

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**



**SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**TESI DI LAUREA**

**PROPOSTA DI NUOVI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER IMPIANTI DI  
DEPURAZIONE: I CASI STUDIO DI CUMA E MARCIANISE**

**RELATORE:**

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

CH.MO PROF. ING. NICOLA MASSAROTTI

CH.MA PROF. ING. LAURA VANOLI

**CORRELATORE:**

ING. SIMONA DI FRAIA

**CANDIDATO**

ALESSANDRO CELENTANO

M67/293

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Gli impianti di depurazione delle acque reflue sono una delle industrie pubbliche più costose in termini di fabbisogno energetico rappresentando oltre l'1% del consumo di energia elettrica in Europa. La Direttiva quadro sulle acque 91/271/CEE ha reso obbligatorio il trattamento delle acque reflue per le città e i paesi che superano i 2.000 abitanti. Ad oggi, considerando i paesi appartenenti all'Unione Europea si stima che il numero totale di impianti di depurazione sia di 22.558, per i quali si può stimare un consumo di energia elettrica pari a 15.021 GWh/anno. Anche se la maggior parte degli obiettivi della direttiva quadro in materia di protezione delle acque sono stati raggiunti, molti degli impianti attualmente in funzione sono obsoleti e presentano dei consumi energetici insostenibili; andrebbero perciò rinnovati, ottimizzandone i processi. Tuttavia, in Europa non c'è una legislazione, una norma o standard da seguire in materia di prestazione energetica, e di conseguenza, una significativa opportunità per ridurre la spesa elettrica pubblica rimane non regolamentata. Anche per poter sostenere l'eventuale messa in atto di direttive europee c'è bisogno di una metodologia standard che possa aiutare a classificare gli impianti di depurazione in termini di efficienza energetica, in funzione della qualità degli effluenti, ossia acqua trattata e fango prodotto.

Lo studio si è focalizzato sulla valutazione del fabbisogno energetico degli impianti di depurazione al fine di riuscire a comprendere quali possano essere i parametri maggiormente influenti. La determinazione di indici affidabili, ricercati all'interno del lavoro, che possano permettere la classificazione di questa tipologia di impianti dal punto di vista energetico, è ritenuta di fondamentale importanza anche per far sì che possa essere agevolata la stesura di una normativa internazionale che regolamenti i consumi energetici degli impianti di depurazione. L'applicazione di una normativa potrebbe spingere i gestori degli impianti di depurazione all'efficientamento energetico degli stessi, onde evitare di incorrere in sanzioni amministrative e ciò comporterebbe una enorme riduzione del fabbisogno energetico legato agli impianti di depurazione su scala mondiale.

Il lavoro nella sua fase iniziale ha presentato un excursus sul panorama energetico mondiale e nazionale. Partendo dall'analisi storica del secolo scorso, si è arrivati alla situazione attuale e a quella prevista nei prossimi decenni. Sfruttando quanto riportato

all'interno di diversi documenti sono state analizzate le stime future sui consumi energetici sottolineando, tra l'altro, l'influenza di questo settore sull'inquinamento. Il lavoro svolto può essere diviso in due fasi ben distinte; la prima fase ha previsto l'audit energetico degli impianti di depurazione di Cuma (NA) e Maricianise (CE), al fine di comprendere quale fosse il fabbisogno energetico degli stessi e quali fossero le fasi del trattamento maggiormente energivore, cioè quelle da ottimizzare al fine di ottenere un miglioramento in termini di efficienza energetica. A conferma di quanto riscontrato in letteratura scientifica l'ossidazione biologica, il sollevamento e il trattamento dei fanghi sono risultate le fasi aventi un maggior fabbisogno energetico (Figura 1). In particolare, l'efficienza energetica della ossidazione biologica potrebbe essere ottimizzata installando un sistema di controllo online in continuo del fabbisogno d'ossigeno nel reattore e la conseguente insufflazione della quantità giusta di ossigeno, evitando sprechi.

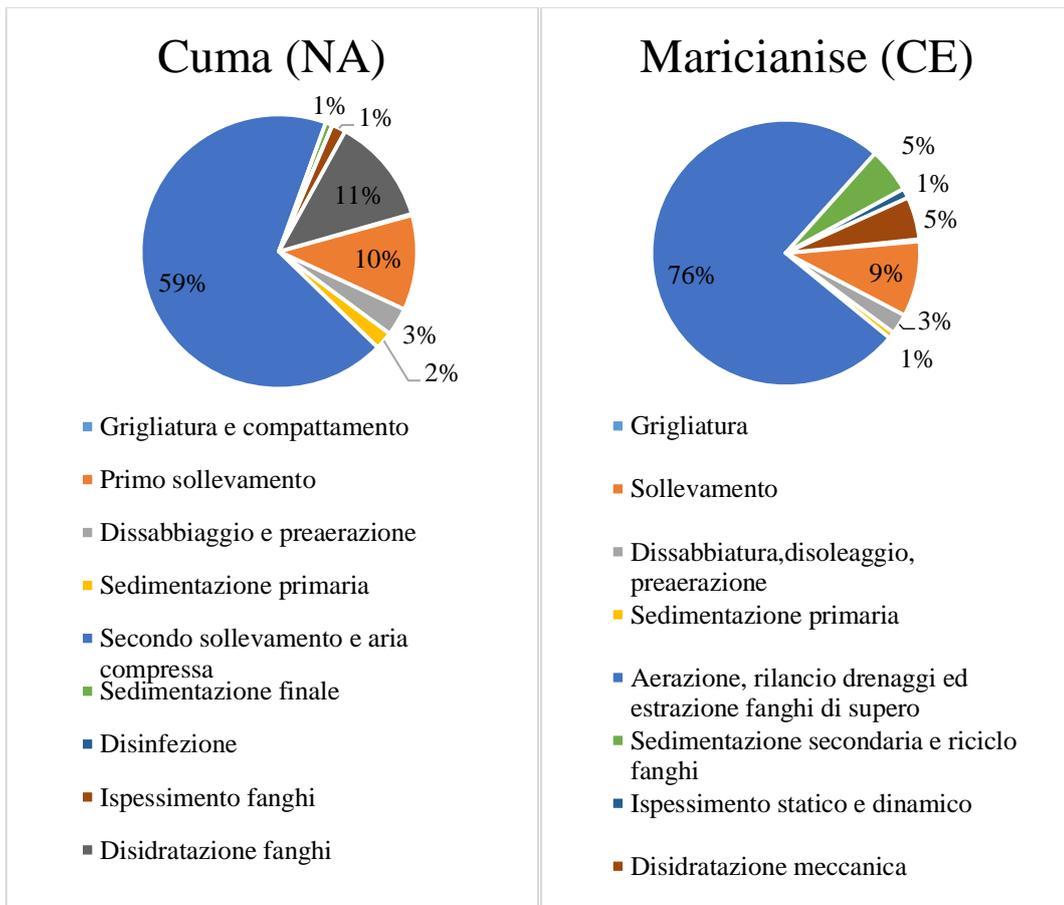


Figura 1 Contributo percentuale delle apparecchiature elettro-meccaniche suddivise per fasi sull'energia elettrica totale consumata dall'impianto di depurazione

Innanzitutto c'è da sottolineare che entrambe gli impianti andrebbero sottoposti ad un upgrade processistico per migliorare l'efficienza depurativa, in particolare nei confronti dei composti azotati. A Cuma l'ossidazione biologica è stata sostituita da un ciclo di pre-denitrificazione ma i risultati, in termini di efficienza di rimozione dell'azoto totale, sono ancora insoddisfacenti; mentre a Marcianise questo intervento è in previsione per il prossimo futuro. Dato che l'installazione di un ciclo di pre-denitrificazione e la garanzia che questo funzioni, implica un dispendio energetico supplementare da non sottovalutare vista l'ingente quantità di ossigeno da insufflare necessaria ai processi biologici di trasformazione dell'azoto, la diagnosi energetica effettuata andrà sicuramente aggiornata nel momento in cui questo ciclo sarà completamente funzionante.

Il fabbisogno energetico è stato correlato ad alcuni dei parametri di gestione che potrebbero in maniera significativa influire sul consumo energetico. I dati a cui si riferiscono i grafici seguenti sono relativi all'anno 2015, per ottenere delle correlazioni maggiormente significative bisognerebbe estendere la popolazione statistica.

In primis è stato analizzato il rapporto tra il consumo energetico e la portata di reflujo in ingresso all'impianto (Figura 2); la correlazione positiva era attesa ma per Cuma sembra essere più evidente rispetto a Marcianise. Probabilmente ciò è anche dovuto al fatto che l'impianto di Cuma presenta due stazioni di sollevamento mentre a Marcianise ce ne è solo una.

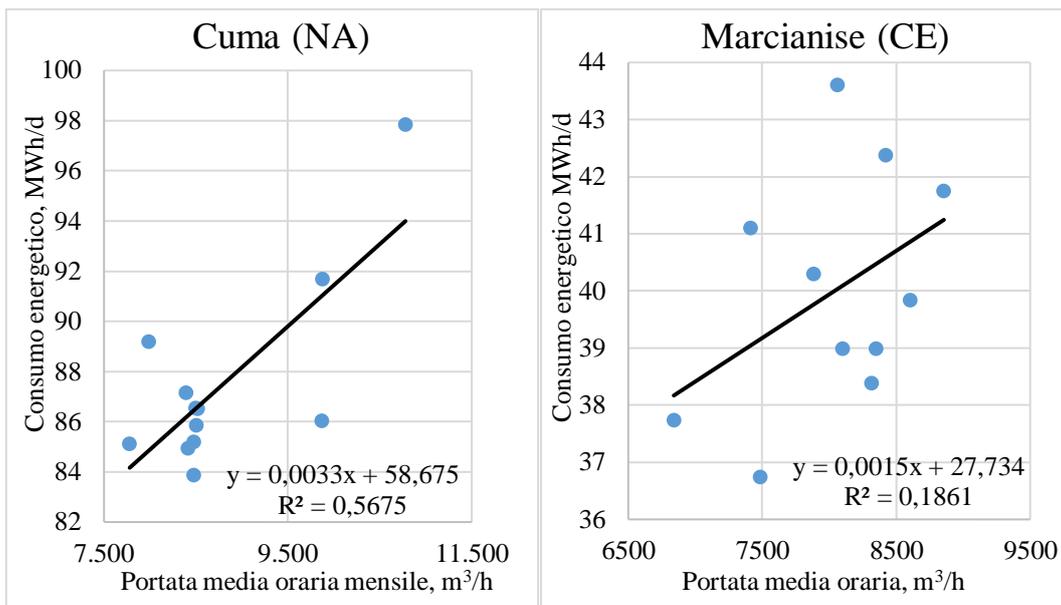


Figura 2 Consumo energetico giornaliero medio mensile rispetto alla portata di refluo influente

La relazione tra i consumi e la temperatura dovrebbe essere negativa per due motivi principali:

- Alle alte temperature corrispondono i mesi estivi in cui l'afflusso di acque agli impianti è minore per motivi climatici (scarsa piovosità);
- Il periodo estivo corrisponde in genere a quello delle vacanze e quindi le grandi città tendono a svuotarsi, per cui gli impianti a loro servizio ricevono meno acque reflue;
- Per una questione di cinetica chimica, a temperature più alte i microrganismi attori del processo biologico hanno una velocità di rimozione del substrato organico maggiore e quindi è plausibile che ci sia bisogno di minore quantità di ossigeno per svolgere il proprio compito.

I grafici seguenti (Figura 3) confermano quanto detto in precedenza. I coefficienti di correlazione lineare per entrambe gli impianti sono abbastanza significativi.

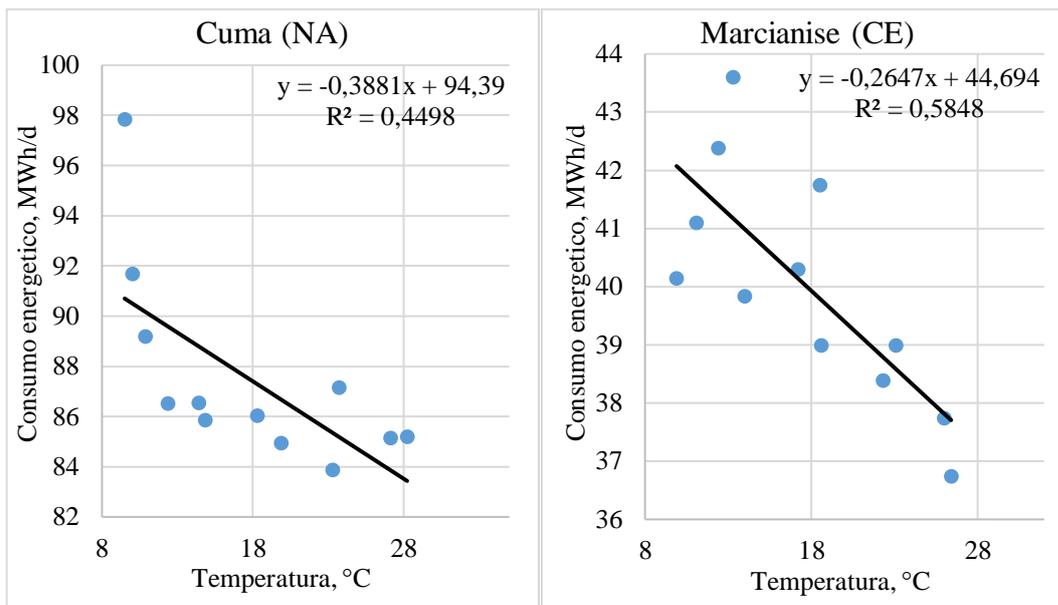


Figura 3 Consumo energetico giornaliero medio mensile rispetto alla temperatura.

È stato già sottolineato come la fase biologica, in particolare le apparecchiature adibite all'insufflaggio dell'aria nei reattori, sia quella avente i consumi maggiori. Per cui un aumento della quantità rimossa di BOD<sub>5</sub> e COD dovrebbe comportare un incremento dei consumi energetici. Come vedremo, ciò avviene per l'impianto di Marcianise, dove la correlazione tra consumi e quantità di inquinanti organici rimossi è positiva, mentre per Cuma l'andamento è in controtendenza rispetto anche a quanto sottolineato nella letteratura scientifica di settore. L'anomalia potrebbe essere però causata dalla presenza di outliers che, vista la popolazione statistica relativa ad un solo anno, condizionano fortemente il calcolo (Figura 4, Figura 5).

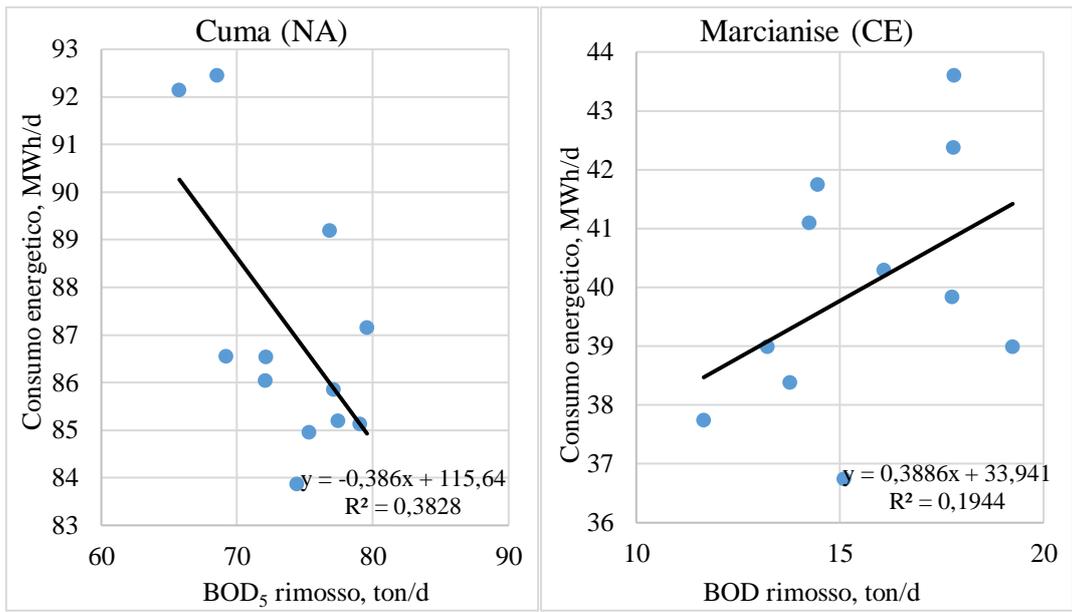


Figura 4 Consumo energetico giornaliero medio mensile rispetto alla quantità di BOD<sub>5</sub> rimossa

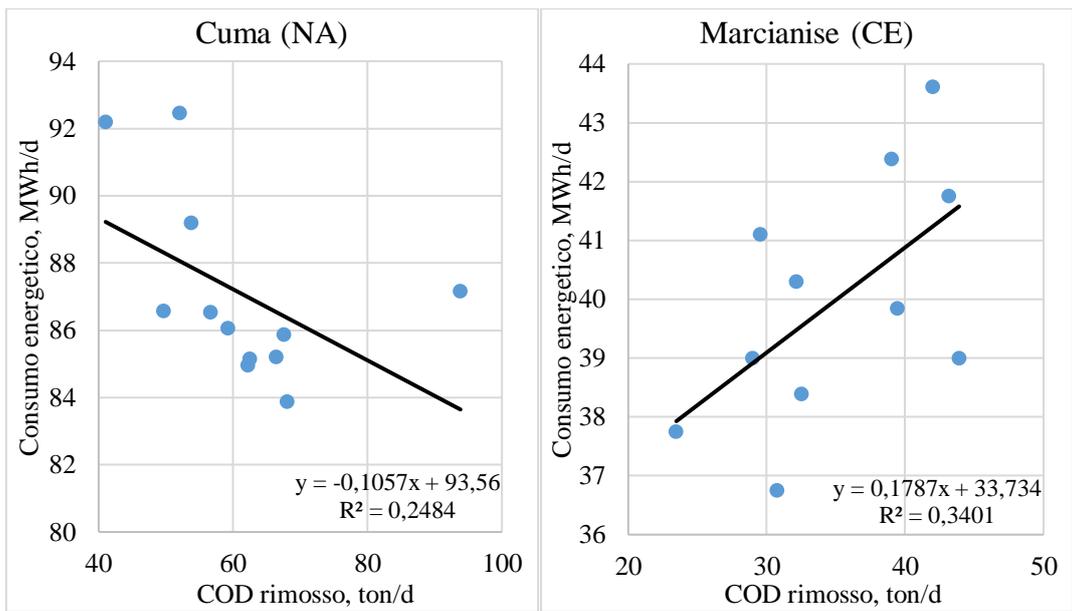


Figura 5 Consumo energetico giornaliero medio mensile rispetto alla quantità di COD rimossa

Solo l'impianto di Cuma, ad oggi, è stato adeguato per effettuare il trattamento dei composti azotati anche se il limite di concentrazione in uscita viene mediamente superato, per cui andrebbero presi degli ulteriori accorgimenti per rientrare nei valori di normativa. La correlazione tra consumi energetici e rimozione dell'azoto ammoniacale (Figura 6), forma sotto la quale l'azoto è maggiormente presente nelle

acque reflue, è positiva e abbastanza elevata a conferma del fatto che l'insufflazione d'aria aumenta per permettere la riuscita del processo di nitrificazione, in cui l'ammoniaca è trasformata in nitriti e nitrati.

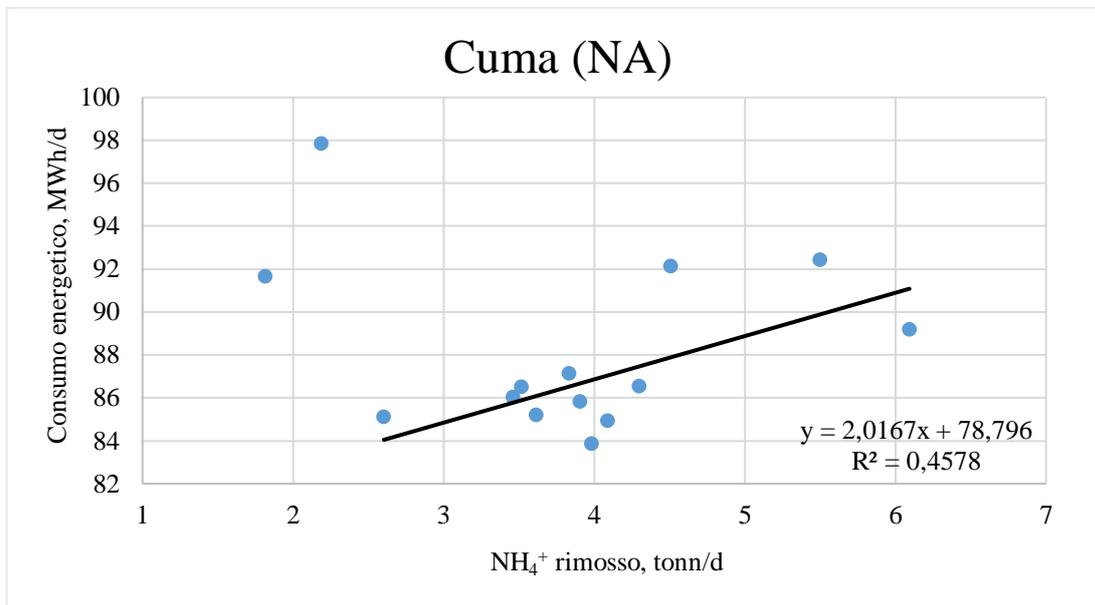


Figura 6 Consumo energetico giornaliero medio mensile rispetto alla quantità di NH<sub>4</sub><sup>+</sup> rimossa

La fase conclusiva di un audit energetico richiede la proposta di interventi che possano migliorare l'efficienza energetica dell'impianto in questione.

Questi miglioramenti sono stati proposti, oltre che per i due impianti analizzati, anche per l'impianto di Foce Regi Lagni (CE). I tre impianti presentano lo stesso schema di trattamento e si trovano nella stessa area geografica, per questo motivo il confronto può essere abbastanza significativo.

Si è ipotizzato di progettare per tutti e tre gli impianti campani delle fasi ulteriori di trattamento dei fanghi, quali:

- *digestione anaerobica* che servirebbe sia per stabilizzare i fanghi, che per produrre biogas;
- *essiccamento termico* che permetterebbe l'abbattimento dell'umidità dei fanghi e dunque una notevole riduzione della quantità di materiale da smaltire, con notevoli vantaggi economici e ambientali.

Per queste due fasi sono stati stimati i consumi sia in termini di energia elettrica che termica. Inoltre si è stimata la produzione di biogas ottenibile dal trattamento anaerobico e l'energia, sia termica che elettrica, ricavabile dal suo utilizzo come combustibile in un cogeneratore ad alte prestazioni.

Si potrebbe, dunque, ottenere sia un risparmio di energia elettrica dovuto alla generazione della stessa da una fonte rinnovabile come il biogas prodotto dai fanghi di depurazione e un risparmio di energia altrettanto importante dovuto allo smaltimento di una quantità di fanghi più o meno pari a 1/3 di quelli smaltiti ad oggi.

Un'analisi economica ha portato anche a quantificare gli eventuali vantaggi dal punto di vista monetario. Questi risultati sono riassunti nella seguente Tabella 1.

*Tabella 1 Percentuali di risparmio energetico-economico*

	<b>Cuma</b>	<b>Marcianise</b>	<b>Foce Regi Lagni</b>	<b>Unità di misura</b>
<b>En. elettrica risparmiata</b>	52	72	59	%
<b>En. Primaria risparmiata (smaltimento fanghi)</b>	67	68	67	%
<b>Costi di gestione annuali</b>	22	30	28	%

Nella seconda parte dello studio ci si è concentrati nello studio degli indici di performance energetica degli impianti di depurazione già noti, ricercati nella letteratura scientifica di settore, e nella proposta di nuovi indici che possano permettere il superamento di alcuni limiti riscontrati negli indici noti.

Tra gli indici standard maggiormente citati in letteratura ci sono quelli che vengono denominati Key Performance Indexes (KPI) che sono i seguenti:

$$KPI_Q = \frac{\text{Consumo elettrico}}{\text{Portata di refluo in ingresso all'impianto}} \frac{kWh}{m^3}$$

$$KPI_{PE} = \frac{\text{Consumo elettrico}}{\text{Abitanti equivalenti (AE)}} \frac{kWh}{AE * \text{anno}}$$

$$KPI_{COD} = \frac{\text{Consumo elettrico}}{\text{Carico di COD rimosso giornaliero}} \frac{kWh}{kg COD_{rimosso}}$$

Un'analisi di benchmarking ha portato alla conclusione che il primo indice,  $KPI_Q$ , è quello più attendibile. Nonostante il valore elevato riscontrato (pari a 0,91) del coefficiente di correlazione lineare tra consumo energetico e portata di reflu influente, l'indice sembra esser comunque soggetto a delle limitazioni; infatti esso trascura implicitamente l'influenza sui consumi energetici della concentrazione degli inquinanti (solidi, materia organica, azoto e fosforo) in ingresso ed in uscita. La ricerca si è dunque focalizzata sul superamento di tali restrizioni per trovare un indice che possa essere facilmente calcolabile e tenga conto non solo della portata in ingresso all'impianto, ma anche dei diversi parametri di gestione.

A conferma del fatto che l'argomento dell'efficienza energetica negli impianti di depurazione è di centrale interesse, l'Unione Europea ha in atto un progetto, denominato *Horizon 2020 Enerwater* il cui obiettivo è proprio quello di riuscire a sviluppare una metodologia per ricavare un indice, il cui valore possa, da solo, fornire un'idea dell'efficienza energetica dell'impianto analizzato. Il progetto terminerà nella primavera del 2018 ma comunque sia, ad oggi, oltre ad aver fornito dei risultati intermedi, ha fornito anche un database, con all'interno i dati sia energetici che relativi al trattamento di oltre 500 impianti su scala mondiale. Il database è stato utilissimo nello sviluppo del presente lavoro di tesi.

Per quanto riguarda la proposta di nuovi indici, la ricerca si è dunque focalizzata sul superamento dei limiti riscontrati nei KPIs; in particolare si è pensato di sviluppare un indice che consideri non solo la portata in ingresso all'impianto, ma che tenga conto dei diversi parametri di gestione e che possa essere facilmente calcolabile. Si è provato a relazionare il consumo energetico giornaliero con il rapporto tra la portata massica giornaliera influente all'impianto di  $BOD_5$  e l'efficienza di rimozione dello stesso ottenuta grazie ai trattamenti effettuati nell'impianto, ottenendo un indice di correlazione lineare pari a 0,9546 (Figura 7) che è ancor più elevato di quello, già alto, ottenuto con la portata giornaliera.

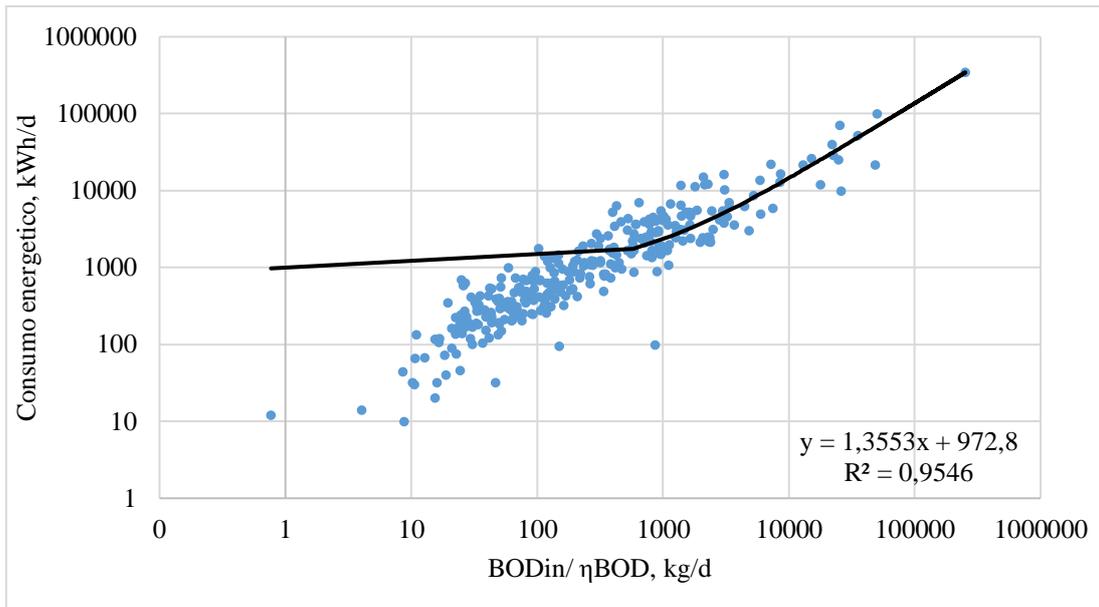


Figura 7 Correlazione tra il consumo energetico giornaliero e il rapporto tra la portata massica di BOD<sub>5</sub> in ingresso e l'efficienza di rimozione dello stesso

L'utilizzo di questa correlazione permette di superare i diversi limiti legati al rapporto del consumo energetico con la sola portata influente:

- la portata massica di BOD<sub>5</sub> in ingresso all'impianto di depurazione giornalmente permette di tener conto sia della portata di refluo influente sia del carico organico da rimuovere;
- l'efficienza di rimozione del BOD<sub>5</sub> permette di considerare l'efficienza depurativa dell'impianto, tenendo in conto da un lato la qualità dell'effluente, dall'altro che una rimozione maggiore può comportare consumi energetici maggiori.

L'indice proposto, denominato Indice di Resa Energetica rispetto al BOD<sub>5</sub>, è il seguente:

$$IRE_{BOD} \left\{ \begin{array}{l} \eta_{BOD} = \frac{BOD_5^{IN} - BOD_5^{out}}{BOD_5^{IN}} \\ X = \frac{\text{Consumo energetico}_d}{\text{Portata massica BOD}_{5d} \text{ in ingresso all'impianto}} \quad (kWh/kg \text{ BOD}_5^{IN}) \end{array} \right.$$

Il grafico seguente mostra la divisione dei range, effettuata in funzione di  $\eta_{BOD}$  e del rapporto tra consumo energetico giornaliero e portata massica di BOD<sub>5</sub> in ingresso

all'impianto, e i risultati ottenuti per gli impianti di cui si disponeva dei dati necessari (Figura 8).

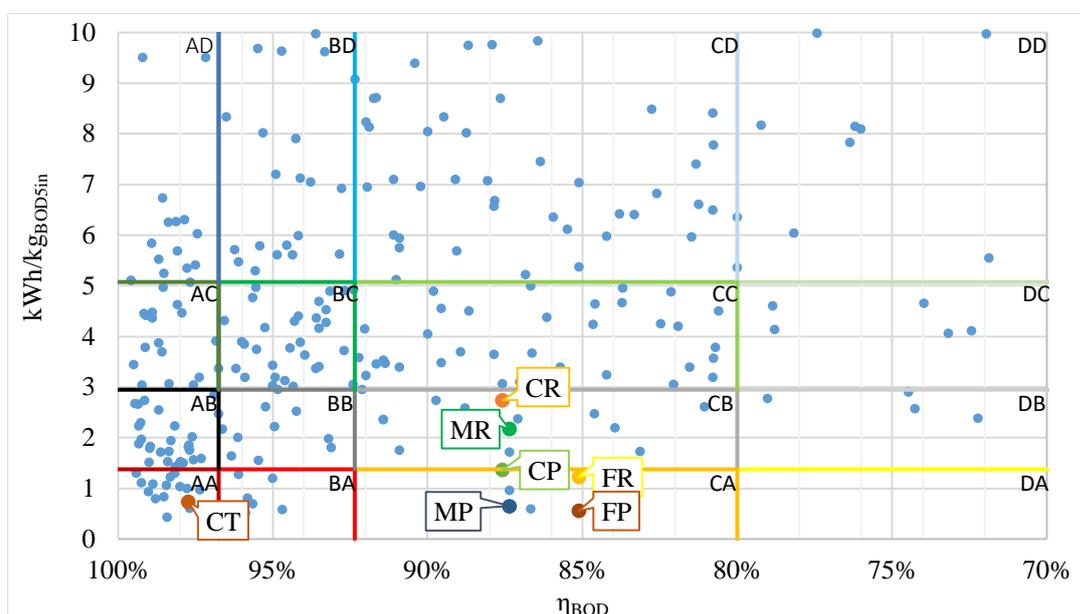


Figura 8 Indice di resa energetica relativo al BOD<sub>5</sub>

Come si può notare, la distribuzione dei risultati ottenuti per gli impianti analizzati è piuttosto eterogenea; in basso a sinistra ci sono gli impianti più virtuosi, che associano ottimi standard qualitativi ad alti valori di efficienza energetica; viceversa, gli impianti in alto a destra presentano un cattivo rendimento sia in termini di qualità dell'effluente che in termini energetici.

È interessante notare come l'indice proposto confermi che l'impianto di Castiglione Torinese, aggiunto allo studio perché all'avanguardia sia dal punto di vista energetico che ambientale, risulti tale in quanto etichettato come impianto AA, cioè ottimo sia dal punto di vista del trattamento di rimozione del BOD<sub>5</sub> che dell'efficienza energetica.

Dato che sempre più Paesi richiedono il trattamento e la rimozione dei nutrienti (azoto e fosforo) dalle acque reflue, si propone di utilizzare una metodologia analoga a quella considerata per il BOD<sub>5</sub>, per tener conto della rimozione dell'azoto. I risultati dell'analisi sono presenti nella tesi.

Per la valutazione dei consumi energetici legati alla linea fanghi, si propongono degli indici che tengano conto anche dell'energia consumata per il trasporto, funzione della quantità di fanghi smaltita che a sua volta dipende dall'umidità relativa dei fanghi, o

dell'eventuale energia prodotta attraverso la valorizzazione energetica dei fanghi, come la produzione di biogas durante la fase di digestione anaerobica o il recupero derivante da processi termici, quali incenerimento, pirolisi o gassificazione.

Il primo indice proposto per l'analisi della linea fanghi è l'Indice di Resa Energetica del Trattamento Fanghi,  $IRE_{TF}$ :

$$IRE_{TF} = \frac{EC_{LF}}{Q_m ST_{in}} * U_{res} = \frac{kWh_{c_{LF}}}{kg ST_{in}} * \%U_{res}$$

dove:

- $EC_{LF}$  è l'energia consumata dalle apparecchiature della linea fanghi;
- $Q_m ST_{in}$  è la portata massica di solidi totali in ingresso all'impianto;
- $U_{res}$  è la percentuale di umidità residua dei fanghi.

Un'altra ipotesi è quella di considerare implicitamente l'effetto dell'umidità rimossa attraverso l'energia consumata per il trasporto dei fanghi.

L'indice proposto, definito come Indice di Resa Energetica di Trattamento e Trasporto Fanghi,  $IRE_{TTF}$ , è il seguente:

$$IRE_{TTF} = \frac{EC_{LF} + EC_{TF}}{Q_m ST_{in}} = \frac{kWh_{LF} + kWh_{TF}}{kg ST_{in}}$$

in cui

- $EC_{LF}$  è l'energia consumata dalle apparecchiature della linea fanghi;
- $EC_{TF}$  è l'energia consumata per il trasporto dei fanghi al luogo di conferimento stabilito;
- $Q_m ST_{in}$  è la portata massica di solidi totali in ingresso all'impianto.

Infine sono stati proposti altri due indici:

- *Indice di AutoProduzione Energetica* che portasse in conto la quantità di energia prodotta dall'impianto, in modo tale da poterla confrontare con quella producibile attraverso, in primis l'energia producibile sfruttando il biogas prodotto dal trattamento anaerobico, ma anche in altri modi come il recupero termico dalle acque reflue o attraverso processi di incenerimento dei fanghi essiccati, ecc;
- *Indice di Resa Depurativa* che tenga conto dell'efficienza di rimozione degli inquinanti per cui esistono dei limiti normativi ben precisi e che possa essere affiancato agli indici energetici.

Gli indici proposti sono stati validati attraverso un'attività di benchmarking che ha confermato la bontà del lavoro svolto. In particolare, l'analisi che ha portato allo sviluppo degli Indici di Resa Energetica rispetto al BOD<sub>5</sub> e all'azoto totale, può ritenersi estremamente soddisfacente in quanto questi ultimi garantiscono il superamento di alcuni limiti riscontrati tra gli indici presenti in letteratura.

Per gli indici proposti in relazione alla linea fanghi non è stato possibile effettuare un'analisi di benchmarking per mancanza di dati; la raccolta di dati specifici relativi alla linea fanghi di impianti di depurazione su scala mondiale farebbe aumentare la validità degli indici proposti.