

# Water-energy nexus: la parte oscura del ciclo dell'acqua, cambiamenti climatici ed economia circolare

La pressione sulla risorsa idrica sta spingendo verso nuovi paradigmi di gestione. Le acque di rifiuto sono oggi trattate con rilevante consumo di energia e potenziale emissione di gas ad effetto serra. Invece, le caratteristiche delle acque reflue sono tali da poter permettere un recupero energetico e di materie prime seconde. Le acque di rifiuto, quindi, possono trasformarsi da un costo per la società in un'opportunità a supporto di un'economia circolare

DOI 10.12910/EAI2016-012

di **Alessandro Spagni, Marco Ferraris, Davide Mattioli, Luigi Petta e Claudia Brunori**, *ENEA*

L'acqua e l'energia sono oggi interdipendenti (water-energy nexus); infatti, l'acqua è utilizzata in tutti i processi di produzione di energia e, allo stesso modo, l'energia è richiesta in tutte le fasi di prelievo, trattamento e trasporto dell'acqua (Figura 1). La crescente consapevolezza della scarsità delle risorse idriche, anche a seguito di eventi catastrofici (uragani, siccità ecc.), la continua crescita demografica, i cambiamenti climatici e il continuo incremento della domanda energetica, hanno

fatto emergere la consapevolezza dell'urgenza dell'affrontare le problematiche relative alla connessione tra acqua ed energia [1].

Il Water Exploitation Index (WEI, indice di sfruttamento dell'acqua), un indice che fornisce la più ampia rappresentazione dell'utilizzo dell'acqua in relazione alla sua disponibilità a lungo termine e fornisce indicazioni sui rischi del sovrasfruttamento della risorsa, evidenzia come la scarsità di acqua sia oggi un fenomeno piuttosto diffuso in Europa [2]: inoltre, mentre prece-

dentemente si riteneva che la scarsità di risorsa idrica coinvolgesse solo la parte meridionale dell'Europa, negli ultimi 10 anni il WEI ha evidenziato come fenomeni di scarsità di acqua stiano coinvolgendo anche paesi del Nord Europa. L'esempio più rilevante è il Belgio che, a seguito del prelievo di acqua per la produzione di energia, presenta oggi le stesse criticità sulla risorsa di Cipro, Italia e Spagna [2].

Mentre alcuni rapporti tra acqua ed energia sono immediati (ad esempio energia idroelettrica), altri, in-

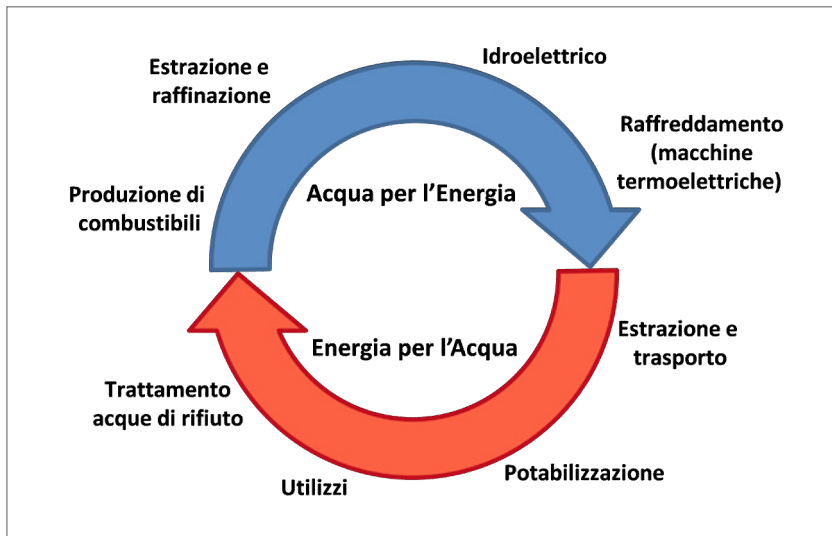


Fig. 1 Rapporto acqua-energia: water-energy nexus

vece, sembrano molto più “oscuri”. La parte più oscura delle connessioni tra acqua ed energia (Water-energy nexus) è il trattamento e la gestione delle acque di rifiuto. Obiettivo di questa nota è, quindi, di evidenziare tale rapporto e, soprattutto, come tale relazione possa divenire una opportunità per la gestione energetica, per i cambiamenti climatici e per la produzione di materie prime seconde.

### Consumi energetici nel trattamento delle acque di rifiuto

La U.S. EPA [3], ha stimato che circa il 3% dell'intero consumo di energia elettrica degli interi Stati Uniti sia legato al trattamento delle acque reflue. Tali consumi sono inoltre attesi in crescita del 20% nei prossimi 10-20 anni a seguito del continuo miglioramento della qualità agli scarichi richiesto dalla normativa in evoluzione [3].

Le stime per l'Italia riportano per il trattamento delle acque di rifiuto valori pari a circa l'1% del consumo

energetico nazionale [4]. Assumendo un consumo elettrico nazionale di circa 340 miliardi di kWh/anno per il 2012 [5], la quota riservata alla depurazione è comunque superiore ai 3 miliardi di kWh/anno per un costo, solo di bolletta elettrica, di ben oltre 300 milioni di €/anno al costo approssimativo di 10 c€/kWh [5]. Le previsioni di un ammodernamento delle infrastrutture, del miglioramento della qualità delle acque allo scarico e dell'andamento del mercato dell'energia potrebbero condurre tali consumi verso valori non più sostenibili.

### Bilancio di energia negli impianti di trattamento acque di rifiuto

Stabilire un bilancio di energia all'interno di un impianto di trattamento reflui è molto difficile in quanto i consumi variano notevolmente sia in relazione alla tecnologia utilizzata, sia in funzione delle pratiche di gestione.

Un recente progetto finanziato dal-

la Commissione Europea [6] ha analizzato dati di letteratura di 369 impianti in piena scala distribuiti su tutto il pianeta e caratterizzati da diverse potenzialità di trattamento e di tecnologie applicate. L'analisi ha evidenziato valori di consumi energetici variabili tra 0,13 e 5,5 kWh/m<sup>3</sup> di acqua trattata, con consumi che, tendenzialmente, aumentano al diminuire della taglia. Data l'estrema variabilità, lo stesso report [6] evidenzia come il 50% dei dati disponibili riportino consumi compresi tra 0,25 e 0,86 kWh/m<sup>3</sup>. Gli impianti di maggiori dimensioni (potenzialità sopra i 100 mila abitanti equivalenti) presentano i valori minori di energia consumata con valori medi che si attestano sugli 0,4 kWh/m<sup>3</sup>. È da sottolineare come impianti tecnologicamente più avanzati, pur permettendo migliori standard di qualità allo scarico, presentino i consumi energetici maggiori. È comune, infatti, trovare valori superiori a 1,0 kWh/m<sup>3</sup> per gli impianti che includono una filtrazione con membrana nella linea di trattamento [6-7]. La richiesta di migliori standard di qualità delle acque trattate, come richiesto dalla normativa in evoluzione o dettati dal bisogno di riuso della risorsa, spingeranno ulteriormente verso l'alto i consumi energetici relativi al ciclo dell'acqua.

Siccome oltre il 95% delle acque reflue in Italia prevede un trattamento almeno secondario, ovvero “un processo che in genere comporta il trattamento biologico” [8], di seguito si cercherà di analizzare questa tipologia di impianto. La ripartizione dei consumi energetici degli impianti di depurazione (che includono un trattamento almeno secondario) evidenzia come oltre il 50% dei consumi sia legato all'aerazione (Figura 2) [9-10].

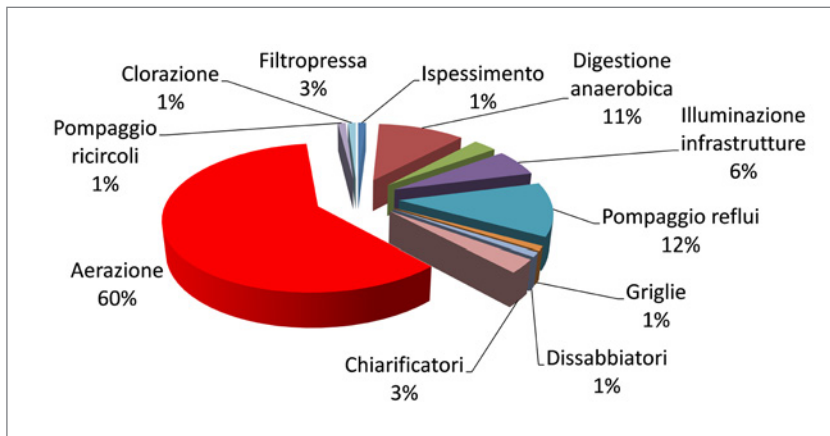


Fig.2 Esempio di ripartizione dei consumi energetici di un tipico impianto di trattamento reflui  
Fonte: Menendez, 2010

È evidente, quindi, che la riduzione dei consumi energetici dei sistemi di trattamento reflui deve intervenire prioritariamente su tale fase.

### Riduzione dei consumi energetici: può un impianto di trattamento di acque di rifiuto contribuire ad un sistema di produzione di energia?

Esistono vari modi per ridurre i consumi di energia richiesti da un impianto di trattamento reflui. Certamente, un ammodernamento delle pompe e delle apparecchiature elettriche può apportare un significativo miglioramento; ma il bilancio energetico può essere ulteriormente molto migliorato.

Ad esempio, esistono numerosi studi che evidenziano come una gestione ottimizzata dei processi di trattamento possa ridurre di oltre il 20% i consumi di energia legati all'aerazione in impianti a fanghi attivi [11-14]. È da sottolineare che negli ultimi anni gli sforzi della comunità scientifica si sono concentrati sullo studio della possibilità di sostituire i processi aerobici con altri anaero-

bici. Questi ultimi, oltre a non richiedere aerazione, permettono un bilancio energetico dell'impianto di trattamento reflui pressoché neutro o positivo, trasformando, quindi, l'impianto in un sistema di produzione di energia. Esistono oggi numerosi casi di impianti di trattamento acque di rifiuto che, a seguito di una profonda revisione del sistema di trattamento immettono energia elettrica in rete [15].

Le acque di rifiuto contengono energia sotto diversa forma: cinetica, potenziale, termica e chimica. Di queste, quella più sfruttabile, almeno nel futuro più prossimo, è l'energia di origine chimica [14]. L'energia chimica contenuta nei reflui è già oggi considerevolmente sfruttata per produrre metano (Figura 3).

Mentre processi anaerobici sono oggi diffusi (ancora non molto in Italia) per la stabilizzazione dei fanghi di supero (ovvero la biomassa prodotta in eccesso) degli impianti di depurazione e per la frazione organica dei rifiuti solidi urbani, trovano ancora modesta applicazione in piena scala per i reflui. I principali limiti che occorre superare per la larga appli-

cazione di processi anaerobici sono due: l'applicazione a flussi di acque "diluite" (come quelle dei reflui municipali) e la gestione dell'azoto.

Per i flussi diluiti, una tecnologia interessante è sicuramente l'Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) [16] che oggi trova larga applicazione soprattutto per acque industriali (Figura 4). Nonostante ci siano studi sull'applicazione di questa tecnologia in condizioni psicrofile [17], le qualità delle acque allo scarico non è ancora comparabile con quella dei processi convenzionali a fanghi attivi. Studi recenti stanno valutando l'applicazione di processi anaerobici combinati a filtrazione a membrana [18-19] ma chi scrive non è ancora a conoscenza di applicazioni in piena scala di queste tecnologie per reflui municipali.

La rimozione dell'azoto è comunemente effettuata attraverso un processo aerobico di ossidazione dell'ammoniaca a nitrato, seguito da uno anossico di denitrificazione con produzione di azoto molecolare che viene reimpresso in atmosfera. Dalla scoperta dei batteri Anammox (nome che sta per ANaerobic AMMonium OXidation) [20], grosso interesse è stato dedicato alla loro applicazione nei trattamenti dei reflui. Il primo impianto in piena scala è stato realizzato in Olanda nel 2002, mentre oggi ci sono almeno 25 impianti in piena scala operanti sul pianeta, dei quali nessuno in Italia [21]. Occorre sottolineare, però, che dalle prime applicazioni industriali, l'interesse è stato altissimo (per l'impatto che ha la nitrificazione sulla richiesta di aerazione negli impianti), tanto che molti gestori hanno tentato di realizzarlo in modo "casalingo" e non è da escludere, quindi, che esitano molte maggiori



Fig. 3 Impianto di depurazione di Biancolina (Bologna); sulla sinistra il primo Anaerobic Baffled Reactor (ABR) in Italia per la digestione anaerobica del liquame progettato dall'ENEA

applicazioni in piena scala di quante riportate in letteratura.

Potenzialmente esistono altre possibilità per recuperare l'energia chimica contenuta nei reflui (per esempio, produzione di idrogeno, celle a combustibile microbiche, celle elettrolitiche microbiche), ma queste sono ancora tecnologie a livello laboratoristico.

### Acque di rifiuto e gas serra

Trasformare un impianto di trattamento acque di rifiuto da energivoro in uno ad energia neutra o positiva determina già una riduzione della immissione di gas serra nell'atmosfera. Ma questo non è tutto; le acque

reflue possono potenzialmente generare gas serra.

Il primo, e sicuramente più significativo, è il metano (effetto serra 23 volte la  $\text{CO}_2$ ) [22]. La capacità di produrre  $\text{CH}_4$  che deriva dalla presenza di sostanza organica è ben conosciuta da lungo tempo, tanto da essere sfruttata per recuperare energia da reflui e rifiuti. Quindi, se i reflui sono ben gestiti, la produzione di metano è più un'opportunità che un pericolo.

Studi in laboratorio ed in piena scala hanno evidenziato che gli impianti di trattamento possono emettere quantità significative di ossido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [23] che è un potente gas serra (effetto serra circa 300 volte maggiore della  $\text{CO}_2$ ). Evi-

denze sperimentali mostrano che la quantità di  $\text{N}_2\text{O}$  emessa durante il trattamento dei reflui dipende dalle condizioni operative applicate [23]. Tuttavia, non ci sono al momento dati organici su di un numero importante di impianti di queste emissioni, almeno in Italia.

### Gestione acque di rifiuto verso un'economia circolare

Le acque sono oggi per lo più utilizzate in modo "lineare" [24]: sono, infatti, prelevate dall'ambiente, utilizzate (una sola volta) e reimmesse nell'ambiente di solito con caratteristiche qualitative peggiori (o almeno diverse) di quelle di origine [24].

Le acque di rifiuto prodotte sono quindi trattate con l'obiettivo di rimuovere le sostanze indesiderate. Stranamente oggi poca attenzione è di solito dedicata al destino delle sostanze rimosse, come della stessa risorsa primaria: l'acqua. L'acqua, ad esempio, potrebbe essere riutilizzata

prima di essere reimpressa nell'ambiente. Il riutilizzo, inoltre, dovrebbe prevedere diverse forme, in modo da massimizzare l'uso della risorsa e, allo stesso tempo, ridurre la richiesta tecnologica per il trattamento in un'ottica *fit-for-(re)use*. Gli esempi di riuso delle acque sono numerosi

e significativi [25], ma nel prossimo futuro, a seguito della crescente pressione sulla risorsa primaria, dovranno diventare pratica comune.

Attualmente, le sostanze contenute nelle acque reflue sono generalmente "bruciate" tramite processi biochimici con l'eccezione della frazione (di solito piccola) che viene utilizzata per produrre metano. La sostanza organica è ossidata a  $CO_2$ , acque e fango di supero (quest'ultimo in alcuni casi utilizzato per produrre biogas, ma più spesso stabilizzato in condizioni aerobiche); il fango di supero deve essere, quindi gestito e smaltito. Invece, dalla sostanza organica, oltre al già citato metano, possono essere prodotti anche biopolimeri per l'utilizzo come plastiche biodegradabili quali, ad esempio, i poliidrossialcanoati [26].

Tra le sostanze presenti nei reflui, una discussione a parte deve essere dedicata all'azoto. L'azoto è presente nelle acque reflue sotto forma di ammoniaca e azoto organico. Oggi è rimosso dalle acque reflue per essere reimpresso in atmosfera. Allo stesso tempo, l'azoto atmosferico è fissato chimicamente ad ammoniaca attraverso il processo Haber-Bosch (altamente energivoro) per la produzione di fertilizzanti. In ottica di ottimizzazione dei processi, di riuso della risorsa idrica, l'azoto (ma stesso vale per il fosforo) contenuto nelle acque potrebbe essere utilizzato direttamente come fertilizzante nelle pratiche di riuso irriguo.



Fig. 4 Impianto di tipo UASB per il trattamento anaerobico con recupero di metano dai reflui di una cartiera tedesca, realizzato da Envirochemie nell'ambito del progetto europeo (7<sup>th</sup> FP) Aquafit4use di cui ENEA è stata partner

*Per saperne di più:  
alessandro.spagni@enea.it*



## BIBLIOGRAFIA

1. US DOE, Department of Energy (2014). The water-energy nexus: challenges and opportunities
2. EEA, European Environmental Agency (2012). Towards efficient use of water resources in Europe. EEA Report No 1/2012
3. US EPA, Environmental Protection Agency (2006). Wastewater management fact sheet, energy conservation. EPA 832-F-06-024
4. M. Campanelli (2013). Incidenza dei consumi energetici sul costo del servizio idrico integrato. In: Atti della 49a Giornata di Studio di Ingegneria Sanitaria Ambientale: Risparmio energetico negli impianti di trattamento dell'acqua
5. AEEG - Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas (2013), Relazione Annuale sullo Stato dei Servizi e dell'attività svolta
6. ENERWATER (2015). Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste treatment plants. Deliverable 2.1 - Study of published energy data
7. L. Palmowski, K. Veltmann, J. Pinnekamp (2012). Energy optimization of large scale membrane bioreactors – importance of the design flux. In: V. Lazarova, K.H. Choo, P. Cornel, Eds. Water-energy interactions in water reuse. IWA Publishing. London
8. ISTAT 2009. Censimento delle risorse idriche a uso civile Anno 2008
9. M.R. Menendez (2010). How we use energy at wastewater plants... and how we can use less. Annual Conference technical paper, NC AWWA-WEA (North Carolina American Water Works Association and the North Carolina Water Environment Association)
10. P.L. McCarty, J. Bae, J. Kim (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer: can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45, 7100-7106
11. NREL – National Renewable Energy Laboratory (2012). Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities. Technical Report NREL/TP-7A30-53341
12. L. Luccarini, D. Pulcini, D. Sottara, A. Spagni (2015). Investigation of energy consumption and costs savings for a pilot scale SBR. In: Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency. Tsagarakis K.P., Stamatelatos K. (Eds), IWA Publishing. London. Pp. 311-326
13. A. Spagni, S. Marsili-Libelli, M.C. Lavagnolo (2008). Optimisation on sanitary landfill leachate treatment in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 58(2): 337-343
14. A. Meda, D. Lensch, C. Schaum, P. Cornel (2012). Energy and water: relations and recovery potential. In: V. Lazarova, K.H. Choo, P. Cornel, Eds. Water-energy interactions in water reuse. IWA Publishing. London
15. Y. Shen, J.L. Linville, M. Urgun-Demirtas, M.M. Mintz, S.W. Snyder (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 50, 346-362
16. G. Lettinga, A. F. M. van Velsen, S. W. Hobma, W. de Zeeuw, A. Klapwijk (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22, 699-734
17. E. Foresti (2002). Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. *Water Science and Technology*, 45, 181-186
18. L. Alibardi, N. Bernava, R. Cossu, A. Spagni (2016). Anaerobic dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment at ambient temperature. *Chemical Engineering Journal*, 284, 130-138
19. A.L. Smith, S.J. Skerlosa, L. Raskin (2013). Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater. *Water Research*, 47, 1655-1665
20. M. Strous, J.A. Fuerst, E.H.M. Kramer, S. Logemann, G. Muyzer, K.T. Van De Pas-Schoonen, R. Webb, J.G. Kuenen, M.S.M. Jetten (1999). Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature* 400(6743), 446-449
21. M. Remy, T. Hendrickx (2015). The Anammox reactor: drawing on more than a decade of experience. *Water*, 21, June, 40-42
22. H.D. Monteith, H.R. Sahely, H.L. MacLean, D.M. Bagley (2005). A Rational Procedure for Estimation of Greenhouse-Gas Emissions from Municipal Wastewater Treatment Plants. *Water Environment Research*, 77, 390-403
23. M.J. Kampschreur, H. Temmink, R. Kleerebezem, M.S.M. Jetten, M.C.M. van Loosdrecht (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43, 4093-4103
24. G.T. Daigger (2012). Design and implementing urban water and resource management systems which recover water energy and nutrients. In: V. Lazarova, K.H. Choo, P. Cornel, Eds. Water-energy interactions in water reuse. IWA Publishing. London
25. T. Asano, F.L. Burton, H.L. Leverez, R. Tsuchihashi, G. Tchobanoglous (2007). Water reuse: issue, technologies and applications. McGraw-Hill Companies
26. M. Arcos-Hernández, L. Montano-Herrera, O.M. Janarthanan, L. Quadri, S. Anterrieu, M. Hjort, T. Alexandersson, A. Karlsson, L. Karabegovic, P. Magnusson, P. Johansson, S. Bengtsson, F. Morgan-Sagastume, O. de Vegt, B. Laycock, S. Pratt, P. Halley, P. Lant, P., A. Werker (2015). Value-added bioplastics from services of wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 10, 546-555