

Potenziale dei trattamenti idrotermici propedeutici all'incenerimento dei fanghi di depurazione

F. Viganò^{1,2}, A. Conversano^{1,2}, M. Gabba², M. Zatti², M. Sbaffi³, F. Cella³

federico.vigano@polimi.it

antonio.conversano@polimi.it

marco.gabba@polimi.it

matteo.zatti@polimi.it

mattia.sbaffi@agrosistemi.it

fabio.cella@agrosistemi.it

¹ Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, Milano, 20156, Italia

² LEAP Scarl, Piacenza, 29121, Italia

³ Agrosistemi Srl, Piacenza, 29122, Italia

Riassunto

La normativa sulla gestione dei fanghi di depurazione sta progressivamente evolvendo verso standard di protezione ambientale sempre più elevati, promuovendo, di fatto, il ricorso all'incenerimento di crescenti quantità di fanghi. Le tecniche attualmente disponibili di mono- e co-incenerimento spesso richiedono la preventiva riduzione del tenore di umidità mediante disidratazioni meccaniche e spesso processi di essiccazione termico. Questi ultimi comportano significativi consumi energetici, poiché basati sull'evaporazione dell'umidità. Alcuni processi di trattamento idrotermico di sviluppo relativamente recente hanno dimostrato la possibilità di abbattere significativamente il fabbisogno energetico per la rimozione di umidità dai fanghi evitandone l'evaporazione. Si tratta di processi denominati HTC = Hydro-Thermal Carbonisation e/o HTD = Hydro-Thermal Dewatering. L'esito di questi processi è un significativo cambiamento delle proprietà reologiche dei fanghi che ne consente un'apprezzabile disidratazione meccanica, tale da rendere superflui eventuali essiccamenti termici propedeutici all'incenerimento.

Un processo HTD è stato recentemente studiato dagli autori mediante varie prove su un impianto pilota. I risultati della sperimentazione hanno consentito di valutare le prestazioni attese a scala industriale, sulla base delle quali, il presente lavoro confronta due scenari di incenerimento dei fanghi: (a) lo scenario di riferimento in cui i fanghi sono disidratati meccanicamente, essiccati termicamente e inceneriti; (b) lo scenario HTD in cui i fanghi, dopo la disidratazione meccanica sono sottoposti a trattamento idrotermico, a ulteriore disidratazione meccanica e, infine, a incenerimento.

I risultati ottenuti mostrano che i consumi di gas naturale (e le conseguenti emissioni di CO₂) per lo scenario basato su HTD si attestano a circa il 19% dello scenario di riferimento. Una preliminare analisi economica, basata sulla stima dei costi industriali di trattamento, evidenzia la convenienza dello scenario HTD che consegue tempi di ritorno dell'investimento dell'ordine di 1-2 anni.

Summary

The legislation on the management of sewage sludge is progressively evolving towards increasingly higher environmental protection standards, effectively promoting the use of incineration of increasing quantities of sludge. Mono- and co-incineration available techniques require the prior reduction of the moisture content by mechanical dehydration and often thermal drying processes. The latter involve significant energy consumption, as they are based on the evaporation of moisture. Some relatively recently developed hydrothermal treatments have shown the possibility of significantly reducing the energy requirements for the removal of moisture from sludge, avoiding its evaporation. These are processes called HTC = Hydro-Thermal Carbonisation and / or HTD = Hydro-Thermal Dewatering. The outcome of these processes is a significant change in the

rheological properties of the sludge, which allows for an appreciable mechanical dehydration, such as to make no more needed any preparatory thermal drying.

An HTD process has recently been studied by the authors through various tests on a pilot plant. The results of the experimentation gave the required insights to evaluate the expected performances on an industrial scale. On such a basis, this work compares two scenarios of sludge incineration: (a) the reference scenario in which the sludge is mechanically dehydrated, thermally dried and incinerated; (b) the HTD scenario in which the sludge, after mechanical dehydration, is subjected to hydrothermal treatment, to further mechanical dehydration and, finally, to incineration.

The results show that the natural gas consumption (and the consequent CO₂ emissions) for the HTD-based scenario is around 19% of the reference scenario. A preliminary economic analysis, based on the estimate of industrial treatment costs, highlights the convenience of the HTD scenario which results payback times of the order of 1-2 years.

1. Introduzione

L'aumento della popolazione mondiale è associato a un incremento nella produzione di fanghi derivanti da processi di trattamento di acque reflue; si stima infatti che nella sola Unione Europea siano prodotte non meno di 50 Mt/anno di tale rifiuto, caratterizzato da un contenuto d'acqua pari a circa l'80% [1], oltre che dalla presenza di sostanze tossiche quali metalli pesanti, inquinanti inorganici (e.g., S, Cl) contaminanti organici e patogeni; richiedono pertanto un opportuno processo di trattamento che consenta la rimozione di sostanze nocive ottenendo scarti di facile gestione con un limitato costo di trattamento e consumi energetici ridotti.

La normativa sulla gestione dei fanghi di depurazione sta progressivamente evolvendo verso standard di protezione ambientale sempre più elevati, promuovendo, di fatto, il ricorso all'incenerimento di crescenti quantità di fanghi. Le tecniche attualmente disponibili di mono- e co-incenerimento spesso richiedono la preventiva riduzione del tenore di umidità mediante disidratazioni meccaniche e spesso processi di essiccamento termico. Questi ultimi comportano significativi consumi energetici, poiché basati sull'evaporazione dell'umidità. Alcuni processi di trattamento idrotermico di sviluppo relativamente recente hanno dimostrato la possibilità di abbattere significativamente il fabbisogno energetico per la rimozione di umidità dai fanghi evitandone l'evaporazione. Si tratta di processi denominati HTC = Hydro-Thermal Carbonisation e/o HTD = Hydro-Thermal Dewatering. L'esito di questi processi è un significativo cambiamento delle proprietà reologiche dei fanghi che ne consente un'apprezzabile disidratazione meccanica, tale da rendere superflui eventuali essiccamenti termici propedeutici all'incenerimento.

Un processo HTD è stato recentemente studiato dagli autori mediante varie prove su un impianto pilota sviluppato da Agrosistemi Piacenza [2]. I risultati della sperimentazione hanno consentito di valutare le prestazioni attese a scala industriale [3], [4], sulla base delle quali, il presente lavoro confronta due scenari di incenerimento dei fanghi: (a) lo scenario di riferimento in cui i fanghi sono disidratati meccanicamente, essiccati termicamente e inceneriti; (b) lo scenario HTD in cui i fanghi, dopo la disidratazione meccanica sono sottoposti a trattamento idrotermico, a ulteriore disidratazione meccanica e, infine, a incenerimento.

2. Metodologia

A partire dalle prestazioni di un impianto pilota ubicato presso la sede piacentina di Agrosistemi, è stato sviluppato un design concettuale del processo HTD, a una scala in grado di trattare 10'000 t/anno di fango al 23% di sostanza secca. Mediante opportuni indicatori prestazionali, sia di natura tecnica che economica, la nuova soluzione tecnologica è stata confrontata con un processo commerciale di essiccamento fanghi a film sottile.

Il tenore di sostanza secca raggiunto dal processo di essiccamento termico a film sottile è generalmente superiore a quello raggiunto a seguito del processo HTD (75-90 %ss vs. 55 %ss), sicché i prodotti dei due processi sono, tendenzialmente, destinati a mercati differenti. Tuttavia, al fine di consentire un confronto omogeneo tra le due tecnologie, si è considerato un assetto operativo

per l'essiccatore a film sottile che ottiene lo stesso tenore di sostanza secca conseguente al processo HTD.

La Fig. 1 riporta una rappresentazione grafica della metodologia adottata per confrontare i due processi. La comparazione considera due diverse situazioni di riferimento, ossia prezzi dell'energia (elettricità e gas naturale) rispettivamente alti e bassi. Complessivamente sei casi studio, confrontati mediante indicatori quali produttività [$t_{\text{Prodotto}}/\text{anno}$], produzione specifica [$t_{\text{Prodotto}}/t_{\text{Fango}}$], consumo specifico di gas naturale [$\text{Sm}^3/t_{\text{Prodotto}}$], consumo elettrico specifico [$\text{kWh}/t_{\text{Prodotto}}$], TIR (Tasso Interno di Rendimento), VAN (Valore Attuale Netto) e TPB (Tempo di Pay-Back).

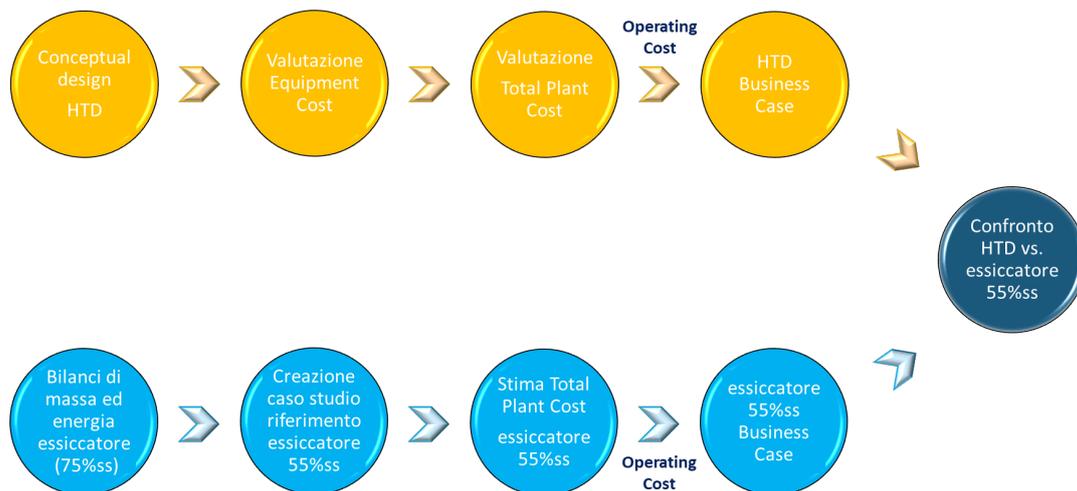


Fig. 1: Metodologia di confronto tra processo HTD e processo di essiccamento (stato dell'arte).

2.1 Assunzioni

Si riportano in **Tab. 1** le principali assunzioni tecniche ed economiche adottate per i diversi casi studio.

Capacità di trattamento	10'000 t/anno
Fango in ingresso HTD / essiccatore	23% sostanza secca (s.s.)
Fango in uscita HTD / essiccatore	55% s.s.
Ore equivalenti di funzionamento	7'000 h/anno
Tempo di realizzazione	1 anno
Vita utile impianto	15 anni
Imposte	28%
WACC	8.06%
Inflazione	4%
Tariffa di conferimento fango 23%ss	150 €/t
Costo consumabili	alto: prezzi correnti post pandemia e crisi energetica → $\text{GN}^\dagger = 1.25 \text{ €/Sm}^3$; $\text{EE}^\dagger = 0.25 \text{ €/kWh}$ basso: prezzi pre-pandemia (2019 –ARERA, utenze industriali[5]) → $\text{GN} = 0.38 \text{ €/Sm}^3(\text{HTD})$ e $0.30 \text{ €/Sm}^3(\text{EFS})$; $\text{EE} = 0.11 \text{ €/kWh}$
Tariffa smaltimento prodotto da processo di trattamento fanghi	Alta: 150 €/t Media: 120 €/t Bassa: 100 €/t

† EE = Energia Elettrica; GN = Gas Naturale

Tab. 1: Assunzioni tecniche ed economiche sia per il design dei processi che per la definizione dei rispettivi business case.

3. Process Design

3.1 Design del processo HTD

Il processo HTD consta delle seguenti fasi: 1. Preriscaldamento, 2. Riscaldamento, 3. Mantenimento e 4. Raffreddamento. Il fango tal quale (23 %ss) è inviato alla fase iniziale di preriscaldamento alla pressione di circa 35 bar, passando dalla temperatura iniziale di 20 °C sino a circa 150 °C. Lo scambiatore utilizzato è di tipo controcorrente e impiega, quale vettore termico, acqua a 25 bar. Nella successiva fase di riscaldamento, la corrente di fanghi è inviata a uno scambiatore equicorrente riscaldato da olio diatermico, che lo porta sino a circa 210 °C. Segue il mantenimento a tale temperatura per circa 35 minuti, per consentire l'esplicarsi delle opportune reazioni. Lo slurry in cui si è convertito il fango è, infine, raffreddamento fino alla temperatura ambiente, per poi alimentarlo alla filtropressa. Con pressioni sino a 10 bar si separa una corrente liquida (6 %ss residua) da una solida (55 %ss). Le correnti gassose prodotte dal processo sono convogliate presso un'opportuna unità di trattamento gas per la rimozione dei composti dello zolfo nonché dei composti organici (COV) prima dello scarico in atmosfera. Uno schema concettuale del processo HTD è riportato in Fig. 2.

Una volta definito lo schema di processo, si sono preliminarmente dimensionate le varie apparecchiature con conseguente stima dei consumi energetici (gas naturale ed elettricità) e relativa valutazione economica. La stima dei costi d'investimento si basa sia su dati reperiti in letteratura [6], sia su quotazioni avanzate da vari fornitori.

3.2 Caratterizzazione del processo convenzionale (essiccatore a film sottile)

Al fine di disporre di un termine di confronto, è stata considerata una tecnologia di essiccamento convenzionale basata su essiccatore a film sottile. Il processo è schematicamente rappresentato in Fig. 3. Gli indicatori specifici di produttività ed energetici caratteristici del processo commerciale sono stati valutati per mezzo della chiusura di bilanci di massa e di energia sul processo mediante un approccio di tipo black-box, assumendo che il prodotto esca dall'essiccatore a 125 °C.

4. Risultati e Considerazioni

La Tab. 2 riporta i principali indicatori specifici di produzione e di consumo energetico. I risultati evidenziano una diversa produttività dei due processi legata alla presenza di sostanza solida residua non recuperata e dispersa nella corrente liquida in uscita dalla filtropressa del processo HTD. Il confronto evidenzia inoltre come i consumi energetici specifici sia di energia elettrica, sia di gas naturale per unità di prodotto siano più alti nel caso di tecnologia convenzionale rispetto al processo HTD. In particolare, l'indicatore di consumo specifico di gas naturale del processo di essiccamento termico è oltre cinque volte superiore a quello del processo HTD. Tale differenza è principalmente ascrivibile al calore latente per l'evaporazione dell'umidità nel processo convenzionale.

	HTD	Essiccamento	Unità
Capacità	10'000	10'000	$t_{\text{Fango/a @23\%w ss}}$
Temperatura processo	210	125	°C
Produttività	3'298	4'182	$t_{\text{Prodotto/anno}}$
Produzione specifica	0.33	0.42	$t_{\text{Prodotto}}/t_{\text{Fango}}$
Consumo gas naturale	79'977	533'482	Sm^3/anno
Consumo elettrico	111	381	MWh/a
Consumo specifico di gas naturale	24	128	$\text{Sm}^3/t_{\text{Prodotto}}$
Consumo elettrico specifico	34	91	$\text{kWh}/t_{\text{Prodotto}}$

Tab. 2: Indicatori specifici caratteristici del processo HTD e di essiccamento.

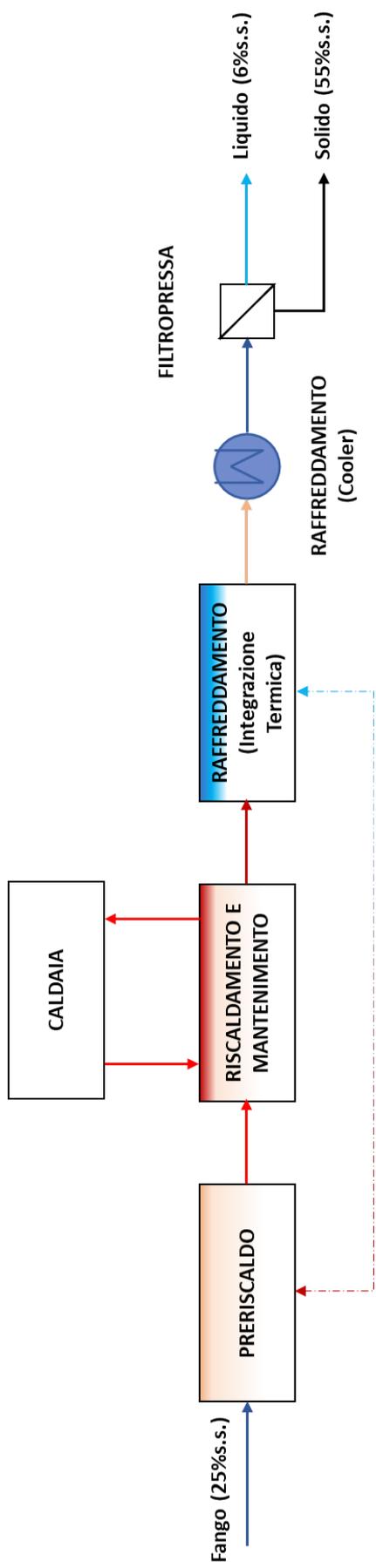


Fig. 3: Diagramma a blocchi del processo HTD (correnti principali in figura).

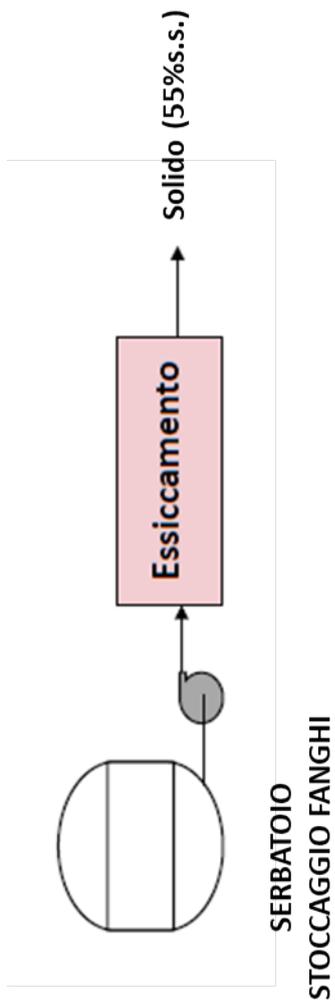


Fig. 2: Rappresentazione schematica del processo di essiccamento fanghi (correnti principali in figura).

La seguente Tab. 3 riporta gli indicatori economici più significativi che caratterizzano i diversi casi studio analizzati. Si può notare come tutti gli indicatori risultino più favorevoli per la tecnologia HTD rispetto al caso di essiccatore a film sottile. La tecnologia HTD risente, infatti, molto meno dei prezzi di energia elettrica (EE) e gas naturale (GN), poiché poco energivora. Ciò consente un periodo di rientro dell'investimento inferiore ai 2 anni in tutti gli scenari analizzati.

		EE e GN – prezzo alto					EE e GN – prezzo basso				
		TIR	VAN 5	VAN 10	VAN 15	TPB [anni]	TIR	VAN 5	VAN 10	VAN 15	TPB [anni]
Tariffa di conferimento		[M€]	[M€]	[M€]		[M€]	[M€]	[M€]			
HTD	ALTA	82%	2.2	5.1	8.0	1.2	91%	2.5	5.7	8.9	1.1
	MEDIA	91%	2.5	5.7	8.8	1.1	99%	2.8	6.3	9.8	1.0
	BASSA	99%	2.8	6.2	9.7	1.0	108%	3.1	6.9	10.6	0.9
ESSICCATORE	ALTA	-13%	-1.8	-1.6	-1.4	#N/D	21%	0.2	2.4	4.6	4.5
	MEDIA	-2%	-1.4	-0.9	-0.3	#N/D	25%	0.6	3.2	5.7	3.9
	BASSA	5%	-1.0	-0.1	0.8	10.6	29%	0.9	3.9	6.8	3.4

Tab. 3: Indicatori economici del processo HTD vs. tecnologia convenzionale nelle due situazioni di prezzo di energia elettrica e gas naturale.

5. Conclusioni

Il processo HTD per la disidratazione dei fanghi sviluppato sulla base dell'esperienza di Agrosistemi è stato valutato preliminarmente su piena scala in base a un design concettuale, confrontandolo con la tecnologia commerciale dell'essiccamento a film sottile. Si è considerata una taglia del processo di 10'000 t/anno di fango al 23 %ss, che porta a produrre 3'298 t/anno di materiale solido al 55 %ss. Le condizioni operative dell'essiccatore a film sottile sono state scelte in modo da ottenere un prodotto al 55 %ss come per l'HTD. È stata effettuata una comparazione sulla base di indicatori tecnico-economici quali produzione specifica, consumo energetico specifico e redditività dell'investimento, assumendo tariffe di conferimento del prodotto al 55 %ss pari a 100 – 125 – 150 €/t e in due scenari di prezzi di energia elettrica e gas naturale (prezzi bassi pre-crisi energetica e prezzi in linea con il 2022). Le opzioni analizzate includono il mancato conferimento a terzi dei fanghi per un costo omnicomprendivo di 150 €/t.

I risultati mostrano come, sia da un punto di vista energetico che da un punto di vista economico, il processo HTD risulti particolarmente promettente: il processo HTD presenta consumo di gas naturale e di elettricità rispettivamente pari al 19% e 37% di quelli caratteristici di un essiccatore a film sottile. Con bassi prezzi di EE e GN e alta tariffa di allontanamento del prodotto il TPB di HTD ed essiccatore è rispettivamente di 1.1 e 4.5 anni. Inoltre, con alti prezzi di EE e GN, il TPB per il processo HTD rimane inferiore ai 2 anni in tutto il range di tariffa di allontanamento considerato, mentre per l'essiccatore il TPB non supera i 15 anni (TPB=11) solo nel caso di tariffa pari a 100€/t.

BIBLIOGRAFIA

- [1] X. Zhang, X. Li, R. Li, and Y. Wu, "Hydrothermal Carbonization and Liquefaction of Sludge for Harmless and Resource Purposes: A Review," *Energy & Fuels*, vol. 34, no. 11, pp. 13268–13290, Nov. 2020.
- [2] "Agrosistemi." [Online]. Available: <https://www.agrosistemi.it/>.
- [3] "LEAP." [Online]. Available: <https://www.leap.polimi.it/>.
- [4] "Politecnico di Milano." [Online]. Available: <https://www.polimi.it/>.
- [5] "ARERA." [Online]. Available: <https://www.arera.it/it/index.htm>.
- [6] G. D. Ulrich, *Chemical Engineering Process Design and Economics: A Practical Guide*. 2004.