

CAPITOLO SETTIMO

La cassetta degli attrezzi della *chimica verde 5.0*

Quando devo rappresentare ai miei studenti qualche esempio di come la tecnologia abbia già in tante occasioni surclassato la natura e i suoi meccanismi, rispolvero Icaro o le macchine volanti di Leonardo ispirate agli uccelli. Le paragono al Boeing 787, l'ammiraglia della flotta Boeing costruita per l'80% in composito plastico e dotata di due potenti turboreattori. Un cambiamento radicale di meccanismo per andare più veloce della natura. Nella cassetta degli attrezzi della *chimica verde 5.0* troviamo strumenti che mimano i processi naturali per renderli più efficienti ai nostri fini.

La fotosintesi artificiale

La fotosintesi artificiale nasce per superare i limiti della fotosintesi naturale, in particolare quelli as-

sociati all'efficienza di conversione della radiazione solare in energia chimica e alla stabilità di funzionamento.

Nonostante siano in fase di studio sistemi che portano alla conversione contemporanea di acqua e CO_2 in composti chimici, esattamente come accade nelle piante accoppiando la fase luminosa del ciclo e quella non luminosa, l'obiettivo principale della fotosintesi artificiale è la produzione di idrogeno (e ossigeno) dall'acqua. Una volta che l'idrogeno è reso disponibile, questo può poi essere impiegato per «ridurre» il CO_2 a formare composti e materiali organici.

Il primo passo per superare la fotosintesi naturale in termini di efficienza è convertire l'energia radiante, associata alla parte più estesa possibile dello spettro solare, in energia elettrica. Questa è la missione dei pannelli fotovoltaici e più specificamente dei semiconduttori che essi ospitano nelle celle che li costituiscono.

I semiconduttori sono materiali presenti in molti dispositivi elettronici che hanno caratteristiche intermedie tra un isolante e un conduttore. Una tipica cella fotovoltaica è formata da due diversi semiconduttori in silicio: uno è stato trattato con altri elementi (in gergo si dice che è stato *drogato*) per avere un eccesso di elettroni liberi (semiconduttori di *tipo n*); l'altro possiede delle lacune (buche) elettroniche e può accogliere facilmente elettroni (semiconduttori di *tipo p*). Per questo motivo i due semiconduttori posti a contatto tra loro creano un campo elettrico: quando la luce solare colpisce la

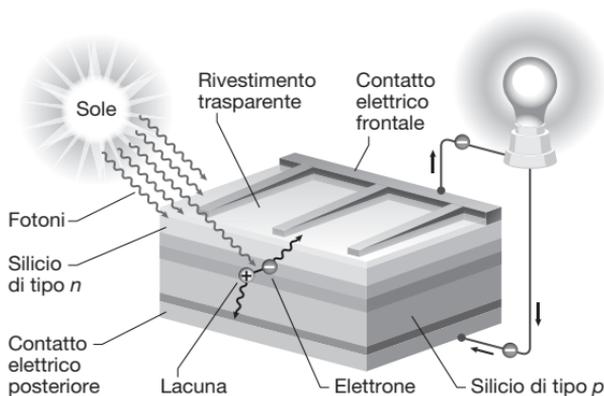


Figura 38. Schema di una cella fotovoltaica in sezione. L'accoppiamento di due diversi semiconduttori permette la produzione di energia elettrica dalle radiazioni luminose.

cella fotovoltaica, gli elettroni strappati al silicio vengono «guidati» da questo campo lungo un circuito, generando corrente elettrica (figura 38).

Nel tempo l'efficienza del fotovoltaico è aumentata moltissimo: nel 2023 il record attuale di efficienza è stato conseguito in Europa, al Fraunhofer Institute of Technology di Friburgo ed è pari al 47,6%, mentre i primissimi pannelli arrivavano a pochi punti percentuali.

La struttura di questi pannelli ad altissima efficienza è basata su un concentratore solare (chiamato *lente di Fresnel*) che concentra la radiazione su un wafer¹⁴ formato da diversi strati di semiconduttori. Ciascuno strato assorbe e converte una porzione

¹⁴ In elettronica i *wafer* sono lamine di materiale semiconduttore che supportano altri componenti, per esempio un circuito integrato.

dello spettro solare, ed è proprio da qui che deriva l'eccezionale efficienza di conversione. Questo tipo di celle è già prodotto industrialmente, ma a costi compatibili solo con applicazioni spaziali.

Oggi le celle solari di riferimento per il mercato energetico sono quelle al silicio cristallino. Per esempio, l'impianto fotovoltaico del vostro condominio utilizza questo tipo di tecnologia, in grado di erogare potenza elettrica con efficienze superiori al 20% su scala commerciale e 25% in laboratorio, a costi oramai competitivi con le tecnologie convenzionali (inferiori a 1 €/W).

La produzione del silicio cristallino presenta però qualche problema di impatto ambientale indiretto a causa della grande quantità di energia necessaria per ridurre a metallo il silicio presente nella silice (SiO_2) di partenza. Grandi aspettative sono riposte nelle celle a base di *perovskite*, un minerale recentemente studiato da Michael Grätzel nella sua applicazione ai dispositivi di conversione dell'energia solare (EPFL, Politecnico Federale di Losanna, in Svizzera).

Oltre alle proprietà uniche della *perovskite*, infatti, le celle fotovoltaiche basate su questa tecnologia possono essere fabbricate con tecnologie semplici e veloci, il che fa prospettare una sicura scalabilità a livello industriale. I più importanti atenei e centri di ricerca mondiali stanno quindi investendo molte risorse umane ed economiche sullo sviluppo di celle solari a *perovskite*, e ciò ha portato a un vertiginoso incremento delle efficienze di conversione della luce solare attraverso questa tecnologia, che ora supera il 30%.

Ogni nuova tecnologia porta però con sé una serie di limitazioni da superare prima di poter essere posta in commercio. In questo caso, le celle solari a perovskite sono soggette a notevoli perdite di efficienza quando sono esposte alla luce ultravioletta (che costituisca il 5% nello spettro solare) e all'umidità atmosferica. Pioggia e sole, quindi, ne provocano il degrado e la completa perdita di funzionalità in pochissimo tempo, nei casi migliori dopo pochi giorni.

Il mio gruppo di ricerca, in una recente collaborazione con l'EPFL di Losanna, l'Istituto Italiano di Tecnologia e il Politecnico di Milano, ha messo a punto per fotopolimerizzazione¹⁵ uno strato polimerico superficiale autopulente, che protegge la cella perovskitica dall'umidità¹⁶. Per contrastare l'invecchiamento dei materiali indotto dalla luce ultravioletta il rivestimento polimerico è stato potenziato con molecole luminescenti in grado di convertire questo tipo di radiazioni in luce non dannosa per la cella solare anch'essa convertibile in elettricità. Con un funzionamento stabile al 19% di efficienza, la cella rappresenta un ulteriore passo avanti verso l'applicazione pratica di questa tecnologia (figura 39 a pagina seguente).

Possiamo quindi essere ottimisti sulla capacità di fare ancor meglio della fotosintesi nel convertire la luce solare in elettricità. Manca però l'equiva-

¹⁵ Polimerizzazione guidata dalla luce.

¹⁶ F. Bella *et al.*, *Science*, 2016.

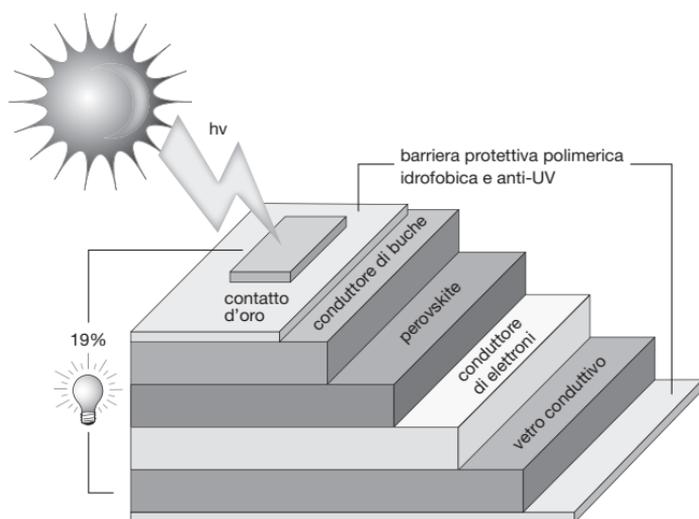


Figura 39. Schema in sezione della cella fotovoltaica sviluppata al Politecnico di Torino in collaborazione con il Politecnico di Milano, l'Istituto Italiano di Tecnologia e l'EPFL di Losanna.

lente della *fase luce-indipendente* della fotosintesi: la sintesi di una sostanza che accumuli l'energia in forma chimica. Nella fotosintesi naturale questo avviene, come abbiamo visto, grazie al ciclo di Calvin che provvede a ridurre il diossido di carbonio grazie all'idrogeno contenuto nell'intermedio NADPH o in altri intermedi simili. Nella fotosintesi artificiale ci si accontenta generalmente di produrre idrogeno. È ormai un decennio che lavoro in questo settore e nel 2016, in un progetto europeo da me coordinato, siamo riusciti a portare questa tecnologia a un prototipo di circa 2 m² di radiazione solare intercettata (figura 40).

In ciascuna delle finestre del prototipo, un foto-anodo a base di BiVO₄ (ossido di bismuto vana-

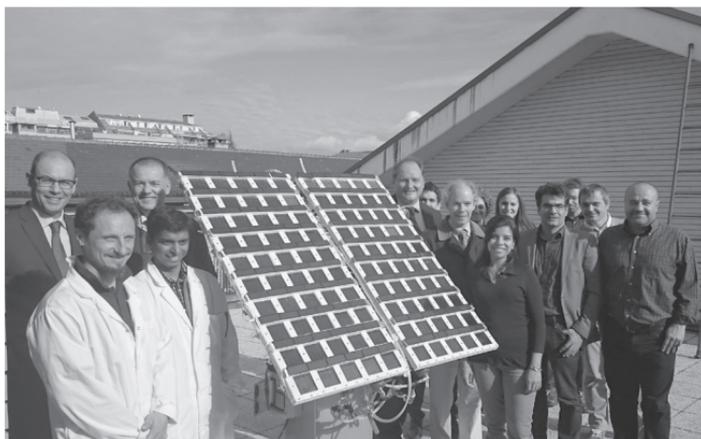


Figura 40. Il prototipo di foglia artificiale realizzato dai partners del progetto europeo Artiphyction con il coordinamento del Politecnico di Torino. Foto: Artiphyction/Politecnico di Torino.

dato), supportato su un ossido trasparente conduttore simile a quelli impiegati sugli schermi degli smartphone, provvede alla fotolisi dell'acqua: né più né meno di quanto fa l'enzima fotosistema II. La luce intercettata dalla cella genera un flusso di elettroni che spezza la molecola d'acqua: all'anodo si libera ossigeno mentre al catodo si libera idrogeno. Una membrana tiene anche separati i due gas (idrogeno e ossigeno) evitando che si miscelino e rendendoli disponibili in forma pura.

L'ossigeno è un sottoprodotto del sistema (valore commerciale: 200 €/t) che, nell'ottica della *blue economy*, è opportuno trovi un impiego a corto raggio. L'idrogeno (valore commerciale: 1000 €/t) è il più prezioso dei prodotti della fotolisi. In esso è accumulata l'energia del Sole sotto forma di energia chimica.

Abbiamo già parlato delle potenzialità dell'idrogeno come vettore energetico, ma possiamo anche usarlo per ridurre il diossido di carbonio e formare composti rinnovabili a base di carbonio (combustibili, materiali e altri composti chimici).

Come abbiamo già visto, ci aiuterà in tal senso una chimica industriale molto simile a quella sviluppata soprattutto in Germania nella prima metà del secolo scorso: la chimica del gas di sintesi ($\text{CO} + \text{H}_2$). Avere idrogeno rinnovabile significa, insomma, avere le chiavi per «resuscitare» il CO_2 e chiudere il ciclo della combustione-utilizzo del CO_2 in modo efficace. Proprio per questo avranno un crescente sviluppo gli *elettrolizzatori*, i reattori elettrochimici votati all'elettrolisi dell'acqua per la produzione di idrogeno e ossigeno.

Non si ha la pretesa, come nella fotosintesi artificiale, di scindere la molecola dell'acqua direttamente sfruttando la radiazione solare. Negli elettrolizzatori si parte direttamente dall'energia elettrica rinnovabile prodotta da pannelli fotovoltaici, pale eoliche, sorgenti idroelettriche e altre tecnologie.

Questa minore ambizione consente anche di poter operare in pressione, con modeste spese di pompaggio dell'acqua usata per l'alimentazione e produrre idrogeno e ossigeno già a diverse decine di bar di pressione, pronti per un loro uso efficace a valle.

Esistono due tipi di elettrolizzatori: quelli alcalini, che operano in un ambiente basico (pH elevati) garantito da un elettrolita ricco di una base

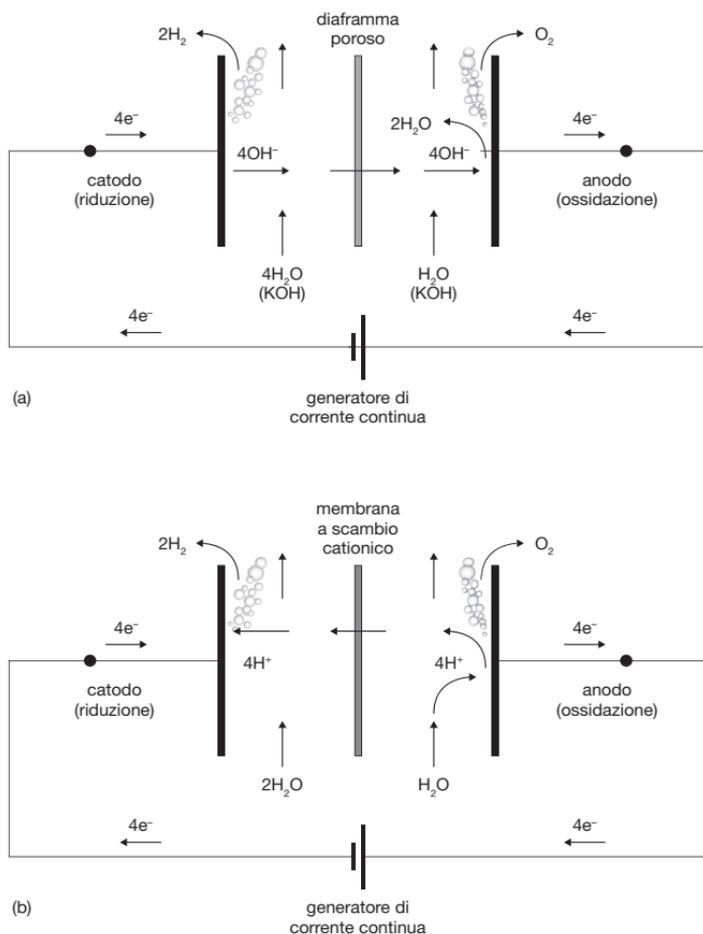


Figura 41. Elettrolizzatori per l'idrolisi dell'acqua a idrogeno e ossigeno: (a) alcalino; (b) a membrana polimerica a scambio cationico.

come KOH (idrossido di potassio), e quelli a base di una membrana a scambio cationico (figura 41).

Questi ultimi elettrolizzatori sono di un certo interesse per le applicazioni *power-to-gas*, che abbiamo già incontrato nel quarto capitolo parlando

di come accumulare l'energia rinnovabile. Secondo questo approccio, ondate di energia rinnovabile, che non possono essere consumate nel momento in cui sono prodotte, potrebbero alimentare gli elettrolizzatori per accumulare energia chimica sotto forma di idrogeno. L'energia accumulata in questo modo sarebbe utilizzata a valle per ridurre il CO₂ e formare metano iniettabile nella rete di distribuzione del gas naturale. Quest'ultima è, infatti, molto meno congestionata di quella elettrica ed è dotata di gasometri per gestire efficacemente domanda e offerta. In alternativa possono essere prodotti combustibili liquidi (si parla in questo caso di *power-to-liquid* e di *e-fuels*) direttamente integrabili nelle relative reti di distribuzione. Oggi invece questi picchi di energia rinnovabile non sfruttabile sono banalmente dissipati dai gestori della rete elettrica per evitare sovraccarichi: non è uno spreco?

Il difetto degli *e-fuel* oggi è il costo molto elevato. L'unico *e-fuel* attualmente in vendita, una benzina a 95 ottani, è commercializzato dalla Zero petroleum a oltre 50 €/litro, ma sarà commercializzato a partire dal 2025! Come i biocombustibili, le prospettive di utilizzo in un mondo «*oil-free*» sono comunque buone in settori come l'aeronautica. Secondo il World Economic Forum (Forum economico mondiale, WEF) i *Sustainable Aviation Fuels*, cioè i «Combustibili Sostenibili per l'Aeronautica», erano una delle dieci tecnologie emergenti del 2023. Anche integrando insieme tutti i progetti di produzione degli *e-fuels* oggi avviati

non arriviamo però a 1% della produzione del solo bioetanolo convenzionale, per ora.

Ma non è finita: nell'industria chimica i reattori chimici tradizionali di tipo catalitico, supportati termicamente da fonti fossili, al momento prevalgono sui reattori elettrochimici, alimentati con l'elettricità. Infatti, costa meno il calore che otteniamo dalla combustione di un combustibile fossile rispetto all'energia elettrica. Ma con il crescere della produzione di energia elettrica rinnovabile e il ridursi dei suoi prezzi la situazione potrebbe capovolgersi, rendendo più conveniente sfruttare l'ampia disponibilità di energia elettrica rinnovabile per alimentare reazioni chimiche in processi produttivi sostenibili, invece di bruciare combustibili. Un futuro roseo per l'elettrochimica, dunque.

La biologia di sintesi e l'ingegneria metabolica

Un futuro altrettanto roseo è alle porte per le nuove scienze e tecnologie biologiche, capaci di compiere processi chimici a temperature prossime a quella ambientale. Gli enzimi sono tra i catalizzatori più efficienti e versatili che si conoscano: le loro prestazioni sembravano inarrivabili per noi scienziati, a meno di non imparare a progettarli e a produrli seguendo le logiche secondo cui è evoluta la natura; ci siamo vicini.

È uno dei traguardi della cosiddetta *biologia di sintesi* il cui fine ultimo è la sintesi di cellule artificiali, capaci di fabbricare composti utili all'essere

umano (farmaci, composti chimici e altro) in modo eccezionalmente efficiente. Per farcela è necessario comprendere il genoma di un organismo. Nella moderna accezione della genetica e della biologia molecolare, il genoma è la totalità del DNA associato ai cromosomi contenuti in una cellula di un organismo vivente. Fanno eccezione molti tipi di virus, in cui esso è costituito da RNA (ma in realtà i virus, come sapete, non hanno una cellula e quindi non sono veri organismi).

I *geni* corrispondono a porzioni di genoma localizzate in precise posizioni all'interno della sequenza di DNA e contengono le informazioni necessarie per la produzione di una proteina (per esempio un enzima) o di RNA. Il gene presenta una diversa struttura a seconda che si considerino organismi procarioti (privi di nucleo, per esempio batteri) o eucarioti (dotati di nucleo, come animali, piante e funghi). Nei primi è costituito prevalentemente da sequenze codificanti, nei secondi contiene anche sequenze non codificanti con funzioni diverse, soprattutto strutturali e di regolazione.

Negli studi di biologia di sintesi, i microrganismi procariotici (batteri, cianobatteri e archei) la fanno da padroni: la maggiore semplicità del loro genoma li rende più facili da manipolare geneticamente per produrre ciò desideriamo in modo stabile e rapido; sono anche più veloci nel riprodursi.

Poco conta che i procarioti non comprendano organismi pluricellulari, a differenza degli eucarioti. Questo non ci interessa, anzi. Il fine ultimo per i nuovi batteri sintetici è l'impiego in bioreattori



Figura 42. Nei bioreattori i microorganismi crescono in condizioni controllate per produrre sostanze chimiche di interesse farmaceutico o industriale. Foto: borzywoj/Shutterstock

(figura 42), un ambiente su misura dove possano riprodursi e produrre in modo controllato.

Non meno ambiziosa è l'*ingegneria metabolica*, che si ripropone di dirigere specificamente il metabolismo di organismi viventi (per esempio quelli che realizzano una fermentazione) verso un ben preciso prodotto a noi utile. Per fare ciò è però necessaria una profonda conoscenza della genetica e delle capacità metaboliche del microorganismo produttore.

In biologia il metabolismo è l'insieme delle trasformazioni chimiche dedicate al sostegno vitale all'interno delle cellule. Queste reazioni, catalizzate da enzimi, consentono agli organismi di crescere e riprodursi, mantenere le proprie strutture e rispondere alle sollecitazioni dell'ambiente circostante.

In natura il metabolismo è evoluto in complesse reti di reazioni enzimatiche che sono andate ottimizzandosi per garantire la sopravvivenza dell'organismo che le ospita e per permettergli di adattarsi ai cambiamenti del suo habitat.

L'ingegneria metabolica nasce per stravolgere, almeno in parte, questo quadro.

Il batterio nel bioreattore sarà «coccolato», cioè vivrà in un ambiente artificiale protetto dove non sarà più in competizione con le altre specie. Sopravviverà, ma dovrà adattarsi a un metabolismo ridotto. Assumerà carbonio e nutrienti nelle forme che a noi faranno gioco per valorizzare rifiuti, ma si accontenterà, per esempio, di un 10-30% del carbonio che assimilava in condizioni normali a supporto della sua sopravvivenza e riproduzione.

Il resto del carbonio sarà processato secondo nuovi cammini metabolici, da noi indotti, per produrre sostanze a noi utili. Il microorganismo rilascerà queste sostanze apparentemente per lui inutili (o in eccesso) nelle sue secrezioni, e noi saremo pronti a separarle e purificarle. In figura 43 è illustrato il terreno di azione dell'ingegneria metabolica.

I microrganismi saranno modificati per assimilare al meglio i *substrati* da convertire (i più rilevanti ai fini della chimica verde sono riassunti nel riquadro a sinistra della figura 43). All'assimilazione del substrato segue il *catabolismo*, ossia quella parte del metabolismo che trae energia dal substrato disgregandolo e convertendolo in almeno uno dei prodotti del *metabolismo centrale*. Questo rappresenta una catena di reazioni biochimiche che coin-

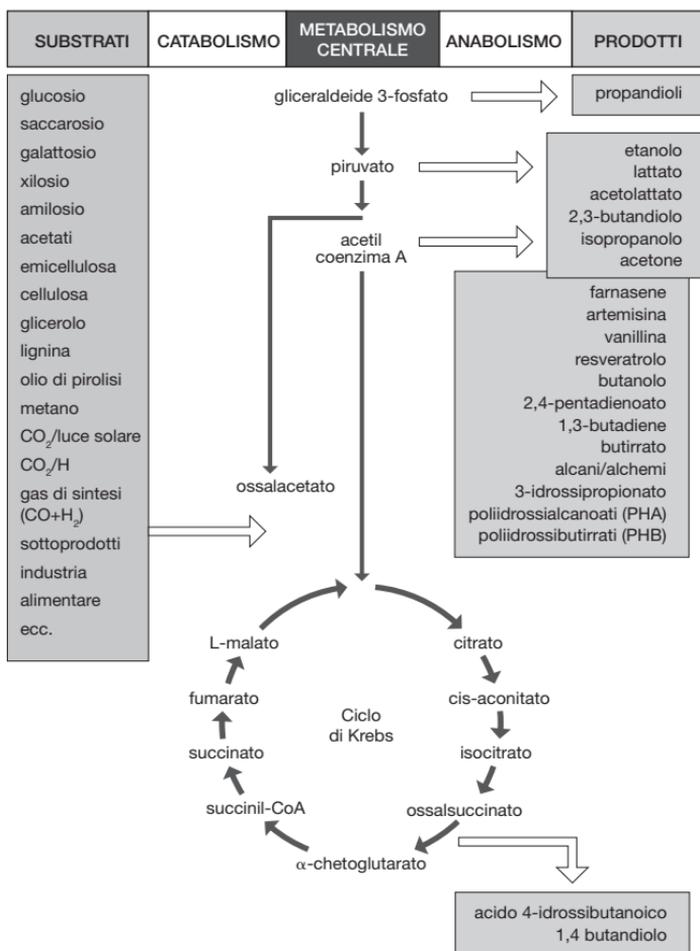


Figura 43. Il terreno dell'ingegneria metabolica: da substrati sostenibili a prodotti sostenibili.

volgono una serie di intermedi metabolici (indicati nella parte centrale della figura 43), comuni a moltissime specie. Questi intermedi a loro volta sono i precursori per la biosintesi di amminoacidi, acidi grassi, colesterolo e glucidi attraverso il cosiddetto

anabolismo, dove la sintesi è favorita anche grazie all'energia immagazzinata durante il catabolismo.

Ancora una volta però interferiremo in questa fase anabolica impiantando cammini metabolici: partendo di volta in volta dal composto intermedio del metabolismo centrale più conveniente, i microrganismi ci porteranno alla sintesi dei prodotti di nostro interesse, con le massime rese compatibili con la loro sopravvivenza e la loro stabilità di funzionamento. I prodotti nei riquadri a destra della figura sono solo alcuni esempi.

Per compiere tutto questo bisogna trasferire nel batterio, con un apposito vettore (per esempio un plasmide), una sequenza genomica appositamente costruita grazie alla tecnica del *DNA ricombinante*, così da modificare le istruzioni con cui la cellula evolve e si struttura (la cosiddetta *rete di regolazione genica*) attivando con altrettante serie di enzimi i nuovi cammini metabolici. Oggi esistono strumenti molto efficienti ed economici per fare questo, come la tecnologia CRISPR¹⁷.

Biologia di sintesi e ingegneria metabolica sono ambiti vicini tra loro, che a volte si compenetrano potenziandosi a vicenda. Sono settori scientifici in cui convergono conoscenze diverse: la biochimica, la genetica, la chimica fisica, la fisica dei sistemi complessi, l'informatica. Volendo anche l'ingegneria chimica, solo su una scala di qualche ordine di

¹⁷ Per saperne di più su CRISPR in questa collana puoi leggere *Curarsi nel futuro*, di Angela Simone e Valentina Fossati (Zanichelli, 2017).

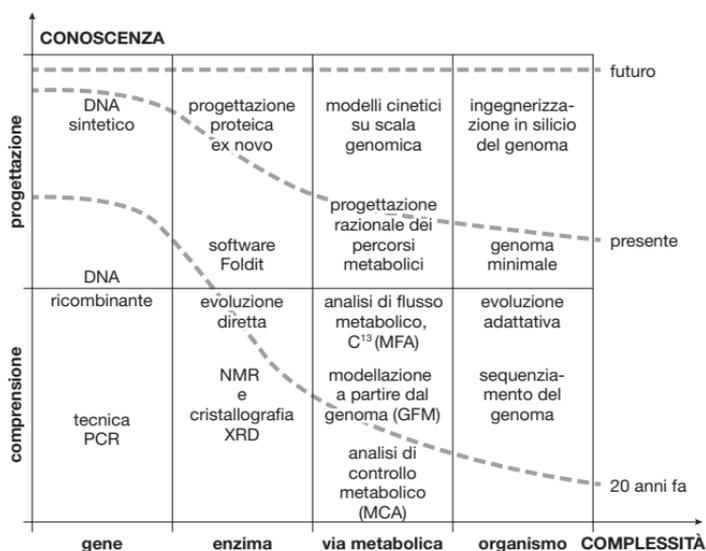


Figura 44. I progressi e le promesse della ingegneria metabolica e della biologia di sintesi alle diverse scale della loro azione. Quadro aggiornato rispetto a quanto in Julleson *et al.*, *Biotechnology Advances*, 2015.

grandezza inferiore a quella a cui l'ingegnere è abituato a operare. Gli enzimi sostituiscono i reattori, le membrane i processi di separazione, gli accumuli endocellulari di composti intermedi i serbatoi e i silos di stoccaggio.

Non conosco un settore altrettanto stimolante per un lavoro di squadra interdisciplinare, cementato dalla ambizione di scoprire quanto ancora di oscuro rimane e di poter plasmare la materia per imprimere la rivoluzione sostenibile alla nostra società. Di oscuro rimane oggi molto di meno di quanto non lo fosse 20 anni fa (figura 44).

Abbiamo imparato a «leggere» il genoma e la tecnica della PCR (*Polymerase Chain Reaction*, rea-

zione a catena della polimerasi) ci ha consentito di amplificare un singolo frammento di DNA, generandone milioni di copie così da poterne studiare con precisione le sequenze. Con la tecnica del DNA ricombinante abbiamo poi imparato a tagliare e cucire diverse sequenze di DNA, anche di organismi diversi, creando nuove combinazioni non presenti in natura. Col crescere delle conoscenze della biologia di sintesi abbiamo, più di recente, anche imparato a «stampare» nuove molecole di DNA senza la necessità di partire da molecole preesistenti.

Nel settore degli enzimi, con l'affinarsi delle tecniche di caratterizzazione (microscopia a trasmissione a freddo, risonanza magnetica nucleare, diffrazione di raggi x su cristalli di enzimi) abbiamo prima di tutto compreso la struttura, la composizione e la funzione di molti enzimi naturali. Con l'*evoluzione diretta* abbiamo poi imparato a intensificare le mutagenesi dei geni che stanno alla base dell'evoluzione naturale. Abbiamo così creato nuovi microrganismi in grado di sintetizzare nuovi enzimi, alcuni dei quali sono più efficaci di quelli originari.

Grazie a programmi software come *FoldIt*, che addirittura si basa su un videogame usato da centinaia di migliaia di utenti¹⁸, siamo ora in grado non solo di visualizzare una proteina nello spazio tridimensionale, ma anche di progettarne un'evoluzione. In questo modo possiamo ottenere varianti

¹⁸ Con *FoldIt* chiunque sul proprio computer può aiutare la ricerca giocando a ripiegare proteine virtuali (<https://fold.it/>).

più adatte a interagire con un ben preciso substrato così da convertirlo in un ben preciso prodotto. Con questa consapevolezza stiamo muovendo i primi passi nella progettazione *ex novo* di proteine enzimatiche, senza partire da proteine già presenti in natura.

D'altro canto oggi conosciamo bene i principali percorsi metabolici condotti da molti microrganismi grazie a tecniche con la MFA (*Metabolic Flux Analysis*, analisi dei flussi metabolici) condotta incrociando analisi sperimentali (con substrati marcati con l'isotopo del carbonio ^{13}C) e simulazioni numeriche. Con altre tecniche come la GEM (*Genome-based Modelling*, modellazione basata sul genoma) abbiamo poi imparato a correlare alla struttura dell'intero genoma di un organismo la sua rete di reazioni metaboliche, precedentemente individuate con tecniche di controllo metabolico (MCA, *Metabolic Control Analysis*). Tutto questo ci porta oggi a muovere i primi passi per la progettazione consapevole di nuovi genomi, in grado di far svolgere alle nostre microscopiche «fabbriche» percorsi metabolici più efficienti (per i nostri scopi) grazie a nuovi insiemi di enzimi.

Infine, dopo aver sequenziato il genoma di molti organismi naturali determinandone l'esatta sequenza di nucleotidi (primo fra tutti il *Saccharomyces cerevisiae* che ci da vino, birra e lievitazione naturale), abbiamo imparato a comprendere a fondo come da un comune antenato l'evoluzione abbia portato a specie diverse per adattarsi a un nuovo ambiente o a un nuovo substrato.

Oggi stiamo muovendo i primi passi nella progettazione di nuovi organismi partendo dalla individuazione del cosiddetto *genoma minimo*, ossia il minimo numero di geni necessario per garantire a una cellula la sopravvivenza e la riproduzione.

Nel 2016 il biotecnologo Craig Venter e i suoi collaboratori, hanno pubblicato un articolo su *Science* in cui annunciavano di avere costruito in laboratorio *JCVI Syn 3.0*. Si tratta del primo batterio con un DNA «sintetico» contenente il minor numero di geni (473) in grado di assicurarne la sopravvivenza e la replicazione, partendo dal genoma del microrganismo naturale *Mycoplasma mycoides* che presenta ben 901 geni. Gli scienziati hanno prodotto artificialmente il *genoma minimo* e lo hanno trasferito all'interno di un altro batterio, *Mycoplasma capricolum*, dopo averne rimosso il patrimonio genetico. Gli stessi autori, però, dichiarano di non avere ancora chiarito la funzione di 149 dei 473 geni presenti in questo microrganismo con genoma «sintetico» (figura 45).

Il lavoro di Venter è destinato a costituire una pietra miliare nella progettazione e costruzione organismi sintetici per gli scopi più vari. Per esempio, possiamo immaginare che in questo settore sarà addirittura possibile realizzare in futuro una sorta di produzione distribuita di farmaci. Con una diagnosi a distanza, un medico ci potrà inoltrare a mezzo di posta elettronica una sequenza genetica che noi useremo per stampare un DNA corrispondente e iniettarlo in un batterio «amico» che produrrà esattamente il farmaco da assumere.

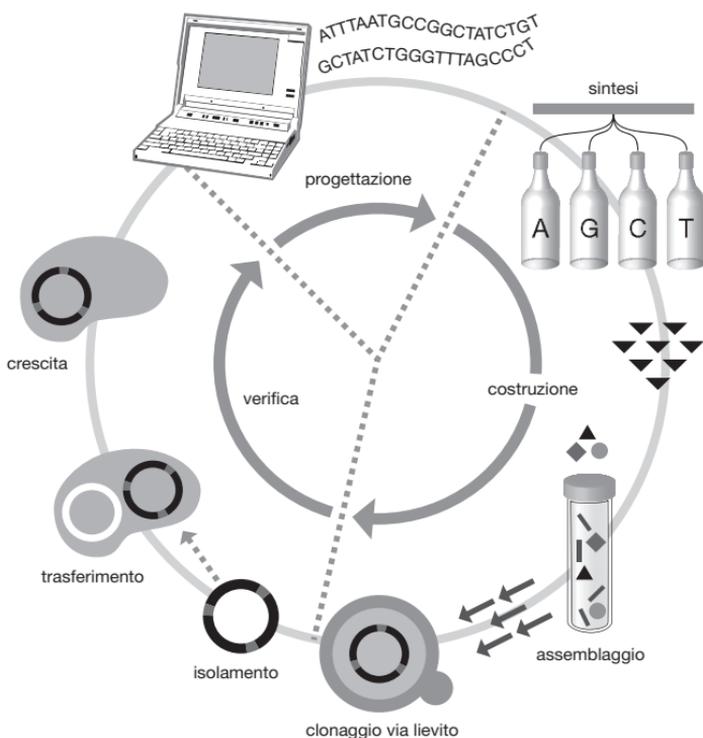


Figura 45. Schema dello sviluppo di *JCVI Syn 3.0*, il batterio con genoma minimo di sintesi. Il genoma progettato e prodotto in laboratorio viene moltiplicato per clonaggio in cellule di lievito. Da qui i genomi sintetici sono isolati e trasferiti in cellule batteriche private del proprio genoma.

È la stessa logica che abbiamo incontrato parlando del *distributed manufacturing*, della stampa 3D o delle comunità energetiche. Produzione e consumo «a km zero» dove i singoli cittadini partecipano al processo di fabbricazione diventando *prosumer*, a metà strada tra produttori e consumatori.