

ENERGIA

Elettricità dai batteri

Le sostanze organiche nelle acque di scarico o nel terreno potrebbero essere usate per produrre elettricità grazie ad alcune specie batteriche

di Pierangela Cristiani



Pierangela Cristiani è ricercatrice presso Ricerca sul sistema energetico (RSE) di Milano. Biologa, è presidente del gruppo di lavoro sulla corrosione microbiologica della Federazione europea di corrosione e coordina ricerche sui sistemi bio-elettrochimici di interesse energetico.



Il responsabile dell'ufficio brevetti mi aveva convocato alcuni anni fa perché incuriosito da una vecchia pratica dal titolo *Sistema per monitorare trattamenti biocidi*, cioè trattamenti che combattono la crescita di organismi nocivi. Da ingegnere elettrotecnico non trovavo immediato classificare i trattamenti biocidi e capire che cosa c'entrasse la biologia con gli impianti di produzione di energia. La descrizione di incrostazioni nei circuiti di raffreddamento dovute agli organismi e ancora di più quella di un sensore elettrochimico, cioè di una pila biologica in grado di monitorare la crescita di strati di batteri, i biofilm, sui tubi degli scambiatori di calore costruiti negli impianti, lo aveva comunque illuminato e sicuramente affascinato.

«Stai sfruttando energia elettrica generata dai microbi!», esclamò. «Perché non esplori la possibilità di produrre elettricità?». Lo guardai scettica e, beffarda, argomentai che ci sono altri modi ben più efficaci per produrre energia elettrica: nelle pile in questione si generavano tensioni e densità di corrente molto basse. Io sfruttavo i fenomeni elettrici indotti dai batteri per sviluppare sensori in campo industriale e ambientale, anche perché, sebbene nel nostro sistema l'elettricità fosse generata da batteri in grado di catalizzare la reazione di trasformazione dell'ossigeno ad acqua su un elettrodo di acciaio inossidabile, cioè sul polo positivo, l'energia per la reazione era fornita da un altro elettrodo di zinco, il polo negativo: un fenomeno più simile alla corrosione microbiologica dei metalli che a una pila a combustibile.

Solo anni dopo ho scoperto che analoghe considerazioni avevano frenato lo sviluppo delle «celle a combustibile microbiche» all'inizio del secolo scorso. Un botanico britannico aveva sperimentato celle a combustibile alimentate con una soluzione di zucchero e lievito già nei primi anni del Novecento. Anche in quel caso l'osservazione di una tensione assai bassa, dovuta inequivocabilmente a un intervento microbico, non aveva suscitato molta attenzione da parte del mondo industriale. Fino agli anni novanta, l'«energia microbica» è stata per lo più oggetto di fantasiosi brevetti privi di reale applicazione pratica, come quello di un improbabile sottomarino.

Questi fenomeni suscitavano molto più interesse e dibattito scientifico per i danni causati ai materiali, imputabili alla corrosione microbiologica. Non a caso, l'argomento era stato al centro anche dei miei studi fin dall'inizio della carriera da biologa, nel gruppo di elettrochimica e corrosione del Centro di ricerca termico e nucleare dell'ENEL. Nel frattempo lo sviluppo delle biotecnologie, i problemi legati allo smaltimento dei rifiuti e dell'inquinamento di acque e suoli, l'attenzione per forme di produzione di energia rinnovabile hanno cambiato lo scenario.

Tra il 2004 e il 2007 Alain Bergel, coordinatore di un progetto sull'attività elettrica dei batteri in cui ero coinvolta, e Alfonso Mollica, un ricercatore del Consiglio nazionale delle ricerche di Genova con il quale dividevo da molti anni alcuni studi mi

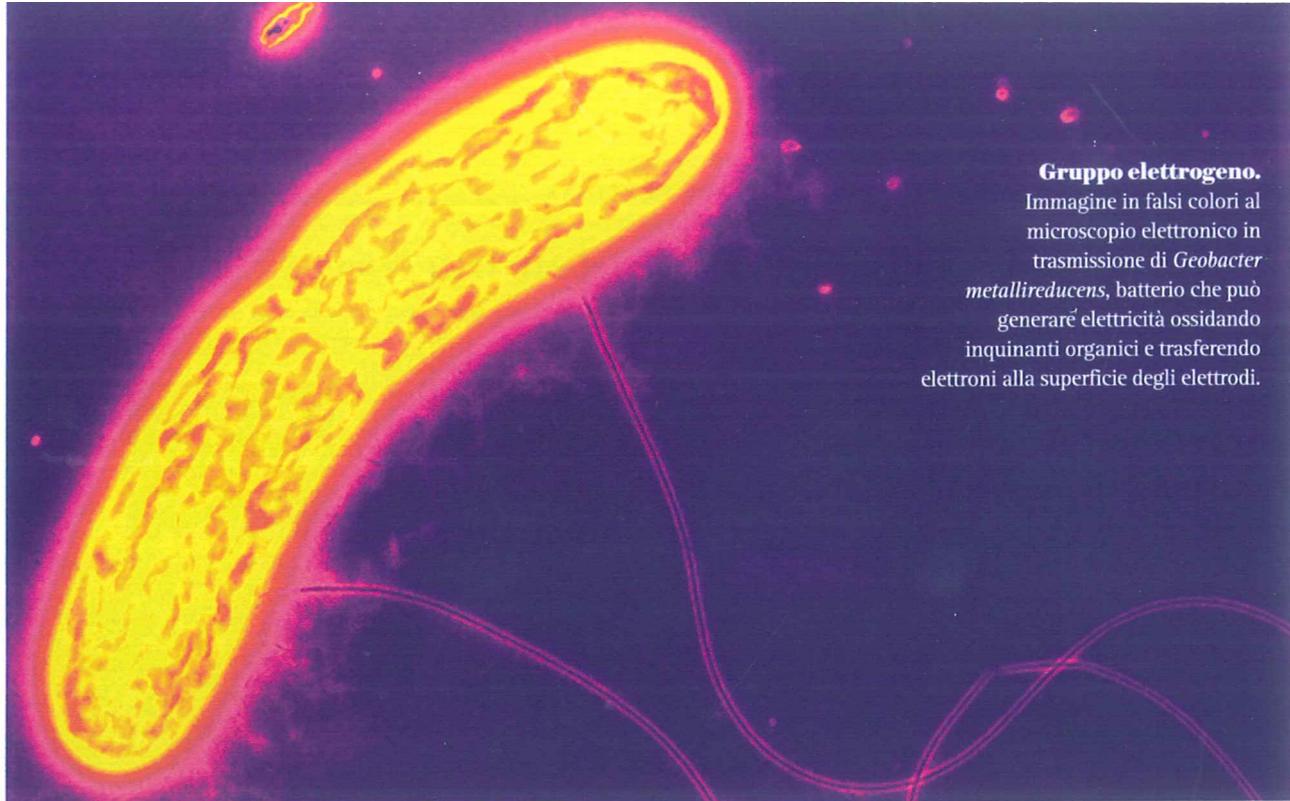
confidarono di voler finalizzare quelle stesse ricerche per rendere più competitiva la tecnologia delle celle a combustibile a bassa temperatura, ancora troppo costosa per decollare. Nello stesso periodo infatti alcuni gruppi già avevano iniziato a sperimentare elementi con cui costruire pile microbiche basate sulla degradazione biologica delle sostanze inquinanti di natura organica.

Nel 2005 infatti la pubblicazione di un articolo su «Nature» in cui veniva documentata l'abilità di batteri *Geobacter sulfurreducens* nel trasferire direttamente gli elettroni a un elemento della pila aveva catturato l'attenzione di molti di noi, fino a quel momento concentrati sugli effetti negativi della corrosione microbiologica. Fu risolutivo un incontro con Willy Verstraete, uno dei pionieri di questo campo e professore all'Università di Gent, in Belgio, in cui descriveva come sarebbe stato possibile sfruttare l'energia dispersa nei reflui fognari con celle a combustibile «microbiche».

Notavo con un po' di stupore come fino a quel momento, per quello che potrebbe definirsi un «difetto professionale», gli ingegneri della depurazione delle acque avessero concentrato tutti gli sforzi sulla reazione microbica di degradazione delle sostanze inquinanti organiche. Al contrario, noi esperti di materiali che conoscevamo bene il contributo dei biofilm batterici nella corrosione microbiologica nutrivamo un scarso interesse per reazioni chimiche diverse da quelle che comportano la dissoluzione dei metalli, uno dei meccanismi di corrosione. L'incontro tra i due mondi avvenne in seguito, nel 2008. Da allora la sfida a realizzare per primi sistemi elettrochimici completamente microbici a scopi tecnologici, e non solo per la produzione di energia elettrica, impazza a livello mondiale. Aveva ragione il responsabile dell'ufficio brevetti: perché non esplorare le possibilità di sfruttare in modo positivo l'energia elettrica prodotta dai microbi?

I sistemi bio-elettrochimici

Un sistema elettrochimico si crea quando un conduttore elettrico si trova in contatto con una soluzione conduttrice di ioni, cioè elementi o molecole cariche dal punto di vista elettrico, tipicamente una soluzione acquosa. In questo caso una forza, chiamata forza elettromotrice, può indurre la circolazione di una corrente



Gruppo elettrogeno.

Immagine in falsi colori al microscopio elettronico in trasmissione di *Geobacter metallireducens*, batterio che può generare elettricità ossidando inquinanti organici e trasferendo elettroni alla superficie degli elettrodi.

elettrica tra il mezzo liquido e quello solido. Questa circolazione è sostenuta da reazioni chimiche che avvengono ai capi dei due poli (negativo e positivo). La forza elettromotrice è spontanea nel caso delle pile, ed è generata da una differenza del cosiddetto potenziale termodinamico, un parametro caratteristico di ogni specie chimica che ne quantifica l'affinità per gli elettroni, tra la specie che acquista elettroni, o come dicono gli addetti ai lavori «si riduce», e quella che li cede, ovvero si ossida. Invece nei cosiddetti sistemi di elettrolisi la forza elettromotrice è imposta tramite apparecchiature in grado di forzare la polarità tra gli elettrodi. In questo modo le reazioni che alimentano la circolazione di corrente elettrica possono avvenire anche al contrario, nella direzione sfavorita dal punto di vista del potenziale termodinamico. La continuità del circuito elettrico esterno e delle specie chimiche cariche elettricamente in soluzione garantisce il flusso di corrente in entrambi i sistemi elettrochimici descritti.

Lo scambio di elettroni tra solido e liquido è più difficile di quello tra due sostanze sciolte entrambe nel liquido, e richiede più energia. Per questo gli elettrodi solidi sono coperti da catalizzatori, sostanze che hanno il compito di facilitare, catalizzare, l'interazione con le molecole del liquido, diminuendo l'energia necessaria per innescare la reazione. I catalizzatori sono generalmente a base di metalli nobili come il platino, quindi inerti, e hanno una geometria specifica, tale da moltiplicare i centri attivi in cui la reazione di ossidoriduzione descritta prima viene favorita.

Un sistema bio-elettrochimico si differenzia da un sistema elettrochimico perché sfrutta molecole biologiche – come enzimi, complessi o catene di enzimi, intere cellule, batteri, altri microrganismi – per la catalisi di una o di entrambe le reazioni a uno o a entrambi gli elettrodi. Le comunità di microrganismi possono catalizzare alcune o tutte le reazioni di ossidazione del combustibile (sostanza organica) e del trasferimento di elettroni fino all'accettore finale, di solito l'ossigeno. I batteri possono usare diversi meccanismi, diretti e indiretti, per il trasferimento degli elettroni agli elettrodi, e ciascuno di questi meccanismi necessita ancora di approfonditi studi per essere confermato.

La prerogativa naturale dei microrganismi di indurre i feno-

meni elettrici tramite le reazioni di ossidoriduzione enzimatiche può essere sfruttata in vario modo: per la produzione di energia elettrica direttamente dalla degradazione della sostanza organica tramite celle a combustibile microbiche; per accelerare processi di degradazione di composti organici complessi e poco biodegradabili con i processi biotecnologici più tradizionali; per la produzione di composti chimici o biocombustibili tramite celle di elettrolisi microbiche.

La cella a combustibile microbica (si veda il box a p. 58) è di particolare interesse tecnologico perché, in linea di principio, rende possibile il trasferimento dell'energia chimica contenuta in qualsiasi forma di sostanza organica biodegradabile anche residuale, in particolare nelle acque reflue, direttamente in energia elettrica rinnovabile, operando a bassa temperatura, senza ricorrere al ciclo di conversione termica dell'energia. Nel caso dell'elettrolisi microbica, l'energia ricavata dalla degradazione della sostanza organica può essere convertita in forza elettromotrice per forzare l'equilibrio della reazione di ossidoriduzione dell'acqua nella direzione di produzione dell'idrogeno, uno dei vettori di energia più promettenti; basti pensare allo sviluppo di veicoli alimentati con questo gas.

Acqua depurata, e non solo

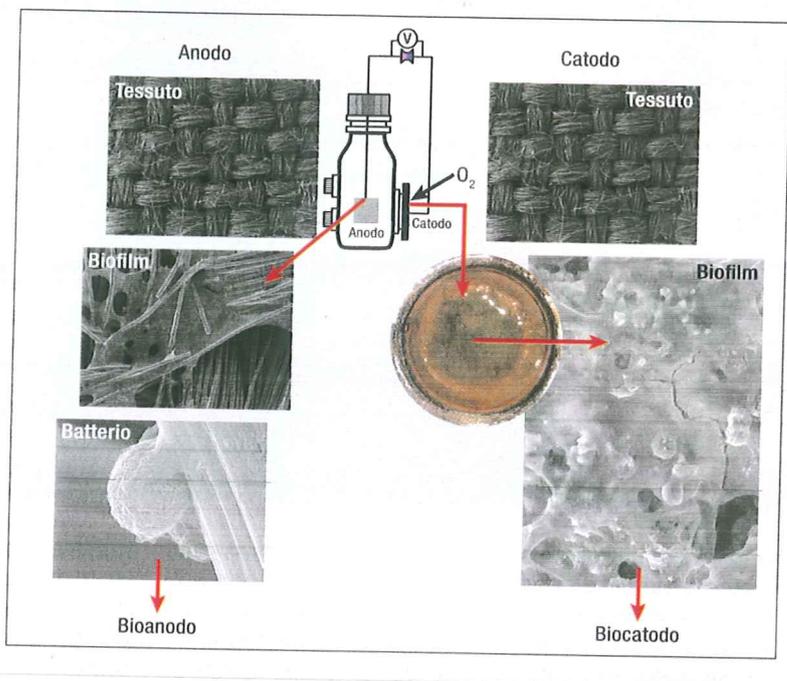
I sistemi bio-elettrochimici trovano un ruolo naturale, ma non esclusivo, negli impianti industriali biotecnologici già operativi, come i depuratori. Questi sistemi potrebbero contribuire all'ottimizzazione dei processi di depurazione, oltre che alle esigenze energetiche dell'impianto. Non a caso, una delle più importanti sperimentazioni è in corso al depuratore di Milano-Nosedo, uno dei più grandi e moderni d'Europa.

Il processo di depurazione richiede energia soprattutto per assicurare il contributo di ossigeno in modo uniforme all'interno delle vasche in cui viene effettuato uno dei trattamenti di degradazione delle sostanze inquinanti di natura organica che si trovano nei reflui. Potendo riprodurre nell'impianto il rendimento delle pile microbiche ottenuto con la sperimentazione di laboratorio (maggiore del 30 per cento), l'energia ricavata, corrispondente a una

La cella a combustibile microbica

In una cella a combustibile microbica i batteri vivono all'interno di complessi biofilm adesi su uno o entrambi gli elettrodi (anodo e catodo) della pila. Nei biofilm anodici avviene la degradazione totale o parziale delle sostanze organiche in assenza di ossigeno, con la produzione di anidride carbonica e altri eventuali composti organici semplici, ioni idrogeno ed elettroni. L'ossigeno, presente solo sul catodo, richiama gli elettroni ed è responsabile della forza elettromotrice che si genera ai capi della pila. Acquisendo gli elettroni e reagendo con gli ioni idrogeno che diffondono dall'anodo, l'ossigeno si trasforma dalla forma gassosa in ione OH^- e quindi in acqua.

Nel caso in cui gli elettrodi sono separati da una membrana elettrolitica semipermeabile che impedisce la colonizzazione microbica del catodo, la reazione di riduzione dell'ossigeno ad acqua può avvenire con l'aiuto di un catalizzatore chimico come il platino. Il biocanodo è tipicamente costituito da un materiale poroso, ed è opportunamente trattato per favorire l'insediamento batterico, con una faccia esposta all'aria e l'altra alla stessa soluzione anaerobica dell'anodo.



potenza continua di 600 chilowatt, sarebbe sufficiente per coprire la domanda energetica dell'impianto stesso. Altri prodotti (biocombustibili di seconda generazione e nuovi sistemi di risanamento ambientale) sono attesi dallo sfruttamento dei meccanismi di bio-elettrolisi applicati a composti solidi e più complessi dei reflui, per esempio fanghi di depurazione, scarti agroalimentari o ligno-cellulosici. In altre parole, in futuro anche le sostanze organiche contenute per esempio nel terriccio di un vaso potrebbero essere sfruttate per generare elettricità.

Le sperimentazioni in corso

Il fatto di poter contribuire sia alla soluzione di problematiche energetiche sia allo smaltimento di rifiuti e inquinanti sta richiamando l'attenzione di scienziati di ambiti molto diversi tra loro disposti a mettersi in gioco e a collaborare senza pregiudizi. Sebbene ancora di frontiera, nel medio termine queste ricerche potrebbero portare innovazioni sorprendenti, anche se al momento possono sembrare solo esperienze didattiche divertenti.

È questo il caso, per esempio, dei prototipi di robot alimentati con rifiuti progettati all'Università di Bristol, dove Ioannis Jeropoulos e il suo gruppo del Robotics laboratory ha già sperimentato con successo l'uso di celle a combustibile microbiche per catturare le zanzare o per alimentare il telefono cellulare con urina umana.

Di recente abbiamo avuto una testimonianza di come una stretta collaborazione tra gruppi di ricerca di diversa estrazione porti a un'accelerazione della ricerca, grazie alla sperimentazione in corso al depuratore di Milano-Nosedo, un sito su cui converge l'attenzione di diversi istituti universitari.

In continuità con gli studi che avevano portato a realizzare sensori elettrochimici per l'ottimizzazione dei trattamenti biocidi, l'approfondimento dei fenomeni elettrici indotti dai batteri ha con-

sentito di mettere a punto una pila molto semplice, priva di membrana di separazione tra i due elettrodi di carica opposta e senza catalizzatori chimici, in cui i biofilm batterici hanno molti ruoli, agendo da catalizzatori delle reazioni di riduzione che avvengono al catodo e di quelle di ossidazione che avvengono all'anodo, e addirittura da elettrolita di separazione tra anodo e catodo, che permette la circolazione delle cariche. Il biofilm, costituito dall'80 per cento o più di acqua, è un buon conduttore di ioni. Il primo insediamento di batteri sul catodo intercetta e consuma l'ossigeno, costruendo una barriera via via più anaerobica, cioè con contenuto di ossigeno sempre più scarso, ideale per lo sviluppo di molte altre comunità batteriche per cui l'ossigeno è veleno.

L'ambiente anaerobico si preserva con il metabolismo della sostanza organica in soluzione, fino all'anodo. L'alternanza tra metabolismo aerobico, cioè in presenza di elevate concentrazioni di ossigeno, e anaerobico, e delle specie nel biofilm può essere modulata dalla comunità batterica, in funzione delle condizioni ambientali e delle fonti di energia disponibili, compresa la luce. Catturando l'energia della luce, o più semplicemente usando come vettori sostanze che si ossidano e riducono, con un andamento ciclico dovuto a un'azione sinergica di diversi organismi, il processo della pila può essere sostenuto anche quando la differenza di potenziale tra i due elettrodi si riduce a poche centinaia di millivolt e il catodo diventa quasi privo di ossigeno. Questo meccanismo, ancora oggetto di studio, ha avuto le prime conferme; al Dipartimento di scienze ambientali e del territorio dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca, per esempio, sono già stati identificati diversi batteri che convivono comunemente negli ambienti anaerobici.

Il sistema microbico a singolo comparto e senza membrana supera alcuni dei principali colli di bottiglia che riguardano la tecnologia delle celle a combustibile a idrogeno, rappresentati dall'ele-



Test sul campo. Il depuratore di Milano-Nosedo, uno dei più grandi e moderni d'Europa, sede di una delle sperimentazioni più importanti nell'ambito della produzione di energia elettrica grazie all'ossidazione di sostanze organiche inquinanti operata da alcune specie batteriche.

vato costo dei componenti, e soprattutto di quello della membrana protonica, semipermeabile al passaggio degli ioni idrogeno dall'anodo al catodo, e di quello del platino, usato come catalizzatore. Questi componenti assicurano alle celle a combustibile a idrogeno prestazioni più elevate di alcuni ordini di grandezza rispetto a quelle delle pile microbiche, ma finora sono risultati fattori limitanti per lo sviluppo industriale dei sistemi elettrochimici.

Di contro, la potenza prodotta con il semplice sistema microbico è ancora dell'ordine di un watt per metro cubo di refluo, quindi ben lontana dal valore di un chilowatt per metro cubo ipotizzato nel 2008 dai pionieri di questa tecnologia e, per la verità, non ancora raggiunto dai laboratori che studiano l'argomento.

Nelle condizioni controllate del laboratorio, oltre a fornire ai batteri un substrato molto semplice da digerire la soluzione può essere resa molto conduttiva, controllando in questo modo anche variazioni eccessive della concentrazione degli ioni idrogeno, cioè del pH, e altri fattori che possono influire negativamente sulla potenza erogata. Le celle inoltre hanno dimensioni di pochi centimetri nonostante la produttività sia poi normalizzata arbitrariamente al metro, su una scala geometrica riferita alla superficie di uno degli elettrodi o al volume della soluzione di refluo trattato.

Forse anche per queste ragioni i sistemi bio-elettrochimici per il trattamento spinto di inquinanti saranno disponibili prima degli impianti che generano elettricità. Negli studi effettuati in collaborazione con l'Università di Bristol e con l'Università del Connecticut è stata verificata e documentata, per esempio, la possibilità di abbattere i comuni inquinanti presenti nelle urine, tra i quali il fosforo e i composti azotati. In collaborazione con l'Università di Milano, inoltre, è iniziata una sperimentazione mirata alla cattura di microinquinanti dei laghi prealpini caratterizzati da una stratificazione aerobica-anaerobica dell'acqua.

Sulla base di questi risultati, il centro Ricerca sul sistema energetico (RSE) di Milano ha ideato un progetto tutto italiano, denominato «Luce bioelettrica», ora finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e dalla Regione Lombardia. Questo progetto ha raccolto la sfida di sperimentare prodotti pre-competitivi, con la collaborazione dell'Università degli Studi di Milano e di alcune aziende italiane (Elettromar, Milanodepur, e Amel), anch'esse «elettrizzate» dal fascino dell'energia microbica.

Immaginare un impianto di produzione elettrica in cui i batteri sono i protagonisti dell'intero processo, e non più solo gli artefici di effetti indesiderati quali la corrosione e il rischio biologico, è il potenziale prorompente che spinge la ricerca industriale.

I microrganismi hanno già dimostrato di poter sostituire efficacemente diversi componenti di un sistema elettrochimico, mentre rimane ancora necessario ricorrere ai materiali tecnologici, come leghe metalliche o fibre di carbonio, per il circuito elettrico conduttore. Gli organismi hanno dovuto risolvere il problema del trasporto di segnali elettrici senza l'aiuto di questi materiali, praticamente inaccessibili al metabolismo. I nervi trasmettono informazioni con processi elettrochimici, ma i metalli sono molto più efficienti nel condurre potenza elettrica, almeno per ora. ■

PER APPROFONDIRE

Recent Advances in Microbial Fuel Cells (MFCs) and Microbial Electrolysis Cells (MECs) for Wastewater Treatment, Bioenergy and Bioproducts. Zhou M., Gu T. e altri, in «Journal of Chemical Technology and Biotechnology», in Vol. 88, n. 4, pp. 508-518, aprile 2013.

The Microbe Electric: Conversion of Organic Matter to Electricity. Lovely D., in «Current opinion in Biotechnology», Vol. 19, n. 6, pp. 564-571, dicembre 2008.

Sito web dell'International Society for Microbial Electrochemistry and Technology: www.is-met.org.