

# Ricerca di Sistema elettrico



## **Neutralità energetica e sostenibilità dei servizi idrici in riferimento agli obiettivi delineati dalle politiche comunitarie (LA5.1)**

D. Mattioli, G. Angarano, L. Cafiero, C. Cardenia, D. De Angelis,  
A. Giuliano, M. Granieri, M. Langone, R. Nuzzi, L. Petta,  
G. Sabia, R. Tuffi

LA5.1 NEUTRALITÀ ENERGETICA E SOSTENIBILITÀ DEI SERVIZI IDRICI IN RIFERIMENTO AGLI OBIETTIVI  
DELINEATI DALLE POLITICHE COMUNITARIE

D. Mattioli, G. Angarano, L. Cafiero, C. Cardenia, D. De Angelis, A. Giuliano, M. Granieri, M. Langone,  
R. Nuzzi, L. Petta, G. Sabia, R. Tuffi (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

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

Linea di attività: Neutralità energetica e sostenibilità dei servizi idrici in riferimento agli obiettivi delineati dalle  
politiche comunitarie

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Davide Mattioli, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: Gennaio 2022

Mese inizio effettivo: Gennaio 2022

Mese fine previsto: Giugno 2023

Mese fine effettivo: Giugno 2023

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	6
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	7
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	8
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	9
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	10
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	15
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	16
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	17

## 1 Risultati attesi

- Strumento software DEES di supporto alle decisioni per la classificazione energetica degli impianti di depurazione e per la valutazione di scenari, aggiornato rispetto alle novità introdotte dalla direttiva europea proposta, per fornire supporto alle decisioni dei gestori e dei pianificatori nel percorso verso il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi della normativa.
- Presentazione del quadro conoscitivo e di riferimento dell'efficienza energetica e misure di efficientamento degli impianti di depurazione italiani, dedotto dalla consultazione e analisi dei dati relativi alle diagnosi energetiche condotte ai sensi del D.lgs. 102/2014 ed aggiornati al dicembre 2019, riferite al settore della depurazione delle acque reflue in ambito civile ed industriale, ampliato a tutte le diagnosi presentate con codici ATECO 36 e 37 e alle infrastrutture fognarie.
- Quadro dello stato di stress idrico dei diversi bacini e sottobacini idrici italiani e delle problematiche e fabbisogni idrici in termini qualitativi e quantitativi dei vari territori, completo di mappe ed elaborazioni di indicatori e indici applicati su tutti i bacini italiani, facendo riferimento a due differenti scale temporali di analisi e, quindi, su base annuale e mensile, in modo tale da indagare anche gli aspetti di stagionalità e variabilità inter-annua dello stato della risorsa idrica a fronte delle esigenze delle attività antropiche e dei fabbisogni ecosistemici. L'analisi permetterà di stimare l'effettivo fabbisogno di risorsa idrica del territorio, valutando in primis le richieste del settore agricolo, e compararlo con la potenzialità rappresentata dal riuso idrico degli effluenti depurati.
- Prove di pirolisi e carbonizzazione idrotermica, eseguite per il trattamento dei fanghi di depurazione, finalizzate alla valutazione delle condizioni migliori di processo in termini di resa di biochar/hydrochar e capacità di assorbimento di CO<sub>2</sub>. A valle di un esame della letteratura esistente in materia e dei risultati della caratterizzazione chimico fisica dei fanghi civili campionati, verranno presentati i risultati delle prove di pirolisi e carbonizzazione idrotermica. Le prove di pirolisi saranno ottimizzate mediante l'utilizzo del software "Design Expert", grazie al quale sarà realizzato un design of experiment (DoE), per valutare l'influenza di tre parametri di processo (temperatura, tempo di residenza e velocità di riscaldamento) sul valore sia della resa di biochar, sia della sua capacità di adsorbimento di CO<sub>2</sub>. Parallelamente, saranno presentati i risultati delle prove di carbonizzazione idrotermica, tecnologia che presenta il vantaggio di poter trattare rifiuti ad alto contenuto d'acqua come i fanghi, senza la necessità di onerosi pretrattamenti termici di essiccazione, così come è necessario per il processo di pirolisi. Anche da questo processo sarà prodotto un hydrochar di cui sarà valutata la capacità di adsorbimento di CO<sub>2</sub>. Durante il processo di carbonizzazione idrotermica, oltre all'hydrochar, viene ottenuta una fase acquosa ricca di materiale organico solubile, che sarà caratterizzata allo scopo di valutarne possibili utilizzi.
- Studio e confronto del processo di pirolisi e di carbonizzazione idrotermica dal punto di vista energetico, utilizzando dati disponibili in letteratura e le prove batch condotte in scala di laboratorio.
- Presentazione dei risultati delle prove sperimentali di efficientamento energetico del processo di biometanazione idrogenotrofa, mirati allo sviluppo di sistemi di trasferimento gas-liquido alternativi, aspetto critico da ottimizzare per conseguire l'upscaling della tecnologia. Valutazioni tecnico-economiche, corrette e aggiornate della tecnologia di biometanazione idrogenotrofa rispetto alle tecnologie di upgrading più diffuse sul mercato, alla luce del nuovo schema incentivante dettato dal decreto biometano di recente emanazione (D. MiTE 15/09/2022) e dei nuovi scenari energetici, in particolare della incrementata variabilità dei costi di energia elettrica e metano, completa di una analisi di sensitività, al fine individuare il range di variabilità dei parametri chiave che maggiormente incidono sulla competitività della tecnologia, in modo da fornire ulteriori indicazioni per i decision makers di settore.

## 2 Risultati ottenuti

- Strumento software DEES di supporto alle decisioni per la classificazione energetica degli impianti di depurazione e per la valutazione di scenari, aggiornato rispetto alle novità introdotte dalla direttiva europea proposta, per orientare i gestori e i pianificatori nel percorso verso il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi della normativa. Grazie all'integrazione di nuovi moduli, il software guida gli operatori di settore nelle valutazioni preliminari dell'efficienza dell'intero impianto e di aspetti specifici relativi ai consumi ed all'autoproduzione energetica. Questo supporto è utile per individuare misure e strategie di gestione finalizzate ad adeguare i processi per indirizzarli verso gli obiettivi di neutralità energetica definiti dalla COM (2022) 541. Lo strumento, nella sua versione aggiornata, è stato testato con il supporto di un'azienda del settore interessata a collaborare al suo sviluppo che ha fornito i dati relativi a impianti di depurazione di differente taglia.  
Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: risparmio energetico, incremento della autoproduzione di energia rinnovabile, riduzione emissioni climalteranti, riduzione degli impatti ambientali delle attività antropiche, benefici in tariffa idrica.
- Presentazione del quadro conoscitivo e di riferimento dell'efficienza energetica degli impianti di depurazione italiani comprensivo delle misure di efficientamento effettuate ed individuate, dedotto sulla base delle analisi dei dati estratti dalle diagnosi energetiche condotte ai sensi del D.lgs. 102/2014 e s.m.i. ed aggiornati al dicembre 2019. Il quadro è stato desunto dalla consultazione delle diagnosi presentate per le attività classificate con codici ATECO 36 e 37 estendendo le valutazioni alle infrastrutture fognarie. Complessivamente il campione analizzato si compone quindi di 104 impianti di depurazione e 22 stazioni di sollevamento fognarie. Questo risultato, basato sull'analisi di dati riferiti a casistiche reali, può fornire ai gestori degli impianti di depurazione elementi concreti per la valutazione, tramite confronto, delle prestazioni energetiche dei propri impianti ed una panoramica delle misure di efficientamento applicate e in via di applicazione, con una quantificazione dei benefici perseguiti o perseguibili. Tali informazioni potranno anche essere di supporto per i decision makers, per valutare lo stato di progresso del settore e le soluzioni maggiormente implementate, permettendo un confronto con gli ambiziosi obiettivi di neutralità energetica prospettati dall'Unione Europea. Per il settore fognatura invece, a causa del numero limitato di diagnosi energetiche presentate nel 2019, le statistiche risultano ancora poco significative, ma rappresentano comunque un primo set di valori di riferimento a supporto delle future diagnosi per cui si prevede, in linea con le indicazioni della COM(2022) 541, una rilevante estensione data la proposta di allargamento applicativo a tutte le reti fognarie che asservono impianti di depurazione con più di 10.000 abitanti equivalenti a partire dal 2030.  
Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: risparmio energetico, incremento della autoproduzione di energia rinnovabile, riduzione di emissioni di gas climalteranti, riduzione degli impatti ambientali delle attività antropiche, benefici in tariffa idrica.
- Quadro dello stato di stress idrico dei diversi bacini e sottobacini idrici italiani ricavato tenendo conto di aspetti sia qualitativi sia quantitativi tramite l'elaborazione di indicatori e indici e relative mappe calcolati per tutti i sotto-bacini italiani e tenendo conto di due differenti scale temporali di analisi, su base annuale e mensile, in modo tale da indagare anche gli aspetti di stagionalità e variabilità inter-annua dello stato della risorsa idrica a fronte delle esigenze delle attività antropiche e dei fabbisogni ecosistemici. L'analisi ha permesso di stimare l'effettivo fabbisogno di risorsa idrica del territorio, valutando in primis le richieste del settore agricolo, poi raffrontato con le potenzialità offerte dal settore della depurazione nell'ipotesi di riutilizzo delle acque reflue trattate. Tale bilancio ha consentito di individuare i contesti territoriali in cui il settore della depurazione può contribuire a contrastare le pressioni sulla risorsa idrica ed in cui l'implementazione della filiera del riutilizzo consente benefici economici e ambientali reali.  
Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: tutela delle risorse naturali, recupero di materia, riduzione degli impatti ambientali delle attività antropiche (i.e. riduzione del fabbisogno di concimi

di sintesi e degli impatti connessi al loro ciclo di vita), tutela della produzione agricola, valorizzazione di fonti idriche non convenzionali e recupero di nutrienti.

- Prove di pirolisi e carbonizzazione idrotermica, eseguite per il trattamento dei fanghi di depurazione, finalizzate alla valutazione delle condizioni migliori di processo in termini di resa di biochar/hydrochar e capacità di assorbimento di CO<sub>2</sub>. A valle di un esame della letteratura esistente in materia e dei risultati della caratterizzazione chimico fisica dei fanghi civili campionati, sono state condotte prove di pirolisi ottimizzate mediante l'utilizzo del software "Design Expert". Il software ha permesso di realizzare un design of experiment (DoE), per valutare l'influenza di tre fondamentali parametri di processo (temperatura, tempo di residenza e velocità di riscaldamento) sul valore della resa di biochar e della sua capacità di adsorbimento di CO<sub>2</sub>. I modelli ottenuti si sono rivelati statisticamente significativi e il materiale ha mostrato buone capacità adsorbenti. Parallelamente, i risultati delle prove di carbonizzazione idrotermica hanno mostrato che l'hydrochar prodotto non è risultato idoneo per essere utilizzato direttamente come materiale adsorbente. Probabilmente un aumento del tempo di residenza del processo in accordo al set-up sperimentale utilizzato, permetterebbe di raggiungere un livello di carbonizzazione più avanzato e stabile. È stato però dimostrato che un successivo step di attivazione chimica o fisica ha un effetto estremamente positivo nel caso dell'hydrochar, aumentando di un fattore dieci le sue capacità adsorbenti. Per quanto riguarda le notevoli quantità di acqua di processo prodotte durante l'HTC, in questo studio sono stati ottenuti promettenti risultati nell'utilizzo di questa fase liquida in un percorso di valorizzazione innovativo, quale la produzione di carbon dot.

Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: tutela delle risorse naturali, recupero di materia, riduzione degli impatti ambientali delle attività antropiche, cattura di gas clima alteranti.

- Dallo studio e confronto del processo di pirolisi e di carbonizzazione idrotermica dal punto di vista energetico, è infine emerso che grazie alla valorizzazione energetica dei prodotti ottenuti, entrambi i processi presentano un bilancio energetico specifico positivo.

Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: tutela delle risorse naturali, recupero di materia, riduzione degli impatti ambientali delle attività antropiche, cattura di gas clima alteranti.

- Riguardo lo sviluppo del processo biologico di upgrading del biogas basato sulla metanogenesi idrogenotrofa, sono stati confrontati in termini di cinetica di solubilizzazione dei gas tre diversi dispositivi di trasferimento gas liquido di tipo passivo (che non prevedono organi meccanici in movimento). Tra i dispositivi testati e nelle condizioni operative applicate, il cavitatore idrodinamico dotato di piastra circolare ha ottenuto delle cinetiche di solubilizzazione superiori rispetto agli eiettori di tipo venturi, registrando un consumo di specifico di energia teorico dello stesso ordine di quelli registrati in letteratura per altre tecnologie di upgrading del biogas. Sono state effettuate delle valutazioni tecnico economiche accompagnate da un'analisi di sensibilità per valutare il grado di competitività della tecnologia di upgrading biologico del biogas e individuare i parametri su cui far principalmente leva per l'incrementare la sua competitività. Dai risultati è emerso che i costi di investimento degli elettrolizzatori e la tariffa di acquisto dell'energia elettrica per la produzione di idrogeno verde sono i principali parametri che incidono sulla remuneratività dell'investimento. Benefici per il sistema elettrico e i suoi utenti: valorizzazione della CO<sub>2</sub>, produzione di energia rinnovabile, riduzione della dipendenza energetica, bilanciamento della rete elettrica nazionale, riduzione dei costi di gestione della rete.

### 3 Prodotti attesi

- Rapporto tecnico “Neutralità energetica e sostenibilità dei servizi idrici in riferimento agli obiettivi delineati dalle politiche comunitarie”

## 4 Prodotti sviluppati

- Rapporto tecnico “Neutralità energetica e sostenibilità dei servizi idrici in riferimento agli obiettivi delineati dalle politiche comunitarie”

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività sono state svolte come previsto e i risultati attesi sono stati conseguiti. I rischi individuati nel capitolato non si sono concretizzati. Le attività di ricerca si sono svolte in diversi centri di ricerca dell'ENEA, il che ha comportato un incremento delle attività di coordinamento rispetto a quanto preventivato. Questo, insieme all'esigenza di partecipare ad alcuni eventi di disseminazione in presenza, ha comportato un incremento dei costi di missione della linea di attività rispetto al preventivo. La pubblicazione a pagamento open access preventivata è stata fatta ma non viene rendicontata perché, diversamente da quanto preventivato, è stata pagata dalle università partner di progetto con fondi propri. Di conseguenza risulta una variazione rispetto alla pianificazione di dettaglio, a parità di totale dei costi di esercizio preventivati, ma nessuno scostamento tra le voci di spesa.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Le attività della Linea di Attività 5.1 si sono focalizzate sull'efficienza energetica nel settore dei servizi idrici integrati, comprendendo le reti di raccolta fognaria, gli impianti di trattamento delle acque reflue e il riutilizzo finale dei reflui come fonti idriche non convenzionali. Queste attività integrano e ampliano i risultati ottenuti nel PTR 2019-21, considerando l'evoluzione degli scenari energetici e i recenti sviluppi normativi. È stata condotta un'analisi delle diagnosi energetiche del settore, focalizzandosi sui consumi e sulle misure per migliorare l'efficienza, nonché uno studio sul contributo potenziale dei reflui depurati ai fabbisogni idrici agricoli. Inoltre, si è proceduto con lo sviluppo di uno strumento software per l'analisi e l'ottimizzazione dei processi di depurazione. Le attività sperimentali hanno riguardato tecnologie per il recupero energetico e di materie prime secondarie dai fanghi di depurazione e per la trasformazione dell'idrogeno in metano.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Le attività del WP5 nel PTR 2022-24 hanno l'obiettivo di sviluppare tecnologie e metodologie per l'efficientamento energetico del settore idrico, dalle reti di raccolta fognarie agli impianti di trattamento delle acque reflue sino alle infrastrutture dedicate al riutilizzo finale dei reflui come fonti idriche non convenzionali. In particolare, la Linea di Attività (L.A.) 5.1, cui si riferisce il presente report integra e sviluppa i risultati raggiunti nel WP5 del Progetto 1.6 RdS nel PTR 2019-21, tenendo conto dell'evoluzione degli scenari energetici e dei recenti orientamenti normativi e, in particolare, della proposta di revisione della direttiva sul trattamento delle acque reflue urbane COM (2022) 541. Tra le varie misure previste viene stabilito per il 2040 il raggiungimento della neutralità energetica del comparto depurativo a livello nazionale da perseguire tramite l'estensione applicativa delle diagnosi energetiche, la promozione di misure di riduzione dei consumi e la produzione di energia da fonti rinnovabili. Inoltre, sono proposte per il settore misure mirate a favorire l'evoluzione del comparto depurativo verso un modello di sistema circolare e sostenibile con inevitabile ricadute sui bilanci energetici degli impianti di depurazione.

### **7.1 INTEGRAZIONE NEL SOFTWARE DEES DI MODULI PER LA NEUTRALITÀ ENERGETICA NEGLI IMPIANTI DI DEPURAZIONE**

In ottica di efficientamento energetico la L.A 5.1, in continuità con il PTR19-21 ha previsto l'ulteriore sviluppo del software "DEES" concepito come strumento di supporto alle decisioni per la classificazione energetica degli impianti di depurazione e per la valutazione di scenari di efficientamento. Grazie all'integrazione di nuovi moduli, il software guida gli operatori di settore nelle valutazioni preliminari dell'efficienza dell'intero impianto e di aspetti specifici relativi ai consumi ed all'autoproduzione energetica. Questo supporto è utile per individuare misure e strategie di gestione finalizzate ad adeguare i processi per indirizzarli verso gli obiettivi di neutralità energetica definiti dalla COM (2022) 541. La procedura implementata in DEES prevede step valutativi in serie dedicati all'analisi di più sezioni dell'impianto e alle relative prestazioni energetiche, identificando le sezioni maggiormente critiche su cui concentrare primariamente gli interventi. I moduli richiedono dati di processo di base generalmente misurati e monitorati negli impianti di depurazione. Per una concreta validazione delle potenzialità di DEES sono attualmente in corso test su dati reali di impianti di depurazione in collaborazione con società operanti nel settore.

### **7.2 ANALISI DELLE DIAGNOSI ENERGETICHE DEL SETTORE FOGNARIO E DEPURATIVO**

La proposta COM (2022) 541 ribadisce la rilevanza delle diagnosi energetiche come strumento essenziale di valutazione del bilancio energetico in siti produttivi, prevedendone per il comparto della depurazione l'estensione applicativa a tutte gli impianti di taglia superiore a 10.000 abitanti equivalenti (A.E.) e alle relative reti di collettamento. In quest'ottica, la L.A. 5.1 ha notevolmente ampliato il quadro conoscitivo ricavato nell'ambito del precedente triennio prendendo in considerazione le attività classificate con codice ATECO 37.00.0 e 36.00.0 ed estrapolando da esse sia le diagnosi relative agli impianti di trattamento delle acque reflue, sia quelle relative alle stazioni di sollevamento delle reti fognarie. Complessivamente il campione analizzato si compone quindi di 104 impianti di depurazione e 22 stazioni di sollevamento fognarie. La numerosità campionaria delle diagnosi relative al comparto depurativo ha permesso di aumentare il livello di affidabilità delle statistiche, mentre per il settore dei sollevamenti sono state ricavate delle indicazioni di carattere preliminare.

In generale per il settore della depurazione l'analisi effettuata evidenzia un parco impianti con configurazioni di processo della linea acque strutturate per lo più su trattamenti a fanghi attivi e schemi nitro-denitro. La linea fanghi prevede, con maggiore frequenza, la stabilizzazione di fanghi misti tramite digestione anaerobica. Si rilevano efficienze limitate nel recupero di flussi di materia ed energia ed elevati costi operativi su cui incidono, in modo preponderante, i consumi energetici e le spese per lo smaltimento dei fanghi prodotti. L'analisi fa emergere al contempo un ricorso limitato all'implementazione di tecnologie e processi dedicati

all'autoproduzione energetica, evidenziando un punto di partenza del comparto depurativo ben distante dagli obiettivi stabiliti dalla COM (2022) 541. Gli indicatori di prestazione energetica globali rilevati per gli impianti di depurazione italiana sono in generale in linea con i valori di riferimento. Maggiori differenze si riscontrano per gli impianti di taglia minore, probabilmente a causa di una minore accuratezza e dettaglio nel monitoraggio delle prestazioni energetiche. Le diagnosi rilevano, soprattutto negli impianti medio piccoli, una maggiore tendenza alla realizzazione di interventi relativamente semplici da implementare e caratterizzati da costi di investimento contenuti. Per le stazioni di sollevamento le statistiche desunte non permettono, per numerosità campionaria e completezza dei dati forniti, di effettuare una analisi del comparto con un livello di dettaglio spinto. In ogni modo i dati ricavati rappresentano dei valori indicativi di comparto da validare con l'integrazione di un maggior numero di informazioni desumibili dal prossimo ciclo di diagnosi.

### **7.3 RIUSO AGRICOLO DEI REFLUI DEPURATI**

Una ulteriore attività condotta riguarda il riuso delle acque reflue depurate, con esplicito riferimento al Reg. (UE) 2020/741 riportante i requisiti minimi per il riutilizzo in ambito agricolo, attuativo da giugno 2023. La normativa prevede l'implementazione di filiere per il riuso (i.e. impianto di depurazione, stoccaggio, distribuzione, utilizzo finale), la cui definizione necessita di analizzare le esigenze infrastrutturali e valutare i relativi costi di gestione con particolare riferimento agli aspetti energetici. Prima di analizzare gli interventi necessari allo sviluppo della filiera del riuso tramite lo studio di casi specifici, attività oggetto della L.A. 5.2, la presente L.A. ha puntato a fornire un quadro dello stato delle risorse idriche dei sottobacini italiani e delle pressioni esercitate dai prelievi e consumi complessivi e dall'incidenza del comparto agricolo, a fronte della produzione di acque reflue trattate, con l'obiettivo di valutare il potenziale contributo del loro riuso.

In generale dal punto di vista quantitativo le regioni del sud sono sottoposte ad un maggiore stress idrico. Allo stesso tempo, i consumi agricoli sono maggiormente concentrati nelle aree a nord del paese ma, in rapporto alla disponibilità di risorsa l'impatto non risulta di entità eccessiva. Dal punto di vista qualitativo i corpi idrici delle aree settentrionali manifestano un maggior rischio di eutrofizzazione e quindi una maggiore sensibilità all'inquinamento da fonti agricole.

Il contributo potenziale del settore depurativo assume un ruolo rilevante sia in termini di volumetrie prodotte sia in termini di apporto diretto alle colture di nutrienti in forma chimica facilmente assimilabile. Le valutazioni effettuate consentono nel complesso di verificare, per capacità di trattamento e tessuto infrastrutturale presente, una diversa predisposizione dei sottobacini all'implementazione di pratiche di riutilizzo. In ogni modo, ai fini di una pianificazione a livello territoriale di interventi mirati alla strutturazione di filiere di riutilizzo, in ottica di perseguire gli obiettivi di sostenibilità economica e ambientale, occorrono analisi a maggior scala di dettaglio basate su elementi informativi con un grado di accuratezza più elevato che consentano di verificare in modo più appropriato i bilanci tra disponibilità di acque reflue trattate a fronte dei reali fabbisogni locali.

### **7.4 PROCESSI TERMO-CHIMICI AVANZATI: PIROLISI E CARBONIZZAZIONE IDROTERMALE PER LA PRODUZIONE DI BIOCHAR E HYDROCHAR**

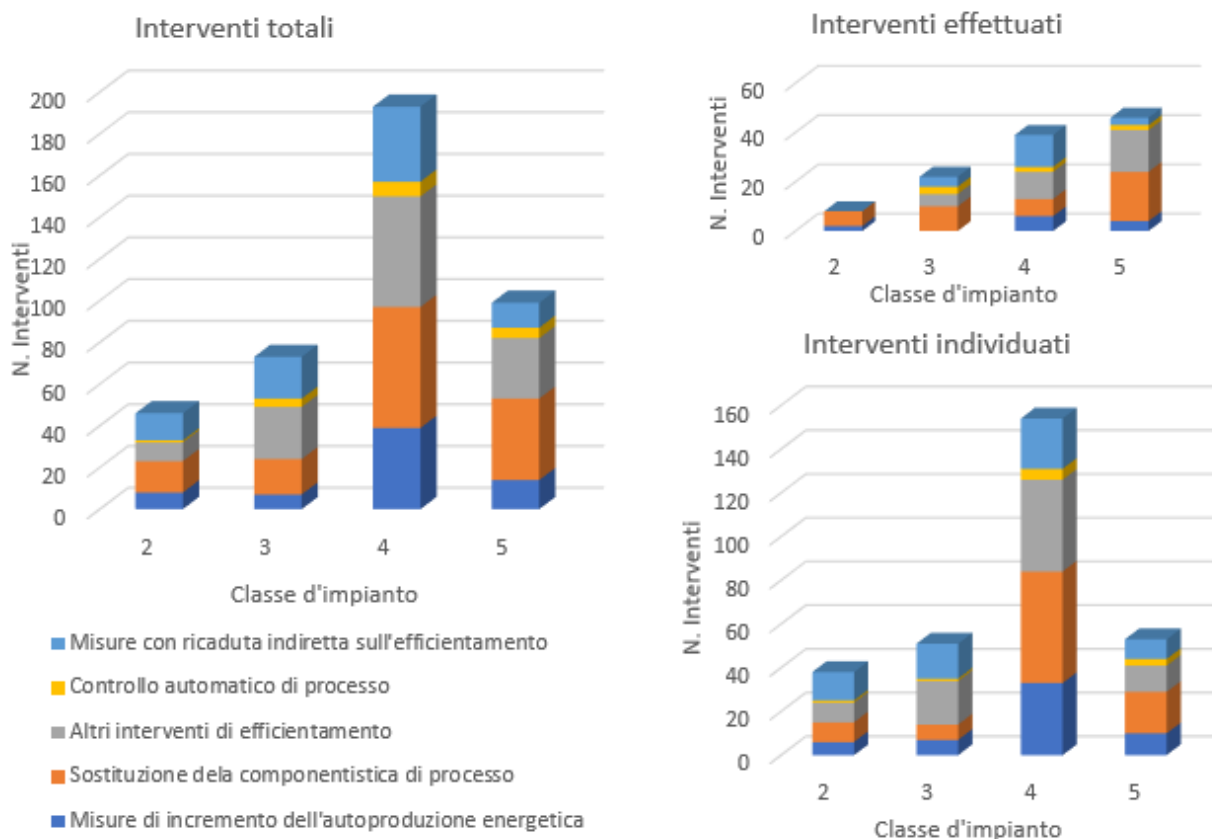
La L.A 5.1 ha inoltre previsto attività sperimentali relative a tecnologie di produzione di energie rinnovabili, anche queste identificate nell'ambito di più normative sull'efficienza energetica del comparto industriale e nella stessa COM (2022) 541, quali soluzioni imprescindibili per il miglioramento delle performance di sistema. In questa L.A. sono state indagate due vie innovative per il riciclo e riutilizzo dei fanghi di depurazione: Pirolisi e Hydrothermal Carbonization (HTC). In entrambi i casi sono stati ottenuti risultati soddisfacenti per quanto riguarda rese e capacità adsorbente di CO<sub>2</sub> dei char prodotti, essendo stata individuata questa proprietà del char come interessante dal punto di vista dei percorsi di valorizzazione dei materiali ottenuti da questi due processi. Il processo di pirolisi è in grado di sintetizzare biochar, pronto per essere utilizzato direttamente come materiale adsorbente per la CO<sub>2</sub>, con discrete capacità di cattura. I

risultati su resa e capacità adsorbente sono stati analizzati attraverso un *design of experiment* (DoE) e i modelli ottenuti si sono rivelati statisticamente significativi (in figura è riportato l'andamento della resa di biochar in funzione dei parametri studiati). L'applicazione di successivi processi di attivazione (chimico o fisico) del biochar, ne hanno in realtà diminuito le capacità di adsorbimento della CO<sub>2</sub> a causa del probabile collasso delle strutture microporose creatisi durante la fase di pirolisi. Sebbene, come detto, i modelli utilizzati per l'analisi dei dati del processo di pirolisi si sono rivelati molto efficaci nel prevedere i trend delle variabili studiate, il passaggio ad un sistema di pirolisi su scala maggiore porta a valori assoluti diversi soprattutto per quanto riguarda la capacità adsorbente. Questo risultato evidenzia come ci siano altri parametri in gioco, come ad esempio la geometria del reattore di pirolisi, in grado di influenzare considerevolmente i prodotti ottenuti. L'HTC condotta a 220 °C per 3 h invece fornisce come residuo solido un char non idoneo per essere utilizzato direttamente come materiale adsorbente: si potrebbe pensare di aumentare il tempo di residenza del processo in accordo al set-up sperimentale utilizzato, tentando di raggiungere un livello di carbonizzazione più avanzato e stabile. L'effetto dello step di attivazione però è risultato essere estremamente positivo nel caso dell'hydrochar, aumentandone le capacità adsorbenti più di 10 volte. Alla luce di questi risultati, l'HTC sembra una metodologia molto promettente per il trattamento dei fanghi di depurazione civili, data soprattutto la possibilità di questo processo di trattare una materia prima con elevati contenuti di acqua, senza la necessità di operare alcuno step di disidratazione meccanica o termica. Perché l'HTC sia applicabile su vasta scala però, è necessario trovare nuove strade di riciclo e riutilizzo per le grandi quantità di acque di processo prodotte; in questo studio sono stati ottenuti promettenti risultati nell'utilizzo di questa fase liquida in un percorso di valorizzazione innovativo, quale la produzione di *carbon dot*. C'è la necessità di eseguire però ulteriori analisi ai fini della completa caratterizzazione di queste nano particelle. Anche qui come studio futuro è interessante applicare le metodologie DoE di analisi dei risultati in modo da validare statisticamente i risultati ottenuti. Per quanto concerne infine gli aspetti energetici dei due processi, grazie alla valorizzazione energetica dei prodotti ottenuti, entrambi i processi presentano un bilancio energetico specifico positivo. In conclusione, sia la pirolisi che l'hydrothermal carbonization sono metodologie di riciclo molto promettenti per il trattamento dei fanghi di depurazione civili e che implicano la produzione di materiali ad elevato valore aggiunto.

## 7.5 BIOMETANAZIONE IDROGENOTROFA

In continuazione con il PTR 2019-21, è proseguito lo sviluppo sperimentale del processo di biometanazione idrogenotrofa a partire da substrati gassosi. Al fine di ottimizzare i consumi energetici nei sistemi di upgrading del biogas basati su tale processo, con particolare attenzione ai consumi energetici associati alla fase di solubilizzazione dell'H<sub>2</sub>, sono stati condotti test di confronto tra diversi sistemi di trasferimento gas-liquido passivi, ovvero due eiettori venturi e un dispositivo di cavitazione idrodinamica dotato di piastra circolare interna (EW). La capacità di solubilizzazione è stata determinata all'interno di reattore tubolare attraverso la quantificazione del coefficiente di trasferimento gas-liquido (KLa) riferito all'O<sub>2</sub>, variando le condizioni operative. Il dispositivo EW ha mostrato cinetiche di trasferimento dell'O<sub>2</sub> in fase liquida superiori rispetto agli eiettori di tipo Venturi. Successivamente il dispositivo EW è stato installato in un impianto pilota di grossa taglia con lo scopo di quantificare i consumi energetici al variare delle condizioni operative. Dai risultati è emerso che, nel range di valori dei parametri testati, la condizione d'esercizio più favorevole ha fatto registrare un consumo di energia specifico di circa 2,0 kWh per m<sup>3</sup> di CH<sub>4</sub> potenzialmente ricavabile. Inoltre, è stata condotta un'analisi tecnico-economica per valutare la competitività del processo di upgrading biologico del biogas, considerando lo schema incentivante fornito dal decreto sul biometano attualmente in vigore (DM 15 settembre 2022). Le valutazioni sono state effettuate considerando sia i costi di investimento attuali, sia una loro possibile riduzione dovuta all'apprendimento tecnologico previsto nei prossimi anni, insieme a un aumento dell'efficienza degli elettrolizzatori. È stata effettuata un'analisi di sensitività considerando diverse ipotesi sulle tariffe di acquisto dell'energia elettrica per la produzione di H<sub>2</sub>. I risultati hanno evidenziato che il principale parametro da cui dipende la remuneratività dell'investimento è la tariffa di acquisto dell'energia elettrica. Per rendere remunerativo l'investimento (i.e. tempo di ritorno del capitale investito inferiore ai 5 anni e TIR superiore al tasso di sconto considerato del 5,5%), mantenendo i tassi

dell'inflazione su livelli odierni (5,6%) e considerando un aumento dell'efficienza degli elettrolizzatori fino 68%, sarebbe necessario conseguire una riduzione sia dei costi di investimento che di gestione rispettivamente di circa il 40% e 50% rispetto a quelli attuali. Si tratta di obiettivi ambiziosi conseguibili nel prossimo futuro attraverso l'adozione di politiche di incentivazione che mirino da una parte a finanziare un'intensa attività di ricerca e sviluppo e a ridurre i costi di investimento e, dall'altra, a favorire l'accesso, da parte degli operatori di settore, a tariffe di acquisto di energia elettrica agevolate.



**Figura 1** Interventi di efficientamento totali, già effettuati e individuati per una prossima realizzazione nelle diagnosi energetiche degli impianti di depurazione suddivisi per macrocategorie

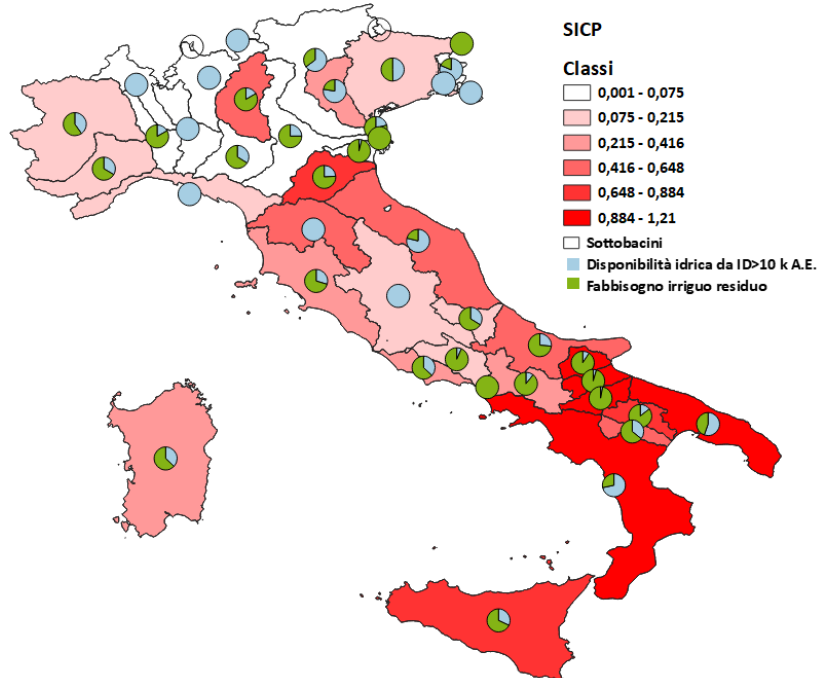


Figura 2 Volumetrie di acque reflue trattate prodotte per sottobacino su base annuale dagli impianti di depurazione al netto dei consumi del comparto agricolo

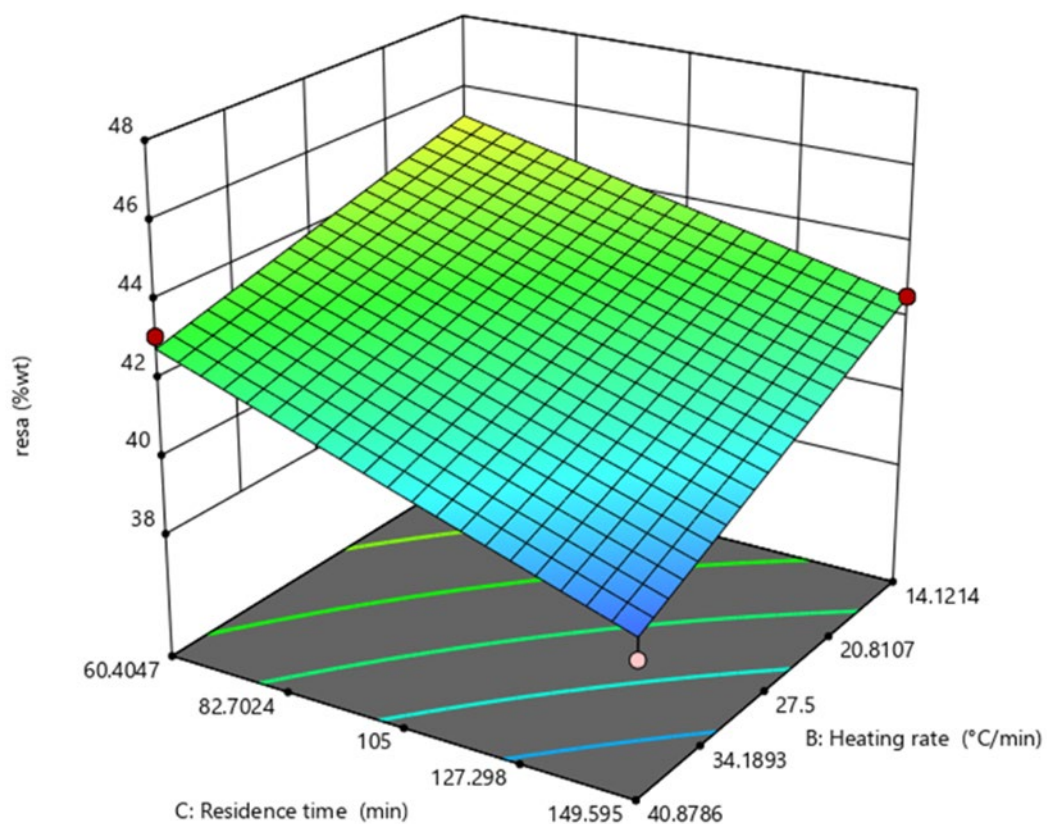


Figura 3. Andamento della resa in peso del processo di pirolisi in funzione del grado di riscaldamento e del tempo di residenza per un valore di temperatura pari a 609,5 °C.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Michela Langone, Davide Mattioli, Gianpaolo Sabia, Luigi Petta. Processi biologici innovativi e modellazione matematica per l'innovazione dei sistemi di depurazione *Energia, ambiente e innovazione 1/2023*. DOI 10.12910/EAI2023-015

In collaborazione con l'Università di Trento (contributo ENEA: elaborazione dei dati, scrittura, revisione e editing):

Ferrentino, R.; Langone, M.; Mattioli, D.; Fiori, L.; Andreottola, G. Investigating the Enhancement in Biogas Production by Hydrothermal Carbonization of Organic Solid Waste and Digestate in an Inter-Stage Treatment Configuration. *Processes 2022, 10, 777*. <https://doi.org/10.3390/pr10040777>

In collaborazione con l'Università di Trento (contributo ENEA: concettualizzazione, elaborazione dei dati, revisione e editing):

Ferrentino, R., Langone, M., Fiori, L., Andreottola, G. Full-Scale Sewage Sludge Reduction Technologies: A Review with a Focus on Energy Consumption. *Water, 2023, 15(4), 615*. <https://doi.org/10.3390/w15040615>

In collaborazione con l'Università di Napoli (contributo ENEA: revisione e editing):

Lanzetta, A.; Di Capua, F.; Panneerselvam, B.; Mattioli, D.; Esposito, G.; Papirio, S. Impact of Influent Composition and Operating Conditions on Carbon and Nitrogen Removal from Urban Wastewater in a Continuous-Upflow (Micro)Aerobic Granular Sludge Blanket Reactor. *Energies 2023, 16, 6303*. <https://doi.org/10.3390/en16176303>

In collaborazione con l'Università di Bologna (Contributo ENEA: concettualizzazione, simulazioni modellistiche, elaborazione dei dati, scrittura, revisione e editing):

Davide Mattioli, Gianpaolo Sabia, Margherita Altobelli, Marco Maglionico. Recupero di energia termica in fognatura ed effetti sulla depurazione delle acque. *Energia, ambiente e innovazione 1/2023*. DOI 10.12910/EAI2023-017

## 10 Eventi di disseminazione

### Presentazioni a convegni e conferenze tavole rotonde

- Gennaio 2022 – Partecipazione alla tavola rotonda Community Valore Acqua per l'Italia - The European House Ambrosetti– Tema: “Circolarità della risorsa idrica e water footprint per una gestione efficiente della filiera estesa dell'acqua”
- Marzo 2022 – Intervento a Convegno IRCAF “Tariffe, qualità e investimenti nel servizio idrico a 10 anni dalla nuova regolazione”
- Maggio 2022 – Partecipazione all'evento “Economia Pulita: Futuro, Impresa e Sostenibilità”. Presentazione dal titolo “Approcci per la gestione delle acque reflue in ottica di Economia Circolare - esperienze e casi studio ENEA”
- Luglio 2022 – Partecipazione alla tavola rotonda promossa da Bologna Fiere Water & Energy sul tema: “La sfida dei cambiamenti climatici e l'emergenza acqua - Ricerca e innovazione, Digitalizzazione, Sostenibilità: la strada per la transizione ecologica”
- Agosto 2022 – Partecipazione alla Summer School Internazionale a Rieti “Sustainable governance of water resources in response to the growing thirst for water and energy” Intervento dal titolo “La gestione delle acque reflue in ottica di economia circolare - Inquadramento di settore e casi studio”.
- Settembre 2022 – Partecipazione alla tavola rotonda Water Utility Network “Innovare il servizio idrico per far evolvere territori e comunità”
- Settembre 2022 – Partecipazione all'evento Green Meet “ACQUA. Le sfide della Green Economy nell'elemento Acqua.” Presentazione dal titolo: “Approcci per la gestione delle acque reflue in ottica di Economia Circolare - esperienze e casi studio ENEA”
- Ottobre 2022 – Partecipazione all'evento organizzato dal Gruppo CAP “Crisi climatica e siccità. La sfida del consumo sostenibile delle risorse idriche” Presentazione dal titolo: “Attività ENEA per l'uso e la gestione efficiente di acqua e reflui”
- Ottobre 2022 – Partecipazione alla tavola rotonda Community Valore Acqua per l'Italia - The European House Ambrosetti– Tema: “Circular Water”.
- Marzo 2023 – Partecipazione al convegno “AQUAE – Verso il World Water Day 2023”. Presentazione dal titolo “Scenari, opportunità e casi studio nel riutilizzo di acque reflue depurate in ambito agricolo”.
- Marzo 2023 - Partecipazione all'evento “Acqua New York ONU Webinar”. Presentazione dal titolo: “Addressing Water stress and droughts. ENEA activities towards a circular economy approach in water management”
- Giugno 2023 – Partecipazione alla manifestazione R2B. Presentazione dal titolo: “Gestione sostenibile della risorsa idrica - Soluzioni, proposte e idee dei soci del Clust-ER Greentech”

### Altre attività di divulgazione

- Aprile 2022 – Lezione presso Istituto di Istruzione Superiore "Arrigo Serpieri" – Bologna su “Gestione acque reflue in ottica di economia circolare”
- Luglio 2022 – Contributo podcast per rivista web Insider. Intervento dal titolo: “ENEA, le tecnologie per una gestione sostenibile dell'acqua”
- Giugno 2023 - Corso di formazione per giornalisti “SOS ACQUA: la risorsa idrica fra nuove emergenze, normative, strategie e innovazione tecnologica per la tutela e l'uso efficiente dell'acqua” Presentazioni dal titolo “Le tecnologie ENEA per la gestione integrata ed efficiente della risorsa idrica” e “Strumenti e processi per sistemi di depurazione smart ed efficienti”.