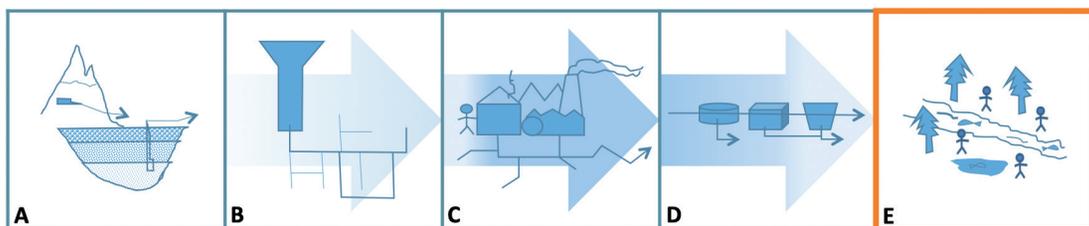


QUADERNI AUSIR E-3

l'utilizzo dell'energia solare per l'essiccamento dei fanghi di depurazione: un caso studio

a cura di
Riccardo Dominici



Stampa

Impressum, Marina di Carrara (Ms)

© **FORUM** 2023

Editrice Universitaria Udinese

FARE srl con unico socio

Società soggetta a direzione e coordinamento

dell'Università degli Studi di Udine

Via Palladio, 8 – 33100 Udine

Tel. 0432 26001

www.forumeditrice.it

ISBN 978-88-3283-424-6

QUADERNI AUSIR E-3

**l'utilizzo dell'energia solare
per l'essiccamento dei fanghi
di depurazione: un caso studio**

**a cura di
Riccardo Dominici**

INDICE

Prefazione	p.	7
1. I fanghi di depurazione	»	9
1.1. Caratterizzazione dei fanghi di depurazione	»	10
1.2. Trattamento dei fanghi di depurazione	»	11
1.3. Ispessimento	»	12
1.4. Disidratazione	»	13
1.5. Stabilizzazione	»	14
1.6. Uso dei fanghi in agricoltura	»	16
2. L'essiccamento solare	»	19
2.1. Parametri che influenzano le prestazioni dell'essiccamento solare	»	20
2.2. Caratteristiche del fango essiccato	»	24
2.3. Possibili strategie per incrementare le prestazioni del processo	»	26
3. L'impianto di essiccamento solare in via di realizzazione da parte di CAFFC SpA a Udine	»	31
3.1. Linea acque	»	31
3.2. Linea fanghi	»	34
3.3. L'impianto di essiccamento solare	»	34
3.4. Dimensionamento dell'impianto di essiccamento solare	»	36
3.5. Analisi economica dell'impianto di essiccamento solare	»	37
4. L'impianto pilota per l'essiccamento dei fanghi	»	39
4.1. Descrizione dell'impianto pilota	»	39
4.2. Determinazione delle potenze elettriche di ciascun componente	»	42
4.3. Determinazione delle dispersioni termiche dell'impianto pilota	»	44

4.4. Consumi energetici con gruppo frigo inserito	»	45
4.5. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: bilancio di massa	»	46
4.6. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: bilancio energetico	»	48
4.7. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: analisi chimiche sul fango essiccato	»	55
4.8. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: analisi chimiche sul condensato	»	59
5. Studio di fattibilità di un sistema di accumulo energetico per l'alimentazione notturna della serra solare	»	63
5.1. Sistema di accumulo con idrogeno	»	64
5.1.1. <i>Dimensionamento bottom-up: dai consumi ai fabbisogni</i>	»	65
5.1.2. <i>Dimensionamento bottom-up: scelta del parco fotovoltaico</i>	»	67
5.1.3. <i>Dimensionamento top-down: dalla produzione effettiva ai costi di esercizio</i>	»	68
5.1.4. <i>Valutazioni economiche</i>	»	69
5.1.5. <i>Valutazioni ambientali</i>	»	72
5.2. Sistema di accumulo con batteria	»	72
5.2.1. <i>Dimensionamento tecnico</i>	»	72
5.2.2. <i>Valutazioni economiche</i>	»	74
5.2.3. <i>Valutazioni ambientali</i>	»	75
5.3. Comparazione dei due sistemi	»	75
6. Conclusioni	»	79
Bibliografia	»	81

PREFAZIONE

Una tra le tematiche ambientali di maggiore rilevanza è la depurazione delle acque reflue e il trattamento dei fanghi derivanti dai processi di depurazione. La produzione annua di acque reflue a livello globale è stimata in 184 miliardi di metri cubi, e il suo trattamento comporta consumi energetici complessivi pari a oltre 86,9 miliardi di kWh. Un adeguato trattamento è tuttavia indispensabile per rimuovere dai reflui sia i composti organici e i nutrienti, che causerebbero altrimenti l'eutrofizzazione dei corpi idrici ricettori, sia i metalli pesanti e i microinquinanti che andrebbero a inquinare gravemente gli ecosistemi che si sviluppano attorno agli stessi. L'ottimizzazione degli impianti di trattamento, anche mediante l'adozione di nuove tecnologie, permette sia di ridurre i consumi energetici, sia di limitare quanto più possibile l'immissione in ambiente di sostanze inquinanti.

Una tecnologia per il trattamento dei fanghi ancora poco diffusa ma molto promettente, grazie al suo ridotto impatto ambientale e ai costi di impianto contenuti, è l'essiccamento solare. Il Consorzio per l'Acquedotto del Friuli Centrale CAFC SpA ha in progetto la costruzione di un impianto basato su tale tecnologia, che andrà a integrarsi con la preesistente linea di trattamento fanghi del depuratore di Udine. Per studiare preventivamente le prestazioni del futuro impianto in scala reale, è stato realizzato e posto in opera un impianto pilota in scala 1:10.000. Il presente quaderno tecnico si pone il duplice obiettivo di riassumere l'analisi dei risultati delle attività sperimentali condotte su tale impianto pilota e di confrontare due soluzioni tecniche che permetterebbero di ottenere la totale autosufficienza energetica del futuro impianto in scala reale.

Nel primo capitolo si richiameranno alcuni concetti generali relativi alla depurazione delle acque e al trattamento dei fanghi, illustrando i principali parametri utilizzati per la caratterizzazione dei fanghi e accennando alle tecnologie di trattamento attualmente disponibili. Anche l'impiego dei fanghi su terreni agricoli verrà preso in considerazione, ponendo l'attenzione sui limiti alle concentrazioni di sostanze inquinanti imposti

dalle normative attualmente vigenti e dal regolamento europeo che potrebbe entrare in vigore nei prossimi anni, facendo seguito al *Working Document on Sludge*, pubblicato nel 2000.

Nel secondo capitolo si analizzerà più nel dettaglio il processo di essiccazione solare, facendo riferimento alla letteratura e alle pubblicazioni di ricercatori di varie Università europee ed extra-europee, in modo da avere un utile termine di confronto per le successive fasi sperimentali.

Il terzo capitolo descriverà lo stato di fatto dell'impianto di depurazione di Udine, presso il quale il Consorzio per l'Acquedotto del Friuli Centrale intende costruire la serra solare. Essa includerebbe anche un sistema (basato su una pompa di calore alimentata da un parco fotovoltaico) per la fornitura di ulteriore calore, in modo da aumentare l'efficienza del processo di essiccazione. Verrà brevemente ripercorso il dimensionamento tecnico e le valutazioni economiche relative alla costruzione e all'esercizio dell'intero impianto di essiccazione.

Il quarto capitolo raccoglierà i risultati delle attività sperimentali svolte sull'impianto pilota, soffermandosi in particolare sull'analisi dei dati relativi alla composizione del fango essiccato nel corso di varie prove, valutando anche i consumi energetici dell'impianto durante un ciclo di essiccazione.

Il quinto capitolo, infine, analizzerà la fattibilità tecnica ed economica di due sistemi per lo stoccaggio di energia elettrica prodotta da un parco fotovoltaico per alimentare con energia pulita il futuro impianto di essiccazione non solo durante il giorno, ma anche durante la notte, in assenza di radiazione solare. Si confronterà lo stoccaggio di energia sotto forma di idrogeno verde con l'accumulo in una batteria, cercando di individuare la soluzione più vantaggiosa dal triplice punto di vista tecnico, economico ed ambientale.

1. I FANGHI DI DEPURAZIONE

I fanghi di depurazione sono il principale sottoprodotto della filiera di trattamento delle acque reflue. Con il termine ‘acque reflue’ si indicano genericamente le acque di scarico provenienti da qualsiasi processo, sia esso civile, agricolo o industriale. In particolare, si parla di ‘acque reflue municipali’ intendendo le acque di scarico prodotte in ambito urbano da utenze domestiche, commerciali e pubbliche. In base alla quantità di sostanza organica e di altri inquinanti presenti, si può distinguere fra acque grigie e acque nere: le prime provengono da scarichi di docce, lavandini e lavatrici, le seconde prevalentemente dai servizi igienici.

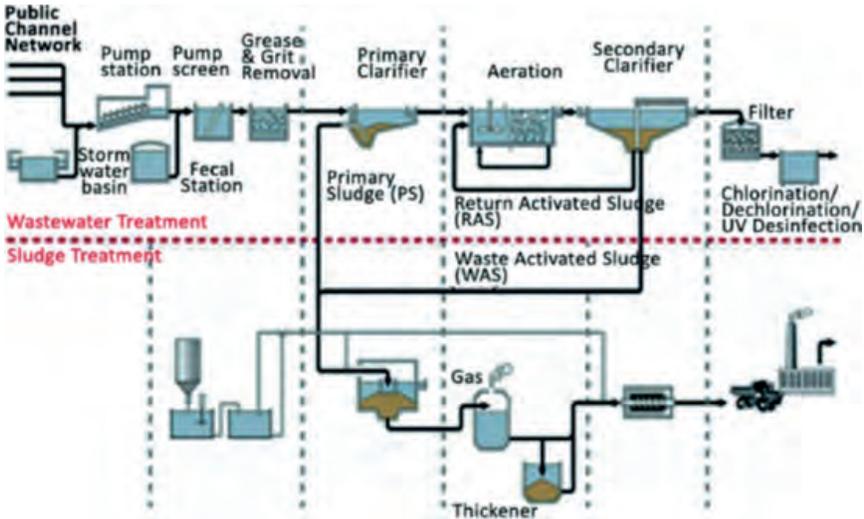
Tipicamente sia le acque grigie che le acque nere vengono raccolte mediante un’unica condotta, che le convoglia presso un impianto di depurazione. Spesso anche le acque piovane vengono raccolte nel medesimo condotto, in modo da ottenere una diluizione degli inquinanti: in questo caso si parla di fognatura mista.

Un impianto di depurazione (*Waste Water Treatment Plant*, WWTP) sfrutta una combinazione di processi fisici, chimici e biologici per rimuovere dalle acque reflue in ingresso la maggior quantità possibile di inquinanti, i quali vanno a concentrarsi nei fanghi di depurazione. Ogni WWTP comprende una linea acque, che ha come ingresso le acque reflue, come uscita l’acqua depurata e come sottoprodotto principale i fanghi di depurazione, e una linea fanghi, dedicata al trattamento dei fanghi stessi.

La linea acque comprende tre fasi principali:

- il trattamento primario, in cui vengono allontanati gli inquinanti solidi più grossolani sfruttando principi fisici/meccanici;
- il trattamento secondario, che utilizza processi biologici per rimuovere i composti a base di carbonio, azoto e fosforo;
- il trattamento terziario, non sempre presente, che permette un’ulteriore sanificazione e disinfezione delle acque.

Fig. 1.1. Schema generale di un impianto di depurazione delle acque reflue.



1.1. Caratterizzazione dei fanghi di depurazione

Una linea acque simile a quella appena descritta produce due tipi di fango: i fanghi primari, composti dai solidi sospesi che si sono sedimentati durante il trattamento primario, e i fanghi secondari o di supero, costituiti prevalentemente dalla biomassa attiva in eccesso generata durante il trattamento secondario. I fanghi di depurazione costituiscono poco più dell'1% in volume rispetto al flusso di acque reflue in ingresso, tuttavia la loro gestione incide per anche più del 50% sui costi operativi di un impianto medio.

Sono numerosi i parametri chimico-fisici che possono essere utilizzati per descrivere le caratteristiche di un fango: di seguito si riportano i principali. In riferimento alla quantità e alla tipologia di solidi presenti nel fango, si utilizzano i seguenti indicatori:

- *Solidi Totali* - TS (% g/g): per determinare il contenuto di solidi totali nel fango si procede ad essiccarne un campione a 105 °C, proseguendo fino a quando il suo peso non rimane costante, ovvero fino a quando non è evaporata tutta l'acqua presente. Il rapporto fra la massa finale del campione e quella iniziale dà il valore di TS.

- *Solidi Volatili - VS* (% g/g): il campione di fango su cui è già stata eseguita l'essiccazione per la determinazione dei TS viene portato ad una temperatura di 550 °C, proseguendo anche in questo caso fino al raggiungimento di un valore costante di peso. Il rapporto fra la massa evaporata (calcolata come differenza fra la massa prima e dopo il trattamento ad alta temperatura) e la massa iniziale del campione rappresenta il valore di VS. Il rapporto fra VS e TS permette di definire la biodegradabilità dei solidi presenti: tanto maggiore è il valore di VS/TS, quanto maggiore è la biodegradabilità.
- *Solidi Totali Sospesi - TSS* (mg/L): il campione viene filtrato con un filtro da 0,45 µm, quindi si fa evaporare l'acqua dal filtro e si misura la massa da esso trattenuta.
- *Solidi Volatili Sospesi - VSS* (mg/L): il campione filtrato a 0,45 µm viene ulteriormente riscaldato a 550 °C. La massa che evapora corrisponde ai VSS, mentre la massa residua che non è evaporata rappresenta i FSS, Solidi Sospesi Fissi (mg/L).
- *Solidi Totali Disciolti - TDS* (ppm): misurabili con opportuni strumenti digitali, includono la frazione che riesce a superare la filtrazione a 0,45 µm. Anche per i solidi disciolti è possibile distinguere tra solidi volatili (VDS) e solidi fissi (FDS).
- *Indice di volume del fango - SVI* (mL/g): il campione viene posto in un recipiente (tipicamente un cono Imhoff) e lasciato sedimentare per 30 minuti. Successivamente si misura il volume di fango che si è sedimentato nella parte inferiore del recipiente, rapportandolo al volume totale del campione: si ottiene un valore in mL/L. Si misura anche la concentrazione di solidi ancora sospesi nella parte superiore (questi ultimi prendono il nome di *Mixed Liquor Suspended Solids*, MLSS), dove 'mixed liquor' indica la miscela di refluo e biomassa attiva), trovando un valore in g/L. Il rapporto tra questi due parametri rappresenta l'indice di volume del fango. Un SVI inferiore a 80 mL/g indica una ottima sedimentabilità del fango, che corrisponde alla possibilità di effettuare una efficiente separazione della biomassa dal resto dell'effluente nelle fasi di sedimentazione secondaria.

1.2. Trattamento dei fanghi di depurazione

Un impianto di depurazione delle acque reflue produce notevoli quantità di fanghi, sia primari sia di supero, pur con delle differenze in base alla ti-

pologia di impianto. In generale, i fanghi sono composti in larghissima parte da acqua, ben oltre il 95%: il primo trattamento previsto in una tipica linea fanghi è pertanto l'ispessimento, finalizzato a una prima riduzione del contenuto di acqua. In base agli step successivi, si può ridurre ulteriormente il contenuto di acqua attraverso processi di disidratazione e/o essiccamento, oppure si può procedere direttamente alla stabilizzazione del fango. Sono possibili sia processi biologici, come la digestione anaerobica, per la quale non è necessario disidratare preventivamente il fango ma è invece necessario farlo a valle, sia processi di stabilizzazione chimica o termica, come l'essiccamento termico, l'incenerimento o la pirolisi, che richiedono invece un contenuto di umidità limitato nel fango in ingresso. La destinazione finale del fango varia in base alla tipologia di trattamenti che ha subito: tra le possibilità rientra lo spandimento su terreni agricoli come ammendante o fertilizzante, il conferimento in discarica, in alcuni casi persino la raffinazione per la produzione di *chemicals*.

1.3. Ispessimento

L'ispessimento a gravità sfrutta il differente peso specifico tra l'acqua e i solidi, analogamente a quanto avviene in un sedimentatore primario.

Il fango viene alimentato al centro di un bacino circolare con fondo conico, all'interno del quale rimane per un tempo inferiore alle 24 ore. Il materiale solido tende a sedimentarsi sul fondo, mentre l'acqua rimane nella parte superiore del bacino. Un sistema di bracci rotanti convoglia il fango ispessito verso il centro del fondo conico, da dove viene pompato verso la fase successiva del trattamento, mentre il surnatante sfiora oltre il bordo superiore della vasca, per essere inviato in testa alla linea di trattamento acque.

Esistono anche ispessitori statici, operanti come impianti *batch* con tempo di ritenzione idraulica del fango (HRT) di uno o due giorni.

Come illustrato in Tabella 1.1, l'ispessimento dei fanghi primari risulta più efficace rispetto all'ispessimento dei fanghi secondari. In ogni caso, il fango ispessito presenta ancora un elevatissimo contenuto di acqua, ben oltre il 90%, sufficiente per un processo di digestione anaerobica in modalità *wet* (a umido) ma non per altri processi di stabilizzazione, prima dei quali è necessaria anche una fase di disidratazione.

Tab. 1.1. *Variazione del contenuto di solidi prima e dopo l'ispessimento.*

	Caratteristiche fango prima dell'ispessimento		Caratteristiche fango dopo l'ispessimento	
	Massa del fango (gss/abitante*giorno)	Solidi totali (%)	Tipologia di ispessimento	Solidi totali (%)
Fango primario	35-45	2-6	Gravità	4-8
Fango secondario	25-35	0,6-1	Gravità	2-3
			Flottazione	2-5
Fango misto	60-80	1-2	Gravità	3-7

1.4. Disidratazione

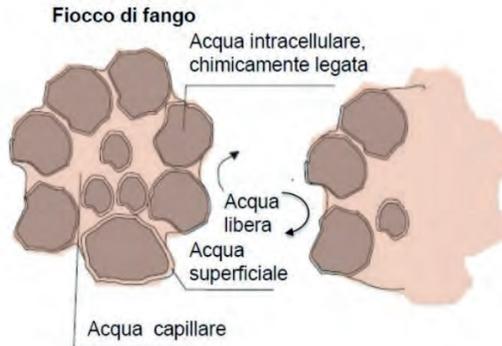
Sono quattro le forme in cui può trovarsi l'acqua all'interno di un fango: acqua libera, tra un fiocco di fango e l'altro; acqua interstiziale o capillare, nello spazio fra le particelle solide che costituiscono il fiocco; acqua superficiale, adesa alla superficie di ciascuna particella; acqua intracellulare, legata chimicamente ad altre molecole e difficilmente rimovibile. Mentre l'ispessimento agisce sostanzialmente solo sull'acqua libera, con i processi di disidratazione si cerca di ridurre anche il contenuto di acqua interstiziale e superficiale.

Si può facilmente intuire che maggiore è l'area superficiale delle particelle solide, maggiori saranno le interazioni fra esse e l'acqua, e maggiore sarà la resistenza alla disidratazione opposta dal fango. Per riuscire a disidratare più efficacemente il fango si ricorre sovente all'aggiunta di sostanze chimiche che favoriscano l'aggregazione delle particelle più fini, in modo da formare particelle a minor area superficiale: in questo caso si parla di condizionamento del fango.

A tal fine, è possibile utilizzare sia composti organici, ovvero polimeri ad elevato peso molecolare, disponibili in forma di soluzione acquosa oppure come polveri, sia composti inorganici, quali composti a base di ferro e alluminio, oppure carbonato di calcio.

La disidratazione può essere eseguita mediante varie tipologie di attrezzature, fra cui nastropresse, filtropresse, centrifughe. In generale, le filtropresse consentono di raggiungere un maggiore livello di disidratazione del fango, portando il tenore di solidi attorno al 36-45%, tuttavia richiedono una maggiore e più costosa manutenzione.

Fig. 1.2. Posizioni occupate dall'acqua nel fango.



1.5. Stabilizzazione

La stabilizzazione del fango, ossia la sua conversione ad un prodotto in cui non avvengono più reazioni biologiche e con trascurabile emissione di odori, può avvenire secondo diverse modalità.

I processi più diffusi sono quelli di tipo biologico, in cui la stabilizzazione avviene grazie all'azione di vari gruppi di microorganismi: fra di essi si devono ricordare la digestione aerobica, il co-compostaggio e la digestione anaerobica.

La digestione aerobica consiste in processi di ossidazione biologica simile a quelli che avvengono nei sistemi a fanghi attivi, con la differenza che in questo caso i microorganismi non decompongono substrato esterno, ovvero il materiale organico presente nei reflui, bensì operano in condizioni endogene, ovvero viene ossidata la stessa biomassa attiva. Si può eseguire la digestione aerobica secondo tre modalità: convenzionale, con ossigeno puro e in condizioni termofile.

Il compostaggio è un trattamento aerobico utilizzato per stabilizzare materiale solido, in particolare la frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU), ma è possibile anche eseguire un co-compostaggio di rifiuto organico e fanghi di depurazione.

La digestione anaerobica è un processo molto diffuso nel trattamento dei fanghi, dal momento che permette un recupero energetico attraverso la produzione di biogas, composto per il 50-70% da metano e quindi utilizzabile come combustibile. Questo consente, in condizioni ottimali, di co-

prire anche più della metà del fabbisogno energetico totale di un impianto di depurazione.

In alternativa ai processi biologici appena descritti, la stabilizzazione dei fanghi può essere condotta mediante processi che sfruttano elevate temperature e/o pressioni. Tali processi consentono di ridurre grandemente il volume del fango e di eliminare gli agenti patogeni, ma richiedono un notevole consumo energetico e possono produrre effluenti liquidi e/o gassosi dalla gestione non sempre semplice.

Nel caso dell'essiccamento termico, il fango precedentemente disidratato viene riscaldato con aria calda o direttamente con i fumi di combustione, fino a raggiungere un tenore di solidi del 65-95%. Si ottiene una piccola quantità di percolato, che può essere ricircolato in testa alla linea acque, un effluente gassoso da trattare opportunamente (in particolare per rimuovere l'odore), e un prodotto solido a cui viene data la forma di pellet. Quest'ultimo, facilmente trasportabile e completamente igienizzato, può essere usato in agricoltura oppure essere smaltito in discarica o inceneritore. Come si può facilmente intuire, l'essiccamento termico richiede un elevato consumo energetico: sono generalmente richiesti 0,82-1,1 kWh per chilogrammo di acqua evaporata, valori che in ogni caso non possono scendere sotto il limite termodinamico di 0,63 kWh/kg.

L'essiccamento solare, che verrà descritto dettagliatamente nei capitoli seguenti, si pone come ottima alternativa all'essiccamento termico, con prestazioni comparabili ma consumi energetici decisamente più contenuti.

L'incenerimento, invece, consiste in una 'normale' combustione in eccesso di ossigeno. Se il fango è molto umido, il calore latente sottratto dall'acqua è superiore a quello liberato dall'ossidazione della sostanza secca, pertanto si rende necessaria l'aggiunta di combustibile ausiliario; solo se il fango presenta un tenore di solidi superiore al 35% il processo di combustione risulta autogeno, cioè non richiede combustibile ausiliario. Le ceneri risultanti dalla combustione rappresentano meno del 4% del volume iniziale, tuttavia in esse si concentrano i metalli pesanti presenti nel fango in ingresso.

Altri processi più complessi mirano invece alla conversione del fango in prodotti a più elevato valore aggiunto: carbonizzazione idrotermica, pirolisi e gassificazione sfruttano elevate temperature e pressioni per ottenere tre prodotti in proporzioni variabili, un olio combustibile detto *tar*, un solido carbonioso simile alla lignite, e una frazione gassosa nota come *syngas*, composta prevalentemente da CO e H₂.

1.6. Uso dei fanghi in agricoltura

Lo spandimento dei fanghi stabilizzati su terreni agricoli può apportare numerosi benefici. Innanzitutto, i fanghi sono ricchi di nutrienti, in particolare azoto e fosforo; contengono inoltre modeste quantità di calcio, magnesio e potassio, anch'essi nutrienti che le piante possono assorbire per il loro sviluppo. Inoltre, il contenuto di materia organica dei fanghi migliora le proprietà dei suoli, aumentando la coesione degli stessi, la capacità di trattenimento delle acque piovane e la resistenza all'erosione; nel caso di suoli limo-argillosi, poi, migliora la friabilità e la porosità, permettendo una migliore circolazione dell'aria e agevolando lo sviluppo delle radici. Il risultato dell'impiego di fanghi stabilizzati può essere un aumento di produttività del suolo fino al 54% (Andreoli et. al, 2007).

Bisogna tuttavia prestare attenzione ad alcune problematiche: nei fanghi possono trovarsi metalli pesanti quali arsenico, cadmio, cromo, mercurio, nichel e altri, i quali, anche nel caso in cui siano presenti in basse concentrazioni, possono accumularsi nel terreno a seguito di un eccessivo spandimento dei fanghi stessi.

Analoghe considerazioni possono essere svolte relativamente agli inquinanti organici, quali idrocarburi, policlorobifenili o polibromobifenili, caratterizzati da ridotta biodegradabilità ed elevata tendenza alla bioaccumulazione.

Infine, agenti patogeni presenti nei fanghi possono contaminare i terreni sui quali vengono sparsi, e di conseguenza i raccolti coltivati sugli stessi. Naturalmente, il riutilizzo agronomico è maggiormente favorito nel caso di fanghi derivanti da reflui municipali, mentre è largamente sconsigliato laddove il fango derivi dal trattamento di reflui industriali.

La Tabella 1.2 riporta i limiti previsti dal D.Lgs. 99/92 circa le concentrazioni massime di patogeni e metalli pesanti, oltre ai requisiti minimi relativi ai nutrienti.

Appare in ogni caso evidente la necessità di valutare se le caratteristiche di un certo fango sono tali da permetterne l'impiego in agricoltura o meno, e anche in caso affermativo è opportuno calcolare accuratamente i quantitativi massimi di fango che un dato terreno può ricevere, sia per fornire il giusto apporto di nutrienti, sia per limitare i fenomeni di bioaccumulazione dei microinquinanti.

Nello scenario italiano, lo spandimento dei fanghi su terreni agricoli è stato largamente praticato, tanto che attualmente si è costretti a limitare questa via di riutilizzo a causa della saturazione della capacità ricettiva di molti

suoli. La stessa tendenza si sta osservando anche a livello europeo: nel 1985 ben il 98,6% dei fanghi veniva sparso su terreni agricoli, mentre nel 2015 tale percentuale era scesa al 75% (Eurostat, 2019).

Data la vetustà della normativa vigente (risalente a ben trent'anni fa), si sta da tempo valutando di porre nuovi limiti sulle massime concentrazioni di inquinanti ammissibili nei fanghi destinati allo spandimento su suoli agricoli. In particolare, già nel 2000 la Commissione Europea ha elaborato il *Working Document on Sludge*, nel quale sono contenute una serie di raccomandazioni in merito, che tuttavia non sono state ancora recepite dalla legislazione italiana (né da quella della maggior parte dei Paesi Europei).

Il *Working Document on Sludge* proponeva sia dei limiti alle concentrazioni di metalli nei fanghi, sia dei limiti alle quantità di metalli pesanti totali aggiungibili su un determinato suolo nell'arco di un anno a causa dello spargimento di fanghi sullo stesso.

Veniva suggerita una graduale diminuzione di tali concentrazioni proponendo tre categorie di limiti via via più stringenti, da applicare rispettivamente dal momento della pubblicazione del documento, a partire dal 2015 e a partire dal 2025, come riportato in Tabella 1.3. Inoltre, si proponevano anche dei limiti per alcuni inquinanti organici e per le diossine, come illustrato nella Tabella 1.4.

Tab. 1.2. *Requisiti per l'uso agronomico di un fango (D.Lgs. 99/92).*

Sostanza	Unità di misura	Valore limite
Cadmio	mg/kgSS	≤20
Mercurio	mg/kgSS	≤10
Nichel	mg/kgSS	≤300
Piombo	mg/kgSS	≤750
Rame	mg/kgSS	≤1000
Zinco	mg/kgSS	≤2500
Salmonelle	MPN/gSS	≤1000
Carbonio organico	%SS	≥20
Fosforo totale	%SS	≥0,4
Azoto totale	%SS	≥1,5

Tab. 1.3. *Massime concentrazioni di metalli in un fango ammissibili per l'uso agronomico (limiti proposti dal Working Document on Sludge).*

Sostanza	Unità di misura	Limite preesistente	Limite proposto 2000	Limite proposto 2015	Limite proposto 2025
Cadmio	mg/kgSS	20-40	10	5	2
Cromo	mg/kgSS	-	1.000	800	600
Rame	mg/kgSS	1.000-1.750	1.000	800	600
Mercurio	mg/kgSS	16-25	10	5	2
Nichel	mg/kgSS	300-400	300	200	100
Piombo	mg/kgSS	750-1.200	750	500	200
Zinco	mg/kgSS	2.500-4.000	2.500	2000	1.500

L'inerzia da parte dei legislatori nel recepire queste indicazioni si può comprendere considerando l'impatto economico che esse potrebbero causare: fanghi che attualmente possono essere smaltiti a costi contenuti mediante impiego agronomico dovrebbero essere avviati a trattamenti avanzati per la rimozione dei microinquinanti organici e dei metalli, oppure essere smaltiti in discariche o inceneritori. In entrambi i casi i gestori (spesso enti pubblici) dovrebbero farsi carico di un notevole aumento dei costi di smaltimento.

Tab. 1.4. *Massime concentrazioni di inquinanti organici in un fango ammissibili per l'uso agronomico (limiti proposti dal Working Document on Sludge).*

Sostanza	Unità di misura	Limite proposto 2025
Composti alogenati totali	mg/kgSS	500
Alchilbenzeni solfonati lineari	mg/kgSS	2.600
Di(2-etilexil)ftalato	mg/kgSS	100
Nonylfenoli	mg/kgSS	50
Idrocarburi policiclici aromatici	mg/kgSS	6
Policlorobifenili	mg/kgSS	0,8
Policloro dibenzofurani e dibenzodiossine	mg/kgSS	100

2. L'ESSICCAMENTO SOLARE

Come si è visto, ridurre il contenuto di umidità nei fanghi è un passaggio indispensabile nella filiera del loro trattamento, sia nel caso di trattamenti biologici, il cui sottoprodotto principale è ancora composto in larghissima parte da acqua, sia nel caso di trattamenti termici, che risultano tanto più efficaci quanto più disidratato è il fango in ingresso. I sistemi di disidratazione meccanica descritti al paragrafo 1.4 non riescono a ridurre il contenuto di acqua al di sotto del 60-70%, mentre l'essiccamento termico, che permette di raggiungere il 90-95% di sostanza secca, comporta consumi energetici (e conseguentemente costi di esercizio) molto elevati.

Una interessante alternativa per l'essiccazione dei fanghi, che consente di avvicinarsi alle prestazioni dell'essiccamento termico pur mantenendo costi di esercizio decisamente più bassi, è l'essiccamento solare. Concettualmente molto semplice, esso prevede di disporre il fango da essiccare in uno strato omogeneo, dello spessore di alcune decine di centimetri, all'interno di una vera e propria serra. Il pavimento della serra è realizzato in calcestruzzo, con delle canalette per la raccolta dell'eventuale percolato, che si forma solo in piccole quantità dal momento che il fango viene preventivamente disidratato per via meccanica. Le pareti e il tetto sono in materiale trasparente alla radiazione visibile ma opaco all'infrarosso, come vetro o plexiglass, proprio come in una normale serra: in questo modo la radiazione solare entra nella serra riscaldando il fango, ma la radiazione infrarossa riemessa dallo stesso viene trattenuta all'interno della serra, scaldando ulteriormente il fango. In questo modo si raggiungono temperature anche superiori ai 40 °C, che permettono all'umidità contenuta nel fango di evaporare. Nella serra deve essere presente un sistema di ventilazione che garantisca l'allontanamento dell'umidità evaporata, inoltre spesso si implementa anche un dispositivo che rimescoli periodicamente lo strato di fango, per ottenere una essiccazione più uniforme.

Evidente vantaggio dell'essiccamento solare sono i consumi energetici bassissimi, limitati al solo azionamento dei ventilatori e dell'eventuale sistema

di miscelazione del fango: in letteratura si riportano valori di 0,22-0,28 kWh/kg di acqua evaporata, meno di un quarto rispetto all'essiccamento termico. Inoltre, l'estrema semplicità dell'impianto determina costi di manutenzione e di installazione molto ridotti.

L'aspetto più problematico di una serra solare sono le variazioni stagionali e giornaliere della temperatura e dell'irraggiamento, a causa delle quali i tempi di essiccazione possono variare molto fra estate e inverno; anche l'eliminazione degli agenti patogeni può non essere garantita se all'interno della serra non si riesce a mantenere temperature sufficientemente alte (ad esempio i processi di compostaggio richiedono temperature superiori a 55 °C per almeno tre giorni per garantire la disinfezione del materiale). Infine, si rende spesso necessario l'uso di biofiltri per abbattere le emissioni di odori.

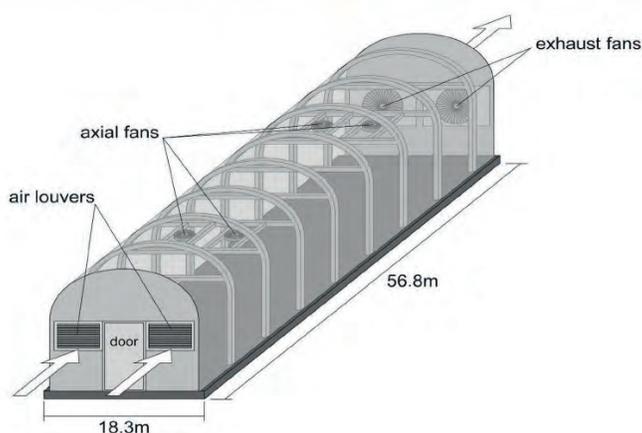
L'essiccamento solare è un argomento ampiamente sviluppato nella letteratura tecnica: nei paragrafi seguenti si analizzeranno alcuni aspetti caratteristici di questo processo facendo riferimento a diversi articoli e pubblicazioni specialistiche.

2.1. Parametri che influenzano le prestazioni dell'essiccamento solare

In letteratura sono disponibili dati relativi a varie campagne sperimentali, eseguite sia su impianti pilota (in scala ridotta), sia su impianti in scala reale. In tutti i casi, si osservano risultati più che soddisfacenti per quanto riguarda il livello di essiccamento raggiungibile, con un contenuto di acqua al termine del trattamento anche inferiore al 5%. Tuttavia, si nota anche una chiara dipendenza della velocità di essiccamento dalle condizioni meteorologiche e climatiche, con prestazioni decisamente migliori nella stagione estiva, più calda e con maggiore irraggiamento.

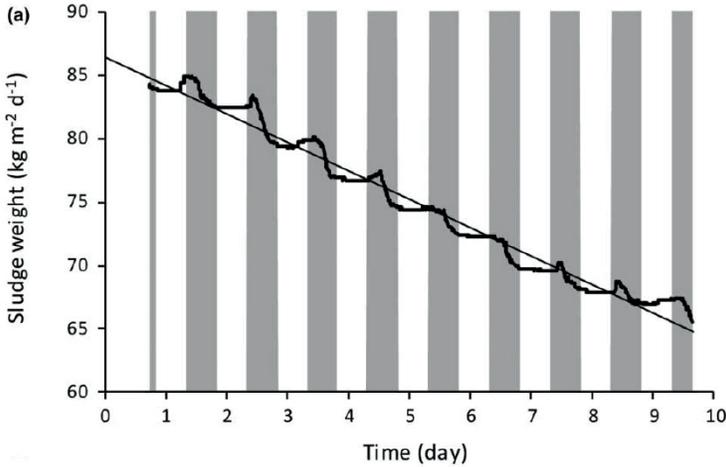
Uno studio del 2020 (Boguniewicz-Zablocka et al.) ha monitorato il funzionamento di una serra solare in piena scala a Ujazd, Opolskie Voivodeship, in Polonia. L'impianto riceve in ingresso 300-400 tonnellate di fango all'anno, con un contenuto di umidità superiore all'88%, e produce circa 35 tonnellate di fango disidratato. La serra è dotata di otto ventilatori orizzontali a bassa velocità per il mescolamento interno dell'aria, di due ventilatori per l'estrazione dell'aria dall'interno della serra e di un robot semovente per il rivoltamento del fango. Il consumo energetico complessivo di circa 130-180 MWh/anno, pari a 0,5 kWh/kg di acqua evaporata.

Fig. 2.1. La serra solare di Ujazd, in Polonia (Boguniemi \acute{c} -Zablocka et al., 2020).



Si è seguita l'evoluzione di tre *batch* di fango, caricati in tre differenti periodi dell'anno: uno a novembre, uno ad aprile e uno a giugno. In tutti e tre i casi, partendo da un fango con circa l'88% di umidità, si è raggiunto un tenore di umidità nel fango essiccato inferiore al 10%, tuttavia il tasso di evaporazione, e conseguentemente il tempo necessario per il completo essiccamento, è risultato molto diverso a seconda del periodo dell'anno. Nella stagione invernale, con una temperatura esterna inferiore a 10 °C, il fango perdeva circa il 2,6% di umidità alla settimana, tanto che il *batch* caricato a novembre ha raggiunto l'8,06% di umidità solo a metà giugno. Nella stagione primaverile, quando le temperature erano attorno ai 15 °C, il fango cedeva l'8,3% di umidità alla settimana, mentre in quella estiva, con temperature superiori a 20 °C, addirittura il 40% alla settimana. Un risultato analogo è stato raggiunto da Prenafeta-Boldù et al.: in uno studio pubblicato nel 2020, i ricercatori hanno costruito un impianto pilota per l'essiccazione di fanghi provenienti da un'azienda vitivinicola a

Fig. 2.2. *Variazione della massa del fango in essiccazione nell'impianto di Vilafranca del Penedès, in Spagna (Prenafeta-Boldù et al., 2020).*



Vilafranca del Penedès, in Spagna. Esso comprendeva una serra di circa 10 m^2 , con un ventilatore per l'estrazione dell'aria umida, controllato da un sensore che lo attivava solo se l'umidità interna alla serra superava il 50%, e un piccolo biofiltro per il trattamento dell'aria in uscita. Il fango è stato caricato nell'impianto a metà settembre con un contenuto iniziale di umidità pari all'89,6%, essiccato per 9 giorni, quindi stoccato in un luogo riparato fino ai primi di novembre, quando è stato caricato nuovamente nell'impianto, rimanendovi per altri 25 giorni. L'umidità finale del fango era pari al 14,3%.

Nel primo intervallo operativo, le condizioni meteorologiche sono state più favorevoli, con temperature di circa $15 \text{ }^\circ\text{C}$: la diminuzione del contenuto di umidità nel fango è stata pari a 17,1% alla settimana. Nel secondo intervallo operativo, con temperature più basse, attorno ai $10 \text{ }^\circ\text{C}$, la perdita di umidità è risultata più bassa, circa il 14% alla settimana.

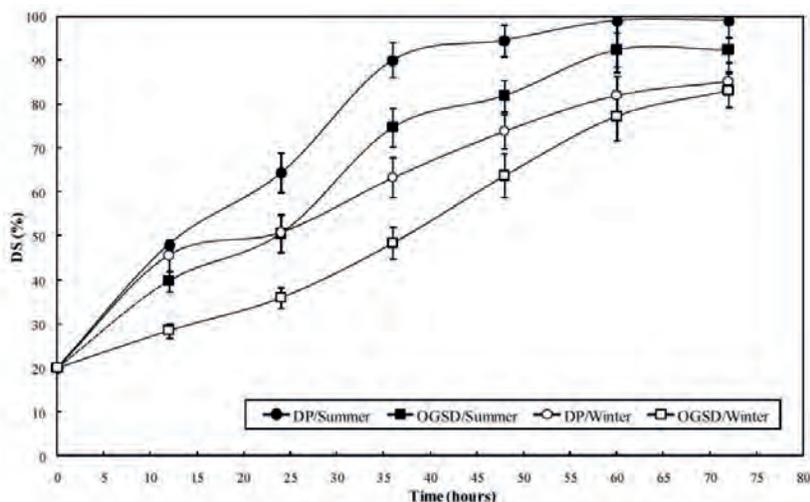
Lo stesso studio ha anche evidenziato come, nelle prime ore del giorno, il fango accresceva leggermente la sua massa: ciò è stato attribuito alle già note proprietà igroscopiche dello stesso, grazie alle quali il fango tendeva ad assorbire parte della condensa che si formava sulle pareti della serra durante la notte, quando la temperatura esterna scendeva ben al di sotto di quella interna. Questo fenomeno riduceva l'efficienza della disidratazione

di circa il 20%, ragione per cui lo studio concludeva affermando la convenienza di installare un sistema per allontanare le condense, minimizzandone il riassorbimento da parte del fango.

Un altro parametro che influenza fortemente l'essiccamento del fango è la ventilazione: Belloulid et al., nel 2017, hanno confrontato le prestazioni di una piccola serra solare (*Open Greenhouse Sludge Dryer, OGDS*) con quelle di un semplice bacino di essiccazione a cielo aperto (*Drying Pan, DP*), il sistema di essiccazione attualmente in uso presso l'impianto di depurazione di Marrakesh, in Marocco. La serra, con superficie di meno di 1 m², non prevedeva né sistemi di mescolamento del fango, né sistemi di ventilazione forzata, ma solo delle aperture nella sua parte superiore.

Si sono ripetute le misurazioni sia nella stagione estiva, con temperature esterne comprese fra 26 e 40 °C, sia nella stagione invernale, con temperature comunque decisamente elevate, comprese nell'intervallo 20-31 °C. In estate, il fango raggiungeva il 20% di umidità in 32 ore nei bacini a cielo aperto e in 45 ore nella serra; in inverno, invece, lo stesso tenore di umidità veniva raggiunto in 57 ore nei bacini e in 65 ore nella serra. In entrambi i casi, l'essiccamento è risultato più rapido nei bacini a cielo aperto rispetto alla serra, sebbene all'interno di quest'ultima si raggiungessero temperature più alte anche di 10 °C rispetto a quelle esterne.

Fig. 2.3. Tenore di sostanza secca nel fango in essiccamento (Belloulid et al., 2017).



All'interno della serra, però, la velocità dell'aria era anche inferiore alla metà rispetto a quella esterna: le aperture sulla sommità della struttura permettevano un certo ricambio d'aria, ma schermavano in buona parte il vento, che invece poteva lambire i bacini a cielo aperto.

Si può quindi concludere che garantire un'adeguata ventilazione all'interno delle serre solari è fondamentale per migliorare le prestazioni di essicca-mento.

2.2. Caratteristiche del fango essiccato

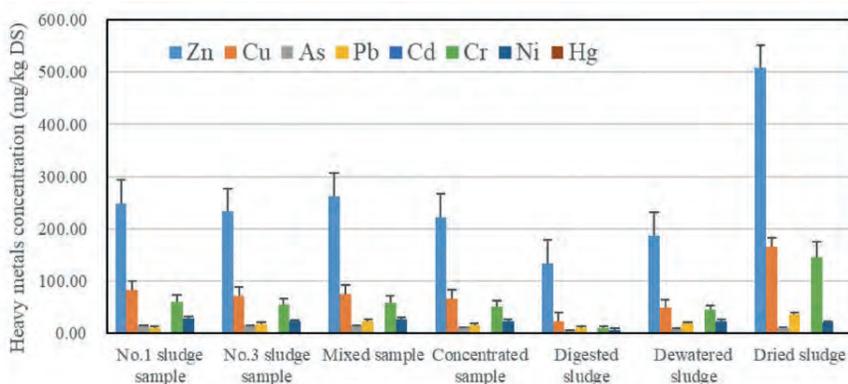
Collard et al., in un articolo del 2016, analizzano le caratteristiche globali e molecolari dei fanghi di depurazione prodotti in tre diversi impianti francesi, trattati rispettivamente con essiccaamento termico, solare e in canneto artificiale, metodologia quest'ultima che prevede il deposito dei fanghi, per un tempo complessivo di alcuni anni, in ampie vasche nelle quali si sviluppano dei veri e propri canneti.

Durante l'essiccaamento solare, il pH del fango è diminuito da 7,4 a 6,6 a causa dell'emissione di CO₂ prodotta dall'attività batterica; per la stessa ragione, anche la quantità di carbonio totale è diminuita leggermente. La quantità di lipidi presenti, dopo un lieve aumento nelle prime settimane, è diminuita fortemente: anche questo fenomeno è riconducibile all'attività batterica, che ha degradato parte della sostanza organica. Gli acidi grassi hanno manifestato un andamento simile a quello dei lipidi, mentre si è osservato un aumento della sostanza *hummin-like*, la componente insolubile della sostanza organica. Il rapporto O/C è rimasto costante, a differenza del rapporto C/N che è leggermente aumentato: ciò è rappresentativo di una maggiore biodegradabilità del fango, al termine del processo di disidratazione.

Nel caso dell'essiccazione termica, condotta a elevate temperature, si sono osservate tendenze opposte: in particolare, è aumentato il contenuto di lipidi e sono diminuite le sostanze *hummin-like*. Infine, il fango depositato nei canneti artificiali ha mostrato ridotte variazioni a livello molecolare, a parte un aumento della quantità di lipidi.

A conclusione di queste osservazioni, si affermava che il fango essiccato mediante serre solari è più indicato come ammendante agricolo, ovvero per fornire un apporto a lungo termine di sostanza organica ai terreni, mentre il fango essiccato ad alta temperatura è maggiormente adatto per un impiego come fertilizzante o per la produzione di biocombustibili.

Fig. 2.4. Concentrazione dei metalli pesanti lungo la filiera di trattamento del fango (Guo et al., 2021).



Per la scelta della destinazione finale del fango disidratato, tuttavia, è indispensabile tenere conto anche della concentrazione degli inquinanti, in particolare metalli pesanti e contaminanti emergenti. Un recente studio di Guo et al., condotto nel 2021, ha analizzato le caratteristiche dei fanghi prodotti da un impianto a fanghi attivi situato nella provincia di Anhui, in Cina, misurando la concentrazione di alcuni metalli pesanti (Zn, Cu, As, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg), di alcuni idrocarburi policiclici aromatici, di due tipi di antibiotico e di due sottoprodotti derivanti dal massiccio uso di disinfettanti causato dalla pandemia di Covid-19. I campioni sono stati prelevati all'uscita dei due sedimentatori secondari, del bacino di mescolamento, dell'ispessitore, del digestore anaerobico, della filtropressa e infine della serra solare.

I risultati mostrano un netto incremento delle concentrazioni di metalli, soprattutto zinco, rame e cromo, dovuti probabilmente alla volatilizzazione di parte della sostanza organica volatile ancora presente nel fango in ingresso alla serra solare. Gli idrocarburi policiclici aromatici, invece, non hanno subito sostanziali variazioni dall'ispessitore in poi: ciò significa che parte di essi è stata allontanata dall'ispessitore assieme al surnatante, mentre la parte rimasta nei fanghi non è stata intaccata né dalla digestione anaerobica, né dall'essiccamento solare. Nel caso degli antibiotici, l'essiccamento ha determinato un lieve incremento della loro concentrazione, mentre i sottoprodotti dei disinfettanti hanno mostrato un forte

aumento di concentrazione, dopo essere stati ridotti di oltre il 60% dalla digestione anaerobica.

In generale, si può affermare che a seguito dell'essiccamento solare i fanghi presentano concentrazioni di microinquinanti uguali o maggiori a quelle riscontrabili nel fango in uscita dai digestori. Sebbene nel caso analizzato da Guo et al. non venissero mai superati i limiti imposti dalla legislazione cinese per il riutilizzo agronomico dei fanghi, gli stessi autori raccomandano la massima prudenza, tenendo conto anche dei fenomeni di bioaccumulazione a cui alcuni dei composti citati possono andare incontro, e invitano lo stesso governo cinese a porre «more attention and focus» a queste problematiche.

2.3. Possibili strategie per incrementare le prestazioni del processo

Una serra solare vede tra i suoi principali vantaggi la costruzione estremamente semplice, tanto che essa può essere costituita dal solo involucro in materiale trasparente e da un sistema di ventilazione forzata. Se però si desidera migliorarne le prestazioni, ad esempio riducendo il tempo necessario per raggiungere un determinato livello di umidità o raggiungendo un più basso livello di umidità nel fango essiccato, si deve necessariamente ottimizzare in qualche modo l'impianto.

Boguniewicz-Zablocka et al., nel sopraccitato articolo del 2020, guardano con scetticismo alla possibilità di fornire del calore ulteriore ai fanghi all'interno delle serre solari. Viene dapprima presa in considerazione la possibilità di aggiungere lampade ad infrarossi, subito scartata in quanto troppo costosa in riferimento sia ai costi di installazione, sia ai costi di esercizio. Analogamente, un sistema di riscaldamento integrato nel pavimento della serra viene ritenuto non conveniente. L'impiego di pompe di calore, pur definito «technically possible», viene a sua volta scartato per i suoi costi giudicati eccessivi.

Un recente studio dell'Università di Pechino (Zhang et. al, 2021) ha analizzato più nel dettaglio varie alternative per ridurre i consumi energetici, l'impatto ambientale e i costi di esercizio degli impianti di depurazione, fra cui l'utilizzo di pompe di calore. Facendo riferimento anche a studi precedenti, i ricercatori cinesi affermano che con esse sia possibile estrarre fino a 1,16 kWh di energia da un metro cubo di acque reflue, per ogni abbassamento di temperatura di 1 °C. Nel primo scenario considerato, l'energia così estratta viene utilizzata per alimentare una rete di teleriscal-

damento, mentre in un secondo caso viene impiegata per riscaldare l'aria necessaria alla disidratazione del fango, il quale viene successivamente incenerito con recupero di energia elettrica.

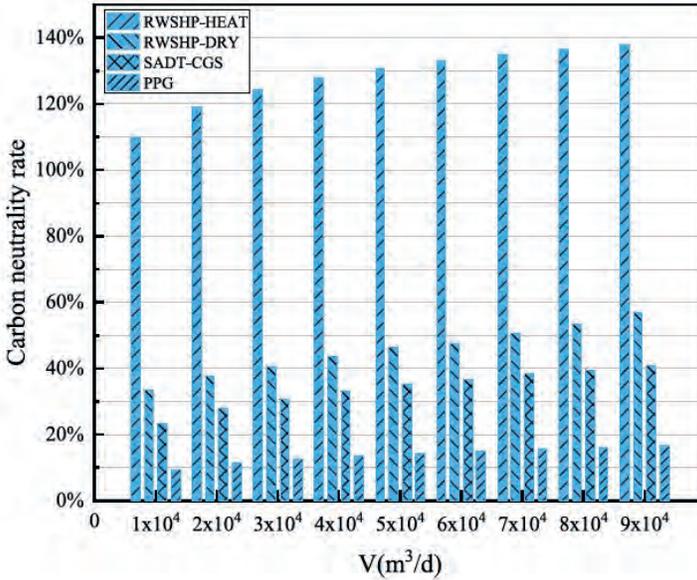
Lo studio confronta anche altre due tecnologie, la cogenerazione del biogas prodotto da digestione anaerobica e la produzione di elettricità mediante pannelli fotovoltaici collocati sopra le strutture preesistenti dell'impianto di depurazione.

I risultati ottenuti mostrano come l'impiego di pompe di calore permetta di ottenere la maggiore riduzione dell'impronta carbonica, ovvero la migliore riduzione di CO₂ equivalente: nell'ipotesi del teleriscaldamento, si ottiene una riduzione superiore al 100% rispetto alle emissioni che si avrebbero nel caso di fornitura di calore con caldaie tradizionali, mentre la combinazione di essiccamento e incenerimento del fango permette una riduzione variabile tra il 30% e il 60% circa, in funzione delle dimensioni dell'impianto. Si tratta in ogni caso di valori superiori a quelli ottenibili con la sola cogenerazione (fra il 20% e il 41%) o con i soli pannelli fotovoltaici (inferiore al 20%, ma può superare il 35% in località con maggiore irraggiamento e maggiore superficie disponibile per il parco fotovoltaico). Inoltre, i tempi di payback degli impianti con pompa di calore sono risultati sempre inferiori a quelli degli altri sistemi, anche al variare dei prezzi dell'energia elettrica e termica.

Lo studio conclude affermando che l'impiego di pompe di calore per l'essiccamento del fango è la «better technical route», non richiedendo la realizzazione di una costosa rete di teleriscaldamento e costituendo un'efficace soluzione per il trattamento del fango stesso. Si può inoltre ragionevolmente supporre che una combinazione di cogenerazione del biogas derivante dalla digestione anaerobica, di essiccamento del fango mediante pompe di calore e di un parco fotovoltaico per la produzione di elettricità costituirebbe una soluzione ancora più vantaggiosa, con una riduzione dell'impronta carbonica proporzionale alla somma delle riduzioni legate a ciascun sistema.

L'uso di pannelli fotovoltaici, specificamente per l'essiccamento dei fanghi, è stato analizzato anche da Kurt et al., in un articolo del 2015, nel quale si valuta la possibilità di utilizzare l'energia da essi prodotta in combinazione il calore trattenuto da una serra solare. Vengono presi in considerazione 37 impianti di depurazione distribuiti in tutta la Turchia, cercando per ciascuno l'ottimo economico al variare delle dimensioni della serra e del parco fotovoltaico, ponendo diverse condizioni di vincolo.

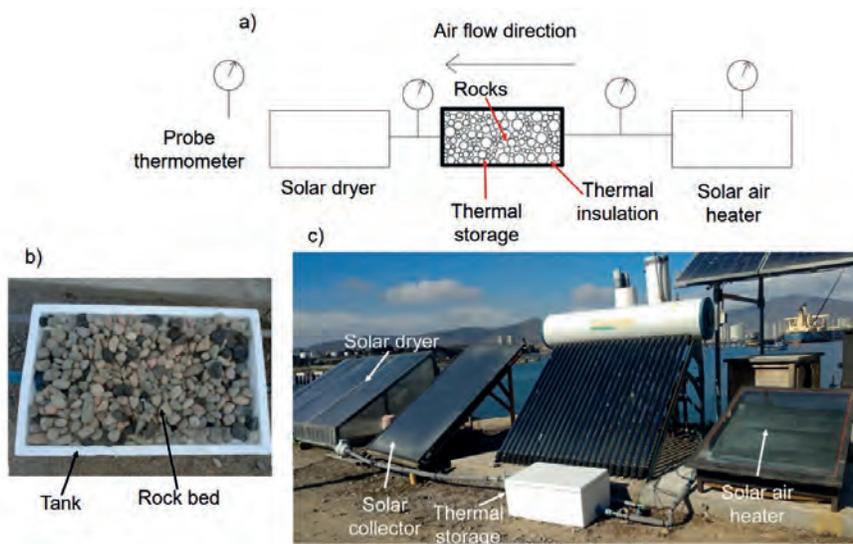
Fig. 2.5. Riduzione dell'impronta carbonica nei quattro scenari, al variare della dimensione dell'impianto (Zhang et al., 2021).



In particolare, dapprima si è utilizzato un modello meno vincolato, in cui si imponeva solamente che l'area complessiva della serra e del parco fotovoltaico fosse inferiore all'area totale delle strutture preesistenti di ciascun impianto; quindi si è imposto che l'area della serra non superasse quella della più grande serra allora esistente (20.000 m², a Palma de Mallorca), infine si è richiesto che l'area della sola serra non superasse il 5% o il 10% dell'area dell'impianto preesistente.

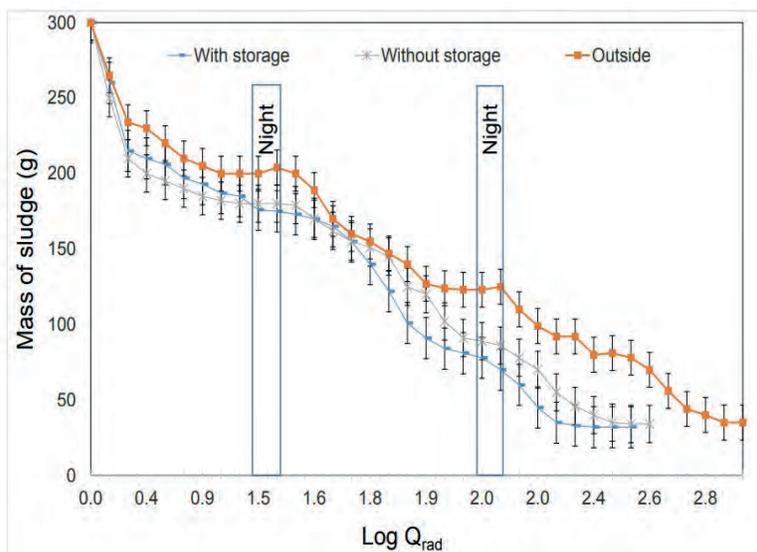
Nel primo scenario, in tutti gli impianti si riusciva a trovare le dimensioni ottimali della serra e dell'impianto fotovoltaico in grado di disidratare il fango fino a raggiungere il 90% di solidi. Imponendo restrizioni più forti sulla superficie occupabile, invece, si è trovato che in molti casi non si riusciva ad ottenere la disidratazione desiderata. Si può quindi concludere che la combinazione di serra e impianto fotovoltaico può dare risultati paragonabili all'essiccazione termica, ma necessita di superfici ampie, non sempre disponibili nelle vicinanze degli impianti preesistenti.

Fig. 2.6. Schema e fotografie dell'impianto pilota realizzato in Cile (Poblete e Painemal, 2020).



Un'altra possibilità per aumentare le prestazioni dell'essiccamento solare è l'impiego di un sistema di accumulo termico. Durante la notte la radiazione solare è assente, di conseguenza il fango tende a raffreddarsi e, per le già citate proprietà igroscopiche, può addirittura riassorbire parte dell'umidità che aveva rilasciato. Un sistema di accumulo termico permette di immagazzinare calore durante il giorno e di rilasciarlo durante la notte, in modo da continuare il processo di essiccamento anche in assenza della radiazione diretta. Poblete e Painemal, nel 2020, hanno verificato l'efficacia di questa tecnologia per l'essiccamento del percolato proveniente da una discarica, in Cile. Il piccolo impianto pilota da loro realizzato prevedeva di preriscaldare l'aria necessaria alla ventilazione della serra con un pannello solare termico. L'aria, prima di essere immessa nella serra, attraversava un recipiente isolato termicamente e riempito di rocce (materiale a elevata capacità termica): durante il giorno le rocce si riscaldavano, mentre durante la notte cedevano il calore accumulato all'aria.

Fig. 2.7. *Variazione della massa dei tre campioni di fango nell'impianto cileno (Poblete e Painemal, 2020).*



Si è confrontato il processo di essiccamento di tre campioni di fango: un primo campione è stato lasciato all'aria aperta, un secondo campione è stato essiccato nella serra solare ma senza l'utilizzo del sistema di accumulo, mentre il terzo ha beneficiato anche dell'accumulo.

I risultati sono stati decisamente positivi: innanzitutto, la disidratazione è risultata in ogni caso più rapida utilizzando la serra solare rispetto al semplice deposito all'aria aperta. Poi, l'impiego dell'accumulo ha permesso di continuare a ridurre il contenuto di umidità del fango anche durante le ore serali e persino durante le ore notturne, sebbene in misura minore a causa della limitata capacità termica dell'accumulo stesso.

I campioni posti all'interno della serra, infine, non hanno risentito del fenomeno dell'assorbimento di umidità atmosferica durante le ore notturne, che si è invece potuto chiaramente osservare nel campione posto all'aria aperta.

3. L'IMPIANTO DI ESSICCAMENTO SOLARE IN VIA DI REALIZZAZIONE DA PARTE DI CAFC SPA A UDINE

Il Consorzio per l'Acquedotto del Friuli Centrale gestisce il servizio idrico integrato (comprendente acquedotti, fognature e depurazione) in 121 Comuni della provincia di Udine. Nello specifico, CAFC SpA si occupa della gestione di numerosi impianti di trattamento delle acque reflue dislocati sul territorio, tra cui il principale è quello di Udine, situato in via Gonnars 38, il quale riceve i liquami provenienti dal territorio comunale di Udine e da parte di quello di Tavagnacco. Esso tratta per la quasi totalità acque di origine urbana, e ha una capacità di trattamento di 200.000 abitanti equivalenti (un abitante equivalente corrisponde a un carico di BOD₅ pari a 60 g/giorno).

Presso tale impianto è prevista nell'immediato futuro la costruzione di una serra solare per l'essiccamento dei fanghi, che verrà effettuato a seguito della digestione anaerobica e della disidratazione meccanica degli stessi; attualmente è in servizio un impianto pilota che riproduce, in scala ridotta, le condizioni operative a cui saranno sottoposti i fanghi durante l'essiccamento nell'impianto reale. Nel presente capitolo si descriverà brevemente lo schema di funzionamento dell'impianto di depurazione attuale (linea acque e linea fanghi) e si accennerà alle prestazioni del futuro sistema di essiccamento solare.

3.1. Linea acque

Le acque reflue convogliate dal collettore principale giungono a un canale a cielo aperto situato immediatamente all'esterno dell'impianto, dove una paratoia fissa devia i liquami verso un canale rettangolare che li convoglia all'interno dell'impianto.

Il refluo viene subito convogliato alla sezione di grigliatura, dove tre griglie verticali del tipo *step-screen*, con maglie da 6 mm, rimuovono il materiale solido più voluminoso.

Fig. 3.1. *Vista satellitare dell'impianto di depurazione di Udine.*



Superate le griglie, il refluo giunge alle vasche di dissabbiatura e disoleatura. Le sabbie con granulometria di circa 2 mm precipitano sul fondo e vengono allontanate da un ponte raschiatore del tipo va e vieni, mentre un sistema di areazione facilita l'affioramento delle sostanze oleose, che vengono sfiorate in canalette laterali e inviate ad ulteriore trattamento.

Il liquame viene poi suddiviso in tre parti uguali, ognuna delle quali viene inviata ad uno dei tre sedimentatori primari, di forma circolare e dotati di ponte raschiatore rotante. La sedimentazione primaria permette l'abbattimento di circa il 30% del carico organico presente nel liquame; il fango primario che si forma viene convogliato dai raschiatori verso il centro delle vasche, da dove viene prelevato da una condotta. È presente un sistema di immissione di aria compressa in prossimità della bocca di presa di tale condotta, sia per prevenirne l'intasamento, sia per evitare l'innescio di fenomeni di putrefazione.

L'effluente liquido proveniente dai sedimentatori primari viene additivato con cloruro ferrico, che favorisce l'aggregazione delle particelle colloidali agevolandone la successiva separazione, ed eventualmente con policloruro di alluminio, aggiunto nel periodo invernale per evitare fenomeni di rigonfiamento del fango e per migliorarne la sedimentabilità. Tali reagenti agevolano inoltre la rimozione del fosforo, in modo da rispettare i severi requisiti sulle concentrazioni di nutrienti allo scarico.

Successivamente l'effluente viene ripartito fra quattro linee di trattamento biologico, che operano secondo il processo 'SW-Easygest-Cicli Alternati', il quale prevede di realizzare una successione di fasi aerobiche e anaerobiche all'interno dello stesso bacino. Ogni linea comprende due bacini posti in serie, uno in cui avviene il trattamento vero e proprio e uno che funge da sedimentatore secondario. Il primo bacino è dotato di sistema di distribuzione dell'aria e di miscelatori sommersi, oltre che di una pompa per l'inoculo di fango primario, che funge da substrato carbonioso per la denitrificazione: l'esigua presenza di COD in ingresso, infatti, non sarebbe sufficiente ad ottenere una buona resa di denitrificazione. Il secondo bacino è equipaggiato con carroponete 'va e vieni aspirato' per la rimozione del fango che si accumula sul fondo della vasca e di un sistema per l'intercettazione delle schiume. L'effluente chiarificato in uscita dai sedimentatori secondari viene convogliato in canalette con profilo di sfioro tipo Thompson, dotato di lama paraschiume.

Le acque provenienti dal trattamento secondario attraversano una vasca a chicane interrata all'interno della quale può essere dosato il prodotto disinfettante.

Le acque depurate vengono scaricate in un canale a cielo aperto in cemento, dove si mescolano con gli eventuali reflui sfiorati in caso di forti piogge. Il canale a cielo aperto trasporta le acque fino al torrente Cormor, a circa 5 km di distanza dal depuratore.

3.2. Linea fanghi

I fanghi primari provenienti dai sedimentatori primari e i fanghi di supero originati dal trattamento biologico vengono pompati fino all'ispessitore. Le acque di supero vengono rinviate in testa alla linea acque, mentre i fanghi ispessiti vengono inviati ai digestori anaerobici.

La digestione anaerobica vera e propria avviene in due digestori primari; successivamente i fanghi digeriti vengono stoccati in un digestore secondario, per un primo ispessimento in vista della successiva disidratazione. Il biogas prodotto viene accumulato in due gasometri a campana mobile, aventi un volume complessivo di 1.800 m³; la produzione annua di biogas è di circa 560.000 Nm³. Per mantenere le condizioni termiche di mesofilia (circa 35 °C) all'interno dei digestori, parte del fango viene estratto e riscaldato mediante scambiatore a fascio tubiero. Il calore viene fornito da motori di cogenerazione alimentati dallo stesso biogas prodotto dalla digestione anaerobica.

I fanghi digeriti, dopo aver stazionato nel digestore secondario, vengono condizionati con l'aggiunta di un polielettrolita cationico, quindi inviati alla disidratazione meccanica. In un edificio adiacente ai digestori sono presenti tre presse a nastro, di cui due operanti in parallelo e una mantenuta normalmente a riposo. Il fango nastropressato presenta un contenuto di umidità mediamente pari al 22-23%. L'acqua di risulta viene rilanciata in testa all'impianto a mezzo di due pompe dedicate.

Le presse a nastro scaricano il fango disidratato su di un nastro trasportatore, che lo accumula in un'area adiacente all'edificio; successivamente esso viene trasportato, a mezzo di pala gommata, in un vicino capannone adibito all'affinamento del fango stesso.

3.3. L'impianto di essiccamento solare

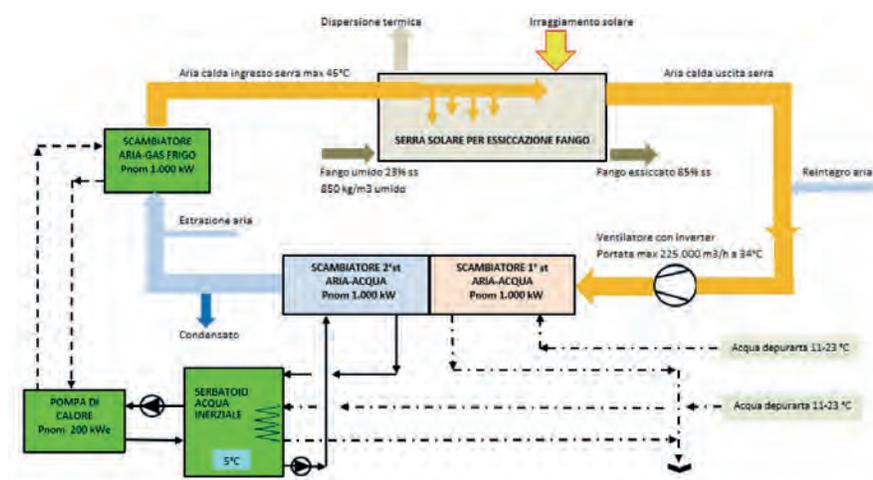
La serra solare che si intende realizzare tratterà il fango in uscita dalle nastropresse, portandolo ad un tenore di sostanza secca indicativo dell'85%, sufficientemente alto per consentire lo smaltimento del fango in discarica con costi contenuti, oppure per avviarlo ad ulteriori trattamenti o processi 'avanzati' quali quelli accennati nel capitolo 1.

La serra sarà composta da due moduli con area complessiva di 2.000 m², realizzati in materiale trasparente, con basamento in calcestruzzo e muretti perimetrali in calcestruzzo di altezza 1 m. Un carrello elettrico semovente provvederà al rimescolamento periodico del fango, che verrà steso in strati

di spessore 20-25 cm mediante pala gommata. Sarà inoltre presente un sistema di ventilazione interno alla serra, realizzato attraverso ventilatori assiali basculanti. L'aria estratta dalla serra verrà mescolata con aria ambiente e raffreddata fino ad ottenere la condensazione dell'umidità in essa contenuta, quindi parte dell'aria verrà scaricata in atmosfera, mentre la parte rimanente verrà riscaldata grazie ad una pompa di calore e immessa nuovamente nella serra. Si riporta in Figura 3.2 lo schema dell'impianto di trattamento dell'aria.

Come si può osservare, l'aria estratta, dopo il mescolamento con aria di reintegro prelevata dall'ambiente e dopo aver attraversato il ventilatore, attraversa un primo scambiatore aria-acqua, con potenza nominale pari a 1.000 kW, alimentato con l'acqua depurata in uscita dall'impianto: in base alla stagione, l'acqua avrà una temperatura compresa tra 11 °C e 23 °C. Successivamente, l'aria viene ulteriormente raffreddata mediante un secondo scambiatore, anch'esso da 1.000 kW alimentato con acqua proveniente da un serbatoio di accumulo mantenuto a 5 °C grazie all'evaporatore della pompa di calore. Ulteriore calore viene estratto dal serbatoio di accumulo mediante uno scambiatore alimentato con l'acqua depurata in uscita dall'impianto. L'aria, a questo punto deumidificata, viene riscaldata attraversando la batteria a fluido frigorigeno del condensatore dell'appena citata pompa di calore; la potenza termica ceduta all'aria dalla pompa di calore è pari a 1.000 kW.

Fig. 3.2. Schema di funzionamento della serra solare.



3.4. Dimensionamento dell'impianto di essiccamento solare

La produzione totale di fango, comprensiva sia dei fanghi primari, sia di quelli secondari, ammonta a circa 6.000 tonnellate annue. Per il dimensionamento della serra solare CAFC SpA ha scelto di variare la quantità di fango trattata in ciascun mese in modo da ottimizzare l'utilizzo della radiazione solare: nei mesi invernali, con meno irraggiamento, si tratterà una quantità minore di fango, mentre l'eccedenza verrà stoccata ed essiccata in estate, quanto l'irraggiamento è maggiore. Se si fosse optato per un quantitativo mensile fisso, nei mesi invernali sarebbe stato necessario un maggiore consumo energetico della pompa di calore, con un conseguente aumento dei costi.

Complessivamente, l'energia da fornire in un anno alla serra ammonterebbe a 6.695.096 kWh, di cui 2.227.578 kWh, pari al 33%, provenienti direttamente dalla radiazione solare, mentre i restanti 4.467.518 kWh proverrebbero dalla pompa di calore.

Per stimare i consumi energetici, CAFC SpA ha innanzitutto calcolato la potenza complessiva di tutti gli ausiliari, ovvero ventilatori, pompe di circolazione e sistema di mescolazione del fango, che è risultata essere pari a 90 kW. La potenza della pompa di calore è stata determinata prendendo un *Coefficient of Performance* (COP), ovvero il rapporto tra il flusso termico fornito e il consumo di energia elettrica, pari a 5: il valore della potenza elettrica è pertanto un quinto della potenza termica fornita, quindi in media 104 kW. La potenza complessiva richiesta dall'impianto corrisponderebbe quindi a circa 190 kW, pari a 1.670.000 kWh/anno.

Attualmente i consumi elettrici dell'intero impianto di depurazione ammontano a 2.600.000 kWh/anno, corrispondenti ad una potenza media di 330 kW. Con l'entrata in servizio della serra solare, la potenza richiesta dall'impianto salirebbe a circa 520 kW. Parte dei fabbisogni energetici viene tutt'ora coperta dai cogeneratori alimentati con il biogas derivante dalla digestione anaerobica dei fanghi: la produzione di energia totale ammonta a 550.000 kWh/anno, con una potenza media di 90 kW. Si prevede pertanto di installare un impianto fotovoltaico da 400 kWp, in grado di coprire, durante il giorno e in condizioni di massimo irraggiamento, non solo i consumi della serra solare, ma anche parte di quelli degli apparati preesistenti.

3.5. Analisi economica dell'impianto di essiccamento solare

La realizzazione dell'impianto di essiccamento solare, comprensiva della costruzione della serra solare stessa, dell'acquisto e dell'installazione dei vari componenti ausiliari, nonché dell'acquisto e dell'installazione dell'impianto fotovoltaico, comporterebbe un esborso iniziale di circa 2.750.000 €. In particolare, 400.000 € sarebbero assorbiti dalla costruzione del parco fotovoltaico, mentre i restanti 2.350.000 € verrebbero impiegati per la costruzione della serra solare (opere in cls, impianto di ventilazione, pompa di calore, ecc.).

I benefici economici della realizzazione dell'impianto di essiccamento sono stati determinati basandosi sul fatto che l'impiego su terreni agricoli dei fanghi sarà sempre meno incentivato: si è pertanto assunto un costo da sostenere per tale modalità di smaltimento pari a 110 €/tonnellata. Il fango disidratato, invece, potrebbe venire avviato a due trattamenti diversi: essere semplicemente smaltito in discarica, a prezzo di 165 €/tonnellata, oppure essere trasportato presso impianti terzi per ulteriori trattamenti di valorizzazione, sostenendo in tal caso il solo costo del trasporto, stimato in 35 €/tonnellata. In entrambi i casi, la costruzione della serra solare determinerebbe una significativa riduzione dei costi di smaltimento, stimabile in circa 400.000-600.000 €/anno.

Al variare della destinazione finale del fango essiccato (trasporto presso impianti terzi o discarica), si avrebbe un tempo di recupero dell'investimento (payback semplice) variabile fra 6,6 e 17 anni.

Si sono ripetute le medesime valutazioni tecniche ed economiche in un secondo scenario, nell'ipotesi di trattare 8.000 tonnellate/anno di fango umido anziché le 6.000 prodotte dal solo impianto di Udine: la serra sarebbe infatti in grado di gestire un aumento del 33% del fango da essiccare senza necessitare di alcuna modifica strutturale. Le 2.000 tonnellate di fango aggiuntive verrebbero conferite da altri impianti di depurazione del gestore stesso oppure di enti terzi, a fronte di un pagamento a CAFC SpA di 90 €/tonnellata.

In questo scenario, a fronte di un aumento dei consumi di energia elettrica del 20%, si avrebbero maggiori introiti derivanti dal pagamento degli enti terzi per il conferimento dei fanghi da disidratare, pari a 180.000 €/anno. Inoltre, i risparmi legati ai minori costi di smaltimento sarebbero ancora maggiori, tanto da ottenere una riduzione del payback fino a soli 5,2 anni.

4. L'IMPIANTO PILOTA PER L'ESSICCAMENTO DEI FANGHI

In vista della costruzione della serra solare descritta ai paragrafi precedenti, CAFC SpA ha deciso di realizzare un impianto in scala ridotta per iniziare a studiare, sia dal punto di vista energetico, sia dal punto di vista biochimico, il processo di essiccazione dei fanghi. Tale impianto pilota è stato posizionato all'interno di un preesistente fabbricato dell'impianto di trattamento di via Gonars. Su questo impianto pilota si sono effettuate le attività sperimentali di cui si riferirà nel seguito del capitolo.

4.1. Descrizione dell'impianto pilota

L'impianto pilota è stato progettato per essere una riproduzione in scala 1:10.000 della serra solare reale: il volume della camera di essiccazione è stato pertanto dimensionato in modo da essere pari ad un metro cubo esatto.

La camera di essiccazione è composta da una metà inferiore, sul cui fondo viene distribuito il fango, e da un coperchio superiore, che può essere sollevato o richiuso per mezzo di un paranco elettrico. Per limitare le dispersioni termiche, l'intero volume è rivestito con uno strato di isolante (poliuretano) dello spessore di circa 50 mm. La camera di essiccazione è dotata di un sistema di illuminazione a LED e di una finestra superiore, per poter controllare visivamente lo stato del fango al suo interno. È inoltre equipaggiata con un sistema di miscelazione e frantumazione manuale, composto da un albero rotante sul quale sono fissate una serie di sporgenze: attraverso un'asta, è possibile far muovere l'albero lungo il fondo della camera, ottenendo in tal modo la miscelazione dello strato di fango. Infine, è presente un sensore di temperatura e, recentemente, è stato aggiunto un foro che permette il prelievo di campioni intermedi di fango anche durante il funzionamento dell'impianto.

Fig. 4.1. *Fotografia dell'impianto pilota.*



Come si è detto, la serra solare in scala reale essiccherà i fanghi grazie all'azione congiunta della radiazione solare diretta, entrante attraverso le superfici trasparenti della stessa, e di un flusso di aria riscaldato mediante una pompa di calore. Per semplicità costruttiva, l'impianto pilota procede all'essiccamento dei fanghi attraverso la sola immissione nella camera di aria calda, prodotta non con pompa di calore ma con semplici resistenze elettriche. In particolare, sono presenti due gruppi di resistenze, ciascuno dei quali è composto da due resistenze da 290 W, per una potenza scaldante complessiva di circa 1.160 W.

Il primo gruppo di resistenze è ad azionamento automatico, controllato da un sistema in retroazione: una centralina elettronica confronta in tempo reale il valore di temperatura rilevato dal sensore posto all'interno della camera con il valore di set-point impostato dal pannello di controllo, attivando le due resistenze non appena la temperatura si abbassa al di sotto del valore impostato e disattivandole quando questo valore viene raggiun-

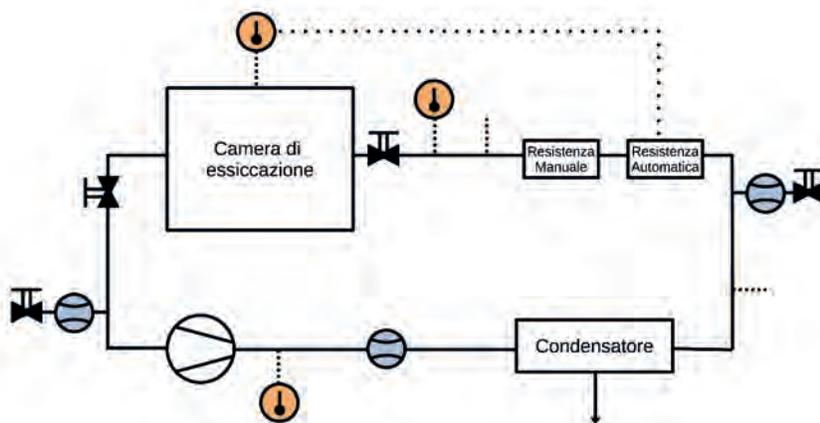
to. Il secondo gruppo di resistenze è invece ad azionamento manuale, con due interruttori che comandano in modo indipendente le due resistenze: questo gruppo è stato aggiunto solo recentemente, per poter eseguire prove di essiccamento a più alta temperatura (superiore a 40 °C), per le quali le sole resistenze automatiche non erano sufficienti.

Le tubazioni immediatamente a valle delle stesse sono state sostituite con tubi in acciaio, dal momento che quelle originariamente installate, in plastica, a causa dell'elevata temperatura subivano un 'rammollimento' tale da infletterle vistosamente. L'aria calda viene immessa nella camera attraverso un sistema di diffusione a 14 ugelli, e viene ripresa da un sistema, del tutto simmetrico, realizzato però in plastica.

La circolazione dell'aria è garantita da un ventilatore assiale con velocità variabile mediante una manopola posta nel pannello di controllo principale. Il ventilatore, modello Elicent AXC 100 B, ha una potenza nominale di 50 W, un assorbimento di corrente massimo pari a 0,23 A e una portata massima di 260 m³/h.

A valle del ventilatore è posto il condensatore: esso comprende due batterie alettate, alimentate con acqua a 11 °C prodotta da un gruppo frigorifero dedicato. Il gruppo frigo, con potenza di circa 620 W, mantiene refrigerato un piccolo accumulo d'acqua, dal quale una pompa di circolazione preleva l'acqua da inviare alle batterie alettate. L'umidità recuperata si accumula nella parte inferiore del condensatore, da dove può essere prelevata mediante un rubinetto.

Fig. 4.2. *Schema di funzionamento dell'impianto pilota.*



Lungo le tubazioni, realizzate in plastica e isolate con poliuretano, sono posizionati cinque attacchi ai quali è possibile collegare vari strumenti di misura: su uno degli attacchi immediatamente a valle del ventilatore è collocato un tubo di Pitot, per la misurazione della portata d'aria, mentre due sonde in grado di rilevare più parametri, fra cui la temperatura, vengono collocate alternatamente in corrispondenza degli altri attacchi liberi.

Sono inoltre presenti due valvole, una a monte e una a valle della camera di essiccazione, per interrompere il flusso d'aria. Infine, due sottili condotti ausiliari, entrambi dotati di valvola, permettono di espellere parte dell'aria dall'impianto o immettere dell'aria fresca: questi due condotti sono collocati rispettivamente a valle e a monte del ventilatore, in modo da trovarsi, rispetto all'ambiente esterno, l'uno in sovrappressione e l'altro in depressione. Per conoscere con esattezza il volume d'aria immesso/espulso, sono stati installati due misuratori di portata volumetrica, due comuni 'contatori del gas', normalmente utilizzati nelle reti di distribuzione del gas metano presso le utenze domestiche.

L'impianto è gestito da un quadro di controllo, nel quale sono inserite le seguenti strumentazioni:

- interruttori manuali per l'accensione e lo spegnimento del gruppo frigo, dell'illuminazione interna, delle due resistenze manuali, del ventilatore;
- manopola per la regolazione della velocità del ventilatore;
- sistema di controllo delle resistenze automatiche, comprensivo di schermo LCD attraverso il quale impostare il valore di set-point;
- presa di corrente per l'alimentazione del gruppo frigo;
- interruttore generale e dispositivi di sicurezza elettrici.

4.2. Determinazione delle potenze elettriche di ciascun componente

Come dati preliminari, necessari anche allo svolgimento dei calcoli successivi, si sono misurate le potenze elettriche effettive assorbite da ciascun componente dell'impianto. La misura sperimentale si è resa necessaria per ragioni diverse: alcuni componenti non presentavano dati di targa chiaramente leggibili, come nel caso delle resistenze elettriche; il ventilatore, inoltre, pur riportando i dati di targa, si trova a lavorare a carico parziale, quindi in condizioni chiaramente diverse da quelle nominali.

La misura è stata effettuata mediante pinza amperometrica: avvolgendo i fili di alimentazione di ciascun componente con le ganasce della pinza, lo

strumento rileva il valore della corrente che fluisce nei fili stessi. Secondo una ben nota legge dell'elettrotecnica, la potenza assorbita è data dal prodotto della corrente per la tensione, in questo caso pari a 230 V.

$$P [W] = I [A] \cdot \Delta V [V]$$

I valori trovati sono riportati in Tabella 4.1.

Si osserva che il 62% della potenza complessiva è dovuta alle resistenze elettriche, mentre il gruppo frigo assorbe complessivamente il 36% della potenza massima; decisamente inferiore è la potenza assorbita dal ventilatore, pari a poco più del 2% del totale.

Va tuttavia sottolineato che, ad eccezione del ventilatore e del circolatore, tutti gli altri componenti non funzionano continuamente: le resistenze automatiche si accendono e si spengono in base alla retroazione già descritta; analogamente, il gruppo frigo si attiva solo quando la temperatura dell'acqua sale al di sopra degli 11°C; le resistenze manuali vengono attivate a discrezione dell'operatore, ma difficilmente vengono mantenute entrambe in funzione per lungo tempo. Di conseguenza, i consumi energetici effettivi non seguono questa distribuzione, ma variano in base alle condizioni operative e alle scelte dell'operatore: questo aspetto è stato investigato con opportune misure sperimentali, di cui si riferirà nei paragrafi successivi.

Tab. 4.1. *Potenze massime assorbite da ciascun componente dell'impianto pilota.*

Componente	Corrente assorbita (A)	Potenza elettrica (W)	Percentuale (%)
Ventilatore	0,17	39,1	2,1
Resistenza manuale - 1 step	1,25	287,5	15,5
Resistenza manuale - 2 step	1,25	287,5	15,5
Resistenza automatica - 1 step	1,25	287,5	15,5
Resistenza automatica - 2 step	1,25	287,5	15,5
Gruppo frigo - circolatore	0,23	52,9	2,8
Gruppo frigo - compressore	2,68	616,4	33,2
Totale	8,08	1858,4	100,0

4.3. Determinazione delle dispersioni termiche dell'impianto pilota

L'impianto pilota è stato realizzato ponendo la massima attenzione all'isolamento termico, al fine di minimizzare i consumi energetici necessari a mantenere alla temperatura desiderata (fra i 40 °C e i 50 °C) la camera di essiccazione. In particolare, le pareti della camera stessa, il ventilatore, il condensatore e i tubi che li collegano sono stati coibentati con uno strato di poliuretano espanso, di spessore noto nel caso della camera di essiccazione, variabile e piuttosto irregolare nel caso degli altri elementi. Non era tuttavia stato calcolato l'esatto flusso termico disperso dall'impianto così isolato, parametro essenziale per poter stabilire, sul totale dell'energia fornita attraverso le resistenze elettriche, quanta riesce ad essere effettivamente utilizzata per l'essiccamento del fango e quanta viene invece dispersa verso l'esterno.

Come si è già detto, l'impianto di essiccazione non opera in regime stazionario, ma in regime approssimativamente periodico, dal momento che la maggior parte dei componenti si accende e si spegne a intervalli abbastanza regolari, secondo le indicazioni dei termostati. Ciò comporta che non si abbia mai una condizione di equilibrio istantaneo tra la potenza termica dispersa dalle superfici dell'impianto e quella immessa dalle resistenze: tale equilibrio che avrebbe permesso di conoscere le dispersioni termiche semplicemente misurando la potenza istantanea delle resistenze. Tuttavia, l'uguaglianza tra potenza dispersa e potenza entrante vale considerando una media in un intervallo di tempo sufficientemente ampio da comprendere almeno un periodo completo: in questa ipotesi, disattivando temporaneamente il gruppo frigo, l'energia assorbita dalle resistenze sarà tutta e sola quella necessaria a compensare le dispersioni attraverso le superfici dell'impianto.

Per eseguire questa misura si è utilizzato un rilevatore modello Fluke 1736 Power Logger, collegato a una pinza amperometrica che avvolgeva i cavi di alimentazione delle resistenze automatiche. Durante il tempo della misura, ovvero per poco più di un'ora, si sono spente sia le resistenze manuali sia il gruppo frigorifero, in modo da non avere altre potenze termiche entranti/uscenti oltre a quelle delle resistenze automatiche e alle dispersioni.

La potenza assorbita dalle resistenze durante i 63 minuti di prova è stata riportata nel grafico di Figura 4.3: si nota che la prova ha coperto nove cicli di accensione/spegnimento di durata non esattamente uniforme. I primi cicli, e il primo in particolare, hanno visto le resistenze rimanere in

funzione per un tempo più lungo: ciò si può probabilmente spiegare considerando che, essendo stato appena spento il gruppo frigorifero, le batterie alettate contenevano ancora acqua molto fredda, tanto da continuare per un po' di tempo a raffreddare l'aria e da richiedere pertanto un maggiore carico alle resistenze.

Complessivamente, l'energia assorbita dalle resistenze è stata uguale a 283,8 Wh, corrispondente a una potenza media fornita dalle resistenze di 270,3 W, pari proprio alla potenza media dispersa dalle superfici dell'impianto.

4.4. Consumi energetici con gruppo frigo inserito

Dopo aver determinato le dispersioni termiche attraverso le superfici dell'impianto, si è voluto misurare anche il flusso termico asportato dal gruppo frigo. Come si è già accennato, anche quest'ultimo opera in modo intermittente: il compressore del gruppo frigo si accende solo quando la temperatura dell'acqua, inviata alle batterie di scambio termico del condensatore da una pompa di circolazione, sale al di sopra di 11 °C. Di conseguenza, proprio come nel caso delle dispersioni termiche, anche per conoscere il flusso termico medio asportato dal gruppo frigo non è sufficiente una misura istantanea, ma è necessaria una misura prolungata nel tempo.

Fig. 4.3. *Potenza istantanea (W) assorbita dalle resistenze elettriche.*

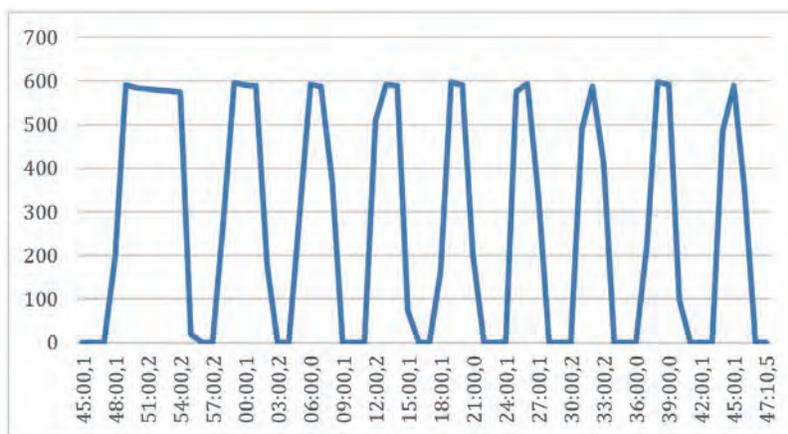
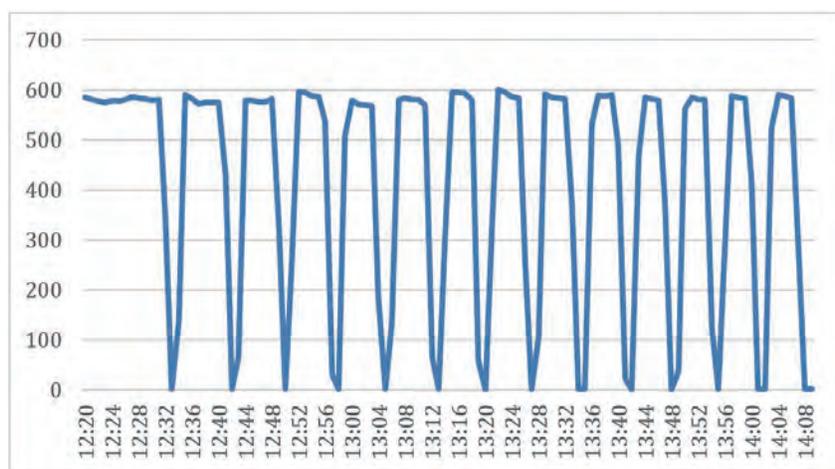


Fig. 4.4. Potenza (W) assorbita dalle resistenze con il gruppo frigo inserito.

Nello specifico, la prova è durata 1 ora e 49 minuti, durante le quali l'impianto è stato lasciato in funzione ad una temperatura di 40 °C, senza avervi caricato del fango: le resistenze e il compressore del gruppo frigo hanno operato in modalità automatica, comandati dai rispettivi termostati. Le potenze assorbite dalle resistenze sono riportate in Figura 4.4.

Confrontando il grafico di Figura 4.4 con quello di Figura 4.3, pur su una diversa scala temporale, si nota chiaramente come le resistenze siano rimaste in funzione per un tempo maggiore, mentre sono stati più brevi i periodi in cui esse si sono spente. Ciò è perfettamente in linea con quanto ci si poteva aspettare: dovendo compensare anche il flusso termico uscente ad opera del gruppo frigo, le resistenze hanno dovuto fornire più energia all'aria. Complessivamente, l'energia assorbita è stata pari a 751 Wh, corrispondenti a una potenza media di 413 W: essendo le sole dispersioni termiche pari a 270 W, si può concludere che le batterie alettate del condensatore estraggono un flusso termico medio pari a 143 W.

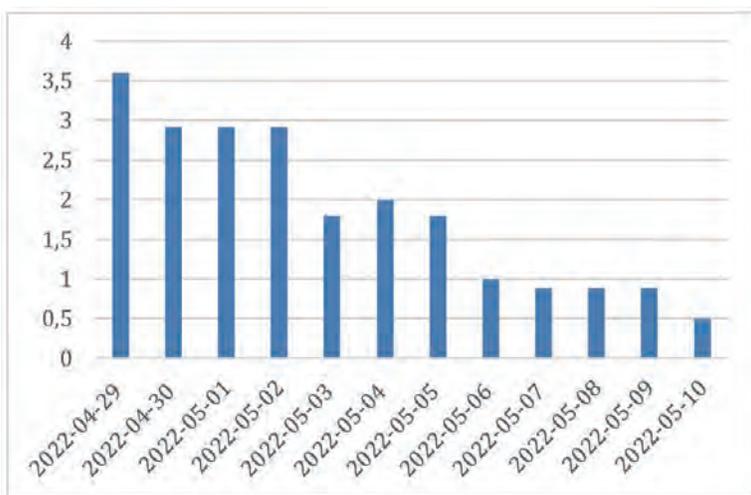
4.5. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: bilancio di massa

Note le prestazioni energetiche dell'impianto pilota a vuoto, si è analizzato il suo comportamento in un reale ciclo di essiccamento. Il giorno 29 aprile 2022 sono stati caricati nella camera di essiccazione 30 kg di fango nastro-

pressato, quindi l'impianto è stato avviato, mantenendo invariate sia la regolazione del ventilatore, che ha continuato a far circolare circa 130 m³/h d'aria, sia del termostato della camera di essiccazione, mantenuto a 40 °C. La prova di essiccamento si è protratta per dodici giorni, sino al 10 maggio 2022. Il misuratore Fluke è stato lasciato attivo per l'intera durata della prova, in modo da rilevare il consumo energetico delle resistenze elettriche.

Durante la prova un operatore, presente in impianto nei soli giorni feriali, ha provveduto a misurare alcuni parametri di controllo (come la temperatura in più punti dell'impianto o la portata d'aria del ventilatore) e la massa di liquido estratta dal condensatore. Purtroppo, i dodici giorni della prova includevano anche due week-end, ovvero quattro giorni in cui non è stato misurato il condensato prodotto: si è allora scelto di ripartire equamente i valori misurati nelle giornate dei due lunedì, suddividendoli tra le giornate di sabato, domenica e lunedì. Nonostante questa approssimazione, si può comunque riscontrare un chiaro andamento decrescente: i primi giorni della prova si è registrata la maggiore produzione di condensato, con un valore di 3,6 L il primo giorno, mentre negli ultimi giorni essa è fortemente diminuita, fino ad una produzione di solo 0,5 L l'ultimo giorno. In totale, dal condensatore sono stati estratti 22,1 L di acqua.

Il fango presentava inizialmente un tenore di sostanza secca pari al 20,9%, corrispondenti ad un contenuto di 23,73 L d'acqua e di 6,27 kg di sostanza secca. Al termine del processo la sostanza secca rappresentava l'84,4% del totale: assumendo costante la massa di sostanza secca (ipotesi accettabile nonostante la modesta riduzione dei solidi volatili), si ricava che la massa totale di fango al termine dell'essiccazione era pari a 7,429 kg, con una riduzione del 75% rispetto alla massa iniziale. L'acqua ancora contenuta nel fango era pari a 1,16 L: si può quindi ricavare la massa di acqua evaporata, pari a 22,57 kg. Questo valore si discosta di appena il 2% rispetto alla massa del condensato estratto, errore più che accettabile tenendo conto dell'incertezza delle misure sperimentali. Si riporta in Figura 4.6 il grafico con l'andamento della massa complessiva di fango, calcolata sottraendo dalla massa iniziale la massa di condensato estratta giornalmente: si nota che nei primi giorni, in corrispondenza alla maggiore produzione di condensato, si è verificata la maggiore perdita di massa, mentre nei giorni successivi la curva diminuisce gradualmente la sua pendenza.

Fig. 4.5. *Produzione giornaliera di condensato (kg).*

La curva può essere approssimata in modo pressoché esatto (il coefficiente di determinazione R^2 risulta pari a 0,999) dalla seguente espressione polinomiale di secondo grado:

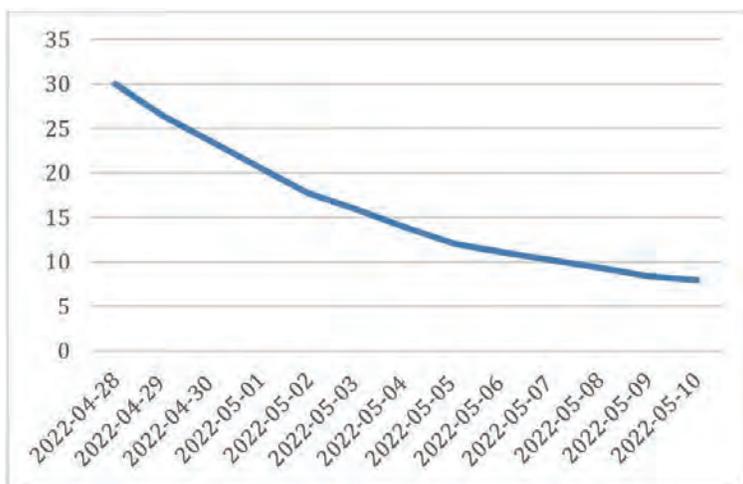
$$y = 0,142 x^2 - 3,792x + 30$$

Si nota che l'intercetta è pari a 30, esattamente pari al valore iniziale della massa del fango.

4.6. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: bilancio energetico

Appare di notevole interesse correlare le quantità d'acqua allontanate dal fango con le potenze elettriche assorbite. Complessivamente, il rilevatore Fluke ha misurato un consumo elettrico totale pari a 138,71 kWh, corrispondenti a una potenza media di 480 W. I consumi giornalieri sono stati tutt'altro che costanti, come si può osservare in Figura 4.7: la potenza assorbita è stata più elevata nei primi giorni della prova, con un picco pari a 657 W il giorno 30 aprile, per poi decrescere in modo abbastanza uniforme fino all'ultimo giorno della prova, quando si è registrata una potenza media di solo 409,5 W.

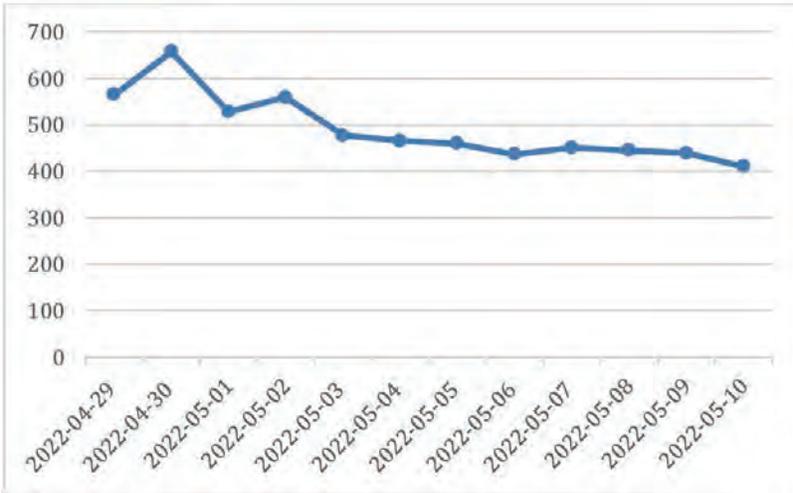
Fig. 4.6. *Andamento della massa del fango (kg) durante l'essiccamento.*



Il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, alla temperatura di 40 °C, è pari a 0,668 Wh/kg: conoscendo la massa d'acqua evaporata ogni giorno, è possibile calcolare l'energia assorbita dal solo processo di evaporazione. Una pari energia è necessaria anche per la condensazione dell'acqua evaporata: assumendo che il flusso termico complessivo scambiato al condensatore sia costante e conoscendo il calore latente necessario per condensare tutto il vapore, è possibile determinare, per differenza tra i due, il calore sensibile sottratto all'aria. Quest'ultimo dovrà essere reintegrato dalle resistenze, per riportare l'aria a 40 °C.

La potenza termica che le resistenze forniscono all'aria deve quindi equilibrare quattro contributi:

- le dispersioni termiche attraverso le superfici dell'impianto, assunte costanti e pari al valore determinato sperimentalmente, ovvero 270 W;
- il calore latente di evaporazione da fornire all'acqua presente nel fango, calcolato nella tabella precedente. Va evidenziato che in fase di condensazione l'acqua cede alle batterie alettate lo stesso calore precedentemente assorbito per evaporare, quindi la condensazione non costituisce un ulteriore carico per le resistenze;
- il calore sensibile sottratto all'aria dalle batterie alettate del condensatore, calcolato come differenza fra il flusso termico totale sottratto dal gruppo frigo e il flusso termico da sottrarre per la sola condensazione dell'acqua;

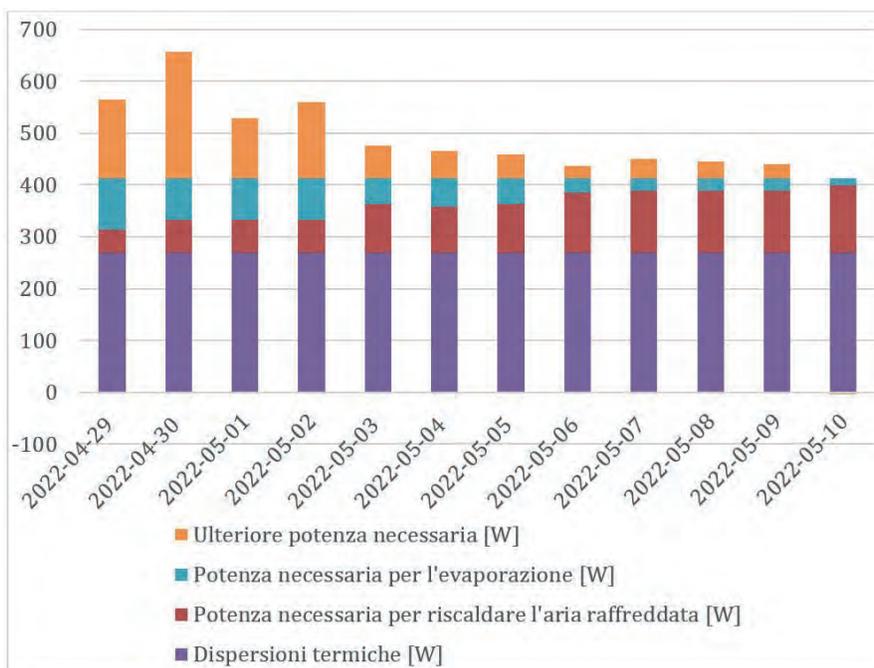
Fig. 4.7. Potenza media giornaliera assorbita dalle resistenze (W).

- ulteriori contributi quali il calore necessario a scaldare la massa di fango, che viene inserita nella camera di essiccazione ad una temperatura approssimativamente pari a quella dell'aria esterna (circa 20 °C), e l'energia necessaria per permettere all'acqua contenuta nel fango di separarsi da esso (come descritto al paragrafo 1.4, l'acqua interstiziale e l'acqua superficiale sono intimamente legate alla sostanza secca). Questi contributi possono essere trovati per differenza fra la potenza totale effettivamente assorbita dalle resistenze e la somma delle altre tre potenze richieste, facilmente calcolabili per via analitica.

Considerando i quattro contributi appena elencati, è possibile ottenere il diagramma riportato in Figura 4.8. Si nota che, nonostante l'isolamento termico su quasi tutti i componenti dell'impianto, la maggior parte della potenza fornita dalle resistenze viene dispersa attraverso le superfici dell'impianto stesso: la potenza dispersa varia fra il 41,08% del secondo giorno di prova e il 65,93% dell'ultimo giorno di prova.

Coerentemente con l'andamento decrescente della produzione di condensato, il calore effettivamente impiegato per l'evaporazione dell'acqua dal fango decresce sensibilmente. Anche nei primi giorni, tuttavia, esso rappresenta appena il 17% della potenza (o, equivalentemente, dell'energia) totale fornita dalle resistenze, diventando un esiguo 3% nell'ultimo giorno della prova.

Fig. 4.8. Ripartizione delle potenze termiche giornaliere (W).



La potenza necessaria a compensare il calore sensibile sottratto all'aria dal condensatore mostra, ovviamente, un andamento complementare rispetto al calore latente di evaporazione, ovvero un graduale aumento dall'8% del 29 aprile fino al 32% del 10 maggio.

I contributi aggiuntivi mostrano un andamento meno regolare, ma dal quale si possono comunque dedurre varie considerazioni. Il fatto che i valori più alti si abbiano nei primi giorni è verosimilmente dovuto alla necessità di riscaldare il fango fino a una condizione di isotermità con l'aria all'interno della camera di essiccazione, a 40 °C. Successivamente, si registrano valori più bassi ma mai nulli, di entità confrontabile con il calore latente di evaporazione: questa energia è probabilmente quella necessaria a liberare l'acqua interstiziale e l'acqua superficiale, portandole in condizioni tali da poter evaporare.

Si nota infine che nell'ultimo giorno di prova i contributi aggiuntivi risultano negativi, ovvero pari a -3,50 W. Questa stranezza si può giustificare considerando che essi sono stati determinati per differenza tra la potenza

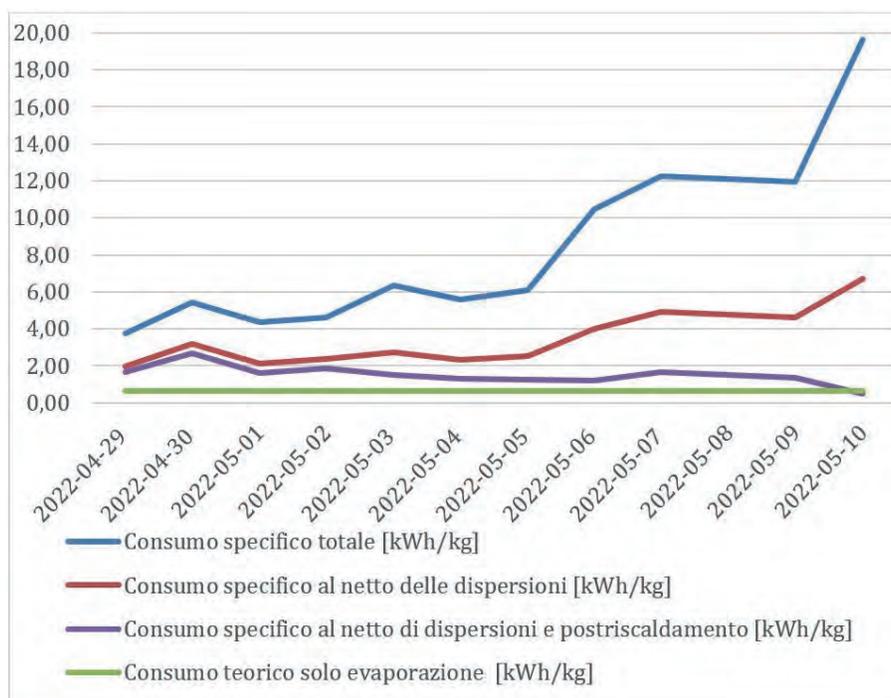
totale e la somma del flusso termico, sensibile e latente, asportato dal condensatore più le dispersioni termiche. Queste ultime sono state assunte costanti, mentre in realtà esse sono funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'impianto. Durante i dodici giorni della prova le condizioni meteorologiche non sono variate in misura significativa, tuttavia un semplice aumento delle temperature di 1-2 °C può aver determinato una piccola riduzione delle effettive dispersioni termiche. In questo modo, alla potenza totale si dovrebbe sottrarre una quantità leggermente inferiore, ottenendo una potenza aggiuntiva positiva, sebbene in valore assoluto sempre piccola.

In Figura 4.9 si mostra il consumo specifico, ovvero l'energia che l'impianto ha consumato per far evaporare ciascun chilogrammo di acqua dal fango. Si sono riportate sia la curva del consumo specifico totale, comprensivo anche delle dispersioni termiche, sia la curva del consumo specifico netto, calcolato trascurando la potenza termica dispersa. Viene inoltre rappresentato il consumo specifico al netto anche della potenza termica necessaria al postriscaldamento dell'aria raffreddata dal condensatore: questo parametro tiene quindi conto esclusivamente dell'energia necessaria al riscaldamento del fango, alla liberazione dell'acqua dalle particelle solide e all'evaporazione dell'acqua stessa.

Infine, viene riportato anche il consumo teorico richiesto per la sola evaporazione dell'acqua, che si è già detto essere pari a 0,668 Wh/kg.

La curva del consumo specifico al netto delle dispersioni può essere interpretata come un valore-limite che l'impianto pilota potrebbe effettivamente raggiungere qualora fosse perfettamente isolato termicamente. Il chiaro andamento crescente della curva, con valori che passano da 2,0 kWh/kg il primo giorno di prova a 6,7 kWh/kg l'ultimo giorno, può essere spiegato considerando che inizialmente evapora l'acqua più debolmente legata alla sostanza secca, mentre con il proseguire del processo evapora anche l'acqua ad essa maggiormente legata, che richiede maggiore energia per distaccarsene. Mediamente, il consumo specifico al netto delle dispersioni termiche è risultato pari a 3,52 kWh/kg.

La curva del consumo specifico totale risulta crescente in modo ancor più netto, a causa del combinarsi dell'effetto appena descritto con il fatto che le dispersioni termiche, costanti, vengono ad essere ripartite su una portata d'acqua evaporata via via minore, come si è visto in Figura 4.5. In particolare, il consumo specifico totale passa da 3,77 a 19,66 kWh/kg tra il primo e l'ultimo giorno di prova, con un valore medio di 8,55 kWh/kg.

Fig. 4.9. *Andamento dei consumi specifici (kWh/kg).*

La curva del consumo specifico al netto delle dispersioni e del postriscaldamento permette di valutare i consumi nel caso di un impianto ideale (quindi senza dispersioni) operante non in circuito chiuso, come è attualmente l'impianto pilota e come sarà l'impianto in scala reale, ma in circuito aperto (quindi senza necessità di riscaldare l'aria raffreddata), come sono la maggior parte degli impianti sperimentali i cui parametri operativi si possono reperire in letteratura. Trascurare l'energia necessaria al postriscaldamento può anche essere giustificato dalla presenza di un sistema di recupero dell'energia termica asportata dal condensatore: nel caso dell'impianto pilota questa energia viene semplicemente scaricata in atmosfera, ma negli impianti in scala reale (incluso quello in via di realizzazione a Udine) essa viene recuperata e riutilizzata per scaldare nuovamente l'aria. Il consumo specifico al netto delle dispersioni e del postriscaldamento dell'impianto pilota oscilla fra 1,2 kWh/kg e 2,7 kWh/kg, con valori me-

diamente più alti nei primi giorni della prova e un nuovo aumento negli ultimi giorni: questo è verosimilmente dovuto alla già citata necessità di scaldare la massa di fango nei primi giorni, e di far evaporare acqua più intimamente legata alla sostanza secca negli ultimi giorni. Il valore dell'ultimo giorno, pari ad appena 0,5 kWh/kg, non è significativo, per quanto già detto in merito all'andamento non esattamente costante delle dispersioni termiche.

I valori di consumo specifico riportati in letteratura sono comparabili a quelli ottenuti. Uno studio condotto in Svezia nel 2017 da Mäkelä et al., ad esempio, ha determinato che un sistema di essiccamento a media temperatura (50-90 °C) a letto fluido presenta un consumo variabile tra 1,3 kWh e 2,6 kWh per chilogrammo di acqua evaporata, al netto dei consumi del ventilatore responsabile del mantenimento in sospensione delle particelle solide. Si vede che l'intervallo è perfettamente compreso in quello determinato sperimentalmente presso l'impianto di Udine.

Nel caso di impianti di essiccamento ad alta temperatura (pari o superiore a 100 °C), i valori forniti dalle aziende produttrici e riportati in alcuni articoli (fra cui quello, già citato al paragrafo 2.1, di Boguniewicz-Zablocka et al. del 2020), sono decisamente più bassi, attorno a 1 kWh/kg. Ciò si può in parte giustificare assumendo che a temperature maggiori la separazione dell'acqua dalla sostanza secca sia termodinamicamente favorita, così da richiedere meno energia. Tuttavia, è bene sottolineare che le stesse aziende produttrici avvertono, rigorosamente in caratteri minuti, che i consumi indicati sono solo teorici, e che i valori effettivi possono risultare superiori a causa di vari fenomeni fra cui l'inerzia termica degli impianti.

Appare di interesse determinare il valore di consumo specifico previsto per la serra solare in vera grandezza. Data una produzione di fanghi di 6.000 ton/anno, corrispondenti a 4.376 tonnellate di acqua da evaporare, viene stimato un fabbisogno di energia termica di 6.695.096 kWh: ne discende un consumo specifico previsto di 1,53 kWh/kg.

Questo valore rientra nell'intervallo del consumo specifico al netto delle dispersioni termiche e del postriscaldamento: se trascurare l'energia necessaria al postriscaldamento è ragionevole essendo presenti i già descritti sistemi di recupero del calore sottratto dal condensatore, trascurare le dispersioni termiche può sembrare azzardato. Per l'impianto pilota, come si è detto, le dispersioni rappresentano una quota molto rilevante della potenza termica totale (tra il 41% e il 66%), tuttavia per l'impianto in vera grandezza si sono stimate dispersioni molto più basse, variabili tra il 5% e

il 24% della potenza termica totale, valori raggiunti rispettivamente nei mesi estivi e nei mesi invernali. Pertanto, per l'impianto reale si può ritenere accettabile anche l'ipotesi di dispersioni 'trascurabili', e appare quindi ragionevole utilizzare come termine di paragone con l'impianto pilota il consumo specifico al netto delle dispersioni e del postriscaldamento.

Alla luce di quanto detto, si può concludere che il consumo specifico previsto per l'impianto in scala reale è coerente con quanto misurato sperimentalmente, nonché con i valori riportati in letteratura.

4.7. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: analisi chimiche sul fango essiccato

L'impianto pilota è entrato in funzione già nella prima metà del 2021 ed è stato subito utilizzato per effettuare numerosi cicli di prova. Per ciascun ciclo si è caricato un quantitativo di fango pari a 30 kg (20 kg in alcune delle prove iniziali), si è impostata una temperatura operativa di 40 °C e si è mantenuto fisso il numero di giri del ventilatore. Si sono effettuati dettagliate analisi fisico-chimiche e microbiologiche sia sul fango in ingresso e in uscita dall'impianto pilota, dopo un tempo di essiccamento variabile ma mediamente pari a due settimane, sia sul liquido raccolto al condensatore.

I dati relativi alle analisi sul fango in ingresso e in uscita dall'impianto per ciascuna prova sono stati riorganizzati e sottoposti ad analisi critica: ciò ha portato a scartare i dati delle prove di luglio e agosto 2021, durate meno di una settimana e con parametri del fango in ingresso atipici rispetto a tutte le altre prove. Tali prove possono essere considerate come una taratura dell'impianto, per la scelta delle migliori condizioni operative. Si sono invece considerati come validi, ai fini delle successive rielaborazioni, i dati delle sei prove successive, svolte tra i mesi di settembre e dicembre 2021; si sono inoltre considerati anche i dati delle prime tre prove effettuate nell'anno 2022, nei mesi di aprile e maggio, ottenendo i valori medi riassunti in Tabella 4.2. Dall'analisi di questi dati si possono trarre numerose considerazioni.

Innanzitutto, il livello di essiccamento raggiunto è assolutamente soddisfacente: partendo da fango nastropressato con contenuto di sostanza secca di circa il 21,7%, si è riusciti a raggiungere un tenore di secco in uscita mediamente pari all'85,5%. Si tratta di un valore superiore a quelli normalmente riportati in letteratura: Kurt et. al, sulla base di numerosi studi precedenti, affermano che il solo essiccamento solare non dovrebbe con-

sentire di superare il 70% di sostanza secca «at reasonable time periods». Ciò può probabilmente trovare spiegazione nell'efficiente sistema di ventilazione dell'impianto pilota: la temperatura nella camera di essiccazione è bassa, come in un reale processo di essiccamento solare, ma il continuo ricambio d'aria facilita grandemente l'evaporazione dell'acqua (in accordo con quanto osservato da Belloulid et al., si veda il paragrafo 2.1).

Al termine del processo di essiccamento, si osserva un notevole aumento degli acidi fulvici e degli acidi umici, oltre a un modesto ma ben evidente aumento del grado di umificazione. Questa osservazione è coerente con quanto già riscontrato in altre ricerche, come il già citato articolo di Collard et al. del 2016, in cui si riporta appunto un aumento delle componenti umiche nel fango sottoposto ad essiccamento solare. Si tratta di un fattore positivo particolarmente importante nel caso di riuso agronomico del fango stesso.

Relativamente agli elementi chimici più significativi, si nota un aumento della percentuale in peso del carbonio totale, dovuto alla diminuzione della massa complessiva del fango a causa della perdita d'acqua. Considerando infatti le grandezze riferite alla sola sostanza secca, si vede come sia l'azoto, sia il fosforo, sia il potassio, sia il carbonio organico non variano significativamente le loro concentrazioni. Il modesto aumento delle concentrazioni di fosforo e potassio può essere valutato positivamente: essendo entrambi nutrienti, una loro maggiore concentrazione corrisponde verosimilmente a un maggior effetto fertilizzante del fango stabilizzato, con benefici nel caso di spandimento su suoli agricoli.

In Tabella 4.2 si nota un aumento di concentrazione degli idrocarburi nel fango essiccato; ciò è spiegabile, probabilmente, a causa delle temperature relativamente basse raggiunte durante il processo. La normativa più recente in materia di riutilizzo agronomico dei fanghi (L. 130/2018, che integra il D.Lgs. 99/92) fissa il limite per gli idrocarburi C10-C40 a 1.000 mg/kgSS, specificando, tuttavia, come tale limite si intenda automaticamente rispettato qualora la ricerca dei marker di cancerogenicità fornisca valori inferiori a quelli definiti nella normativa stessa. Stante la natura del fango di origine prevalentemente civile non c'è ragione di pensare che le concentrazioni di tali marker siano in presenza tale da compromettere l'utilizzo del fango in agricoltura.

Tab. 4.2. *Analisi del fango essiccato dall'impianto pilota fra settembre 2021 e maggio 2022.*

		IN		OUT	
		Valore	Dev.std.	Valore	Dev.std.
Residuo secco a 105°C	%	21,7	8,4	85,5	39,7
Solidi Sospesi Volatili	% SS	89,5	33,9	58,0	27,1
Acidi Fulvici (FA)	% p/p	1,0	0,6	3,7	2,1
Acidi Umici (HA)	% p/p	1,6	0,9	5,5	3,2
Grado di umificazione (DH %)	%	75,8	7,7	83,0	2,4
Carbonio totale estratto (TEC)	% p/p	3,2	1,9	11,1	6,3
Carbonio Organico	% SS	30,7	7,9	28,4	4,7
Potassio	mg/kg SS	785	110	860	83
Azoto totale (N)	% SS	3,6	1,5	3,5	1,7
Fosforo totale (P)	% SS	2,0	0,9	2,1	1,0
Idrocarburi C>10 (C10C40)	mg/kg	364	222	3340	976
pH	pH	7,0	2,7	6,7	3,1
Escherichia coli	MPN/g SS	72.789	142.066	160.028	194.330
Batteri coliformi	MPN/100 ml	960.571	1.205.574	276.500	281.610
Bario (Ba)	mg/kg SS	255	91,7	268	87,2
Boro (B)	mg/kg SS	30,9	14,9	25,6	10,8
Cadmio (Cd)	mg/kg SS	<1	0,0	<1	0,0
Cromo totale (Cr)	mg/kg SS	46,3	11,4	45,1	8,7
Manganese (Mn)	mg/kg SS	245	73,0	249	59,5
Nichel (Ni)	mg/kg SS	41,6	27,6	29,3	6,9
Piombo (Pb)	mg/kg SS	74,7	19,2	77,9	15,8
Selenio (Se)	mg/kg SS	3,2	1,7	2,9	0,6
Arsenico (As)	mg/kg SS	3,9	1,1	3,9	1,2
Rame (Cu)	mg/kg SS	306	80,8	309	55,7
Stagno (Sn)	mg/kg SS	25,9	7,7	27,3	6,2
Zinco (Zn)	mg/kg SS	965	238	987	126

La leggera acidificazione del fango, testimoniata da un lieve calo del pH, può far ipotizzare l'insorgere di processi anaerobici durante l'essiccamento, dovuti probabilmente a un insufficiente rimescolamento del fango, che ha

determinato condizioni anaerobiche negli strati inferiori dello stesso. Un'analoga, lieve diminuzione del pH è stata osservata anche da Collard et al., conferma della difficoltà di garantire un sufficiente apporto di ossigeno all'intera massa di fango.

La riduzione dei solidi volatili testimonia che già a 40°C una parte di essi riesce a volatilizzarsi e ad essere allontanata con l'aria estratta dalla camera di essiccazione, accumulandosi ragionevolmente nel condensato.

La carica batterica del fango, espressa attraverso il MPN di Coliformi totali ed *Escherichia Coli*, varia in modo disomogeneo: il numero di colonie di *Escherichia Coli* quasi raddoppia, mentre quelle di Coliformi totali si riduce a un terzo. Come suggeriscono le elevatissime deviazioni standard, i risultati sono molto variabili da prova a prova: in alcune prove, come quella svolta a settembre, si osservava una diminuzione di entrambi gli indicatori, in altre un aumento di entrambi, come nella prova di dicembre, in altre ancora, come quella di novembre, un andamento opposto tra i due indicatori, con la diminuzione dei Coliformi totali e l'aumento degli *Escherichia Coli*. Sebbene l'estrema aleatorietà dei dati renda la rilevanza statistica delle presenti analisi microbiologiche decisamente scarsa, si può affermare che la temperatura attualmente raggiunta durante il processo sembra essere insufficiente per garantire una vera e propria sterilizzazione del fango. Prove a temperature maggiori, da eseguire in una fase successiva delle sperimentazioni, potranno sicuramente portare a una migliore rimozione dei microorganismi patogeni.

Particolare attenzione richiede l'andamento delle concentrazioni dei metalli: con poche eccezioni, le concentrazioni di tutti gli altri metalli pesanti considerati è aumentata, seppur non in misura particolarmente rilevante. Questo andamento è ragionevole, tenendo conto che le quantità sia sostanza secca, sia di metalli rimangono sostanzialmente costanti durante il processo: i metalli certamente non volatilizzano a temperature così basse, mentre la modesta riduzione dei solidi volatili permette di giustificare l'aumento, pur contenuto, delle concentrazioni. Anche la campagna sperimentale condotta da Guo et al., citata al paragrafo 2.2, ha riscontrato una tendenza simile, sebbene con aumenti un po' più evidenti. Le diminuzioni delle concentrazioni di boro, cromo, nichel e selenio, tutte di limitata entità e in generale minori della deviazione standard delle misure, vanno probabilmente attribuite ad errori nella procedura di misura, errori più che ragionevoli trattandosi di concentrazioni comunque molto piccole. In alternativa, si può ipotizzare che questi metalli siano stati in parte assorbiti dal

polietilene che costituisce il fondo della camera di essiccazione o che abbiano reagito con il metallo di cui è realizzato il sistema di rimescolamento, ma queste spiegazioni appaiono meno convincenti.

Come illustrato al paragrafo 1.6, il D.Lgs. 99/92 impone dei limiti massimi alle concentrazioni di alcuni metalli pesanti e salmonelle, e dei limiti minimi ai nutrienti presenti in un fango per poterlo utilizzare in agricoltura. I valori del fango essiccato in uscita dall'impianto pilota rientrano ampiamente non solo nei range, vincolanti, indicati dalla norma italiana, ma sono decisamente inferiori persino ai più stringenti (ma non ancora vincolanti) limiti indicati nel *Working Document on Sludge*. Assumendo che anche il fango in uscita dalla serra solare in scala reale avrà composizione simile a quella del fango essiccato dall'impianto pilota, si può quindi affermare che sarà possibile continuare la pratica dello spandimento su suoli agricoli, anche qualora entrassero in vigore i più rigorosi limiti europei.

4.8. Risultati delle prove sperimentali di essiccamento: analisi chimiche sul condensato

In corrispondenza di ciascuna prova, è stato estratto ed analizzato anche un campione di condensato, per una caratterizzazione completa degli effluenti prodotti dall'impianto di essiccamento. I valori medi dei risultati ottenuti sono riportati in Tabella 4.4.

Il condensato appare leggermente basico, con un pH di poco superiore a 8. Sia la richiesta chimica di ossigeno che i solidi sospesi totali sono decisamente bassi, coerentemente con quello che era possibile riscontrare empiricamente: il condensato era trasparente e sostanzialmente inodore, quindi chiaramente privo di grandi quantità di materia organica in sospensione. Anche le concentrazioni di azoto e fosforo sono piuttosto contenute: solo l'azoto ammoniacale presenta un valore leggermente più elevato, indicativo di una lieve presenza di ammoniaca all'interno del fango in essiccamento, che si è volatilizzata ed è stata poi raccolta assieme al condensato.

In occasione della prova svolta tra la fine di aprile e l'inizio di maggio, durante la quale si sono monitorati anche i consumi energetici (si veda il paragrafo 4.6), sono state rilevate anche le quantità di metalli presenti nel condensato: i valori ottenuti sono tutti pressoché trascurabili, essendo tutti di entità pari o inferiore a pochi microgrammi per litro.

Tab. 4.3. *Confronto tra i limiti di legge, i limiti proposti dal Working Document on Sludge e i valori del fango essiccato dall'impianto pilota.*

Sostanza	Unità di misura	Limite norma italiana	Limite 2025	Valore misurato
Cadmio	mg/kgSS	≤20	2	<1
Mercurio	mg/kgSS	≤10	2	-
Nichel	mg/kgSS	≤300	100	29,3
Piombo	mg/kgSS	≤750	200	77,9
Rame	mg/kgSS	≤1000	600	309
Cromo	mg/kgSS	-	600	45,1
Zinco	mg/kgSS	≤2500	1500	987
Salmonelle	MPN/g SS	≤1000	-	-
Escherichia coli	MPN/g SS	-	-	160.028
Carbonio organico	%SS	≥20	-	28,4
Fosforo totale	%SS	≥0,4	-	2,1
Azoto totale	%SS	≥1,5	-	3,5

Essendo ben nota la scarsa volatilità dei metalli, era del tutto prevedibile che nel condensato non si ritrovassero, se non in quantità estremamente esigue, quelli presenti nel fango in essiccazione.

Tab. 4.4. *Analisi del condensato estratto dall'impianto pilota fra settembre 2021 e maggio 2022.*

		Valore	Dev. std.
pH	pH	8,3	0,3
Richiesta chimica di ossigeno (COD)	mg/l	37,3	10,0
Azoto ammoniacale (NH ₄ ⁺)	mg/l	59,6	29,9
Azoto totale (N)	mg/l	44,4	13,9
Fosforo Totale (P)	mg/l	2,5	0,7
Solidi sospesi totali	mg/l	4,8	3,2

Tab. 4.5. *Concentrazione di metalli pesanti nel condensato estratto dall'impianto pilota fra settembre 2021 e maggio 2022.*

Bario (Ba)	µg/l	2,15	Piombo (Pb)	µg/l	0,45
Boro (B)	µg/l	2,60	Selenio (Se)	µg/l	0,22
Cadmio (Cd)	µg/l	0,00	Arsenico (As)	µg/l	0,00
Cromo totale (Cr)	µg/l	1,04	Rame (Cu)	µg/l	80,76
Manganese (Mn)	µg/l	3,94	Stagno (Sn)	µg/l	2,01
Nichel (Ni)	µg/l	0,82	Zinco (Zn)	µg/l	12,41

Le maggiori (seppur decisamente limitate) quantità di rame presenti provengono verosimilmente dal condensatore, le cui batterie alettate sono realizzate proprio in rame.

5. STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN SISTEMA DI ACCUMULO ENERGETICO PER L'ALIMENTAZIONE NOTTURNA DELLA SERRA SOLARE

Il nuovo impianto di essiccamento solare che si prevede di realizzare presso il depuratore di Udine utilizzerà energia rinnovabile proveniente da un parco fotovoltaico da 400 kW_p per alimentare la pompa di calore e gli altri ausiliari, come si è già illustrato al capitolo 3. Per il funzionamento notturno si è previsto il semplice acquisto di energia elettrica dalla rete nazionale, ipotizzando tutt'al più di acquistare energia 'con garanzia di origine rinnovabile'.

Allo scopo sia di ridurre la dipendenza dell'impianto dall'acquisto di energia elettrica, riducendo in tal modo l'esposizione alla fluttuazione del prezzo di quest'ultima, sia di massimizzare l'uso di energia rinnovabile, si è deciso di analizzare la fattibilità tecnico-economica di ampliare il parco fotovoltaico già previsto, associandovi un sistema di accumulo. L'energia elettrica prodotta in eccedenza durante il giorno dall'impianto fotovoltaico potrebbe così venire stoccata temporaneamente, per essere poi utilizzata durante la notte.

Le tecnologie attualmente disponibili per lo stoccaggio di una notevole quantità di energia, come quella richiesta dall'impianto di essiccamento solare in esame, sono sostanzialmente due: l'accumulo elettrochimico mediante grandi batterie, oppure la produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua con successivo utilizzo di tale idrogeno all'interno di celle a combustibile per ottenere nuovamente elettricità.

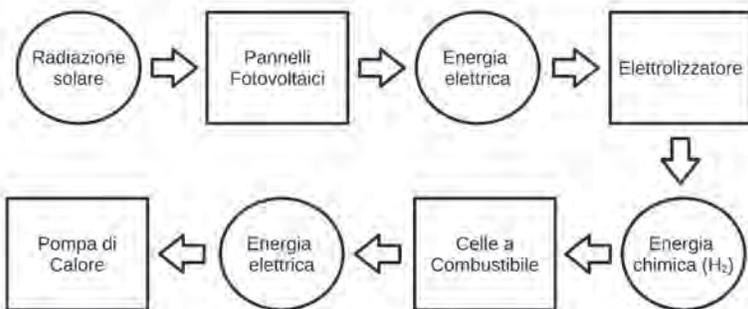
Il presente capitolo descriverà i passi seguiti per il dimensionamento di entrambi i sistemi di accumulo energetico, confrontando i risultati ottenuti nei due casi dal punto di vista tecnico, economico, e ambientale. Per brevità, non si riporteranno nel dettaglio tutti i valori numerici trovati, ma solo i risultati complessivi.

5.1. Sistema di accumulo con idrogeno

Uno dei sistemi di accumulo di energia con maggiori prospettive di crescita per il futuro, grazie a numerosissimi studi e ricerche in corso in tutto il mondo, è l'idrogeno verde, ovvero idrogeno prodotto per elettrolisi dell'acqua con elettricità proveniente da fonti rinnovabili. In pratica, si immagazzina l'energia elettrica sotto forma di energia chimica contenuta nelle molecole di idrogeno. Successivamente, facendo reagire l'idrogeno con l'ossigeno all'interno di celle a combustibile (comunemente note con il termine inglese *fuel cell*) si produce nuovamente elettricità e, come unico prodotto della reazione chimica, dell'innocuo vapore acqueo.

Nel caso dell'impianto di essiccamento solare di Udine, lo schema funzionale del processo sarebbe quello riportato in Figura 5.1. La radiazione solare verrebbe convertita in energia elettrica da un secondo parco fotovoltaico durante il giorno, quindi tale elettricità verrebbe istantaneamente utilizzata per produrre idrogeno attraverso uno o più elettrolizzatori; l'idrogeno prodotto durante il giorno verrebbe alimentato alle *fuel cells* durante la notte, producendo l'energia elettrica necessaria ad alimentare la pompa di calore. È bene ribadire l'espressione 'secondo parco fotovoltaico': l'energia prodotta dal parco fotovoltaico già previsto per l'alimentazione diurna della serra non sarebbe infatti sufficiente per coprire anche i consumi notturni, per i quali sarebbe necessario installare un

Fig. 5.1. *Schema delle conversioni energetiche operate dall'impianto di produzione di idrogeno verde.*



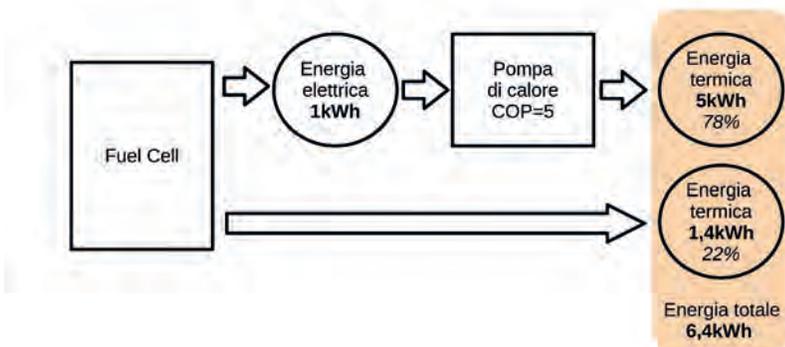
ulteriore parco fotovoltaico, il cui dimensionamento verrà svolto nel seguito capitolo.

Il dimensionamento del sistema di accumulo energetico è stato svolto in due fasi: in un primo momento si è proceduto a ritroso, partendo dall'output desiderato (l'energia necessaria alla pompa di calore) si è cercato l'input teorico richiesto (l'energia da fornire con l'impianto fotovoltaico); scelto un impianto fotovoltaico di potenza sufficiente, si è determinato l'input effettivo (l'energia realmente prodotta dall'impianto) e, in cascata, tutti i parametri dipendenti da esso (produzione di idrogeno, dimensionamento dell'accumulo e del compressore, produzione elettrica eccedente o mancante nei mesi dell'anno, ecc.).

5.1.1. Dimensionamento bottom-up: dai consumi ai fabbisogni. In primo luogo, si sono recuperati i consumi previsti per ciascun mese per il funzionamento notturno della pompa di calore: questi valori erano già presenti nel progetto preliminare stilato da CAFC SpA. L'energia elettrica totale necessaria per il funzionamento della pompa di calore risulta pari a 571.124 kWh, mentre la potenza elettrica richiesta oscilla tra i 69 kW e i 150 kW.

Per potenze significative, dell'ordine del centinaio di kW, le celle a combustibile disponibili sono sempre celle ad alta temperatura: il calore prodotto durante la reazione viene allontanato da un sistema di raffreddamento, che normalmente dovrebbe provvedere a dissiparlo, ad esempio scaricandolo in atmosfera mediante dry-cooler o torri evaporative.

Fig. 5.2. Ripartizione della fornitura di energia termica fra la pompa di calore e il sistema di raffreddamento della fuel cell.



Dal momento che l'effetto utile ricercato dall'impianto di essiccamento solare è proprio il riscaldamento di un flusso d'aria, appare molto conveniente sfruttare anche il calore estratto dal sistema di raffreddamento delle *fuel cells*, prevedendo di installare uno scambiatore per cedere questo calore all'aria in ingresso alla serra. Ciò permetterebbe anche di ridurre il carico termico da fornire con la pompa di calore, riducendone i consumi elettrici. Utilizzando i parametri della *fuel cell* commerciale PowerCellution100, si ottiene lo schema riportato in Figura 5.2. Il recupero dell'energia termica generata dalla *fuel cell* permette di ridurre del 22% l'energia termica richiesta alla pompa di calore, e conseguentemente anche il suo consumo elettrico.

Il consumo elettrico della pompa di calore appena determinato equivale all'energia elettrica che devono fornire le *fuel cells*. Conoscendo il loro rendimento, ovvero il rapporto fra l'energia elettrica prodotta e l'energia chimica contenuta nell'idrogeno in ingresso, è possibile calcolare quest'ultima secondo la seguente, semplice espressione:

$$E_{chimica\ in\ ingresso} [kWh] = \eta \cdot E_{elettrica\ in\ uscita} [kWh]$$

Essendo poi noto il contenuto energetico dell'idrogeno, 33 kWh/kg, si può facilmente trovare la massa di idrogeno da alimentare alle *fuel cells* per ottenere l'energia elettrica richiesta dalla pompa di calore:

$$m_{idrogeno} [kg] = \frac{E_{chimica\ necessaria} [kWh]}{e_{contenuto\ energetico} \left[\frac{kWh}{kg} \right]}$$

Per visualizzare più chiaramente le quantità in gioco, si è provveduto anche a calcolare il volume di idrogeno complessivo, dividendo la massa per la densità, pari a 0,0838 kg/Nm³. Dividendolo poi il volume trovato per le ore con presenza di radiazione solare, quelle in cui avverrà la produzione di idrogeno, si è trovata la portata oraria di idrogeno che dovrà essere erogata dagli elettrolizzatori.

Conoscendo la portata di idrogeno necessaria, si può trovare il consumo di energia elettrica richiesto dagli elettrolizzatori per produrla. Anche in questo caso si è scelto un modello commerciale, per poter disporre di dati realistici per effettuare i calcoli: in particolare, si è optato per un elettrolizzatore MC-Lyzer 100-30, con un consumo specifico di 4,5 kWh/Nm³ di

idrogeno prodotto. Poiché la produzione massima di idrogeno di un singolo elettrolizzatore è pari a $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$, inferiore a quella richiesta nella maggior parte dei mesi, si è ipotizzato di installare due unità in parallelo. Questa scelta appare più vantaggiosa rispetto all'installazione di un solo elettrolizzatore più grande, dal momento che permette di continuare la produzione, almeno parziale, anche in caso di guasto o di manutenzione ad una delle due apparecchiature.

5.1.2. Dimensionamento bottom-up: scelta del parco fotovoltaico. Il riferimento per la progettazione degli impianti fotovoltaici, in ambito europeo ma non solo, è il *PhotoVoltaic Geographical Information System* (PVGIS). Realizzato con il patrocinio della Comunità Europea, consiste in un ricco database relativo all'irraggiamento solare in tutta Europa (e in buona parte dell'intero pianeta), sul quale si basa un software che permette di calcolare le prestazioni di un impianto fotovoltaico al variare della sua posizione e dei suoi parametri operativi.

In particolare, selezionando le coordinate geografiche (46.026, 13.242 nel caso del depuratore di via Gonars), le perdite legate al *Balance of Systems* (tipicamente il 14%), la tecnologia dei pannelli fotovoltaici (silicio cristallino) e l'angolo di inclinazione (ottimizzato in base alla latitudine, nel caso di Udine pari a 40°), è possibile conoscere l'effettiva produzione di energia elettrica che si può ragionevolmente aspettarsi da un impianto di nota potenza di picco.

L'energia elettrica totale richiesta dagli elettrolizzatori ammonta a 1.596.383 kWh: utilizzando iterativamente il software PVGIS, si è cercato un impianto in grado di produrre una quantità di energia leggermente superiore a quella richiesta, in modo da coprire in parte anche i consumi del compressore (di cui si dirà in seguito). In tal modo, si è scelto un impianto da 1.200 kW_p, in grado di produrre 1.610.893 kWh di energia elettrica in un anno. Considerando poi che un pannello in silicio cristallino presenta mediamente un'area di $5,6 \text{ m}^2/\text{kWp}$, l'area complessiva dell'impianto da 1.200 kW_p ammonterebbe a 6.720 m^2 .

L'impianto fotovoltaico scelto non produce esattamente tutti e soli i kWh richiesti dal sistema di stoccaggio di idrogeno, anzi: nei mesi estivi la produzione elettrica supera la richiesta, mentre in quelli invernali risulta inferiore. Di conseguenza, è necessario verificare le effettive prestazioni di ciascun componente del sistema di stoccaggio per individuare gli

scostamenti con le prestazioni richieste e valutare, ad esempio, la quantità di energia elettrica che sarà comunque necessario acquistare dalla rete nazionale.

5.1.3. Dimensionamento top-down: dalla produzione effettiva ai costi di esercizio. Innanzitutto, si è determinata l'effettiva produzione di idrogeno, tenendo conto dell'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici e dell'efficienza degli elettrolizzatori precedentemente scelti. Conoscendo la quantità di idrogeno a disposizione, si è calcolata l'energia chimica corrispondente a tale quantità; quindi, considerando l'efficienza delle celle a combustibile scelte, si è trovata l'energia elettrica prodotta. A partire da quest'ultima si è facilmente determinata l'energia termica totale, data dalla somma dell'energia termica generata direttamente dalle celle a combustibile e dell'energia prodotta dalla pompa di calore.

L'energia termica totale disponibile ammonta a 2.876.967 kWh/anno, appena superiore rispetto al fabbisogno della serra, di 2.855.622 kWh/anno, ma la situazione non è uniforme per tutti i mesi dell'anno. In alcuni mesi, infatti, l'energia disponibile è comunque inferiore rispetto a quella richiesta, mentre in altri è superiore: nei primi sarà necessario acquistare energia elettrica dalla rete nazionale, nei secondi sarà possibile immettere in rete l'energia elettrica eccedente, invece inviarla alla pompa di calore. Complessivamente, si è trovato un surplus complessivo di 4.269 kWh/anno di energia elettrica, che possono essere immessi nella rete nazionale. Assumendo il costo dell'elettricità pari a 0,3 €/kWh, questo surplus comporterebbe un guadagno pari a 1.281 €/anno.

A questo punto, è stato necessario procedere al dimensionamento del sistema di accumulo vero e proprio: dal momento che la produzione giornaliera di idrogeno oscilla fra i 600 e i 1.300 Nm³/giorno, è evidentemente impensabile stoccarlo a pressione atmosferica. Si è pertanto previsto che l'idrogeno in uscita dagli elettrolizzatori sia compresso a 520 bar e successivamente stoccato in un serbatoio adatto a resistere ad una pressione così elevata. Per garantire continuità di funzionamento all'impianto, o per permettere operazioni di manutenzione agli elettrolizzatori senza interrompere la produzione di idrogeno, si è optato per una capacità dello stoccaggio pari alla massima produzione di una settimana, ovvero 18 m³ a 520 bar, corrispondenti a circa 9.200 Nm³.

Al fine di calcolare i consumi elettrici e i costi della fase di compressione dell'idrogeno, si è selezionato un compressore commerciale, modello Bauer L 25-18.55, con potenza nominale pari a 55 kW. La potenza effettivamente assorbita dal compressore è stata calcolata ipotizzando una relazione lineare con la portata \dot{Q} elaborata:

$$P_{portata\ incognita} = \frac{\dot{Q}_{incognita}}{\dot{Q}_{massima}} \cdot P_{portata\ massima}$$

Considerando che il compressore opererebbe solo nelle ore con produzione di idrogeno, ovvero durante le ore di sole, è stato possibile calcolare il consumo energetico e il corrispondente costo. Si è trovato un consumo totale di 142.672 kWh/anno, ovvero un costo di 42.802 €/anno.

5.1.4. Valutazioni economiche. Attingendo a varie fonti, fra cui letteratura tecnica, siti web di aziende costruttrici e lo stesso studio di fattibilità di CAFC SpA relativamente al parco fotovoltaico, è stato possibile stimare i costi unitari e i costi totali dei principali componenti del nuovo impianto di produzione e stoccaggio di energia. Si vede che la maggiore voce di spesa è rappresentata dal parco fotovoltaico, seguita dalle bombole per l'accumulo dell'idrogeno: non solo esse devono sopportare pressioni altissime, ma va anche ricordato che la molecola di idrogeno è la più piccola esistente, e che per riuscire a trattenerla sono necessari materiali compositi molto costosi. Risultano relativamente meno significativi gli altri costi, ovvero il compressore, lo scambiatore per il recupero termico dalle *fuel cells*, i due elettrolizzatori e le due *fuel cells*.

A seguito della crisi economica causata dalla pandemia di Covid-19, la Comunità Europea ha previsto un sostanzioso piano di aiuti per i Paesi più colpiti, con l'obiettivo non solo di risollevarne l'economia, ma anche e soprattutto di guidarla in direzione della transizione ecologica. In Italia questo piano prende il nome di Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) e include incentivi a molteplici attività, fra cui quelle del settore energetico. Il 23 marzo 2022 è stato pubblicato un bando, per un valore totale di 30 milioni di euro, per finanziare attività di ricerca industriale e di sviluppo sperimentale relative alla produzione di idrogeno verde. Il bando

Tab. 5.1. *Costi dell'impianto di produzione e stoccaggio di idrogeno verde.*

	Taglia	Costo unitario	Numero	Costo totale
Parco fotovoltaico	1.200 kW _p	1.000 €/kW _p	1	1.200.000
Elettrolizzatore	100 kW	300 €/kW	2	60.000
Compressore	55 kW	1.700 €/kW	1	93.500
Bombole	9.238 Nm ³	60 €/Nm ³	1	554.299
Fuel Cell	100 kW	100 €/kW	2	20.000
Scambiatore piastre	164 kW	30 €/kW	1	4.920
Totale				1.932.719

offre finanziamenti a progetti presentati sia da enti pubblici, sia da enti privati, con importo compreso fra 2 e 4 milioni di euro.

Sommando i diversi contributi applicabili al caso dell'impianto di produzione e stoccaggio di idrogeno verde che si sta in questa sede valutando, si ottiene una percentuale di finanziamento pari al 50%, che abbatterebbe in misura significativa le spese iniziali.

Per rientrare nel limite minimo di 2 milioni di euro sarebbe ad esempio sufficiente aumentare del 20% la capacità delle bombole, ottenendo un importo complessivo di 2.043.579 €: confidando nell'approvazione del progetto, il 50% di tale importo sarebbe finanziato con i fondi europei del PNRR, in modo che CAFC SpA si troverebbe a sostenere una spesa di soli 1.021.790 €.

Di seguito si è calcolato il tempo di rientro nell'investimento sia nel caso in cui non si riesca a beneficiare del PNRR (Scenario 1), sia nel caso in cui si ottenga il finanziamento europeo (Scenario 2); i due casi sono stati confrontati con il 'caso base', ovvero l'alimentazione della serra solare nelle ore notturne semplicemente con energia acquistata dalla rete nazionale. Le altre spese includono una stima dei costi di manutenzione e l'ammortamento dell'esborso iniziale effettivamente sostenuto dal CAFC SpA (al netto del finanziamento nel secondo scenario) per un tempo di 20 anni.

Si nota chiaramente che, senza i contributi del PNRR, l'investimento è sostanzialmente insostenibile, essendo il tempo di payback pari a oltre un secolo.

Tab. 5.2. *Analisi economica dell'impianto di produzione di idrogeno verde.*

	Elettricità (€/anno)	Altre spese (€/anno)	Totale (€/anno)	Risparmio (€/anno)	PB semplice (anni)
Caso base	171.337	0	171.337		
Scenario 1	41.521	115.963	157.484	13.853	139,51
Scenario 2 - PNRR	41.521	71.525	113.046	58.291	17,53

Al contrario, potendo usufruire del finanziamento europeo, la realizzazione dell'impianto di accumulo di idrogeno verde diventa economicamente più interessante: un tempo di payback di 17 anni, pur essendo ancora decisamente elevato, è in linea con i valori già trovati da CAFC SpA per il solo impianto di essiccamento.

Essendo le spese per l'elettricità tra le voci di costo più significative nella determinazione del tempo di payback, è ragionevole ipotizzare che quest'ultimo dipenda marcatamente dal prezzo dell'elettricità stessa. Per verificare questa supposizione, si è svolta un'analisi di sensitività, variando il parametro 'prezzo dell'energia', considerato inizialmente uguale a 0,30 €/kWh (valore di mercato al momento del primo svolgimento dei calcoli qui riportati), nell'intervallo 0,20-0,60 €/kWh.

I risultati ottenuti confermano quanto facilmente prevedibile: all'aumentare del prezzo dell'elettricità aumenta il risparmio derivante dal non doverne acquistare, di conseguenza il tempo di payback si riduce notevolmente. Questo scenario appare purtroppo non del tutto inverosimile, dal momento che il conflitto armato attualmente in corso in Ucraina sta rendendo più difficoltoso l'approvvigionamento di fonti energetiche (in particolare gas naturale e petrolio) per l'intera Europa. Il prezzo dell'elettricità negli ultimi mesi è aumentato considerevolmente rispetto al valore 'iniziale' di 0,30 €/kWh, e la sua diminuzione potrebbe risultare più lenta di quanto auspicato.

Al contrario, qualora l'acquisto di energia dalla rete nazionale diventasse più economico, diventerebbe sempre meno conveniente autoprodurla e stoccarla sotto forma di idrogeno verde, al punto che, in assenza del finanziamento del PNRR, l'investimento risulta in perdita netta di quasi 30.000 €/anno in corrispondenza ad un prezzo dell'energia pari o inferiore a 0,20 €/kWh.

5.1.5. Valutazioni ambientali. Per valutare la riduzione dell'impatto ambientale dell'impianto di essiccamento solare con sistema di accumulo di idrogeno verde rispetto all'impianto alimentato con energia acquistata dalla rete nazionale, si è calcolata la variazione della quantità di CO₂ equivalente emessa in atmosfera. Secondo la normativa europea, in riferimento al mix di fonti energetiche con cui l'Italia produce l'energia elettrica, le emissioni di CO₂ equivalente vanno stimate in 198 g/MJ. Ovviamente, all'energia prodotta da impianti fotovoltaici compete una emissione di CO₂ equivalente pari a 0, quindi le emissioni nel caso della serra solare con sistema di accumulo sarebbero solo quelle riferite alla quota di energia acquistata dalla rete nazionale. L'installazione del sistema di accumulo di idrogeno verde eviterebbe l'emissione di circa 310 tonnellate di CO₂ equivalente, pari ad una riduzione di quasi il 76%.

5.2. Sistema di accumulo con batteria

Le batterie rappresentano ad oggi un sistema di accumulo di energia elettrica molto più diffuso rispetto all'idrogeno, come si può facilmente constatare pensando ad esempio al settore dell'*automotive*. Essendo le batterie composte sostanzialmente da una serie di celle elettrochimiche variamente collegate tra loro (in serie per ottenere un voltaggio maggiore, in parallelo per erogare una corrente più elevata), è possibile immaginare batterie con capacità anche molto grandi, semplicemente affiancando un numero maggiore di celle. Appare pertanto non inverosimile l'uso di una grande batteria per l'accumulo dell'energia prodotta durante il giorno con pannelli fotovoltaici, in modo da poterla utilizzare nelle ore notturne.

5.2.1. Dimensionamento tecnico. L'efficienza di carica e scarica di una moderna batteria viene stimata, secondo varie pubblicazioni di letteratura e siti di aziende produttrici, superiore al 95%, con punte di oltre il 99%. Cautelativamente, in questa sede si è scelto di considerare un'efficienza di carica e scarica pari al 90%.

Scegliere un valore più pessimistico permette anche di tenere conto della perdita di efficienza nel tempo: una batteria riesce a garantire prestazioni ottimali solo per un numero limitato di cicli di carica e scarica, tipicamente alcune migliaia, poi il progredire di vari fenomeni di degradazione determinano una inevitabile riduzione dell'efficienza.

Con l'ipotesi di un'efficienza del 90% sia in fase di carica, sia in fase di scarica, è possibile calcolare l'energia che è necessario fornire in ingresso alla batteria per ottenere, in uscita, l'energia richiesta dalla pompa di calore. L'energia totale necessaria è pari a 705.092 kWh/anno.

Procedendo iterativamente per tentativi, con l'ausilio del software PVGIS si è individuata la dimensione del parco fotovoltaico in grado di produrre una quantità totale di energia leggermente superiore a quella richiesta: in particolare, si è scelto un parco da 550 kW_p, che garantisce una produzione di 738.326 kWh/anno. La vendita dell'eccedenza di energia elettrica prodotta nei mesi di maggiore produzione, sottratta l'energia da acquistare dalla rete nazionale nei mesi con produzione insufficiente, consentirebbe di ottenere un ricavo netto di 9.970 €/anno.

La superficie occupata dai pannelli fotovoltaici, considerando ancora un'area specifica di 5,6 m²/kW_p, ammonterebbe a 3.080 m².

Successivamente, si è calcolata la massima produzione giornaliera del parco fotovoltaico, che è risultata essere pari a 2.685 kWh. A causa della minore densità energetica delle batterie rispetto all'idrogeno, si è scelto di dimensionare la batteria in modo da garantire non una settimana ma un giorno di autonomia. In particolare, si è scelto un modello commerciale di batteria con capacità di 2.764 kWh, la PowerCombo-C40, che occupa un container di dimensioni 12,2x2,4x2,9 m. Si può facilmente capire che un accumulo sufficiente a garantire un'autonomia di una settimana sarebbe risultato improponibile.

La batteria PowerCombo-C40 è dotata di un sistema di raffreddamento composto da due gruppi frigoriferi con potenza 25 kW: la batteria è infatti progettata per lavorare ad una temperatura pari o inferiore a 25 °C, mentre temperature più elevate potrebbero determinare un calo delle prestazioni.

Per stimarne il consumo energetico del sistema di raffreddamento, si è fatto ricorso ai database di climatologia locale dell'Osservatorio Meteorologico Regionale (OSMER): si è potuto constatare che, nella località di Udine, tutti i mesi hanno una temperatura media inferiore a 25 °C. In compenso, il valore medio delle temperature massime di giugno, luglio e agosto è superiore a 25 °C: si è assunto che in quei mesi la temperatura sia sempre maggiore di 25 °C per tutte le ore di luce, così che l'accensione del sistema di raffreddamento della batteria sia necessaria per tutte e sole le ore di luce di quei tre mesi.

Si tratta chiaramente di una semplificazione molto forte, ma che dovrebbe portare a risultati non troppo inverosimili: infatti, da un lato si trascurano le giornate calde che potrebbero verificarsi negli altri mesi, ma dall'altro si ignorano anche le giornate più fresche che possono certamente verificarsi nei mesi più caldi. Inoltre, se si rendesse necessario un funzionamento prolungato del sistema di raffreddamento anche nei mesi più freddi, ci si troverebbe nella condizione di disporre di una significativa quantità di calore che potrebbe essere vantaggiosamente recuperato per riscaldare l'aria in ingresso nella serra, riducendo i consumi della pompa di calore.

Uno scenario apparentemente più critico di quello considerato, pertanto, risulterebbe invece più vantaggioso: ciò conferma la scelta operata, nell'ottica di analizzare uno scenario il più oneroso possibile.

Nello scenario considerato, risulta un consumo totale dell'impianto di raffreddamento pari a 46.200 kWh/anno, corrispondenti ad una spesa di 13.860 €.

5.2.2. Valutazioni economiche. I costi unitari dei componenti principali dell'impianto sono stati ricavati da diverse fonti: per il parco fotovoltaico si è utilizzato lo stesso valore stimato dal CAFC SpA, analogamente a quanto fatto nel caso dell'impianto di accumulo di idrogeno verde; i costi di batteria e inverter sono stati dedotti da siti di aziende produttrici di modelli più piccoli, applicando cautelativamente una maggiorazione del 20% circa. Si può osservare che, anche in questo caso, la voce di costo principale è il parco fotovoltaico, seguito dalla grande batteria. L'inverter, la cui potenza massima è pari in base alla massima potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore, incide in misura quasi trascurabile sull'esborso iniziale. Ipotizzando un ammortamento in 20 anni e i costi di manutenzione annui pari all'1% del costo totale dell'impianto, coerentemente con quanto assunto nel caso del sistema di accumulo di idrogeno, si ottiene un tempo di payback decisamente interessante, pari a 8,67 anni.

Per analogia con quanto effettuato per il sistema di accumulo di idrogeno, si è eseguita anche l'analisi di sensibilità al variare del prezzo dell'energia elettrica. Anche per il sistema di accumulo con batteria si osserva lo stesso andamento: il tempo di payback risulta tanto più breve (ovvero, l'investimento è tanto più vantaggioso) quanto più elevato diventa il prezzo dell'elettricità.

Tab. 5.3. *Analisi economica dell'impianto di stoccaggio di energia con batteria.*

	Taglia	Costo unitario	Numero	Costo totale
Parco fotovoltaico	550 kWp	1.000 €/kWp	1	550.000
Batteria	2.764 kWh	140 €/kWh	1	386.960
Inverter	150 kW	120 €/kW	1	18.024
Totale				954.984

Persino in caso di diminuzione del prezzo dell'elettricità si avrebbe un payback ragionevole, sebbene appena superiore al limite della vita utile della batteria: ciò implicherebbe che, ancora prima che l'investimento si fosse del tutto ripagato, si dovrebbe sostenere un nuovo esborso per la sostituzione della batteria.

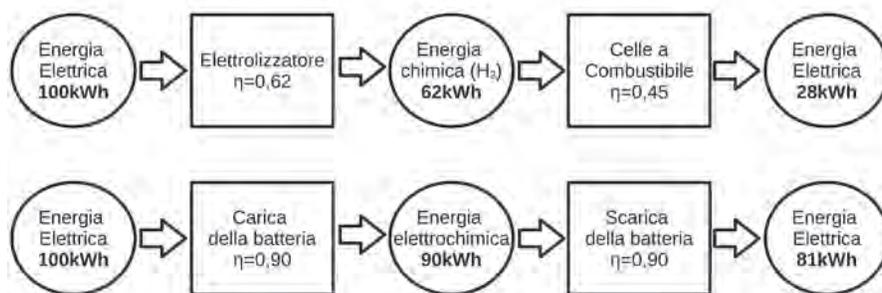
5.2.3. Valutazioni ambientali. Come si è già evidenziato, il parco fotovoltaico da 550 kWp produrrebbe più energia di quella strettamente richiesta per il funzionamento della pompa di calore. L'energia eccedente riuscirebbe a coprire parte dei consumi del sistema di raffreddamento della batteria, con il risultato che il sistema di accumulo nel suo insieme richiederebbe un acquisto di energia dalla rete elettrica nazionale davvero contenuto.

Di conseguenza, la riduzione di emissioni di CO₂ equivalente rispetto al caso dell'impianto di essiccamento alimentato con sola energia elettrica acquistata dalla rete nazionale sarebbe molto elevata, pari a circa 397 tonnellate.

5.3. Comparazione dei due sistemi

Tra i due sistemi di accumulo di energia proposti, appare chiaramente preferibile l'accumulo elettrochimico con batteria, sia dal punto di vista tecnico, sia dal punto di vista economico, sia dal punto di vista ambientale (limitatamente alle emissioni di CO₂ equivalente).

Dal punto di vista energetico, il principale problema del sistema di accumulo con idrogeno è dato dai bassi rendimenti di elettrolizzatori e *fuel cell*, che determinano un rendimento complessivo pari a circa il 28%, come illustrato in Figura 5.3. Al contrario, essendo i rendimenti di carica e scarica di una batteria pari (o superiori) al 90%, il rendimento complessivo risulta

Fig. 5.3. *Comparazione dei rendimenti complessivi dei due sistemi di accumulo energetico.*

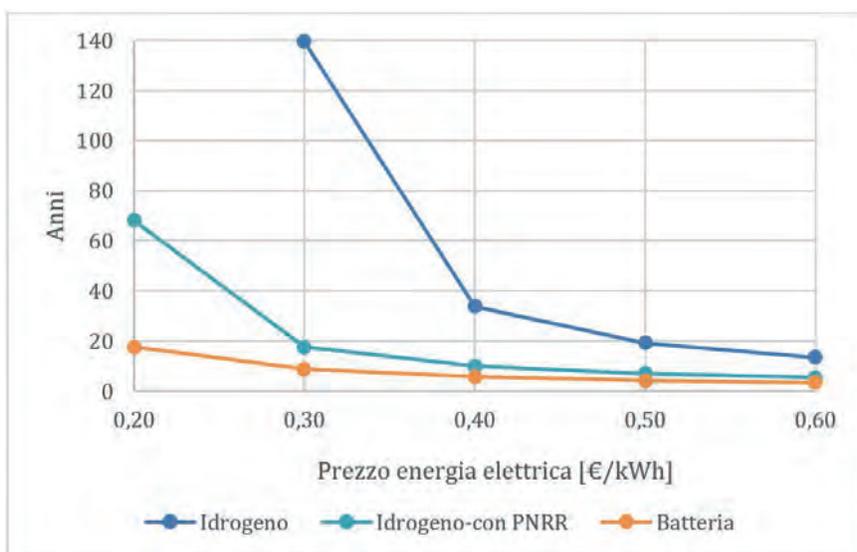
dell'81%, quasi triplo rispetto al sistema elettrolizzatori-*fuel cell*, precisamente 2,89 volte maggiore.

In realtà, la possibilità di recuperare parte dell'energia termica dissipata dalle celle a combustibile per riscaldare la serra solare, come già detto in riferimento alla Figura 5.2, permette di aumentare leggermente l'efficienza complessiva: come si può infatti notare in Tabella 5.4, l'energia elettrica ri-

Tab. 5.4. *Comparazione dei due sistemi di accumulo di energia; in grassetto l'alternativa più conveniente in riferimento a ciascuna voce.*

Parametro	Idrogeno senza PNRR	Idrogeno con PNRR	Batteria
Energia elettrica richiesta (esclusi ausiliari) (kWh/anno)	1.596.383	1.596.383	705.092
Consumo ausiliari (kWh/anno)	142.672	142.672	46.200
Potenza nominale impianto fotovoltaico (kWp)	1.200	1.200	550
Superficie parco fotovoltaico (m ²)	6.720	6.720	3.080
Autonomia accumulo (giorni)	7	7	1
Dimensioni accumulo (m ³)	18	18	85
Investimento iniziale (€)	1.932.719	1.021.790	954.984
Risparmio rispetto acquisto energia da rete nazionale (€/anno)	13.853	58.921	110.149
Tempo di payback (anni)	139,51	17,53	8,67
Riduzione emissioni CO ₂ (%)	75,8	75,8	97,7

Fig. 5.4. Confronto degli andamenti dei tempi di Payback dei due sistemi di accumulo al variare del prezzo dell'energia elettrica.



chiesta dal sistema di accumulo con idrogeno risulta essere ‘solo’ 2,26 volte (anziché 2,89) quella richiesta dal sistema di accumulo con batteria.

In ogni caso, l'energia elettrica da fornire con l'impianto fotovoltaico è comunque molto maggiore nel caso in cui la si immagazzini sotto forma di idrogeno, così che l'impianto stesso deve estendersi per una superficie molto più ampia. Non solo: la necessità di portare l'idrogeno fino a una pressione di 520 bar corrisponde a elevati consumi energetici del compressore, superiori rispetto ai consumi stimati del sistema di raffreddamento della batteria.

L'unico aspetto in cui l'accumulo di idrogeno prevale sull'accumulo elettrochimico è dato dalla densità energetica raggiungibile: l'idrogeno compresso a 520 bar consente infatti di accumulare sette volte più energia in un volume quasi cinque volte inferiore rispetto alla batteria. Tuttavia, trattandosi il caso in esame di un'applicazione stazionaria, per la quale risulta oltretutto semplice sopperire a eventuali interruzioni della produzione del parco fotovoltaico con energia dalla rete nazionale, la capacità di stoccare più energia non può certo essere considerata come il parametro più rilevante nella scelta del sistema di accumulo.

Dal punto di vista economico, le maggiori dimensioni dell'impianto fotovoltaico determinano un costo iniziale quasi doppio nel caso dell'accumulo di idrogeno, che nemmeno il ricorso ai finanziamenti del PNRR permette di portare al di sotto del costo iniziale dell'impianto con batteria.

Considerando poi che l'elevato consumo del compressore costringe ad acquistare molta elettricità dalla rete nazionale, il risparmio annuo risulta inferiore, con un aumento del tempo di payback fino a valori del tutto inaccettabili in assenza del finanziamento europeo. In tutti i casi, il tempo di payback diminuisce al crescere del prezzo dell'energia elettrica, ma l'accumulo con batteria rimane sempre l'alternativa più conveniente.

Dal punto di vista ambientale, a causa dell'acquisto di energia elettrica per alimentare il compressore la riduzione delle emissioni di CO₂ equivalente è meno marcata nel caso dell'accumulo di idrogeno. Per un'analisi più completa, tuttavia, sarebbe opportuno valutare anche le emissioni legate alla produzione e allo smaltimento della batteria, verosimilmente superiori rispetto a quelle relative al ciclo vitale delle bombole per l'idrogeno.

6. CONCLUSIONI

Il presente quaderno Ausir si è focalizzato sul trattamento dei fanghi di depurazione mediante essiccamento solare, analizzando in particolare il *case study* dell'impianto di Udine, presso il quale è in via di realizzazione una serra solare equipaggiata con un sistema di fornitura di aria calda con pompa di calore. Si è descritto l'impianto pilota già operativo, analizzandone nel dettaglio le prestazioni, e si è svolto il dimensionamento di un possibile sistema di produzione ed accumulo di energia a servizio del futuro impianto in scala reale.

Grazie all'analisi dei dati raccolti dall'impianto pilota è stato possibile verificare la convenienza tecnica dell'essiccamento solare: esso consente, in tempi del tutto ragionevoli (circa due settimane) di ridurre notevolmente il contenuto di umidità del fango, fino a raggiungere un tenore di secco ben superiore all'80%. Il fango essiccato non presenta concentrazioni eccessive di inquinanti, al contrario rispetta non solo i limiti prescritti dalla legislazione attuale, ma anche quelli previsti dal *Working Document on Sludge*, che potrebbero entrare in vigore dal 2025. I risultati ottenuti nel presente lavoro, al netto degli approfondimenti futuri richiesti per una migliore comprensione delle dinamiche del processo di essiccamento a bassa temperatura, confermano la bontà del trattamento proposto ai fini di un riutilizzo agronomico dei fanghi di depurazione.

Nonostante l'isolamento termico presente, le dispersioni termiche assorbono la maggior parte dell'energia totale, determinando consumi specifici molto superiori ai valori di letteratura. Tuttavia, considerando i consumi al netto delle dispersioni e del calore di post-riscaldamento, si ottengono valori in linea con altri impianti di essiccamento a bassa temperatura, nonché con le stime effettuate nel progetto preliminare redatto dal CAFc SpA.

Relativamente ai sistemi di accumulo di energia, i dimensionamenti svolti hanno messo in luce le notevoli criticità dell'utilizzo dell'idrogeno verde, a livello sia di efficienza energetica, sia di convenienza economica: solo il ricorso ai cospicui finanziamenti previsti dal PNRR, infatti, permetterebbe

di rientrare nell'investimento in tempi ragionevoli. Al contrario, l'impiego di una grande batteria si è dimostrato più conveniente ed efficiente, nonostante le possibili criticità ambientali legate alle fasi di smaltimento della batteria stessa al termine del suo ciclo di vita.

Per approfondire la conoscenza del processo di essiccamento solare, in futuro si potrebbero eseguire ulteriori prove sull'impianto pilota variando alcuni parametri: ad esempio, si potrebbe sperimentare una maggiore temperatura di essiccamento, attorno a 45-50 °C, per verificare se ciò è sufficiente a ridurre in modo più significativo la carica batterica presente nel fango. Sarebbe inoltre opportuno analizzare anche alcuni campioni prelevati durante l'essiccamento, in modo da determinare con esattezza come variano nel tempo i diversi parametri chimici e microbiologici del fango. Infine, si potrebbero eseguire analisi sulle emissioni odorigene che si verificano durante l'essiccamento, per valutare l'opportunità di realizzare un biofiltro a servizio della futura serra solare.

BIBLIOGRAFIA

- AMGA - Azienda Multiservizi S.p.A. Udine (2012). Ammodernamento della linea acque del depuratore di Udine: progetto esecutivo.
- Andreoli C., von Sperling M., Fernandes F. (2007). Sludge treatment and disposal. Londra, IWA Publishing.
- Apt J., Newcomer A., Lave L., Douglas S., Dunn L. (2008). An engineering-economic analysis of syngas storage. *Tepper School of Business*, Paper 1120.
- Belloulid M., Hamdi H., Mandi L., Ouazzani N. (2017). Solar drying of wastewater sludge: a case study in Marrakesh, Morocco. *Environmental Technology*, 40, Issue 10.
- Boguniewicz-Zablocka J., Klosok-Bazan, Capodaglio A. (2020). Sustainable management of biological solids in small treatment plants: Overview of strategies and reuse options for a solar drying facility in Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 24680-24693.
- CAFC S.p.A. (2020). Essiccazione fanghi di depurazione con sistema misto serra solare-pompa di calore presso depuratore CAFC via Gonars 38 Udine. Relazione tecnica e allegati.
- CAFC S.p.A. (2020). Ottimizzazione della linea fanghi dell'impianto di depurazione di Udine. Progetto definitivo-esecutivo.
- Collard M., Teychenè B., Lemée L. (2016). Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: solar, thermal and reed beds - impact on organic matter characteristics. *Journal of Environmental Management*, 203, 760-767.

- Coppola M. (2009). 'Caratterizzazione della biomassa dei fanghi secondari dopo il trattamento nitro-denitro'. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli 'Federico II'.
- De Feo G., De Gisi S., Galasso M. (2013). Fanghi di depurazione: produzione, caratterizzazione e trattamento. Palermo, Dario Flaccovio.
- Ding W., Li L., Liu J. (2015). Investigation of the effects of temperature and sludge characteristics on odors and VOC emissions during the drying process of sewage sludge. *Water Science & Technology*, 72.4, 543-552.
- European Commission (2000). Working Document on Sludge.
- Goi D., Rizzardini C. (2009). I fanghi di depurazione: un rifiuto recuperabile? Caratterizzazione, aggiornamenti, prospettive. Università degli Studi di Udine.
- Guo Y., Guo Y., Gong H., Fang N., Tan Y., Zhou W., Huang J., Dai L., Dai X. (2021). Variations of heavy metals, nutrient, POPs and particle size distribution during 'sludge anaerobic digestion-solar drying-land utilization process': Case study in China. *Science of the Total Environment*, 801, 149609.
- Kurt M., Aksoy A., Sanin D. (2015). Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. *Water Research*, 82, 47-57.
- Mainardis M. (2022). Caratterizzazione reflui. Dispense del corso di Ingegneria sanitaria ambientale, Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Udine.
- Mainardis M. (2022). Trattamento fanghi per recupero energia e risorse. Dispense del corso di Ingegneria sanitaria ambientale, Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Udine.
- Mainardis M. (2022). Trattamento reflui. Dispense del corso di Ingegneria sanitaria ambientale, Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Udine.

- Mäkelä M., Edler J., Geladi P. (2017). Low temperature drying of industrial biosludge with simulated secondary heat. *Applied Thermal Engineering*, 116, 792-798.
- Ministero della Transizione Ecologica (2022). Avviso pubblico finalizzato alla selezione di proposte progettuali inerenti attività di ricerca e sviluppo, da finanziare nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), missione 2 'Rivoluzione verde e transizione ecologica', investimento 3.5 'ricerca e sviluppo sull'idrogeno', finanziato dall'Unione Europea (Next Generation EU) a valere sul Decreto del Ministro della Transizione Ecologica del 23.12.2021, Art. 1, Comma 5, Lettera B.
- Poblete R., Painemal O. (2020). Improvement of the solar drying process of sludge using thermal storage. *Journal of Environmental Management*, 255, 109883.
- Prenafeta-Boldù F., Burgos L., Noguerol J., Mercader M., Soler J., Fernandez B. (2020). Solar drying in the vineyard: A sustainable technology for the recovery of nutrients from winery organic waste. *Water Science & Technology*, 82, Issue 1.
- SMAT - Società Metropolitana Acque Torino S.p.A. (2018). La depurazione delle acque reflue urbane: l'impianto per l'area metropolitana torinese.
- US Department of Energy, Office of energy efficiency and renewable energy (2011). Technical targets for hydrogen production from electrolysis.
- Vega E., Monclús H., Gonzales-Olmos R., Martín M. (2014). Optimizing chemical conditioning for odour removal of undigested sewage sludge in drying processes. *Journal of Environmental Management*, 150, 111-119.
- Zhang Q., Yang Y., Zhang X., Liu F., Wang G. (2021). Carbon neutral and techno-economic analysis for sewage treatment plants. *Environmental Technology and Innovation*, 26, 102302.

I Quaderni AUSIR, nati da una convergenza di idee di Massimo Canali, Marcello Del Ben, Daniele Goi e Lorenzo Tosolini, rappresentano una forma di divulgazione dei lavori realizzati in collaborazione tra l'Università degli Studi di Udine e l'Autorità Unica per i Servizi Idrici e i Rifiuti della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, sui temi della risorsa acqua e dei rifiuti. Essi riportano attività di innovazione e ricerca su tematiche relative a: captazione (A), trattamento-distribuzione (B), utilizzo-scarico (C), depurazione (D), recupero-reimmissione in ambiente (E) della risorsa idrica. Vi sono compresi anche altri temi come: la comunicazione (ç), gli aspetti economico-giuridici (€) e di gestione (@) relativi all'articolato mondo dell'acqua, dei rifiuti e non solo.

I contributi includono vari livelli di impegno: parti dei lavori di tesi degli studenti di vari corsi di laurea, sintesi descrittive di risultati ottenuti in borse di ricerca, relazioni di assegni di ricerca annuali o pluriennali, studi svolti in percorsi di dottorato di ricerca, descrizioni dei risultati raggiunti in ricerche approfondite e pubblicate in giornali dedicati di livello nazionale e internazionale.

Riccardo Dominici ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Meccanica con percorso Energetica presso il Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura (DPIA) dell'Università degli Studi di Udine. È iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Udine e lavora come progettista meccanico nella divisione Daniela Environment del gruppo Daniela & C. Officine Meccaniche di Buttrio (Udine).

