

Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto 26 gennaio 2000 Decreto direttoriale 30 giugno 2014 - Ministero dello sviluppo economico

## RELAZIONE FINALE del PROGETTO PANACEA

<b>Codice Proposta</b>	<b>CCSEB_00236</b>		
<b>Titolo completo</b>	Poligenerazione Alimentata con biomasse da rifiuti Negli impianti di depurazione delle ACque reflue urbAne		
<b>Tema di ricerca</b>	Energia elettrica da biomasse		
<b>Capofila</b>	<b>Società Grastim J.V. S.r.l.</b>		
Proponente 2	Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Napoli Parthenope		
Proponente 3	Consiglio Nazionale delle Ricerche -DIITET		
Proponente 4	GIOTTO Water S.r.l.		
Proponente 5	PROTEG S.p.A.		
Data inizio progetto	<b>03/04/2017</b>	Data fine progetto	<b>31/03/2020</b>

### COSTI E CONTRIBUTI FINALI

COSTO COMPLESSIVO AMMESSO			1.266.938,18 €
<i>di cui: Ricerca Industriale</i>	327.454,86 €	<i>Sviluppo sperimentale</i>	939.483,33 €
CONTRIBUTO AMMESSO SENZA MAGGIORAZIONI			554.954,22 €
<b>CONTRIBUTO AMMESSO COMPLESSIVO (INCLUDE MAGGIORAZIONI)</b>			<b>676.577,52 €</b>

## SINTESI DEL PROGETTO

### ITALIANO

Il progetto PANACEA ha sviluppato un sistema virtuoso per soddisfare la domanda di energia elettrica e termica di impianti di depurazione di acque reflue attraverso l'utilizzo di biomasse residuali. Nello specifico, si è valutato l'utilizzo di un'unità di cogenerazione alimentata ad Oli Vegetali Esausti (OVE), provenienti dalla raccolta differenziata, e syngas ottenuto dalla gassificazione dei fanghi prodotti dall'impianto di depurazione. L'energia termica ottenuta viene sfruttata per l'essiccamento dei fanghi di depurazione, mentre quella elettrica per coprire parte dei consumi dell'impianto di depurazione. Sono stati analizzati diversi impianti di depurazione al fine di individuare delle strategie per l'efficientamento energetico di tali utenze e per sviluppare una metodologia innovativa di valutazione delle prestazioni energetiche. È stata presa in esame anche la filiera degli OVE, analisi che ha evidenziato l'importanza delle campagne di sensibilizzazione presso le utenze per l'incremento della raccolta differenziata, e ha permesso di stimare il quantitativo di oli disponibile a livello territoriale per la produzione di energia. Sono state inoltre condotte prove di laboratorio sulla gassificazione di fanghi di depurazione per valutare le caratteristiche quantitative e qualitative del syngas ottenibile. Sulla base dei risultati ottenuti, è stata condotta una campagna sperimentale su un motore cogenerativo, alimentato a soli OVE e in modalità dual-fuel con OVE e syngas, riscontrando efficienze elettriche variabili tra 29,7% e 33,3% nel primo caso e tra 19,8 e 32,4% nel secondo caso. Con i dati ottenuti, è stato dimensionato un motore cogenerativo alimentato ad OVE e syngas per soddisfare la domanda di energia di un impianto di depurazione delle acque reflue e trattamento dei fanghi. Il sistema proposto permette di coprire circa il 50% della domanda di energia elettrica di un impianto di depurazione di grande taglia e di ridurre di circa il 70% il quantitativo in massa di fanghi da smaltire, grazie al processo di essiccamento, attraverso il recupero di energia da biomassa di scarto.

### INGLESE

The PANACEA project developed a system to meet the demand for electrical and thermal energy of wastewater treatment plants by using residual biomass. More in detail, the use of a cogeneration unit powered by Waste Vegetable Oils (WVO) coming from separate waste collection and syngas from the gasification of sludge produced by the wastewater treatment plant has been considered. The thermal energy produced by the cogeneration plant is used for drying the sewage sludge, while the electrical energy covers part of the wastewater treatment plant demand. Different wastewater treatment plants have been analyzed to identify strategies to increase their energy efficiency and to develop an innovative methodology to evaluate their energy performance. The WVO supply chain was also examined, highlighting the importance to increase awareness of users to increase separate collection, and allowed estimating the quantity of WVO available locally for energy production. In addition, laboratory tests on gasification of sewage sludge were carried out to evaluate quantitative and qualitative characteristics of the produced syngas. On the basis of these results, an engine powered by WVO and by WVO and syngas in dual-fuel mode was experimentally tested, finding electrical efficiencies ranging between 29.7 and 33.3% in the first case, and between 19.8 and 32.4% in the second case. A cogeneration unit powered by WVO and syngas has been designed to meet the energy demand of an actual wastewater treatment plant. The proposed system covers almost 50% of the

electricity demand of a large-scale plant, and reduces the quantity of sludge to be disposed, thanks to the drying process, of about 70%, by using energy recovered by residual biomass.

## **1. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO E OBIETTIVI**

In Italia, la depurazione delle acque reflue è normata dal D. Lgs. 152/06 che, recependo i limiti legislativi definiti dalla Comunità Europea, ha introdotto limiti più stringenti sulla qualità dell'effluente degli impianti di depurazione. Il raggiungimento di standard più elevati richiede trattamenti più spinti, incrementando i consumi di energia elettrica e la produzione di residui di processo, tra cui i fanghi. Per quanto concerne il rispetto dei limiti normativi, la Comunità Europea ha dichiarato l'Italia inadempiente alla Direttiva 91/271/CEE, inerente il trattamento delle acque reflue, per le condizioni inadeguate dei sistemi di collettamento e trattamento delle acque reflue, con multe che possono arrivare fino a 700 milioni di euro l'anno. Le carenze del sistema italiano vanno dal mancato o inadeguato collettamento allo scarico in aree sensibili, con il risultato di una situazione di grave inquinamento dei corpi idrici.

Anche a livello europeo la percentuale di popolazione servita da impianti di depurazione ed il livello di trattamento delle acque reflue sono in aumento, soprattutto nei paesi dell'area meridionale ed orientale. Quindi, analogamente alla situazione italiana, a causa dell'estensione del servizio di depurazione e dei limiti più restrittivi sugli effluenti, i consumi energetici e la produzione di fanghi di depurazione sono destinati ad aumentare ulteriormente nei prossimi anni.

Dall'analisi dei costi di gestione di diversi impianti di depurazione, si evince che circa il 25-30% del totale è connesso al fabbisogno elettrico, mentre il 20-25% al trattamento e smaltimento in discarica dei fanghi di depurazione. Per questi motivi, in numerosi impianti è prevista una sezione di digestione anaerobica dei fanghi con produzione di biogas per la generazione di energia elettrica. Tale produzione non è comunque sufficiente alla copertura dei fabbisogni di energia dell'impianto sia per il quantitativo modesto di biogas producibile, che per il suo potere calorifico, relativamente basso. Inoltre, il digestato prodotto, se non destinato allo spandimento in agricoltura, necessita di ulteriori trattamenti energivori. Bisogna infine evidenziare che, nel caso di spandimento in agricoltura, la Comunità Europea impone dei limiti stringenti sia sui quantitativi che possono essere applicati al suolo, sia sulle caratteristiche fisico-chimiche del digestato, in particolare in termini di contenuto di metalli pesanti.

Per contribuire alla risoluzione delle problematiche illustrate, il progetto PANACEA si è posto come obiettivo principale lo sviluppo di un sistema virtuoso per soddisfare la domanda di energia elettrica e termica di impianti di depurazione di acque reflue attraverso l'utilizzo di biomasse residuali. Nello specifico, si è previsto l'utilizzo di un'unità di cogenerazione alimentata ad Oli Vegetali Esausti (OVE), provenienti dalla raccolta differenziata, e syngas ottenuto dalla gassificazione dei fanghi prodotti dall'impianto di depurazione. L'uso degli oli vegetali, infatti, puri o esausti, è riconosciuto come strategico per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera, per via del legame esistente tra il ciclo di produzione e la crescita dei vegetali con relativo assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera. Allo stato attuale, gli OVE vengono riutilizzati principalmente nella produzione di biodiesel, il cui impiego è limitato alla forma esterificata, in miscelazione a oli combustibili di origine estrattiva, per il potere calorifico generalmente inferiore rispetto a quello del gasolio e per il costo superiore, conseguenza del più difficile stoccaggio e del processo di transesterificazione necessario alla sua produzione. Tale processo è inoltre estremamente oneroso in termini energetici ed ambientali. Per questo, soprattutto nei sistemi di generazione di elettricità di piccola e media taglia, si ricorre all'impiego di oli vegetali puri

filtrati, che presentano però problemi connessi alla loro costituzione chimico-fisica (elevata viscosità). Le conseguenze immediate sono la riduzione del rendimento e l'aumento dei consumi specifici. Nonostante l'interesse crescente verso l'utilizzo degli OVE come combustibile, gli studi disponibili sono ancora limitati. Per questo motivo, nell'ambito del progetto PANACEA, sono state condotte diverse campagne sperimentali per individuare le criticità legate all'utilizzo di questa matrice come combustibile e per ottimizzare la resa energetica del sistema cogenerativo che li utilizza. È stata inoltre dedicata particolare attenzione all'analisi delle emissioni dovute all'utilizzo di OVE, in quanto, come anticipato, il numero di studi presenti sull'argomento è limitato, e relativo a motori di piccola taglia, non rappresentativi del caso in esame.

Oltre all'analisi dell'utilizzo degli OVE come combustibile, il progetto si proponeva come obiettivo la valutazione della fattibilità dell'alimentazione di un motore in modalità dual fuel con due combustibili derivati da biomasse, OVE e syngas ottenibile dalla gassificazione dei fanghi, che allo stato attuale non vengono utilizzati insieme, né a livello prototipale né a livello commerciale. Per perseguire quest'obiettivo, il sistema è stato testato su scala di laboratorio per diverse condizioni di carico, con diverse percentuali di alimentazione dei due combustibili e diverse condizioni di iniezione del combustibile. Per definire le caratteristiche qualitative del syngas sono state condotte delle prove sperimentali di laboratorio sulla gassificazione dei fanghi.

Gli obiettivi specifici di progetto hanno permesso di raggiungere l'obiettivo finale di sviluppo e valutazione di fattibilità tecnica, economica ed ambientale di un sistema integrato finalizzato alla produzione di energia, elettrica e termica, in impianti depurazione delle acque reflue ed alla riduzione dei costi economici ed ambientali dei fanghi prodotti.

## **2. RISULTATI RAGGIUNTI**

Le attività necessarie al raggiungimento degli obiettivi di progetto sono state suddivise in diverse macro-attività: caratterizzazione delle due utenze analizzate (impianto di depurazione delle acque reflue e filiera degli oli vegetali esausti); analisi del processo di essiccamento dei fanghi; analisi del processo di gassificazione dei fanghi essiccati; analisi del sistema di cogenerazione; analisi del sistema integrato.

Nell'ambito della caratterizzazione delle utenze, queste sono state analizzate focalizzando l'attenzione sui consumi energetici, i relativi impatti ambientali e sulle possibilità di intervento per l'incremento dell'efficienza energetica e la conseguente riduzione dell'impatto ambientale.

Gli impianti di depurazione sono stati analizzati principalmente come utenza energetica, con riferimento a sistemi con trattamento convenzionale a fanghi attivi e con trattamento chimico-fisico. L'analisi condotta ha evidenziato che i parametri operativi che maggiormente influenzano la richiesta energetica degli impianti di depurazione delle acque reflue sono la portata di acqua da trattare e, in caso di ciclo a fanghi attivi, la richiesta di ossigeno per la rimozione della sostanza organica. I dati raccolti in campo sono stati confrontati con quelli reperiti in letteratura, per lo sviluppo di una metodologia di valutazione delle prestazioni energetiche degli impianti di depurazione, in funzione di diversi parametri operativi dell'impianto.

Considerando le principali apparecchiature elettro-meccaniche installate, il loro piano di funzionamento e i consumi energetici dell'impianto su base giornaliera, sono state individuate le fasi del trattamento di depurazione delle acque reflue con i maggiori consumi energetici. Per gli impianti con ciclo a fanghi

attivi, le fasi più energivore risultano essere l'aerazione della fase biologica, il pompaggio e la linea fanghi, in linea con quanto riscontrato nella letteratura tecnico-scientifica del settore. In impianti con trattamento chimico-fisico i consumi energetici sono risultati essere molto più bassi rispetto a quelli degli impianti a fanghi attivi, in quanto la rimozione della sostanza organica avviene tramite l'aggiunta di reagenti chimici. A seguito dell'analisi energetica, per entrambi gli impianti analizzati, si è valutata come proposta migliorativa l'installazione di un impianto di cogenerazione a gas naturale per soddisfare il fabbisogno elettrico ed utilizzare l'energia termica prodotta per alimentare un sistema di essiccamento termico dei fanghi.

L'analisi della filiera degli oli vegetali esausti (OVE) è stata condotta su diverse scale territoriali: a livello nazionale prendendo in esame i dati del CONOE (Consorzio nazionale di raccolta e trattamento degli oli e dei grassi vegetali ed animali esausti), a livello regionale considerando i dati dell'Osservatorio Rifiuti Campania ed a livello comunale considerando come caso studio il comune di Pozzuoli in provincia di Napoli. Sono stati presi in esame la popolazione totale, la percentuale di raccolta differenziata sul territorio, il reddito medio ed il tasso di natalità per effettuare una stima dei benefici ottenuti da potenziali installazioni di sistemi di raccolta sul territorio comunale. Sulla base dei dati raccolti sono state selezionate diverse tipologie di contenitori da distribuire: per le unità abitative è stato scelto un contenitore da 5 litri in polietilene ad alta densità dotato di tappo di chiusura; in alcuni condomini e parchi è stato possibile installare contenitori delle dimensioni di 100/120 litri in modo da facilitare il conferimento dell'olio da parte del cittadino. Parallelamente all'analisi del sistema di raccolta, è stata analizzata la linea di trattamento degli OVE e sono state effettuate delle analisi per caratterizzare l'olio vegetale esausto a monte e a valle di tali trattamenti. L'olio raccolto è sottoposto ai trattamenti di degommaggio, neutralizzazione, decantazione, lavaggio, disidratazione e filtrazione, che mirano a rimuovere: gomme (fosfatidi e composti proteici solforati), acidità libera, residui, acqua ed impurezze.

Il processo di essiccamento fanghi è stato analizzato dal punto di vista del recupero di calore dai gas esausti in uscita da cogeneratore, con particolare riguardo ai sistemi alimentati ad OVE, oggetto della ricerca. La pratica del recupero termico da gas esausti da cogenerazione negli impianti di essiccamento fanghi è una pratica ormai consolidata anche su scala industriale e di indubbia efficacia; innovativo invece è l'impiego di gas di scarico generati dall'utilizzo degli OVE.

La modellazione teorica, parzialmente validata con i dati di impianti di essiccamento funzionanti su scala industriale, ha simulato il recupero di calore sulla base di due diverse configurazioni impiantistiche: con e senza scambiatore interposto tra il flusso caldo (gas cogeneratore) e il flusso freddo (aria di processo essiccamento). In virtù della natura dei gas esausti provenienti da cogenerazione ad OVE, si ritiene lo scambio termico con scambiatore intermedio la configurazione ottimale in quanto, anche se meno efficiente dal punto di vista energetico, garantisce i minori oneri manutentivi. Per ottimizzare il dimensionamento si ritiene ottimale lavorare alla temperatura in macchina di 180°C, con eventuale integrazione del quantitativo di calore mediante combustione di metano in bruciatore in linea. Come tipologia di scambiatore si è identificata quella a fascio tubiero in AISI304, in quanto minimizza gli oneri manutentivi.

Sotto le ipotesi di cui sopra, si è riscontrato che, il quantitativo di OVE attualmente raccolto in regione Campania, permette di coprire il fabbisogno termico ai fini essiccamento di un impianto di piccola taglia e coprire parzialmente, per circa un quinto del totale, il fabbisogno termico di un impianto di media taglia. I vantaggi sarebbero pertanto consistenti sia in termini energetici che in termini di riduzione dell'impatto ambientale, dal momento che diminuirebbe di circa 3 volte il quantitativo di fanghi da inviare a smaltimento; senza perdere di vista i vantaggi ottenibili dalla produzione di energia elettrica del sistema di cogenerazione. Il tutto infine è potenzialmente scalabile, con incremento dei recuperi, aumentando il quantitativo di OVE raccolti e conseguentemente incrementando la taglia del sistema di

cogenerazione impiegato. Il quantitativo di OVE raccolto, non è l'unica variabile potenzialmente "migliorabile" in gioco, la soluzione è adattabile in funzione delle specifiche condizioni al contorno: la modifica di uno degli assunti adottati potrebbe infatti portare ad una ottimizzazione della soluzione identificata.

Il processo di gassificazione è condizionato dalle caratteristiche della biomassa trattata e quindi dai trattamenti cui questa è sottoposta. Per questo motivo, è stato sviluppato un modello per la simulazione dei processi di essiccamento termico e gassificazione del fango, al fine di valutare l'effetto di diverse condizioni operative sul sistema. Nello sviluppo del modello si è tenuto conto anche della componentistica per il recupero termico di tutte le fonti disponibili al fine di ottimizzare l'intero sistema. Sono stati presi in esame, come possibili recuperi termici, i gas esausti e l'acqua del circuito di raffreddamento del motore in assetto cogenerativo, e i gas esausti in uscita dall'essiccatore. Il modello è stato sviluppato sia per l'essiccamento condotto in maniera "diretta", ovvero sfruttando direttamente i gas esausti del motore, che "indiretto", con l'inserimento di uno scambiatore di calore intermedio per il riscaldamento, mediante i gas esausti del motore, della corrente essiccativa.

La gassificazione delle biomasse è un processo competitivo e sostenibile per la produzione di combustibili gassosi (syngas) a scopi energetici. D'altro canto, numerosi parametri operativi, come ad esempio la distribuzione di temperatura nel reattore, la natura e la composizione della biomassa e dell'agente gassificante (vapore, aria, ossigeno), la presenza di opportuni catalizzatori (nel caso di reattori a letto fluido) e l'architettura del reattore stesso influiscono notevolmente sulla resa, la composizione e il potere calorifico del syngas prodotto. Data l'estrema sensibilità che caratterizza la composizione (e dunque il contenuto energetico) di questo combustibile alle possibili variazioni nei parametri operativi, lo sviluppo di modelli numerici per lo studio delle efficienze di conversione al variare della biomassa considerata, della geometria del reattore o delle condizioni operative, risulta un approccio efficace per una caratterizzazione del processo in tempi e costi ridotti.

Lo sviluppo di modelli di simulazione del processo di gassificazione è stato perseguito seguendo due diversi approcci, caratterizzati da un livello di accuratezza crescente:

- un modello cinetico zero - dimensionale (0D) che permette la stima della composizione del syngas derivante da processo di gassificazione di biomasse nelle ipotesi ideali di tempo di residenza infinito della biomassa nel gassificatore e indipendenza del processo dalle caratteristiche geometriche del reattore. Tale modello è stato arricchito da un'opportuna cinetica per la previsione delle moli di TAR presenti nel gas di sintesi e da un'equazione di bilancio dell'energia tra specie reagenti e prodotti per la previsione della temperatura di gassificazione nel reattore. Nonostante sia stato sviluppato per reattori downdraft a letto fisso, il modello è stato validato anche per reattori a letto fluido, a valle di opportuna calibrazione del tempo di residenza;
- un modello fenomenologico monodimensionale (1D) in cui si risolvono le equazioni di bilancio di massa, specie chimiche, quantità di moto ed energia su una discretizzazione 1D di un gassificatore downdraft. Tale approccio, dipendente dalle caratteristiche geometriche del reattore, ha permesso la previsione dei profili di composizione del syngas e di temperatura all'interno del gassificatore durante le diverse fasi di evaporazione, pirolisi, combustione e gassificazione, considerando l'interazione tra cinetiche di reazione e fluidodinamica interna ed i processi di scambio termico tra le fasi solido-gassosa e con le pareti. La validazione del modello è stata effettuata in base a dati sperimentali derivanti da una campagna di prove effettuate su un reattore downdraft a letto fisso alimentato da diverse biomasse di origine legnosa.

È stata condotta anche una campagna sperimentale per l'analisi del processo di gassificazione dei fanghi. I campioni di fanghi disidratati ed ispessiti sono stati prelevati presso un depuratore dell'area territoriale campana, al fine di ottenere dati quanto più vicini alla realtà d'impianto. Il campione è stato

caratterizzato in ingresso in termini di: analisi immediata, analisi elementare, determinazione del potere calorifico superiore, contenuto di cloro, analisi ICP, analisi SEM con EDX, evidenziando una variazione in base al periodo dell'anno in cui è stato effettuato il campionamento. A valle di queste operazioni preliminari si è proceduto con le prove di gassificazione con impianto sperimentale caratterizzato da reattore a letto fluidizzato, inserito in fornace a temperatura controllata, dotato di apparecchiature per esercizio, monitoraggio e caratterizzazione. Le prove hanno evidenziato un syngas prodotto con differenti rapporti idrogeno/monossido di carbonio, coerentemente con le differenze evinte dalla caratterizzazione della matrice di partenza e con le differenti condizioni operative. Anche il bottom ash residuale del processo è stato caratterizzato e ne è stato previsto un potenziale recupero, nell'ottica di economia circolare, come fertilizzante agricolo e/o come additivo nei materiali da costruzione previo test di cessione. Lo sfruttamento di fonti energetiche alternative è incoraggiato dalle crescenti preoccupazioni relative alla disponibilità sul lungo termine dei combustibili fossili convenzionali e, soprattutto di recente, in virtù del pesante impatto ambientale dei sistemi di conversione energetica. Il recupero di OVE come fonte alternativa ai combustibili fossili costituisce un'opzione di valorizzazione degli scarti per promuovere l'ambizioso concetto di economia circolare, in cui ogni risorsa è sfruttata ai massimi livelli per la minimizzazione degli scarti e dei materiali conferiti ai siti di smaltimento finali.

Per tali ragioni, in via preliminare, sono state svolte attività sperimentali e numeriche per l'analisi delle prestazioni di un motore ad accensione per compressione alimentato con soli OVE, confrontando le misure con il caso di alimentazione a solo combustibile gasolio. L'uso di un OVE in un motore Diesel di derivazione stradale ed utilizzato in un impianto cogenerativo è risultato fattibile senza particolari modifiche all'impianto, previa operazione di pre-riscaldamento dell'OVE per abbassarne la viscosità fino a valori ottimali (20 Cst a 65°C). Sono stati registrati consumi di combustibile su base massica aumentati di circa il 20% rispetto al caso di solo gasolio, in conformità con la diminuzione del potere calorifico del combustibile, mentre le emissioni di idrocarburi incombusti e di particolato carbonioso sono diminuite fortemente (riduzione intorno al 50%). D'altro canto, le emissioni di ossidi di azoto (NOx) e di monossido di carbonio (CO) sono aumentate utilizzando l'olio rispetto al gasolio rispettivamente di circa il 15% e il 25%.

Lo sviluppo di un modello di analisi numerica CFD, validato nei carichi analizzati in alimentazione a gasolio, è stato esteso poi con relativa semplicità al caso di funzionamento ad OVE. Esso ha permesso di evidenziare come il maggiore modulo di compressibilità e la maggiore viscosità degli OVE determinano maggiori lunghezze di penetrazione e una più lenta atomizzazione del combustibile, dunque un più lento rilascio di calore durante la combustione. Inoltre, le emissioni inquinanti in alimentazione ad OVE determinano un incremento degli NOx a causa dell'azione combinata della presenza di ossigeno nella molecola del combustibile e della maggiore estensione della zona di fiamma interessata dalla formazione di questa specie inquinante, conseguenza anche questa della diversa evoluzione dello spray e della maggiore diffusione della nuvola di vapore di combustibile.

Successivamente, è stata condotta una campagna di prove sperimentali su un altro motore ad accensione per compressione, di derivazione automotive, in alimentazione con soli OVE e successivamente in configurazione dual-fuel, ovvero considerando il processo di combustione derivante dall'accensione di una miscela di aria e syngas aspirata nel collettore determinata dall'innesco di una piccola quantità di OVE iniettata in camera di combustione. A causa di limitazioni legate alla sicurezza del laboratorio, non è stato possibile implementare syngas reale derivante da gassificazione di biomasse, in virtù della quantità di CO presente. Di conseguenza, una miscela ternaria, energeticamente equivalente a quella reale, ma composta solo da idrogeno, metano e azoto, è stata adottata nella campagna di prove. Le prove in sola alimentazione ad OVE hanno confermato i trend analizzati nel caso precedente. Le prove in

modalità dual-fuel hanno evidenziato come sia possibile sostituire elevate percentuali di OVE con syngas, continuando a garantire un funzionamento affidabile del motore, ma ottimizzando la legge di iniezione, con particolare riferimento all'inizio dell'iniezione. Tale modalità ha consentito di ottenere valori di efficienza pari a quelli dell'alimentazione con solo OVE, con minori emissioni di NOx e CO<sub>2</sub>.

In parallelo all'analisi sperimentale, si è sviluppato un modello 3D CFD del motore in assetto cogenerativo, che ha permesso di riprodurre a calcolo le condizioni sperimentali analizzate in entrambe le modalità di alimentazione. Numericamente si è anche caratterizzato il comportamento del motore in alimentazione dual-fuel con syngas reale derivante da gassificazione di biomasse, confrontando le prestazioni con i casi analizzati sperimentalmente con miscela ternaria e individuando tramite procedura di ottimizzazione la combinazione di parametri operativi che determinano la condizione migliore di funzionamento del sistema. Il confronto tra i cicli di pressione ottenuti considerando una miscela di syngas reale ha mostrato una fase di combustione qualitativamente simile a quella stimata sfruttando il contenuto energetico di una miscela ternaria, con una riduzione però dell'efficienza di primo principio rilevabile del 4%. D'altro canto, l'influenza sulle emissioni inquinanti di CO e CO<sub>2</sub> presente allo scarico risulta maggiore in quanto condizionata dalla presenza di queste due specie già nel syngas e quindi nella miscela intrappolata in camera di combustione. Infine, il processo di ottimizzazione ha permesso di individuare la combinazione di parametri operativi che determinano il massimo lavoro prodotto. Tale condizione si raggiunge minimizzando il tempo che intercorre tra le iniezioni pilota e principale di combustibile liquido (OVE) considerando una frazione di syngas intrappolato in camera di combustione variabile tra il 30% e il 50%.

Per quanto attiene al sistema di alimentazione di OVE al motore a combustione interna si è progettato un sistema composto da un primo serbatoio di stoccaggio del combustibile avente una capienza di 80 m<sup>3</sup>, non coibentato ed un secondo serbatoio da 25 m<sup>3</sup> (*daily tank*), coibentato. Nel sistema considerato e rappresentato in Figura 1, l'olio viene prelevato dal serbatoio da 80 m<sup>3</sup> (T-1) tramite una pompa ad ingranaggi (P-1) e riscaldato dall'acqua calda del circuito motore tramite uno scambiatore a piastre per poi essere inviato al serbatoio T-2 da 25 m<sup>3</sup>. L'OVE in T-2 viene mantenuto a temperatura tramite un ricircolo di fluido effettuato tramite la pompa centrifuga P-2.

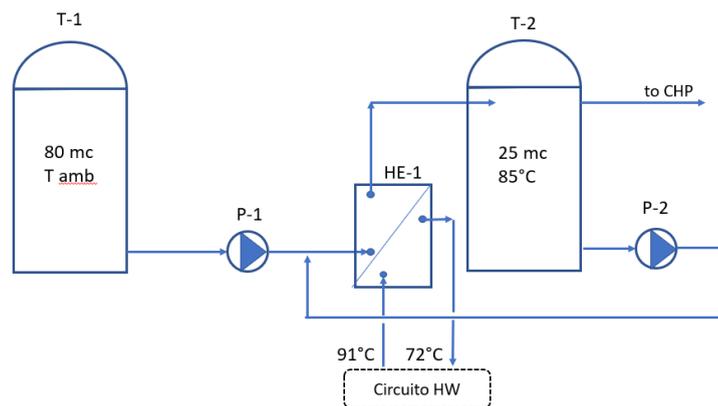


Figura 1. Schema sistema di alimento dell'OVE.

Nella fase finale di progetto, considerando tutti i risultati ottenuti, è stata condotta un'analisi di prefattibilità di un sistema integrato composto dai sistemi di essiccamento e gassificazione dei fanghi e da un cogeneratore alimentato ad OVE e syngas. Sono state valutate diverse opzioni di integrazione dei sottosistemi analizzati e diverse strategie di operazione del sistema. Il sistema proposto è stato confrontato con le soluzioni comunemente adottate negli impianti di depurazione delle acque reflue,

che prevedono l'utilizzo di combustibili fossili e si è valutato l'effetto della variabilità di alcuni dei costi che influenzano la fattibilità economica del sistema proposto. Lo schema del sistema integrato è riportato in Figura . I fanghi di depurazione umidi entrano nell'essiccatore e vengono essiccati a un contenuto di umidità inferiore al 10%, utilizzando l'energia termica prodotta dall'unità di cogenerazione alimentata ad OVE e syngas. Il fango essiccato alimenta il gassificatore che produce syngas e char. L'energia elettrica prodotta dal cogeneratore viene utilizzata per soddisfare la domanda interna del sistema e quella dell'impianto di depurazione.

Si è stimato che il sistema sviluppato consentirebbe di ridurre notevolmente i costi economici ed ambientali degli impianti di depurazione. Sono stati valutati diversi scenari in funzione della percentuale di syngas ed OVE alimentata all'unità di cogenerazione. Operando con la percentuale massima di syngas, intorno al 75-80% su base energetica, è stato stimato che il sistema permetterebbe di coprire circa il 50% della domanda di energia elettrica di un impianto di depurazione di grande taglia e ridurre il quantitativo di fanghi da smaltire, grazie ai processi di essiccamento e gassificazione, di circa il 70%. Riducendo la percentuale di syngas e quindi aumentando il quantitativo di OVE alimentati, si potrebbe arrivare a coprire l'intero fabbisogno di energia elettrica, mantenendo invariata la riduzione dei quantitativi di fanghi da smaltire. Entrambi gli scenari sono risultati fattibili dal punto di vista economico, con un periodo di ritorno semplice variabile tra i 3 ed i 4 anni.

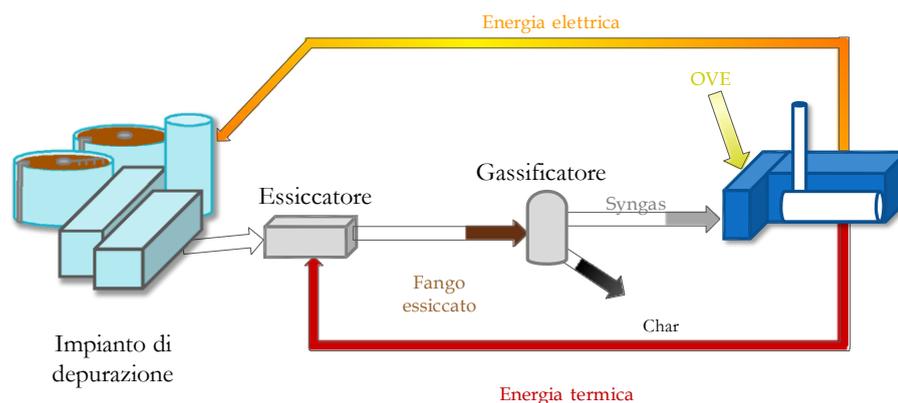


Figura 2.  
Schema  
del sistema  
integrato

A completamento dello studio è stata condotta un'analisi del ciclo vita (LCA) di due configurazioni di sistema integrato, una prima (scenario A) basata su un cogeneratore alimentato ad OVE con un essiccatore a nastro ed una seconda (scenario B), basata su un cogeneratore alimentato in dual fuel da OVE e syngas, un essiccatore a nastro ed un gassificatore. La finalità dell'analisi del ciclo vita è la valutazione e quantificazione dei carichi energetici ed ambientali e degli impatti potenziali associati ad un prodotto/processo/attività lungo l'intero ciclo di vita, a prescindere da valutazioni di tipo economico. L'analisi è stata condotta utilizzando il software SimaPro versione 9.0.0.49, il database Ecoinvent versione 3.5 e, per l'analisi degli impatti, il metodo ReCiPe Midpoint (H) versione 1.03.

Come atteso, il sistema energetico comprendente cogeneratore, essiccatore e gassificatore consente di ridurre l'impatto ambientale del sistema di riferimento (Scenario A) grazie alla rigenerazione di un prodotto di scarto quali i fanghi ed alla conversione degli stessi in combustibile (syngas) e ceneri.

### **3. IMPATTO SUL SISTEMA ELETTRICO E BENEFICI ATTESI**

Come evidenziato nella descrizione dello stato dell'arte, gli impianti di depurazione costituiscono una tipologia di utenza estremamente energivora, i cui consumi elettrici vengono stimati intorno all'1% della potenza totale prodotta sul territorio nazionale. I consumi elettrici pesano per il 30% sui costi di esercizio di un impianto di depurazione, valore destinato a crescere in presenza di trattamenti più spinti, quali ad esempio quelli finalizzati alla rimozione dei nutrienti per evitare il problema dell'eutrofizzazione nei corpi idrici sensibili. L'analisi della letteratura tecnico-scientifica del settore e gli studi condotti in campo nell'ambito del progetto, hanno evidenziato le sezioni più energivore degli impianti di depurazione delle acque reflue. Il consumo energetico principale è connesso alla fase biologica, a causa dell'aerazione dei fanghi attivi. Bisogna poi considerare la linea fanghi, il cui fabbisogno è più elevato in presenza di digestione aerobica o di digestione anaerobica senza recupero di energia dal biogas. I consumi di energia elettrica sono poi legati alla fase di sollevamento iniziale, che dipende dalla situazione geo-morfologica dell'impianto, agli ulteriori organi motori come pompe intermedie, miscelatori, diffusori, centrifughe, ai servizi annessi al depuratore, quali ad esempio uffici e laboratori. Considerando i risultati ottenuti dalle attività di progetto, si è stimato che il sistema sviluppato consentirebbe di ridurre notevolmente i costi economici ed ambientali degli impianti di depurazione. Sono stati valutati diversi scenari in funzione della percentuale di syngas ed OVE alimentata all'unità di cogenerazione. Operando con la percentuale massima di syngas, intorno al 75-80% su base energetica, è stato stimato che il sistema permetterebbe di coprire circa il 50% della domanda di energia elettrica di un impianto di depurazione di grande taglia e ridurre il quantitativo di fanghi da smaltire, grazie ai processi di essiccamento e gassificazione, di circa il 70%. Riducendo la percentuale di syngas e quindi aumentando il quantitativo di OVE alimentati, si potrebbe arrivare a coprire l'intero fabbisogno di energia elettrica, mantenendo invariata la riduzione dei quantitativi di fanghi da smaltire. Entrambi gli scenari sono risultati fattibili dal punto di vista economico, con un periodo di ritorno semplice variabile tra i 3 ed i 4 anni.

Il risparmio sui consumi elettrici e termici dell'impianto e la diminuzione della spesa legata allo smaltimento dei fanghi, derivanti dall'utilizzo del sistema proposto, hanno come immediato vantaggio possibile per l'utenza la riduzione degli oneri per la depurazione. Inoltre, la valorizzazione energetica di due biomasse ottenute da materiali di scarto, che sono oggi considerati rifiuti, permetterebbe di circoscrivere la filiera a livello regionale, con benefici derivanti dai concetti di filiera corta e di riduzione del grado di dipendenza energetica. Infine, non bisogna sottovalutare i benefici ambientali legati all'implementazione del sistema proposto. La valorizzazione degli OVE e dei fanghi di depurazione

consente da un lato di ridurre l'utilizzo di combustibili fossili e le relative emissioni in atmosfera per l'approvvigionamento di energia, dall'altro di evitare lo smaltimento in discarica di due rifiuti che in questo caso diventano una risorsa.

