamento termico a 95 °C con il processo a fanghi attivi. La sperimentazione è stata condotta a scala pilota per 35 giorni. Le performance derivanti dalla combinazione del trattamento termico con il processo a fanghi attivi sono state confrontate con un sistema di trattamento convenzionale. Il trattamento combinato è stato inoltre valutato considerando differenti tempi di contatto variabili da 5 a 45 minuti. I risultati hanno evidenziato che una riduzione della produzione di fanghi pari al 55% è stata ottenuta con un tempo di contatto pari a 45 minuti. Tempi di contatto minori inducono, invece una minore riduzione della produzione di fanghi.

I **trattamenti elettrici**, invece, attaccano i fosfolipidi che sono i costituenti principali della membrana cellulare. La conseguente apertura dei pori nella membrana cellulare induce la rottura delle cellule e quindi la lisi, che favorisce il rilascio di materiale intracellulare e quindi promuove la biodegradazione da parte dei batteri. Il trattamento elettrico è stato applicato solo a scala pilota su una parte dei fanghi di ricircolo (percentuale non indicata) del processo convenzionale a fanghi attivi, applicando un'energia specifica pari a 1650 kJ/kg TSS. I risultati hanno mostrato una riduzione della produzione di fanghi variabile tra il 27 – 45 % [29].

3.2 Screening delle tecnologie di riduzione fanghi applicate alla linea fanghi

In genere, la riduzione della produzione di fanghi avviene all'interno della linea di trattamento fanghi per gli impianti di trattamento di acque reflue dove è presente un comparto di digestione anaerobica inserendo un'unità di pre o post-trattamento.

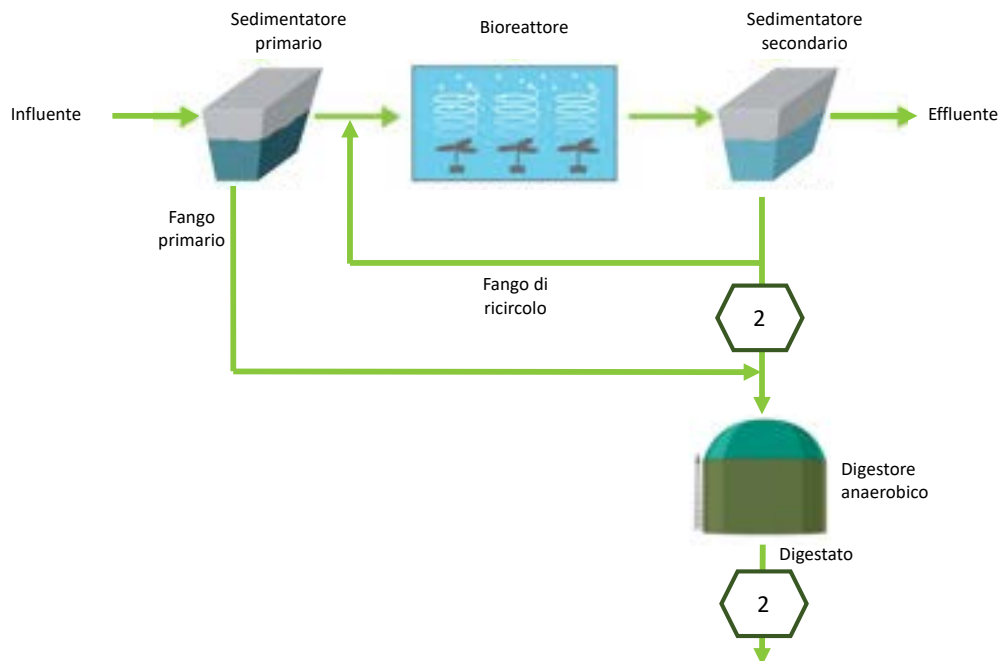


Figura 9. Schema impianto di depurazione. Il numero 2 corrisponde alla localizzazione delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea fanghi

All'interno del comparto di digestione anaerobica, la maggiore degradazione dei fanghi si traduce in una maggiore rimozione di solidi totali o volatili e in un incremento della produzione di metano e biogas.

Le tecnologie di pre-trattamento e di post-trattamento che consentono di ottenere una riduzione della produzione di fanghi applicate alla linea fanghi si basano su trattamenti fisici, chimici e biologici.

3.2.1 Trattamenti fisici

Tra i trattamenti fisici è possibile distinguere i seguenti che possono essere applicati come pre-trattamenti della digestione anaerobica: **ultrasuoni**, **centrifuga disintegratrice** e **omogeneizzazione ad alta pressione**.

Trattamento ad ultrasuoni

Il trattamento ad **ultrasuoni** è stato, nel corso degli ultimi anni, ampiamente applicato a scala reale, soprattutto come pretrattamento della digestione anaerobica, con benefici per la produzione di biogas. Analogamente a quanto descritto per l'applicazione in linea acque, l'utilizzo degli ultrasuoni in linea fanghi consente di ottenere la disgregazione dei fiocchi, la solubilizzazione della sostanza organica, il danneggiamento delle cellule batteriche ed un aumento della biodegradabilità del fango.

In genere, il pretrattamento ad ultrasuoni viene eseguito con una frequenza variabile tra 9 e 41 kHz (generalmente 20 kHz) per una durata variabile da diversi secondi fino a 2.5 ore (generalmente meno di un'ora) con una rimozione dei solidi volatili del 9-36% ed un incremento della produzione di metano/biogas variabile dal 24 al 138% [10,30,31]. I principali parametri che influenzano il processo sono: 1) l'energia applicata: all'aumentare dell'energia applicata aumenta l'effetto di disintegrazione del fango; 2) la frequenza degli ultrasuoni: le basse frequenze sono più efficaci e 3) le caratteristiche del fango: buon effetto su fanghi biologici secondari; effetto nullo se applicati a fanghi biologici primari.

Molteplici sono i sistemi disponibili in commercio tra cui GSD (VTA, Austria), Sonix™ (Sonico, Regno Unito), Sonolyzer™ (Ovivo, Regno Unito), Biosonator (Ultrawaves, Germania), smart DMS (Weber Ultrasonics, Germania), Iwe.Tec (Germania) e Hielscher™ (Germania). La principale differenza tra queste tecniche è il design del sonotrodo che trasferisce l'energia alla fase liquida [32].

Gli ultrasuoni sono stati applicati in diversi impianti di trattamento di acque reflue variando da una capacità di trattamento di 50,000 sino a 750,000 abitanti equivalenti. Xie et al. [30] hanno studiato gli effetti del trattamento con ultrasuoni presso un impianto a scala reale in Singapore come pretrattamento per la digestione anaerobica al fine di incrementare la produzione di biogas e ridurre il volume di fanghi da smaltire. Gli ultrasuoni sono stati applicati con una frequenza di 20 kHz e con una portata di 200 m³ al giorno (percentuale di fango inviata all'ultrasuoni non specificata). I risultati ottenuti, a fronte di un consumo di energia giornaliero pari a 288 kWh, hanno evidenziato una riduzione della produzione di fanghi pari al 22% che, in condizioni ottimali, raggiunge anche il 30% e un incremento della produzione di biogas pari al 45%. Hogan et al. [33] hanno valutato l'applicazione degli ultrasuoni presso diversi impianti di trattamento a scala reale: Regno Unito, Svezia, Stati Uniti d'America e Australia. Anche in questo caso, gli ultrasuoni, realizzati secondo la tecnologia Sonix™ e con una frequenza pari a 20 kHz, sono stati utilizzati come pretrattamento per i fanghi secondari e, in alcuni casi, per fanghi ispessiti prima della digestione anaerobica. I risultati hanno evidenziato una rimozione significativa dei solidi volatili variabile dal 54 al 70% con un incremento del 50% nella produzione di biogas e un effetto positivo sulla disidratabilità dei fanghi.

Tra le varie tecniche, GSD (VTA, Austria) ad oggi vanta più di 50 applicazioni a scala reale in tutto il mondo. Si tratta di un reattore al cui interno sono installati oscillatori ultrasonici, ciascuno dotato di due testine oscillanti con potenze del risonatore variabili fino a 4000 Watt e frequenze tra 20 kHz e 1.6 MHz (Figura 10). Il miscelatore centrale, invece, ha una potenza pari a 4 kW.



Figura 10. Caratteristiche e componenti del sistema GSD [34]

Le diverse applicazioni a scala reale hanno evidenziato i numerosi vantaggi di questa tecnologia:

- Supporto dell'idrolisi biologica del fango: i composti organici complessi presenti nel fango sottoposto al trattamento ad ultrasuoni vengono degradati in composti organici più semplici;
- Riduzione della sostanza organica nei fanghi di depurazione fino al 25%;
- Aumento della produzione di biogas fino al 30%;
- Riduzione della quantità di fanghi prodotti fino al 20% ed oltre;
- Aumento del contenuto di sostanza secca in uscita dal comparto di disidratazione dei fanghi fino al 15%;
- Riduzione del consumo di flocculanti e di reattivi chimici fino al 30%.

In Tabella 1, sono riportati i dati applicativi di alcuni impianti dove gli ultrasuoni GSD, realizzati dalla società VTA, sono stati implementati a scala reale:

Tabella 1. Impianti a scala reale con sistema GSD [35]

Nome impianto	Potenzialità [AE]	Volume reattore [m ³]	Numero di risonatori	Quantità di fanghi ispessiti trattata [%]	Tempo di permanenza [min]	Produzione di biogas [%]	Produzione di fanghi [%]
Roth (Germania)	65,000	-	5	100%	-	+ 29	-11
AZV Main-Mud-Miltenberg (Germania)	95,000	1.8	6	30 – 50%	90	+20	-13
Moosee (Svizzera)	40,000	-	5	50%	-	+24	-15
Stralsund (Germania)	75,000	-	6	50%	-	+15	
Wildon (Austria)	120,000	-	12	40%	-	+20	-12
Villach (Austria)	200,000	2 x 1.5	10	30-40%	90	+15	-10
Lana (Italia)	27,000	-	5	50%	-	+20	-10
Cesena (Italia)	120,000	-	11	50%	150	+20	-10
Imola (Italia)	90,000	-	10	50%	100	+18	-14
Monguelfo (Italia)	40,000	1.5	4	30 -50%	300	+28	-15

Come si può notare, tutte le applicazioni consentono di ottenere un incremento della produzione di biogas variabile tra il 15 e il 29%, una riduzione della produzione di fanghi del 10-15% a fronte di un tempo di trattamento con ultrasuoni, in genere pari a 90-100 minuti, che in alcuni casi può arrivare fino a 300 minuti.

Trattamento con centrifuga disgregatrice

La **centrifuga disintegratrice** rientra, anch'essa, tra i trattamenti fisici. Si tratta di un sistema di disintegrazione meccanica mediante l'utilizzo di un addensatore centrifugo per l'ispessimento dei fanghi, equipaggiato con un anello meccanico aggiuntivo che rompe i fiocchi di fango e le membrane cellulari, favorendo, quindi, la solubilizzazione della sostanza organica. Come avviene per il trattamento ad ultrasuoni, la disgregazione dei fiocchi e la parziale solubilizzazione del materiale cellulare migliora la degradazione anaerobica del materiale organico riducendo la produzione di secco in uscita e aumentando la produzione di biogas. A scala reale, questo sistema è stato applicato in modalità semi-continua e con una velocità di rotazione variabile tra 2250 e 3140 giri al minuto. I risultati dell'applicazione hanno evidenziato un incremento della produzione di biogas pari al 15-26% [36] e un contenuto di secco del fango disidratato pari a circa il 30%. La potenza stimata per l'utilizzo di una centrifuga disintegratrice varia in base alle specifiche della stessa (formato e capacità di trattamento della macchina) e, in generale, è compresa tra 0.75 e 1.1 kW/m³.

Trattamento con omogeneizzatore ad alta pressione

Un altro trattamento fisico applicato a scala reale è l'**omogeneizzazione ad alta pressione**. Questa tecnologia prevede due componenti principali: la pompa ad alta pressione multistadio e la valvola dell'omogeneizzatore. Il fango viene compresso con una pompa fino a diverse centinaia di bar (150 – 660 bar) e pompato a bassa velocità nell'omogeneizzatore. Il passaggio attraverso la valvola di omogeneizzazione aumenta la velocità del fango fino a 300 m/s. L'aumento della velocità fa sì che la pressione scenda rapidamente al di sotto della tensione di vapore dell'acqua e induce collisioni tra le particelle di fango. Queste sollecitazioni meccaniche provocano la disintegrazione dei fiocchi e la rottura delle cellule. Sebbene questa tecnologia consenta di ottenere fino al 30% di riduzione della produzione di fanghi e un incremento della produzione di biogas pari al 23%, è stata poco applicata a scala reale perché troppo dispendiosa dal punto di vista energetico, variabile tra 0.2 e 0.4 kWh/kg TS [37].

3.2.2 Trattamenti termici

Il **pre-trattamento termico** integrato alla linea di trattamento fanghi, in genere, viene realizzato con temperature tra 165 e 180 °C e una durata variabile da 30 a 60 minuti. Esistono solo poche applicazioni a scala di laboratorio realizzate a temperature inferiori (121 °C). L'aumento di temperatura tende a destrutturare il fiocco di fango, i composti organici extra-cellulari vengono denaturati e si verifica la lisi delle cellule batteriche con un conseguente incremento della sostanza organica biodegradabile. Per temperature di processo fino ai 180°C, è particolarmente favorita l'idrolisi della sostanza organica che, all'interno del comparto di digestione anaerobica, rappresenta lo stadio limitante del processo. L'applicazione del trattamento termico prima del processo di digestione anaerobica presenta diversi vantaggi quali:

- riduzione dei solidi totali con valori variabili tra 7 – 32% [38] e un minor quantitativo di fanghi da smaltire;
- incremento di produzione di metano, che può arrivare fino al 90% [39];
- minori tempi di ritenzione idraulica nel comparto di digestione anaerobica poiché l'idrolisi avviene a monte;
- maggiore concentrazione dei fanghi in alimentazione al digestore anaerobico, traducibile anche in un minor volume necessario per la digestione anaerobica.

Il pre-trattamento termico è stato applicato a scala reale presso molti impianti di depurazione ed è, ad oggi, la tecnologia più utilizzata per ottenere la riduzione della produzione di fanghi all'interno della linea fanghi degli impianti di depurazione.

Il primo impianto di depurazione con pre-trattamento termico del fango, realizzato a scala reale, risale al 1995 in Hamar, Norvegia, ed è relativo all'applicazione del processo Cambi™ che, ad oggi, conta 70 installazioni.

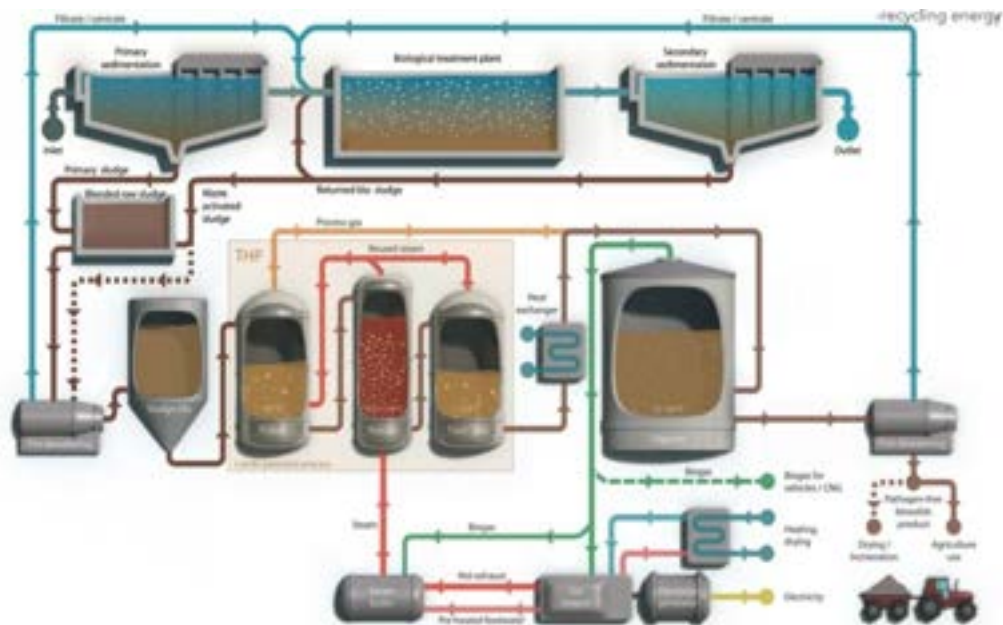


Figura 11. Schema impianto di pre-trattamento del processo Cambi™ integrato in un impianto di depurazione [40]

Il processo Cambi™ (Figura 11) prevede il pre-trattamento termico del fango preventivamente ispessito fino ad avere una concentrazione di solidi totali pari al 16-18%. Questo fango ispessito viene alimentato continuamente al primo reattore (pulper) che ha il compito di omogeneizzare e preriscaldare i fanghi ad una temperatura prossima ai 100 °C, utilizzando il vapore recuperato dall'ultimo reattore (flash tank). Dal pulper, il fango riscaldato viene alimentato in continuo ai reattori secondo un andamento sequenziale: una volta che un reattore si riempie, i fanghi fluiscono nel successivo reattore disponibile e così via. Tipicamente, il processo Cambi™ prevede l'installazione di un numero di reattori variabile da 2 a 5, che lavorano in parallelo, a seconda del volume dei fanghi da trattare, delle dimensioni del reattore e del tempo di ritenzione idraulica.

Quando il reattore è pieno, viene immesso al suo interno del vapore che provoca l'aumento della temperatura da 140 a 165 °C e della pressione che raggiunge circa 6 bar. La durata del processo di idrolisi termica è fissata pari a 20-30 minuti per ciascun reattore, così da garantire la morte dei batteri patogeni.

Dai reattori di idrolisi, i fanghi ormai sterilizzati e idrolizzati vengono inviati al flash tank, che funziona a pressione atmosferica. L'improvvisa caduta di pressione porta a una sostanziale distruzione delle cellule presenti nella frazione organica dei fanghi di depurazione. Il vapore generato dall'abbassamento di pressione viene recuperato e inviato al pulper per preriscaldare i fanghi in ingresso. Infine, in uscita dal flash tank, i fanghi vengono raffreddati alla temperatura tipica per la digestione anaerobica, in scambiatori di calore, e alimentati ai digestori anaerobici.

Il processo Cambi™ consente di ottenere un incremento fino al 50% della produzione di biogas e fino al 65% di riduzione del volume di fanghi da smaltire [40].

La tecnologia del pre-trattamento termico dei fanghi è stata commercializzata da diverse società tra cui Veolia, con il trattamento BioThelys™ (7 applicazioni), Kruger-Veolia con Exelys™ (1 applicazione), Sustec con il processo Turbotec (1 applicazione), Eliquo con Lysotherm (1 applicazione) e Biorefinex (1 applicazione) [41].

Analogamente al processo Cambi™, BioThelys™ unisce l'idrolisi termica ("THELYS") alla digestione anaerobica ("BIO") garantendo performance migliorative rispetto alla filiera di trattamento convenzionale. L'idrolisi termica avviene modalità batch ad una temperatura variabile tra 150-180°C, per un tempo compreso tra 30

e 60 minuti e una pressione variabile tra 8 – 10 bar. La digestione anaerobica, invece, avviene a 35- 38 °C per un tempo di residenza idraulica pari a 15 giorni.

In Tabella 2, si riportano i principali parametri operativi della tecnologia BioThelys™ a confronto con la digestione anaerobica mesofila tradizionale.

Tabella 2. Parametri operativi DA vs. BioThelys™ [42]

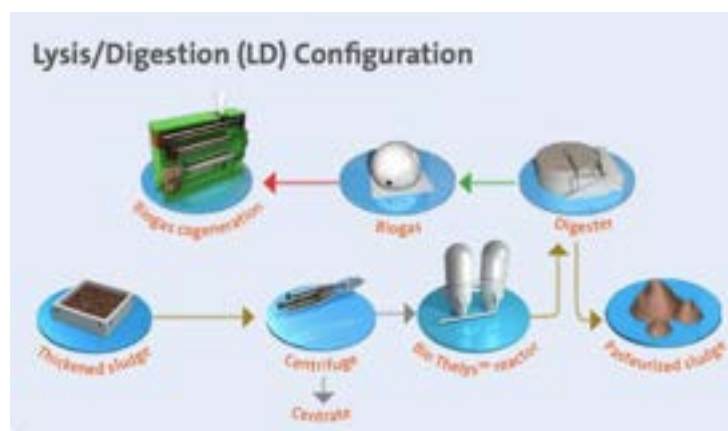
Parametro	Digestione anaerobica mesofila	BioThelys™
Temperatura	35- 38 °C	35- 38 °C
HRT	21 giorni	15 giorni
Concentrazione del fango alimentato	5 – 6 %	10 – 13 %
Volume (m³) per 10t DS/d	3500 - 4200	1150 - 1500
Carico volumetrico	1.5 – 2.0 kg VS/ m³ d	4.0 – 7.0 kg VS/ m³ d
Riduzione solidi totali fango secondario	20 – 25%	40 – 45%
Riduzione solidi totali fango misto	30 – 35%	45- 50%

Il processo BioThelys™ consente di:

- ridurre la quantità di solidi sospesi fino al 45% su fango biologico e al 50% su fango misto;
- incrementare la produzione di biogas per un valore compreso tra il 30 e il 50%.
- incrementare la biodegradabilità del fango;
- incrementare la disidratabilità del fango con una riduzione del volume di fanghi da smaltire pari a circa il 25%;
- accelerare la metanogenesi.

Il processo BioThelys™ può operare secondo tre configurazioni (Figura 12):

- Lisi/Digestione (LD): il processo di idrolisi termica è realizzato su una parte o su tutto il fango prima della digestione anaerobica
- Lisi parziale/Digestione (Partial LD): l'idrolisi termica avviene solo per il fango biologico (secondario)
- Digestione/Lisi/Digestione (DLD): questa configurazione è un brevetto Veolia. L'idrolisi termica è applicata a tutto il fango in uscita dal digestore 1. Successivamente, il fango viene raffreddato e inviato al secondo comparto di digestione anaerobica. Questa configurazione consente di ottenere fino all'80% in più di produzione di biogas e di elettricità con oltre il 45% di riduzione della quantità di fanghi [42].



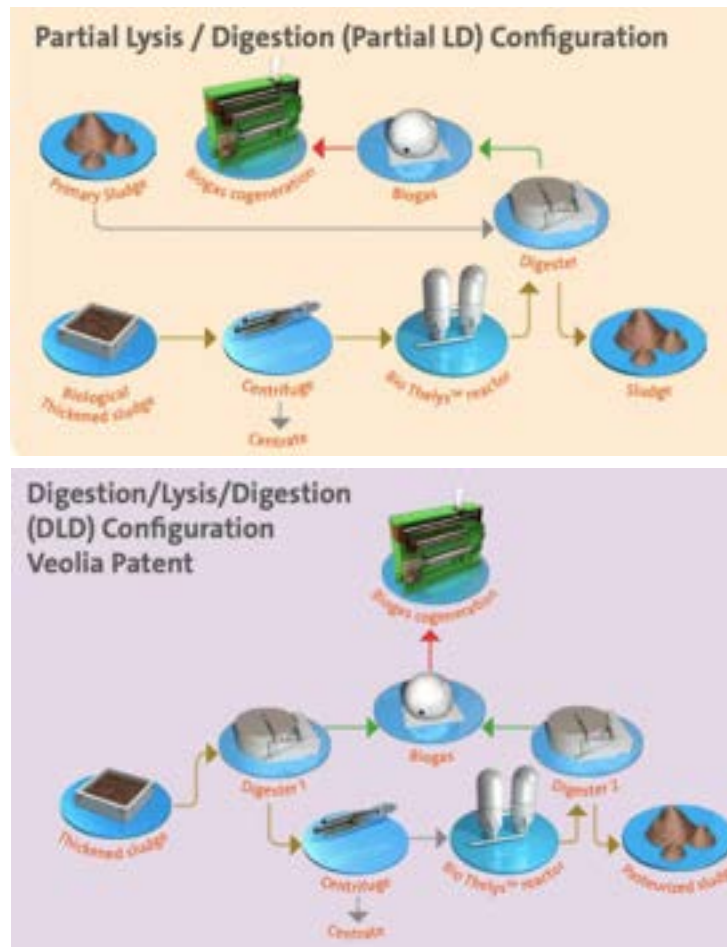


Figura 12. Possibili configurazioni del processo BioThelys™ [43]

Tra le varie applicazioni, la tecnologia BioThelys™ è stata implementata nel 2012 presso l'impianto di depurazione di Monza, avente una capacità di trattamento pari a 790,000 AE con una produzione di 10,220 tSS all'anno (28,000 kg SS/d). L'applicazione del processo BioThelys™ ha previsto l'inserimento di due reattori di idrolisi di volume ciascuno pari a 12.5 m³ e l'utilizzo di un digestore anaerobico mesofilo da 7,000 m³. I risultati hanno evidenziato un incremento della biodegradabilità dei SSV che si è tradotto in un incremento di circa l'80% della produzione di biogas (produzione giornaliera di biogas: 13,500 Nm³/d), di cui il 35% viene utilizzato per la lisi termica, e una riduzione del 45% della massa di fanghi da smaltire (fanghi prodotti al giorno: 22,000 kgSS/d).

Il processo Exelys™ rappresenta la versione in modalità continua del processo BioThelys™, che, come descritto sopra, è un processo batch. La Figura 13 riporta lo schema impiantistico.

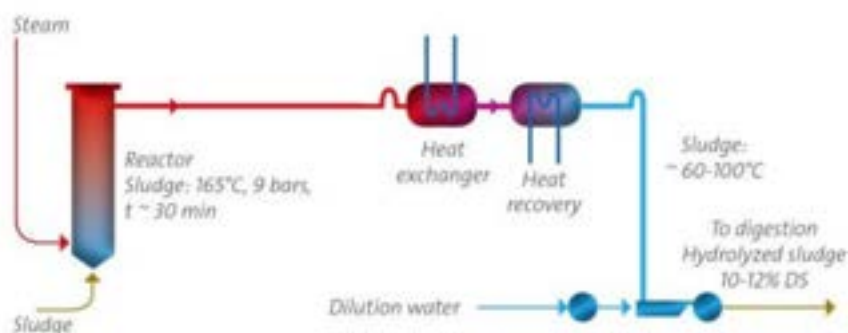


Figura 13. Schema del processo Exelys™ [43]

Analogamente al processo BioThelys™, mediante l'applicazione della tecnologia Exelys™ è possibile ottenere una riduzione della produzione di fanghi variabile dal 5 al 35% ed un incremento della produzione di biogas variabile dal 30 al 50%.

Il processo TurboTec® sviluppato da Sustec (Figura 14) utilizza, come per i processi descritti in precedenza, il riscaldamento diretto mediante iniezione di vapore. In questo processo, il fango idrolizzato viene raffreddato in uno scambiatore di calore (a 105 °C) e quindi miscelato con il fango ispessito (7-14% TSS) dal miscelatore brevettato Mobius per preriscaldare il fango grezzo. L'unità di miscelazione è in grado di separare i fanghi idrolizzati fluidizzati e i fanghi grezzi più densi in base alla loro diversa viscosità. La frazione meno densa (fanghi idrolizzati) viene deviata direttamente al digestore, mentre la frazione più densa, contenente una miscela di fiocchi di fango non idrolizzati e fiocchi di fango grezzo non trattato, viene deviata al reattore di idrolisi.

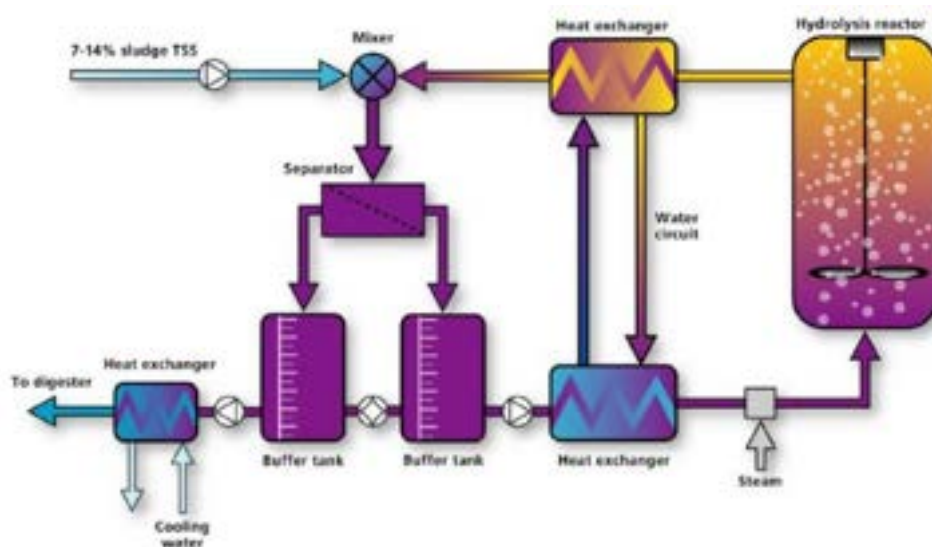


Figura 14. Schema del processo TurboTec® [44]

L'idrolisi della biomassa dei fanghi biologici produce fino al 35% in più di biogas all'interno del comparto di digestione anaerobica, mentre la disidratazione finale viene migliorata fino a ottenere più del 30% di TS.

3.2.3 Trattamenti termochimici

Carbonizzazione idrotermica

Negli ultimi anni, il processo termochimico di carbonizzazione idrotermica (hydrothermal carbonization, HTC) ha assunto una notevole rilevanza nel trattamento dei fanghi di depurazione. Il processo HTC può essere implementato a scala reale come pre-trattamento o post-trattamento della digestione anaerobica [45]. Il processo HTC è un processo termochimico per la conversione di biomasse residuali a condizioni di temperatura comprese tra 180 – 250 °C e pressioni di 10 – 50 bar così da operare in un ambiente di reazione caratterizzato da acqua allo stato liquido. L'HTC è un processo esotermico, per cui, una volta raggiunta la temperatura a cui il processo si attiva, la reazione viene poi sostenuta dall'energia liberata durante il processo stesso [46]. Durante la reazione HTC, acqua, anidride carbonica e altri composti vengono scissi dalla biomassa generando un solido carbonioso, chiamato idrochar, con caratteristiche molto simili alla lignite, e un residuo liquido, chiamato HTC liquor, ricco di nutrienti. Il vantaggio di tale tecnologia, rispetto ad altre, deriva dal fatto che il processo avviene in acqua liquida per cui la carbonizzazione idrotermica è idonea a trattare anche biomasse con un alto livello di umidità, senza che esse debbano essere preventivamente disidratate e/o essiccate. Il processo HTC è implementato a scala reale da diverse aziende tra cui TerraNova Energy GmbH (Germania), Ingelia (Spagna), AVA CO₂ (Svizzera) e Carborem (Italia), sia per il trattamento di fanghi da

depurazione che della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) e di verde da manutenzione urbana e forestale.

Il primo impianto con un processo continuo di carbonizzazione idrotermica dei fanghi biologici è stato realizzato da TerraNova Energy GmbH in Cina. Il processo TerraNova® Ultra prevede la carbonizzazione dei fanghi biologici per una durata pari a due-tre ore, ad una temperatura di circa 200 °C ed una pressione variabile da 20 a 35 bar. Secondo lo schema di processo, i fanghi di depurazione disidratati (contenuto in materia secca: 5-30%) vengono preriscaldati in uno scambiatore di calore. In un reattore a pressione riscaldato esternamente con olio diatermico viene aggiunto un catalizzatore e in poche ore viene generata una sospensione di idrochar. La miscela in uscita di idrochar e acqua di processo viene raffreddata in uno scambiatore di calore (che cede il calore necessario al preriscaldamento dei fanghi) e l'HTC liquor viene allontanato mediante una filtropressa per produrre idrochar con un tenore di sostanza secca tra il 65% e il 70%, che può essere utilizzato come combustibile solido. L'HTC liquor, invece, contiene preziosi nutrienti come il fosforo e l'azoto che possono essere recuperati per produrre fertilizzanti. I vantaggi derivanti dall'utilizzo di questa tecnologia sono:

- riduzione del volume di fanghi da smaltire di oltre i due terzi
- consumo energetico dell'80% inferiore rispetto al trattamento di essiccazione
- incremento della produzione di biogas pari al 10%
- recupero del fosforo via processo integrato.

L'energia termica ed elettrica utilizzata per il processo TerraNova® Ultra può essere stimata, rispettivamente, pari a 100 kWh_{heat} e 15 kWh_{el} per tonnellata di fango biologico trattato. Di contro, invece, il risultato finale, quando l'idrochar viene usato come combustibile, è un guadagno energetico di 425 kWh per tonnellata. Utilizzando il sistema TerraNova Energy in un impianto di depurazione per 100,000 AE si possono quindi generare circa 3,400 MWh di energia all'anno che può essere utilizzata per l'autosostentamento energetico dell'intero impianto di depurazione [47].

La società Ingelia, invece, conta la realizzazione di due impianti HTC per il trattamento della FORSU e del verde e due nuovi impianti, commissionati di recente, per il trattamento dei fanghi biologici per i quali non sono ancora disponibili dati sui rendimenti di riduzione dei fanghi e sui consumi energetici.

AVA CO₂, società acquisita nel 2016 da International Power Invest AG, nel 2010 ha realizzato a Relzow, Germania, il primo impianto al mondo a scala industriale del processo HTC. L'impianto, costituito in una prima fase da 2 reattori HTC e, in una seconda fase, da 6 reattori, è stato realizzato per trattare 8,000 tonnellate all'anno di canne da zone agricole lacustri, consentendo di produrre circa 2,664 t/anno di biocarbone.

Di recente, la start up Carborem (Trento, Italia) ha implementato un processo HTC a scala reale per il post trattamento del fango derivante dalla digestione anaerobica di reflui di aziende agro-industriali (industrie del vino, della produzione di distillati alcolici, caseifici, ecc.). La tecnologia, C700 (Figura 15) che opera in continuo, consente la valorizzazione degli scarti organici (fanghi di depurazione, digestato, FORSU, liquami zootecnici) utilizzando un processo termico che opera fino a 200 °C e 20 bar per un tempo di trattamento inferiore a 60 minuti. Tale processo consente di ottenere HTC liquor, che può essere utilizzato per la produzione di biogas, e un solido sterile, l'idrochar, utilizzabile come ammendante o come combustibile in impianti esistenti. I risultati dell'applicazione della tecnologia C700 hanno mostrato una riduzione pari al 43% di solidi sospesi totali (concentrazione di TSS prima del processo HTC: 44.5 g/L – dopo HTC: 25.1 g/L) con un impatto positivo sui costi di trasporto e di smaltimento e, utilizzando il liquido HTC, una produzione di biogas in digestione anaerobica raddoppiata rispetto all'utilizzo dei soli reflui agro-industriali. Di contro, il consumo elettrico e quello termico, per un quantitativo di fanghi trattati pari a 760 litri, ammonta, rispettivamente a 3.5 kWh e 6.5 m³ di CH₄ [48].



Figura 15. Schema concettuale del processo C700 [46]

3.2.4 Idrolisi termochimica a bassa temperatura (< 100°C)

I trattamenti di idrolisi termochimica uniscono l'utilizzo della temperatura (< 100 °C) a quello dei chemicals e, implementati come pre-trattamento della digestione anaerobica, perseguono l'obiettivo di ridurre in maniera significativa la produzione di fanghi, incentivando, al contempo, la produzione di biogas.

Il processo NewLisi è un'idrolisi termochimica a bassa temperatura (fino a 90 °C) e pressione atmosferica che opera secondo un processo continuo. Dopo una separazione meccanica con pretrattamenti di triturazione o vagliatura, se necessari, il fango viene inviato ad un reattore dove avviene un'ossidazione acida. In questo stadio di trattamento il pH è tra 1.0 e 3.0 e il potenziale di ossido-riduzione ORP è maggiore di 250 mV. L'ossidazione acida può avvenire mediante il dosaggio di diversi acidi tra cui HCl oppure H₂SO₄. Successivamente, avviene un'ossidazione alcalina, dove il pH viene incrementato fino a raggiungere un valore compreso tra 8.0 e 12.0 e l'ORP risulta inferiore a -50mV. L'ossidazione alcalina, invece, avviene mediante l'utilizzo di soluzioni basiche quali, ad esempio, NaOH. Entrambe le fasi di ossidazione avvengono ad una temperatura compresa tra 70 e 90 °C e a pressione atmosferica. Il fango in uscita dal comparto di ossidazione alcalina viene inviato, poi, ad un terzo reattore dove avviene la neutralizzazione e il pH viene riportato a valori compresi tra 6.0 e 8.0. A questo punto del processo di trattamento, il fango idrolizzato viene inviato alla sezione di disidratazione e al successivo smaltimento, mentre l'eluato viene ricircolato in testa all'impianto. In alternativa, l'eluato può essere inviato al comparto di digestione anaerobica per incrementare la produzione di biogas. Il processo NewLisi consente di disgregare il fiocco di fango promuovendo, quindi, la lisi cellulare, di favorire il rilascio di acqua intracellulare e di ottenere un'elevata solubilizzazione del fango.

Il processo NewLisi consente di ridurre fino al 75% i quantitativi di fanghi da smaltire con una conseguente riduzione dei costi di smaltimento. Inoltre, negli impianti dove è presente il comparto di digestione anaerobica, è possibile ottenere un incremento della produzione di biogas di oltre il 40% [49].

NewLisi è stato applicato a scala reale presso l'Acquedotto del Fiora, un impianto di depurazione di reflui civili con potenzialità pari a 100,000 AE senza il comparto di digestione anaerobica. Il risultato dell'applicazione ha evidenziato una riduzione del 70% circa dei fanghi da smaltire. Nel caso, invece, dell'applicazione presso l'Acquedotto Pugliese, avente un potenziale pari a 195,000 AE e dotato di comparto di digestione anaerobica, la riduzione della produzione di fanghi è risultata pari al 64% e l'incremento della produzione di metano pari a circa il 44%.

3.2.5 Trattamenti chimici

Il trattamento con **ozono** è, senza dubbio, il pre-trattamento di ossidazione più comunemente utilizzato nella linea di trattamento dei fanghi [50]. Oltre al suo potere ossidante, l'ozono è un metodo di trattamento *environmental-friendly* poiché non produce sottoprodotti o residui che possano nuocere all'ambiente. Per tale ragione, spesso viene preferito rispetto ad altri agenti ossidanti come il cloro. Tuttavia l'ozonolisi spesso

non è tra le tecnologie scelte per l'applicazione a scala reale, a causa dell'elevato costo di produzione dell'ozono.

A differenza dell'ossidazione aerobica che avviene in linea acque, l'applicazione dell'ozono nel comparto di trattamento fanghi consente un recupero energetico del contenuto organico del fango mediante la produzione di metano. Il pre-trattamento del fango con ozono migliora l'idrolisi della digestione anaerobica consentendo, quindi, a parità di degradazione, una riduzione dei tempi di ritenzione dei fanghi all'interno del digestore e una considerevole riduzione della produzione di fanghi.

In molti studi realizzati sia a scala di laboratorio che pilota, l'ozonolisi, utilizzata come pre-trattamento della digestione anaerobica, ha evidenziato un miglioramento molto più significativo della riduzione della produzione di fanghi rispetto ai trattamenti fisici, termici e termochimici [51]. I risultati sperimentali hanno evidenziato che, aumentando la dose di ozono, aumenta il grado di solubilizzazione e disintegrazione della sostanza organica. Tuttavia, in caso di sovradosaggio di ozono, la solubilizzazione viene ridotta a causa dell'ossidazione dei composti solubilizzati e aumenta la produzione di frazioni organiche solubili inerti [52]. La dose ottimale di ozono per l'ossidazione dei fanghi di supero e l'utilizzo dell'ozono come pre-trattamento della digestione anaerobica varia tra 0.02 e 0.87 kg O₃/kg TS.

Un'applicazione del pretrattamento con ozono a scala reale è stato riportata nello studio condotto da Sievers et al. [53] dove l'impianto di ozono (Wedeco, Xylem) è stato integrato all'interno del comparto di trattamento fanghi dell'impianto di depurazione di Schermbeck (17,000 AE), Germania. I risultati hanno mostrato che con un dosaggio di ozono pari a 0.05 kg O₃/kg TSS_{trattati} è stato possibile ottenere una riduzione della produzione di fanghi pari al 55%. Riduzioni maggiori della produzione di fanghi sono state riscontrate per applicazioni a scala di laboratorio e a scala pilota raggiungendo percentuali fino al 68% [54].

Risultati sperimentali hanno evidenziato, oltre ad una riduzione della quantità di fanghi disidratati maggiore del 70% e una riduzione del contenuto di acqua negli stessi pari al 12%, anche la capacità dell'ozonolisi di incrementare la biodegradabilità degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) migliorando, quindi, la loro rimozione all'interno del comparto di digestione anaerobica [50].

3.2.6 Trattamenti biologici

Il pre-trattamento biologico della digestione anaerobica comunemente utilizzato per ridurre la produzione di fanghi è un trattamento a doppio stadio di temperatura, chiamato TPAD (Temperature-phased anaerobic digestion). Questo trattamento combina uno step termofilo, con tempi di ritenzione bassi, ad uno step mesofilo, dove i tempi di ritenzione sono maggiori [55,56]. Il processo TPAD consente di separare la fase iniziale del processo di digestione anaerobica ovvero l'idrolisi, l'acidogenesi e l'acetogenesi, dalla fase di metanogenesi. In questo modo, ciascun digestore può lavorare nelle condizioni tali da garantire le migliori performance di ciascuna fase del processo di digestione anaerobica consentendo di ottenere una riduzione della produzione di fanghi maggiore rispetto al trattamento convenzionale di digestione anaerobica.

La temperatura nel digestore di pre-trattamento è, generalmente, compresa tra 60 – 70 °C con un tempo di ritenzione variabile tra 9 – 48 ore [57,58]. Nonostante sia stato abbondantemente testato in laboratorio, il processo TPAD con sequenziamento termofilo-mesofilo non è comune in Europa. Nel 1997 sono stati segnalati 10 impianti in Germania che utilizzano TPAD di cui solo 5 ad alta efficienza [59], per i quali non è stato possibile rilevare se ancora sono funzionanti o meno. Più recentemente un impianto in Norvegia ha combinato il processo TPAD con quello di idrolisi termica (CAMBI) [60], e altri impianti sono stati realizzati negli Stati Uniti [61]. I risultati dell'applicazione hanno evidenziato un incremento della produzione di biogas variabile tra il 7 – 11% e una riduzione della produzione di fanghi variabile dal 26 al 50%.

3.3 Vantaggi e svantaggi delle tecnologie descritte

Si riporta, di seguito, una tabella riassuntiva delle tecnologie descritte nei paragrafi precedenti dove vengono sottolineati i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna tecnologia integrata alla linea acque (Tabella 3) e integrata alla linea fanghi (Tabella 4).

Tabella 3. Vantaggi e svantaggi delle tecnologie di riduzione dei fanghi integrate alla linea acque

Tecnologie		Vantaggi	Svantaggi
Trattamenti meccanici	Ultrasuoni	Bassi costi di investimento Processo applicato a scala reale Non necessita di ampie superfici Nessuna produzione di odori	Erosione dei sonotrodi Elevati costi di gestione Incremento della concentrazione di COD nell'effluente
	Omogeneizzazione ad alta pressione	Migliora la sedimentabilità del fango	Costi di investimento e di gestione elevati Incremento della concentrazione di COD nell'effluente Processo applicato a scala pilota
Trattamenti chimici	Ozonizzazione	Migliora la sedimentabilità del fango Processo applicato a scala reale	Costi di investimento e di gestione elevati Incremento della concentrazione di COD solubile inerte nell'effluente e di fosforo
	Clorazione	Bassi costi di investimento e di gestione in confronto all'ozonizzazione	Formazione di sottoprodotti alogenati Peggioramento della sedimentabilità del fango Incremento della concentrazione di COD nell'effluente Processo applicato a scala pilota
	Fenton	Bassi costi di investimento e di gestione in confronto all'ozonizzazione	Incremento della concentrazione di COD nell'effluente Processo applicato a scala pilota
Trattamenti biologici	Cannibal	Processo applicato a scala reale	Aumento della concentrazione di fosforo nell'effluente (per il Cannibal) Sono necessarie ulteriori applicazioni a scala reale
	UMass	Facilita di upgrading di impianti pre-esistenti	
	UTN	Costi contenuti di realizzazione e di gestione Migliora la sedimentabilità del fango Ostacola la crescita di filamentosi	
Trattamenti termici		Migliora la sedimentabilità del fango Ostacola la crescita di filamentosi e la formazione di schiume	Costi di investimento e di gestione elevati Incremento della concentrazione di COD nell'effluente Processo applicato a scala pilota Problemi di corrosione Produzione di odori
Trattamenti elettrici		Migliora la sedimentabilità del fango Non necessita di ampie superfici	Costi di investimento e di gestione elevati Incremento della concentrazione di COD nell'effluente Erosione degli elettrodi Processo applicato a scala di laboratorio

Tabella 4. Vantaggi e svantaggi delle tecnologie di riduzione dei fanghi integrate alla linea fanghi

Tecnologie integrate alla linea fanghi			
Tecnologie	Vantaggi	Svantaggi	
Trattamenti fisici	Ultrasuoni	Bassi costi di investimento Processo applicato a scala reale Non necessita di ampie superfici Nessuna produzione di odori Migliora la disidratabilità del fango	Erosione dei sonotrodi Elevati costi di gestione
	Omogeneizzazione ad alta pressione	Migliora la sedimentabilità del fango per alta intensità di disaggregazione Brevi tempi di contatto Favorisce la diminuzione della viscosità dei fanghi facilitandone la miscelazione ed il pompaggio	Deterioramento delle apparecchiature Costi di investimento e di gestione elevati Nessuna inattivazione dei patogeni
Trattamenti chimici	Ozonizzazione	Migliora la sedimentabilità del fango Processo applicato a scala reale Favorisce la diminuzione della viscosità dei fanghi facilitandone la miscelazione ed il pompaggio	Costi di investimento e di gestione elevati Incremento della concentrazione di azoto e fosforo nelle acque madri Per elevati dosaggi di ozono, peggioramento della disidratabilità
Trattamenti biologici	TPAD	Inattivazione dei patogeni Migliora la disidratabilità del fango Bassi costi di gestione	Costi di investimento elevati Produzione di odori
Trattamenti termochimici	NewLisi HTC	Processo applicato a scala reale Inattivazione dei patogeni Migliora la disidratabilità del fango Sinergie termiche per l'aumento della produzione di biogas	Corrosione e deterioramento delle apparecchiature Elevati costi di funzionamento e di manutenzione Elevato consumo di reagenti chimici Produzione di odori
Trattamenti termici	Cambi	Processo applicato a scala reale Inattivazione dei patogeni Migliora la disidratabilità del fango Sinergie termiche per l'aumento della produzione di biogas	Problemi di corrosione Produzione di odori

4 Acquisizione dati sui costi di investimento e di esercizio

Obiettivo dello step 3 è l'acquisizione di dati su costi di investimento e di esercizio delle tecnologie integrate alla linea acque e alla linea fanghi descritte nei paragrafi precedenti. A tal fine sono state considerate solo le tecnologie applicate a scala reale per le quali è possibile ottenere dati affidabili relativi ai costi di investimento e di esercizio.

La raccolta dei dati è stata eseguita mediante due modalità:

- Invio di questionario online alle aziende produttrici delle relative tecnologie;
- Analisi di dati di letteratura riferiti ad articoli scientifici e divulgazioni commerciali.

Per quanto attiene alla prima modalità di raccolta dati, il questionario, dal titolo "Economic and energy aspects of sludge reduction technologies", è stato strutturato in lingua inglese ed online mediante il sito SurveyMonkey. All'interno del questionario è stato chiesto di indicare il nome della tecnologia di trattamento implementata, il numero di installazioni realizzate, se si trattasse di una tecnologia integrata alla linea acque, alla linea fanghi o ad entrambe, la riduzione media della produzione di fanghi ottenuta e i costi medi di investimento ed esercizio. Il questionario è stato poi inviato ad una mailing list di contatti mediante il seguente link: <https://it.surveymonkey.com/r/25FVFG5>.

In generale, le informazioni relative ai costi di investimento ed esercizio di seguito riportati sono stati ottenuti dalla combinazione delle due modalità di raccolta dati.

Trattamento ad ultrasuoni

I costi di investimento di un sistema ad ultrasuoni sono relativi a: sistema di pompaggio per l'alimentazione del fango al reattore ad ultrasuoni, risonatori ad ultrasuoni, miscelatore, reattore di contatto, sistema hardware e software di gestione dell'impianto. Il costo di esercizio dell'impianto può variare al variare della potenzialità dell'impianto stesso, durata di trattamento, del numero di risonatori utilizzati, volume trattato e della concentrazione del fango.

Si riporta, di seguito, l'esempio di implementazione del sistema GDS della società VTA, descritto in precedenza, che presenta un miscelatore centrale di potenza pari a 4 kW e dei risonatori ad ultrasuoni con potenza variabile fino a 4000 Watt. In Tabella 5 viene mostrato il consumo energetico del trattamento ad ultrasuoni, in relazione alla capacità dell'impianto, alla durata del trattamento e al numero di risonatori.

Tabella 5. Stima dei consumi energetici GDS – VTA [62]

Paramento					
Potenzialità dell'impianto [AE]	30,000	35,000	100,000	120,000	220,000
Fango di supero secondario trattato [%]	50 - 60	30 - 40	30	40 - 50	30
Quantità trattata [m³/h]	0.3	0.75	1.0	1.5 - 2.0	1.5
Concentrazione SST [g/L]	60	55	60	55	65
Numero di risonatori	4	5	6	10	12
Durata trattamento [min]	300	120	110	95	80
Apporto energetico [kW/kg SST]	0.35	0.4	0.3	0.35	0.3
Consumo energetico [kWh_e/m³]	6.3	16	18	29 - 38	29

Come si può notare, il consumo energetico varia molto in base alla quantità di fanghi trattata; di contro, l'apporto energetico non presenta una notevole differenza tra un impianto e l'altro o al variare del numero dei risonatori utilizzati.

I costi di investimento sono stimati in relazione alla potenzialità dell'impianto e possono arrivare fino a 7 €/AE per un impianto da 330,000 AE [10,63].

Trattamenti chimici: l'ozonizzazione

I principali costi di investimento del processo di ozonizzazione sono relativi al generatore di ozono, al sistema di pompaggio del fango all'interno del reattore ad ozono, al sistema di iniezione ed alla torre di contatto. I principali costi di esercizio del processo sono relativi ai consumi energetici per il sistema di pompaggio, per l'aerazione e per la produzione dell'ozono.

Tra tutti i costi di esercizio, sicuramente rilevante è il costo associato alla generazione di ozono dato dalla somma del costo dell'energia e dell'ossigeno di alimentazione. In Figura 16 viene mostrata la correlazione tra il costo totale di produzione dell'ozono, dato come somma del costo dell'energia e dell'ossigeno di alimentazione, e la concentrazione di ozono, espressa come % in peso, considerando un costo medio dell'energia pari a 0.08 €/kWh_{el} e un costo medio dell'ossigeno liquido pari a circa 85 €/ton.

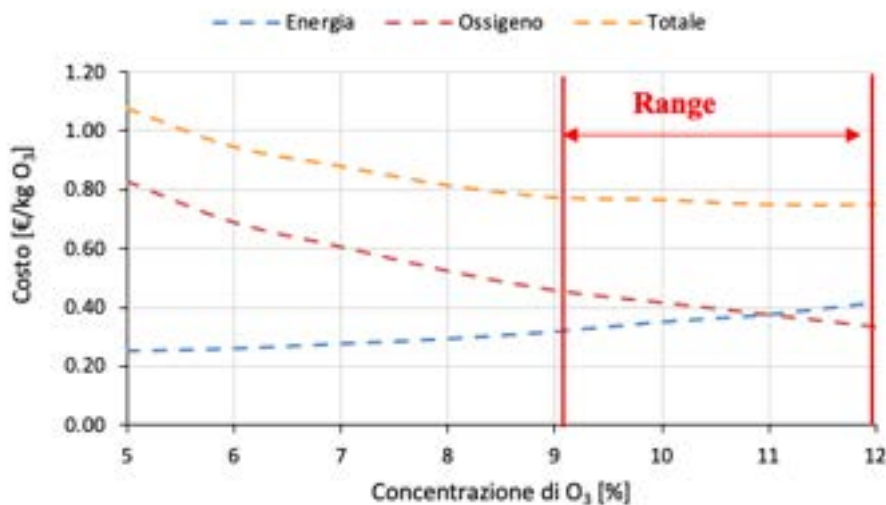


Figura 16. Esempio di costo di produzione dell'ozono (modificato da [64])

La Figura 16 mostra che all'aumentare della concentrazione di ozono, l'energia specifica necessaria per generare l'ozono aumenta mentre il quantitativo di ossigeno liquido richiesto, diminuisce. Quindi, a parità di massa di ozono è richiesta una potenza maggiore. Il consumo di ossigeno, invece, si riduce compensando il costo legato al consumo energetico. Seguendo i due trend, quello relativo al costo dell'energia necessaria per produrre ozono e quello relativo all'ossigeno liquido, è possibile definire un range di produzione ottimale, corrispondente a circa 0.7 €/kg di ozono, che va da una concentrazione di ozono pari al 10% fino al 12%. Per concentrazioni di ozono inferiori all'8%, invece, il costo di produzione aumenta in maniera sostanziale perché il maggior costo dell'ossigeno liquido è di gran lunga superiore al ridotto costo energetico necessario per la generazione di ozono.

Secondo quanto riportato nelle applicazioni del sistema di trattamento ad ozono (Wedeco, Xylem), il costo medio dell'ossigeno è circa pari a 0.11 €/kg O₂ mentre il costo medio dell'energia elettrica è di 0.15 €/kWh_{el} [65]. A partire da un impianto con alimentazione ad ossigeno, per produrre 1 kg O₃/h in condizioni standard di temperatura occorrono circa 9.67 kg O₂/h e 8.9 kWh_{el}. Il costo di produzione di 1 kg/h di ozono è di circa 2.4 €/h ovvero circa 58 €/d. Se, al contrario, si vuole produrre 1 kg O₃/h di ozono a partire da un impianto con alimentazione ad aria, occorrono circa 22 kWh_{el} e il costo di produzione è di circa 3.3 €/h ovvero circa 80 €/d.

Dall'analisi degli studi di letteratura relativi all'applicazione del processo di ozonizzazione integrato alla linea acque, è emerso che il dosaggio specifico di ozono varia tra 0.02 g O₃/kg TSS_{fango-trattato} fino ad un massimo di 1.0 g O₃/kg TSS_{fango-trattato}. Il costo di produzione dell'ozono, inteso come somma del costo dell'energia e dell'ozono di alimentazione a partire da ossigeno, varia, quindi, da 0.05 €/kg TSS_{fango-trattato} h fino a 2.4 €/kg TSS_{fango-trattato} h. Il dosaggio specifico di ozono per un trattamento integrato alla linea fanghi, invece, varia da

0.05 g O₃/kg TSS_{fango-trattato} fino ad un massimo di 1.0 g O₃/kg TSS_{fango-trattato}. Per cui il costo massimo ammissibile per la produzione di ozono di un sistema integrato alla linea fanghi è paragonabile a quello integrato alla linea acque.

In generale, l'applicazione dell'ozonolisi come trattamento integrato conviene laddove la riduzione della quantità del fango da smaltire consenta di ottenere un risparmio maggiore rispetto al costo di produzione dell'ozono.

Il processo Biolysis®-O prevede un dosaggio di ozono variabile da 0.13 a 0.23 kg O₃/ kg TS trattati, da cui è possibile ricavare il costo massimo di produzione dell'ozono che è pari a 0.55 €/ kg TS trattati. Da un'analisi economica del Biolysis®-O, condotta per un impianto di depurazione di potenzialità pari a 100,000 AE, è emerso che i costi di investimento e di esercizio della tecnologia [15] sono pari, rispettivamente, a 140 €/ton TSS e 260 €/ton TSS. Il costo complessivo risulta di 400 €/ton TSS, paragonabile a quello di tecnologie di trattamento meccaniche e termiche.

Nello studio condotto da Romero et al. [14], un sistema di generazione di ozono (Wedeco, Xylem) è stato posto sulla linea di ricircolo dei fanghi di un impianto di depurazione con potenzialità pari a 50,000 AE. Lo studio condotto ha evidenziato che il consumo energetico dell'impianto, durante il periodo di funzionamento dell'impianto di ozonolisi, è stato pari a 567036 kWh_{el} mentre il consumo dell'ozono è stato di 77194 kWh, pari a circa il 14% del consumo complessivo di tutto l'impianto. Inoltre, considerando un costo specifico per l'ossigeno pari a 0.05 €/kg O₂ e un costo medio dell'energia elettrica pari a 0.13 €/kWh, il costo specifico di produzione dell'ozono ammonta a 1.8 €/ kg O₃ prodotto (10 kg O₂ e 10 kWh_{el} di energia elettrica per kg O₃ prodotto). Considerando, poi, che la produzione annuale di ozono è pari a 3276 kg O₃, il costo di esercizio del sistema risulta pari a 5897 €/anno.

Trattamenti biologici

Tra le varie tecnologie di riduzione fanghi proposte, i trattamenti biologici sono, sicuramente, quelli meno rilevanti dal punto di vista energetico. Il loro grande vantaggio, infatti, è avere dei costi di esercizio relativamente bassi se confrontati con i trattamenti di riduzione della produzione di fanghi di tipo fisico o chimico. Anche i costi di investimento risultano contenuti, soprattutto se si riesce a convertire volumetrie esistenti in reattori di trattamento fanghi. Per tale ragione, i trattamenti biologici sono di facile implementazione anche in impianti preesistenti.

Per il sistema biologico Cannibal, i costi di investimento includono il costo del sistema di rimozione di sabbie ed inerti (idrociclone e tamburo rotante), il costo per la realizzazione del reattore anaerobico/anossico e il costo del sistema di pompaggio. Il costo di esercizio, invece, è relativo al solo consumo energetico del sistema di pompaggio e miscelazione presente nel comparto di trattamento fanghi. Dall'analisi di letteratura e dalla somministrazione del questionario online, non è stato possibile reperire i costi di investimento e di esercizio. Il detentore della tecnologia ha evidenziato che per un impianto che tratta circa 1.5 MGD (millions of gallons per day) di acque reflue (circa 6000 m³/d) è possibile ottenere un risparmio annuale dei costi di esercizio e gestione dell'impianto pari a circa 200,000 euro.

Per il sistema UTN, invece, durante l'implementazione a scala reale del processo è stata eseguita una stima dei consumi energetici ed un confronto con il consumo relativo al trattamento convenzionale a fanghi attivi. Nella configurazione UTN il consumo di energia specifico rispetto al COD rimosso risulta pressoché simile a quello del trattamento a fanghi attivo convenzionale. Il consumo specifico medio di energia elettrica per AE è pari a 84 kWh_{el}/AE/anno, che risulta essere lievemente inferiore ai 90 kWh_{el}/AE/anno del sistema a fanghi attivi. Da un'analisi, invece, condotta sui singoli comparti analizzando le potenze nominali delle singole apparecchiature elettromeccaniche, le potenze assorbite e il numero di ore di funzionamento al giorno delle singole apparecchiature elettromeccaniche, è emerso che i consumi del processo UTN sono leggermente superiori rispetto al processo convenzionale a fanghi attivi (Figura 17). Tale incidenza maggiore è stata attribuita all'utilizzo del sistema dinamico di ispessimento del fango prima che lo stesso fosse inviato al comparto anaerobico di trattamento fanghi. Infatti, mentre l'ASSR incide per solo il 6% sui consumi totali

dell'impianto, il microfiltro incide per il 31%, a fronte del 24% della stabilizzazione aerobica nella configurazione relativa al periodo precedente l'implementazione del processo UTN.

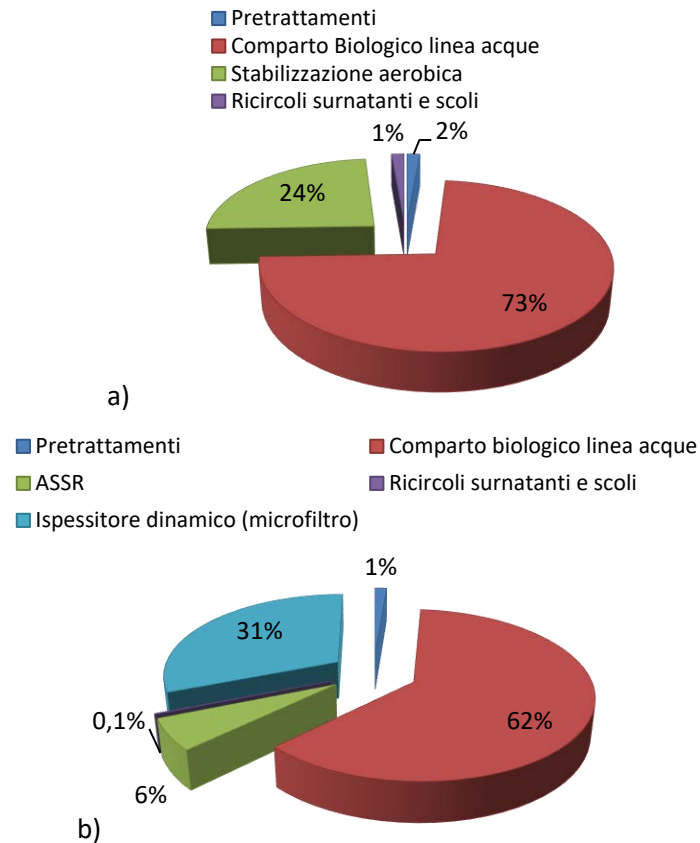


Figura 17. Incidenza percentuale dei diversi comparti sul consumo energetico del processo UTN (a) e processo a fanghi attivi (b) [26]

Infine, per il processo TPAD i costi di investimento sono relativi alla realizzazione del comparto di digestione e al sistema di pompaggio. I costi di esercizio, invece, si riferiscono principalmente al consumo di energia necessaria per scaldare i reattori termofili e mesofili. Viste le scarse applicazioni del processo, è stato possibile trovare pochi dati di letteratura. Krugel et al. [61], nel suo studio, riporta un consumo energetico pari a 0.04 kWh_{el}/kg VS e 0.5 kWh_{el}/kg VS rispettivamente riferiti al consumo di energia elettrica oppure di energia sotto forma di calore a fronte di una degradazione dei VS pari al 45% e un tasso di produzione di biogas pari a 454 Nm³/ton VS_{alimentato}.

Trattamenti termici

Tra le varie tipologie di trattamento proposte, i trattamenti termici hanno sicuramente un costo di investimento considerevole determinato dai reattori, dal sistema di riscaldamento e raffreddamento, dal sistema di pompaggio dei fanghi e dal complesso hardware e software necessario per la gestione del processo. I costi di esercizio sono relativi ai consumi energetici espressi in termini elettrici e di calore.

Proprio per la natura dei trattamenti termici stessi dove il processo di degradazione avviene a temperature elevate, essi vengono elencati tra le tecnologie dispendiose dal punto di vista energetico. Il consumo energetico in termini elettrici, infatti, varia da 7.2 kWh_{el}/m³ fino a 24 kWh_{el}/m³; al contrario, il consumo in termini di calore può arrivare fino a 116 kWh_{heat}/m³.

Nonostante ciò, uno studio condotto da Taboada – Santos et al. [66] evidenzia che i trattamenti termici hanno comunque un impatto positivo, in termini economici, sui costi di gestione dell'intero impianto di depurazione dovuto alla capacità del trattamento termico stesso di auto-sostenersi dal punto di vista energetico e di garantire, in condizioni ottimali di gestione e funzionamento, un surplus di energia utilizzabile all'interno dell'impianto di depurazione.

I trattamenti termici consentono un incremento notevole della produzione di biogas che può arrivare sino al 50%, consentendo quindi un recupero di energia.

Inoltre, alcuni trattamenti, quali ad esempio la carbonizzazione idrotermica (HTC) consentono anche un recupero di materia. La sostanza solida derivante dal processo termico, infatti, può trovare diversi utilizzi come, ad esempio, fertilizzante, materiale adsorbente oppure combustibile. Questi trattamenti, quindi, consentono, oltre alla riduzione della produzione di fanghi anche una valorizzazione degli stessi e un recupero di risorse che, altrimenti, andrebbero inviate a smaltimento con un'incidenza sulle relative voci di costo.

Relativamente al processo HTC, Lucian e Fiori [67] hanno evidenziato un costo di investimento di un impianto in grado di trattare 44,000 ton/anno pari a 1,774,000 € che include i costi per l'acquisto di ciascuna unità di processo, la loro installazione, il trasporto al sito dell'impianto, le spese assicurative e le relative tasse oltre al costo per l'acquisto del suolo, di avviamento e dei lavoratori. Il costo operativo complessivo, invece, ammonta a 833,000 €/anno ed è comprensivo anche dei costi dell'energia termica ed elettrica. Il costo di produzione totale ammonta a circa 157 €/ton di hydrochar secco prodotto, con consumi specifici termici ed elettrici pari a 1170 e 160 kWh/ton di hydrochar secco prodotto.

5 Sintesi delle performance

Viene presentata, di seguito, una sintesi delle performance di tutti i processi di riduzione della produzione di fanghi applicati in maniera integrata alla linea acque (Tabella 6) e alla linea fanghi (Tabella 7).

Obiettivo delle seguenti tabelle riassuntive è paragonare le differenti tecnologie in relazione alla riduzione della quantità di fanghi ottenuta e ai consumi energetici nonché ai vantaggi ottenuti in termini di incremento della produzione di biogas.

Tabella 6. Performance delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea acque

Tecnologia	Substrato	Condizioni di trattamento	Indicatori di performance			Referenze
			Riduzione della produzione di fanghi [%]	Consumo energetico	Costo di Investimento	
Ultrasuoni		20- 40 kHz >90 se c	25 – 78%	2.4 kWh _e /m ³ 28.1 kWh _e /m ³	0.97 €/AE 7 €/AE	[10] [63] [62]
Ozonolisi	Fango secondario	0.01- 0.15 kg O ₃ /kg TS	35 – 45%	30 kWh _e /kg O ₃	45 – 67 €/ton 10 – 30 €/AE	[52][19] [68]
Cannibal		HRT 10 d	20%	N.D.	N.D.	[25]
UTN		HRT 2.5 d	50 – 69%	84 kWh _e /AE	N.D.	[26]

Nd.= non disponibile

Dalla Tabella 6, emerge che la riduzione della produzione di fanghi ottenuta con l'applicazione degli ultrasuoni è di poco superiore a quella ottenuta mediante l'implementazione del processo UTN. L'ozonolisi, invece, consente di ottenere comunque una buona riduzione della produzione di fanghi, ma risulta economicamente meno conveniente rispetto alle precedenti soluzioni.

Dal confronto delle performance delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea acque (Tabella 7), emerge che i processi che consentono una maggiore riduzione della produzione di fanghi sono quelli termici e fisici. In particolare, i processi termici, oltre alla riduzione della produzione di fanghi, favoriscono un incremento della produzione di biogas, che può arrivare fino al 50%. Minore, invece, è l'incremento della produzione di biogas (30%) che può essere ottenuto con i processi di tipo fisico. Il trattamento con ozono, invece, consente comunque una buona riduzione della produzione di fanghi, paragonabile a quella ottenuta con i trattamenti fisici, ma necessita di un maggiore consumo energetico. Infine, il processo biologico TPAD consente di ottenere una discreta riduzione della produzione di fanghi senza però incrementare significativamente la produzione di biogas.

Tabella 7. Performance delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea fanghi

Tecnologia	Substrato	Condizioni di trattamento	Indicatori di performance					AE	Referenze
			Riduzione della produzione di fanghi [%]	Incremento della produzione di biogas [%]	Biogas prodotto [Nm ³ /t VS]	Consumo energetico	Costo di investimento		
Ultrasuoni	Fango misto	20- 40 kHz 90 - 300 sec	10 - 60%	20 - 30 %	442	2.4 kWh _{el} /m ² 28.1 kWh _{el} /m ²	0.97 €/AE 7 €/AE	17,000 330,000	[10] [63]
Centrifuga disintegratrice	Fango misto	2250 rpm 3140 rpm	60%	15 – 26%	362	11.4 kWh _{el} /m ²	1.22 €/AE	650,000 100,000 70,000	[52] [36]
Omogeneizzazione ad alta pressione	Fango misto	150 bar 36 – 38 °C	23 - 57%	30%	478	5.5 kWh _{el} /m ² 0.2 - 0.4 kWh/kg TS	2 €/AE	55,000 100,000	[69] [37]
CAMBI [®]	Fango ispessito	160 – 180 °C 5 – 6 bar 20 – 30 min	65	50	252 - 442	7.2 kWh _{el} /m ² 116 kWh _{term} /m ²	20.38 €/AE	100,000 250,000	[40] [70][71][72]
BioThelys [®]	Fango secondario	150 – 180 °C 8 – 10 bar 30 – 60 min	40 – 60%	30 – 50%	286	N.D.	N.D.	760,000	[73]
Exelys [®]	Fango secondario	130 – 150 °C 8 – 15 bar in continuo	64%	30 – 50%	600	6.4 kWh _{el} /m ²	N.D.	630,000	[74][75] [76]
TurboTec [®]	Fango ispessito	140 °C	41%	35%	350 - 410	52 kWh _{el} /t TS 620 kWh _{term} /t TS	N.D.	300,000	[44]
TerraNova [®] Ultra	Fango ispessito Digestato	200 °C 20 – 35 bar 2 h	75%	10%	N.D.	15 kWh _{el} /t 100 kWh _{term} /t	N.D.	N.D.	[47]
C700	Fango ispessito Digestato	200°C 20 bar < 60 min	43%	50%	N.D.	4.60 kWh _{el} /m ² 8.6 m ³ CH ₄ /t	N.D.	N.D.	[48]
NewLisi	Fango misto	pH 1 – 3 pH 8 – 12 70 – 90 °C	64%	43%	N.D.	N.D.	N.D.	195,000	[49]
Ozonolisi	Fango attivo Digestato	0.01 – 0.15 O ₂ /kg TS 0.02 – 0.87 O ₂ /kg TS	55%	20 – 30 %	550	23.8 kWh _{el} /m ²	18 €/AE	17,000	[69]
TPAD (termofilo – mesofilo)	Fango di supera	60 – 70 °C 9 – 48 h HRT _{termofilo} 9 d HRT _{mesofilo} 18 d	26 - 50%	7 – 11%	454	N.D.	N.D.	N.D.	[57] [58] [61]

N.D. = Data non disponibile

6 Disseminazione

Il contenuto del presente lavoro è stato utilizzato per la redazione di una review dal titolo “Energy consumption of full-scale sewage sludge technologies: a review” inviata alla rivista Critical Review in Environmental Science and Technology (Impact Factor: 8.302) per l’eventuale pubblicazione a seguito di esito positivo del processo di revisione.

Quanto contenuto all’interno del presente documento è stato di supporto alla redazione di materiale di studio per i corsi di laurea in Ingegneria Sanitaria dell’Università di Trento dove sono stati discussi alcuni aspetti descritti nei paragrafi precedenti.

7 Output del progetto

Short list

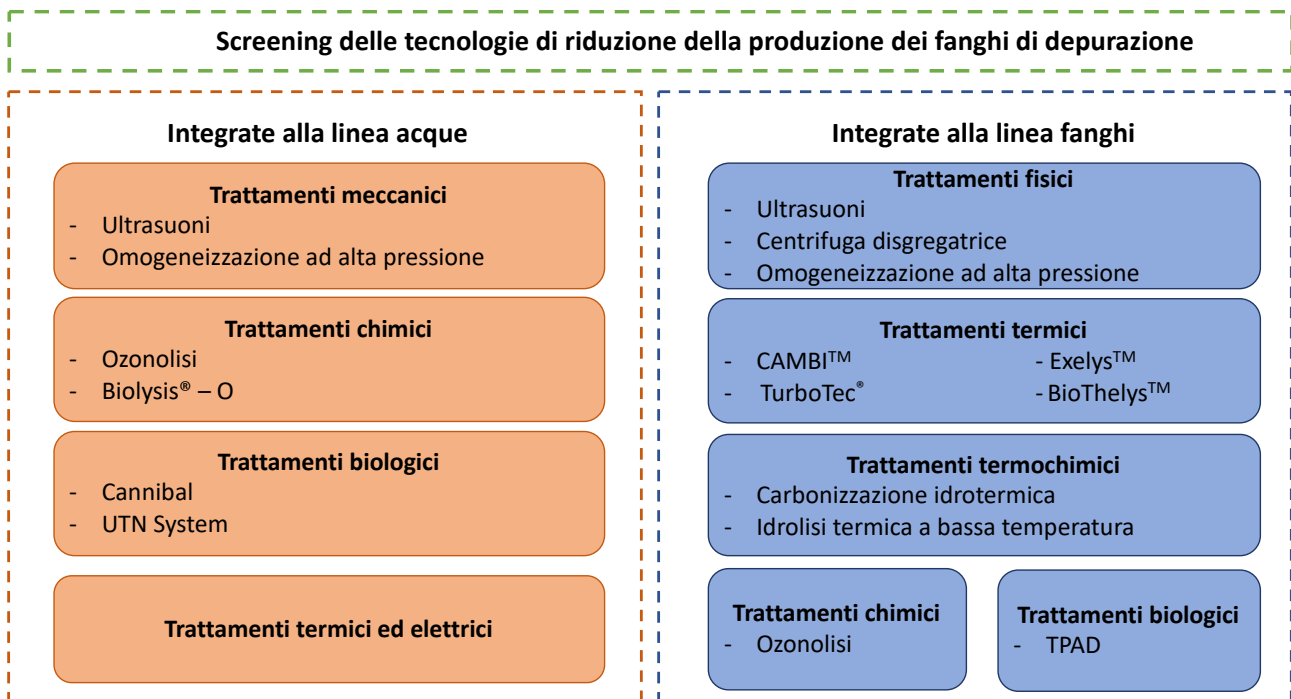


Figura 18. Short list tecnologie

Tabella 8. Short list di dati delle tecnologie integrate alla linea acque

Tecnologia	Substrato	Condizioni di trattamento	Indicatori di performance			Referenze
			Riduzione della produzione di fanghi [%]	Consumo energetico	Costo di Investimento	
Ultrasuoni		20- 40 kHz >90 se c	25 – 78%	2.4 kWh _e /m ³ 28.1 kWh _e /m ³	0.97 €/AE 7 €/AE	[10] [63] [62]
Ozonolisi	Fango secondario	0.01 - 0.15 kg O ₃ /kg TS	35 – 45%	30 kWh _e /kg O ₃	45 – 67 €/ton 10 – 30 €/AE	[52][19] [68]
Cannibal		HRT 10 d	20%	N.D.	N.D.	[25]
UTN		HRT 2.5 d	50 – 69%	84 kWh _e /AE	N.D.	[26]

N.D. = Dato non disponibile

Tabella 9. Short list di dati delle tecnologie integrate alla linea fanghi

Tecnologia	Substrato	Condizioni di trattamento	Indicatori di performance				Costo di investimento	AE	Referenze
			Riduzione della produzione di fanghi [%]	Incremento della produzione di biogas [%]	Biogas prodotto [Nm ³ /t VS]	Consumo energetico			
Ultrasuoni	Fango misto	20- 40 kHz 90 - 300 sec	10 - 60%	20 - 30 %	442	2.4 kWh _{el} /m ³ 28.1 kWh _{el} /m ³	0.97 €/AE 7 €/AE	17,000 330,000	[10] [63]
Centrifuga disintegratrice	Fango misto	2250 rpm 3140 rpm	60%	15 - 26%	362	11.4 kWh _{el} /m ³	1.22 €/AE	650,000 100,000 70,000	[52] [36]
Omogeneizzazione ad alta pressione	Fango misto	150 bar 36 - 38 °C	23 - 57%	30%	478	5.5 kWh _{el} /m ³ 0.2 - 0.4 kWh/kg TS	2 €/AE	55,000 100,000	[69] [37]
CAMBI [®]	Fango ispessito	160 - 180 °C 5 - 6 bar 20 - 30 min	65	50	252 - 442	7.2 kWh _{el} /m ³ 116 kWh _{el} /m ³	20.38 €/AE	100,000 250,000	[40] [70][71][72]
BioThelys [®]	Fango secondario	150 - 180 °C 8 - 10 bar 30 - 60 min	40 - 60%	30 - 50%	286	N.D.	N.D.	760,000	[73]
Exelys [®]	Fango secondario	130 - 150 °C 8 - 15 bar in continuo	64%	30 - 50%	600	6.4 kWh _{el} /m ³	N.D.	630,000	[74][75] [76]
TurboTec [®]	Fango ispessito	140 °C	41%	35%	350 - 410	52 kWh _{el} /t TS 620 kWh _{el} /t TS	N.D.	300,000	[44]
TerraNova [®] Ultra	Fango ispessito Digestato	200 °C 20 - 35 bar 2 h	75%	10%	N.D.	15 kWh _{el} /t 100 kWh _{el} /t	N.D.	N.D.	[47]
C700	Fango ispessito Digestato	200 °C 20 bar < 60 min	43%	50%	N.D.	4.60 kWh _{el} /m ³ 8.6 m ³ CH ₄ /t	N.D.	N.D.	[48]
NewLisi	Fango misto	pH 1 - 3 pH 8 - 12 70 - 90 °C	64%	43%	N.D.	N.D.	N.D.	195,000	[49]
Ozonolisi	Fango attivo Digestato	0.03 - 0.15 O ₂ /Kg TS 0.04 - 0.87 O ₂ /Kg TS	55%	20 - 30 %	550	23.8 kWh _{el} /m ³	18 €/AE	17,000	[69]
TPAD (termofilo - mesofilo)	Fango di supera	60 - 70 °C 9 - 48 h HRT _{termofilo} 9 d HRT _{mesofilo} 18 d	26 - 50%	7 - 11%	454	N.D.	N.D.	N.D.	[57] [58] [61]

N.D. = Dato non disponibile

Pubblicazione scientifica

Il contenuto del presente lavoro è stato utilizzato per la redazione di una review dal titolo “Energy consumption of full-scale sewage sludge technologies: a review” inviata alla rivista *Critical Review in Environmental Science and Technology* (Impact Factor: 8.302) per l’eventuale pubblicazione a seguito di esito positivo del processo di revisione.

8 Conclusioni

I temi riduzione della produzione dei fanghi e consumi energetici negli impianti di depurazione risultano molto discussi all’interno del settore scientifico ed ingegneristico perché da essi deriva un problema sia ambientale che economico. Lo screening delle tecnologie di riduzione della produzione di fanghi integrate alla linea acque e alla linea fanghi ha confermato l’importanza del tema trattato. Numerose, infatti, sono le pubblicazioni scientifiche relative all’argomento.

Considerando le tecnologie di riduzione integrate alla linea acque, l’analisi condotta ha portato all’individuazione di tre tipologie di processi: fisici, chimici e biologici. Tra essi, i processi fisici, in particolare gli ultrasuoni, hanno evidenziato la più elevata riduzione della produzione di fanghi variabile dal 25 al 78%, seguiti, poi, dai trattamenti biologici e infine da quelli chimici. Di contro, il trattamento ad ultrasuoni e l’ozonolisi presentano un consumo energetico maggiore rispetto ai trattamenti biologici che, a differenza di quanto accade nelle tecnologie integrate alla linea fanghi, non può essere compensato con un possibile recupero di energia, in termini di biogas, o di materia. Il processo che, quindi, consentirebbe di perseguire i due obiettivi ovvero, risparmio energetico e riduzione della produzione di biogas, è quello biologico che, tuttavia, necessita di ulteriori applicazioni per una piena definizione dei costi di esercizio e di investimento che, in ogni caso, sono sito specifici.

Differente è, invece, ciò che è emerso dallo screening delle tecnologie integrate alla linea fanghi. Tra tutti i possibili trattamenti, quelli più promettenti sono i trattamenti termici che consentono sia di ottenere un’elevata riduzione della produzione dei fanghi (fino al 75% con la tecnologia Terranova Ultra) sia un considerevole incremento nella produzione di biogas (fino al 50% con il processo BioThelys, Exelys e C700). Quest’ultimo aspetto è di estrema rilevanza. Nonostante i processi termici siano dispendiosi dal punto di vista energetico, la capacità degli stessi di recuperare energia sotto forma di biogas ha un impatto positivo sul costo complessivo di gestione dell’impianto di depurazione. Inoltre, tali processi consentono anche un eventuale recupero di materia favorendo, quindi, la valorizzazione del fango e il suo successivo utilizzo come ammendante, materiale adsorbente o combustibile. Ai trattamenti termici, seguono quelli meccanici che consentono, anch’essi, il raggiungimento di buone percentuali di riduzione della produzione di fanghi e un discreto incremento della produzione di biogas. Tra tutti sono da preferire l’omogeneizzazione ad alta pressione e le centrifughe disintegranti che presentano un consumo energetico minore rispetto agli ultrasuoni. Ultimi, invece, sono i trattamenti biologici che non consentono il raggiungimento di un significativo incremento della produzione di biogas e, per tale ragione, sono economicamente poco sostenibili.

9 Riferimenti bibliografici

1. Semblante, G.U.; Hai, F.I.; Bustamante, H.; Price, W.E.; Nghiem, L.D. Effects of sludge retention time on oxic-settling-anoxic process performance: Biosolids reduction and dewatering properties. *Bioresour. Technol.* **2016**, *218*, 1187–1194.
2. Fytily, D.; Zabaniotou, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2008**, *12*, 116–140.
3. Semblante, G.U.; Hai, F.I.; Ngo, H.H.; Guo, W.; You, S.J.; Price, W.E.; Nghiem, L.D. Sludge cycling between aerobic, anoxic and anaerobic regimes to reduce sludge production during wastewater treatment: Performance, mechanisms, and implications. *Bioresour. Technol.* **2014**, *155*, 395–409.
4. Clarke, R.M.; Cummins, E. Evaluation of “Classic” and Emerging Contaminants Resulting from the Application of Biosolids to Agricultural Lands: A Review. *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.* **2015**, *21*,

- 492–513.
5. Foladori, P.; Andreottola, G.; Ziglio, G. *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*; IWA Publishing, 2010;
 6. Campanelli, M.; Foladori, P.; Vaccari, M. *Consumi elettrici ed efficienza energetica nel trattamento delle acque reflue*. Maggioli Editore; 2013;
 7. Kenway, S.J.; Priestley, a; Cook, S.; Seo, S.; Inman, M.; Gregory, a; Hall, M. Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand. *Water Serv. Assoc. Aust.* **2008**.
 8. Mohammadi, A.R.; Mehrdadi, N.; Bidhendi, G.N.; Torabian, A. Excess sludge reduction using ultrasonic waves in biological wastewater treatment. *Desalination* **2011**, *275*, 67–73.
 9. Zhang, G.; Zhang, P.; Yang, J.; Chen, Y. Ultrasonic reduction of excess sludge from the activated sludge system. *J. Hazard. Mater.* **2007**, *145*, 515–519.
 10. Neis, U.; Nickel, K.; Lundén, A. Improving anaerobic and aerobic degradation by ultrasonic disintegration of biomass. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* **2008**, *43*, 1541–1545.
 11. Ultrawaves.
 12. Onyeche, T.I.; Schlaefel, O.; Sievers, M. Advanced anaerobic digestion of sludge through high pressure homogenisation. *J. Solid Waste Technol. Manag.* **2003**, *29*, 56–61.
 13. Camacho, P.; Geaugey, V.; Ginestet, P.; Paul, E. Feasibility study of mechanically disintegrated sludge and recycle in the activated-sludge process. *Water Sci. Technol.* **2002**, *46*, 97–104.
 14. Romero, P.; Coello, M.D.; Aragón, C.A.; Battistoni, P.; Eusebi, A.L. Sludge Reduction through Ozonation: Effects of Different Specific Dosages and Operative Management Aspects in a Full-Scale Study. *J. Environ. Eng. (United States)* **2015**, *141*, 1–9.
 15. Déléris, S.; Larose, A.; Geaugy, V.; Lebrun, T. Innovative Strategies for the reduction of sludge production un activated sludge plant: BIOLYSIS O and BIOLYSIS E. *Int. IWA Spec. Conf. BIOSOLIDS 2003 Wastewater Sludge as a Ressour.* **2003**, *33*, 55–61.
 16. Dytczak, M.A.; Londry, K.; Siegrist, H.; Oleszkiewicz, J.A. Extracellular polymers in partly ozonated return activated sludge: Impact on flocculation and dewaterability. *Water Sci. Technol.* **2006**, *54*, 155–164.
 17. Egemen, E.; Corpening, J.; Padilla, J.; Brennan, R.; Nirmalakhandan, N. Evaluation of ozonation and cryptic growth for biosolids management in wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* **1999**, *39*, 155–158.
 18. Richardson, E.E.; Edwards, F.; Hernandez, J. Ozonation in Sequencing Batch Reactors for Reduction of Waste Solids. *Water Environ. Res.* **2009**, *81*, 506–513.
 19. Dallera, F. *Ozonolisi dei fanghi biologici : valutazione dei risparmi economico-gestionali.*; 2016; pp. 1–8.
 20. Sakai, Y.; Fukase, T.; Yasui, H.; Shibata, M. An activated sludge process without excess sludge production. *Water Sci. Technol.* **1997**, *36*, 163–170.
 21. Lee, J.W.; Cha, H.Y.; Park, K.Y.; Song, K.G.; Ahn, K.H. Operational strategies for an activated sludge process in conjunction with ozone oxidation for zero excess sludge production during winter season. *Water Res.* **2005**, *39*, 1199–1204.
 22. Chen, G.; Yip, W.; Mo, H.; Liu, Y. Effect of sludge fasting/feasting on growth of activated sludge cultures. *Water Res.* **2001**, *35*, 1029–1037.
 23. Ferrentino, R.; Langone, M.; Merzari, F.; Tramonte, L.; Andreottola, G. A review of Anaerobic Side-Stream Reactor for excess sludge reduction: configurations, mechanisms and efficiency. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2016**, *46*, 382–405.
 24. Novak, J.T.; Chon, D.H.; Curtis, B.-A.; Doyle, M. Biological Solids Reduction Using the Cannibal Process. *Water Environ. Res.* **2007**, *79*, 2380–2386.
 25. Velho, V.F.; Foladori, P.; Andreottola, G.; Costa, R.H.R. Anaerobic side-stream reactor for excess sludge reduction: 5-year management of a full-scale plant. *J. Environ. Manage.* **2016**, *177*, 223–230.
 26. Ferrentino, R.; Langone, M.; Andreottola, G. Sludge reduction by an anaerobic side-stream reactor

- process : A full-scale application. *Environ. Challenges* **2021**, 2, 100016.
27. Canales, A.; Pareilleux, A.; Rols, J.L.; Goma, G.; Huyard, A. Decreased sludge production strategy for domestic wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* **1994**, 30, 97–106.
 28. Camacho, P.; Ginestet, P.; Audic, J.M. Understanding the mechanisms of thermal disintegrating treatment in the reduction of sludge production. *Water Sci. Technol.* **2005**, 52, 235–245.
 29. Heinz Scaling up of electrical route. In *Comparative Evaluation of Sludge Reduction Routes*; IWA Publishing: London, 2007.
 30. Xie, R.; Xing, Y.; Ghani, Y.A.; Ooi, K.E.; Ng, S.W. Full-scale demonstration of an ultrasonic disintegration technology in enhancing anaerobic digestion of mixed primary and thickened secondary sewage sludge. *J. Environ. Eng. Sci.* **2007**, 6, 533–541.
 31. Pérez-Elvira, S.I.; Fernández-Polanco, F.; Fernández-Polanco, M.; Rodríguez, P.; Rouge, P. Hydrothermal multivariable approach. Full-scale feasibility study. *Electron. J. Biotechnol.* **2008**, 11.
 32. Elliott, A.; Mahmood, T. Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues. *Water Res.* **2007**, 41, 4273–4286.
 33. Hogan, F.; Mormede, S.; Clark, P.; Crane, M. Ultrasonic sludge treatment for enhanced anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.* **2004**, 50, 25–32.
 34. Ladurner Ambiente Available online: www.ladurnerambiente.it.
 35. TVA Available online: www.tva.com.
 36. Dohányos, M.; Zábranská, J.; Kutil, J.; Jeníček, P. Improvement of anaerobic digestion of sludge. *Water Sci. Technol.* **2004**, 49, 89–96.
 37. Onyeche, T.I. Sludge as source of energy and revenue. *Water Sci. Technol.* **2004**, 50, 197–204.
 38. Valo, A.; Carrère, H.; Delgenès, J.P. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2004**, 79, 1197–1203.
 39. Tanaka, S.; Kobayashi, T.; Kamiyama, K.I.; Signey Bildan, M.L.N. Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Sci. Technol.* **1997**, 35, 209–215.
 40. Cambi thermal hydrolysis from waste to worth. In *Proceedings of the Polish Cities to Norway*; 2016.
 41. Wang, Q.; Wei, W.; Gong, Y.; Yu, Q.; Li, Q.; Sun, J.; Yuan, Z. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art. *Sci. Total Environ.* **2017**, 587–588, 510–521.
 42. Veolia La riduzione della quantità di fango attraverso la tecnologia Biothelys. In *Proceedings of the Il trattamento e la gestione dei fanghi di depurazione: stato dell'arte, normativa e innovazione*; Roma, 2014.
 43. Veolia Available online: www.veolia.it.
 44. Pereboom, J.; Luning, L.; Hol, A.; van Dijk, L.; de Man, A.W.A. Full scale experiences with TurboTec® continuous thermal hydrolysis at WWTP Venlo (NL) and Apeldoorn (NL). *19th Eur. Biosolids Org. Resour. Conf. Exhib.* **2014**.
 45. Ferrentino, R.; Merzari, F.; Fiori, L. Coupling Hydrothermal Carbonization with Anaerobic Digestion for Sewage Sludge Treatment : Influence of HTC Liquor and Hydrochar on Biomethane Production. **2020**.
 46. Carborem Srl Available online: www.carborem.com.
 47. Terranova Energy Available online: www.terranova-energy.com.
 48. SRL, C. ETV STATEMENT OF VERIFICATION CARBOREM TECHNOLOGY. **2020**.
 49. NewLisi Available online: www.newlisi.com.
 50. Chu, L.; Yan, S.; Xing, X.-H.; Sun, X.; Jurcik, B. Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production. *Water Res.* **2009**, 43, 1811–22.
 51. Scheminski, A.; Krull, R.; Hempel, D.C. Oxidative treatment of digested sewage sludge with ozone. *Water Sci. Technol.* **2000**, 42, 151–158.
 52. Carrère, H.; Dumas, C.; Battimelli, A.; Batstone, D.J.; Delgenès, J.P.; Steyer, J.P.; Ferrer, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *J. Hazard. Mater.* **2010**,

- 183, 1–15.
53. Sievers, M.; Ried, A.; Koll, R. Sludge treatment by ozonation - Evaluation of full-scale results. *Water Sci. Technol.* **2004**, *49*, 247–253.
 54. Weemaes, M.; Grootaerd, H.; Simoens, F.; Verstraete, W. Anaerobic digestion of ozonized biosolids. *Water Res.* **2000**, *34*, 2330–2336.
 55. Riau, V.; De la Rubia, M.Á.; Pérez, M. Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids: A semi-continuous study. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 2706–2712.
 56. Bolzonella, D.; Cavinato, C.; Fatone, F.; Pavan, P.; Cecchi, F. High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: A pilot scale study. *Waste Manag.* **2012**, *32*, 1196–1201.
 57. Climent, M.; Ferrer, I.; Baeza, M. del M.; Artola, A.; Vázquez, F.; Font, X. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chem. Eng. J.* **2007**, *133*, 335–342.
 58. Skiadas, I. V.; Gavala, H.N.; Lu, J.; Ahring, B.K. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 701 °C prior to anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.* **2005**, *52*, 161–166.
 59. Torres, L.G.; Bandala, E.R. *Energy and Environment Nowadays*; Nova Science Publisher.: New York, 2014;
 60. Panter, K.; Jolis, D.; Solheim, O.E.; Seyffarth, T.; Fjaergard, T.; Sorensen, G. THyPAD – from Pilot to Full Scale Application at Hamar WWTP. *Proc. Water Environ. Fed.* **2014**, *2006*, 429–437.
 61. Krugel, S.; Parella, A.; Ellquist, K.; Hamel, K. Five Years of Successful Operation - A Report on North Americas First TPAD System at the Western Lake Superior Sanitation District (WLSSD). *Weftec* **2007**, 357–373.
 62. **Trattamento di sonolisi dei fanghi : Esperienze italiane ed europee. 2008.**
 63. Bamberg, H.W.; Nickel, K.; Houy, A.; Lunden, A. Intensivierung der anaeroben Schlammstabilisierung mit Ultraschall. **2009**, *2009*, 492–498.
 64. Mundy, B.; Kuhnel, B.; Hunter, G.; Jarnis, R.; Funk, D.; Walker, S.; Burns, N.; Drago, J.; Nezdod, W.; Huang, J.; et al. A Review of Ozone Systems Costs for Municipal Applications. Report by the Municipal Committee–IOA Pan American Group. *Ozone Sci. Eng.* **2018**, *40*, 266–274.
 65. Dallera, F. Applicazione dell’ozono nel trattamento delle acque reflue. In *Proceedings of the Ecomondo*; Rimini, 2015.
 66. Taboada-Santos, A.; Lema, J.M.; Carballa, M. Energetic and economic assessment of sludge thermal hydrolysis in novel wastewater treatment plant configurations. *Waste Manag.* **2019**, *92*, 30–38.
 67. Lucian, M.; Fiori, L. Hydrothermal carbonization of waste biomass: Process design, modeling, energy efficiency and cost analysis. *Energies* **2017**, *10*.
 68. Biolysis, E.; Biolysis, O.; Biolysis, E. DEUX INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA. **2002**, 33–37.
 69. Remy, C.; Diercks, K. Full scale demonstration of energy positive sewage treatment plant concepts towards market penetration. *Horiz. 2020 Framew. Program.* **2016**.
 70. Nielsen, P.J. *9. Klärschlammstage der DWA.* 2015,.
 71. Kepp, U.; Machenbach, I.; Weisz, N.; Solheim, O.E. Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis - Three years of experience with full scale plant. *Water Sci. Technol.* **2000**, *42*, 89–96.
 72. Edgington, R.M.; Belshaw, D.; Lancaster, L.; Jolly, M. Thermal Hydrolysis at Davyhulme WwTP - One Year On. *Eur. Biosolids Org. Resour. Conf.* **2014**.
 73. Chauzy, J.; Kline, M.; Cabral, C.; Dimassimo, R.; Eveillard, F. The Different Solutions Proposed by Thermal Hydrolysis Process: Successful Implementation of LD, DL and DLD Configurations on Several WWTP. *Proc. Water Environ. Fed.* **2015**, *2014*, 1–13.
 74. Djafer, M.; Crampon, C.; Dimassimo, R. Continuous “Digestion-THP-Digestion” (DLD) at Lille (France) WWTP: Results after one year operation. In *Proceedings of the Proceedings of the Water Environment Federation*; 2016.
 75. Kjaer, R.; Chen, J.H.; Djafer, M.; Py, C.; Nielsen, B. Two-step digestion with continuous thermal hydrolysis to optimize sludge treatment at Marquette-lez-Lille WWTP. In *Proceedings of the 2nd*

IWA Conference on Holistic Sludge Management; International Water Association: Malmo - Sweden, 2016.

76. Cano, R.; Pérez-Elvira, S.I.; Fdz-Polanco, F. Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *Appl. Energy* **2015**, *149*, 176–185.

Curriculum vitae

Roberta Ferrentino

Roberta Ferrentino, laureata in Ingegneria Civile per l'Ambiente ed il Territorio presso l'Università degli Studi di Salerno, nel 2016 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Ambientale presso l'Università di Trento con una tesi sperimentale sulla riduzione della produzione dei fanghi di depurazione con il processo anaerobico side-stream. Dal 2016 al 2018 è stata assegnista di ricerca presso l'Università di Cassino e del Lazio Meridionale dove ha svolto un progetto finanziato dalla Fondazione Caritro, in collaborazione con l'Università di Trento e due realtà imprenditoriali trentine. Da Marzo 2019 è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento dove si occupa di processi di riduzione della produzione dei fanghi, processi termici innovativi, recupero di energia e risorse negli impianti di depurazione ed economia circolare.

Ha sempre svolto attività di ricerca nell'ambito dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale, occupandosi in particolare di trattamenti delle acque reflue, dei fanghi e dei rifiuti. Ha partecipato a diversi lavori sperimentali pubblicati su riviste italiane e straniere o presentati a Congressi nazionali ed internazionali. È autrice di 20 pubblicazioni nazionali ed internazionali. È co-inventrice e titolare di un brevetto nel settore delle tecnologie innovative di riduzione dei fanghi di depurazione.

Luca Fiori

Luca Fiori è professore associato di Ingegneria Chimica, è il leader del Green Process Engineering Group (detto anche Gruppo Biomasse) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento. Ha conseguito il dottorato di ricerca in ingegneria chimica e di processo nel 2003 presso l'Università di Genova, dove si è anche laureato con il massimo dei voti in ingegneria chimica nel 1998. Attualmente si occupa principalmente di processi di estrazione e di conversione termochimica, in particolare ad alta pressione (estrazione con CO₂ supercritica, gassificazione con H₂O supercritica, carbonizzazione idrotermica) per lo sfruttamento di rifiuti organici urbani e agroindustriali e biomasse più in generale: rifiuti e biomassa per recupero di energia e materia o da cui estrarre composti ad alto valore aggiunto. Ha più di 160 pubblicazioni, tra cui oltre 80 articoli su riviste ISI peer-reviewed e 4 capitoli di libri (H-index: 31, citazioni > 3000 – Scopus database). Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca, spesso in veste di coordinatore. I suoi fondi di ricerca provengono da progetti di R&D nazionali ed europei e da consulenze a società private dei settori agroindustriale, dei rifiuti e dell'ingegneria. È revisore di numerose riviste scientifiche e valutatore di proposte di ricerca nazionali, europee (CIP-IEE 2012, CIP-IEE 2013) ed internazionali.

Gianni Andreottola

Gianni Andreottola è professore ordinario di Ingegneria Sanitaria-Ambientale (Gruppo ICAR 03) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento. Laureato con lode in Ingegneria Civile Idraulica presso il Politecnico di Milano, ha iniziato la sua carriera scientifica presso l'Istituto di Ingegneria Sanitaria del medesimo Politecnico, conseguendo nel 1989 il titolo di Dottore di Ricerca con una tesi sperimentale sulla rimozione biologica dei nutrienti dalle acque di scarico. Negli anni 1990 e 1991 ha lavorato come ricercatore presso l'Istituto per l'Ambiente. Dal 1991 al 1993 ha svolto attività di ricerca come borsista post-dottorato presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano. Dal 1993 svolge attività didattica e di ricerca presso l'Università di Trento. Dal 2008 è professore Ordinario presso la stessa sede.

Ha sempre svolto attività di ricerca nell'ambito dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale, occupandosi in particolare di trattamenti delle acque reflue, dei fanghi, dei rifiuti e dei terreni contaminati. In questi ed altri settori di ricerca ha svolto numerosi lavori sperimentali e modellistici pubblicati su riviste italiane e straniere o presentati a Congressi nazionali ed internazionali.

È Autore o co-autore di oltre 200 pubblicazioni nazionali ed internazionali.

E' co-autore di 3 brevetti nel settore delle tecnologie innovative di riduzione dei fanghi di depurazione.
E' responsabile del Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (LISA) dell'Università di Trento.
Svolge con la sua struttura di laboratorio e con collaboratori qualificati (ricercatori, dottori di ricerca, borsisti, post-doc, assegnisti) attività di supporto tecnico e consulenza di processo ed impiantistica ad Enti territoriali ed Aziende