



Co-funded by
the European Union

Foglie solari: come le piante ci insegnano a raccogliere energia



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





SOMMARIO

· Introduzione.....	2
· Come le piante raccolgono l'energia solare.....	3
· Come funziona la fotosintesi?.....	5
· Perché la fotosintesi è essenziale?.....	6
· Imparare dalle piante: come la fotosintesi ispira le energie rinnovabili.....	6
· Tecnologia solare bioispirata.....	7
· In che modo la natura ispira l'innovazione solare?.....	8
· Dalle foglie alle celle solari: approcci biomimetici all'energia sostenibile.....	9
· Innovazioni ispirate alle piante nella raccolta e trasformazione dell'energia solare.....	10
· Fattori che influenzano la fotosintesi e il loro ruolo nella tecnologia solare bioispirata...	13
· Integrazione della realtà aumentata nelle foglie solari: come le piante ci insegnano a raccolgere energia.....	16
· Esempio di esecuzione e miglioramento.....	18
· Risorse.....	22





Argomento generale del percorso di apprendimento	Tecnologia solare bioispirata: imparare dalla natura per ricavare energia
Nome specifico dell'unità didattica	Foglie solari: come le piante ci insegnano a ricavare energia
Età target degli utenti	14-18 anni
Prerequisiti per gli studenti	Conoscenze di base di biologia, chimica, fisica e nozioni introduttive di scienze ambientali.
Descrizione dell'unità didattica	Questa unità introduce studenti e insegnanti alla tecnologia solare bio-ispirata, sottolineando come le piante catturino in modo efficiente l'energia solare attraverso la fotosintesi e come gli scienziati replichino questi meccanismi per soluzioni energetiche sostenibili. Utilizzando Strumenti di realtà aumentata (AR) , gli studenti visualizzeranno il processo di fotosintesi , esplorare celle solari bioibride e sperimentare con progetti di pannelli solari ispirati alla natura . L'unità promuove apprendimento multidisciplinare integrando concetti di biologia, fisica, chimica e ingegneria con esperimenti digitali pratici .
Soggetto coinvolto	Biologia, Fisica, Chimica, Scienze ambientali, Ingegneria, Matematica
Parole chiave	Fotosintesi, Energia solare, Bioispirazione, Biomimetica, Sostenibilità, Energie rinnovabili, Realtà aumentata, Apprendimento interattivo, Tecnologia solare intelligente
Competenze chiave, abilità, conoscenze che possono essere acquisite	- Capire La fotosintesi come processo naturale di energia solare e il suo ruolo nella progettazione sostenibile. - Analizzare come tecnologie solari bio-ispirate imitare la conversione energetica delle piante. - Partecipare a risoluzione dei problemi e innovazione utilizzando principi di biodesign . - Sviluppare Competenze di prototipazione basate





	sulla realtà aumentata visualizzare progetti solari ad alta efficienza energetica. - Fare domanda a Concetto STEM per affrontare sfide energetiche del mondo reale.
Risorse e strumenti didattici utilizzati	-Articoli e libri scientifici sulla fotosintesi e la tecnologia solare bioispirata. Applicazioni di realtà aumentata (per esempio..) McGraw Hill AR, Photosynthesis VR, CoSpaces Edu, Assemblr EDU, Merge Cube) per l'apprendimento interattivo.
Criteri di valutazione e valutazione	La valutazione si baserà su: -Padronanza dei concetti attraverso quiz interattivi e discussioni. Valutazioni pratiche basate sulla realtà aumentata Simulazioni ed esercizi di prototipazione utilizzando strumenti di realtà aumentata. Progettazione creativa del progetto Gli studenti proporranno e presenteranno Un concetto di pannello solare ispirato alla natura. Utilizzo della visualizzazione in realtà aumentata. Feedback e riflessione Gli studenti valuteranno l'efficacia della tecnologia solare bio-ispirata nell'affrontare le sfide della sostenibilità.

Introduzione

Le piante sono le fabbriche verdi della natura, che convertono la luce solare in energia chimica attraverso il processo di fotosintesi. Questo straordinario meccanismo naturale non solo sostiene la vita sulla Terra, ma è anche fonte di ispirazione per le tecnologie all'avanguardia nel campo dell'energia solare. Studiando come le piante catturano e utilizzano in modo efficiente l'energia solare, gli scienziati hanno sviluppato progetti bioispirati che migliorano le prestazioni delle celle solari. Questa unità didattica introduce gli studenti all'affascinante connessione tra fotosintesi ed energie rinnovabili, sottolineando come la realtà aumentata (AR) possa migliorare la loro comprensione di questi concetti.

La fotosintesi è il processo mediante il quale le piante utilizzano la luce solare per produrre glucosio, una forma di energia chimica immagazzinata, rilasciando ossigeno come sottoprodotto. Questo processo avviene in due fasi: le reazioni dipendenti dalla luce e il ciclo di Calvin. Nelle reazioni dipendenti dalla luce, la clorofilla assorbe la luce solare, scindendo le molecole d'acqua in ossigeno, protoni ed elettroni. L'energia generata in questa fase viene immagazzinata in molecole come ATP e NADPH, che vengono poi utilizzate nel ciclo di Calvin per sintetizzare zuccheri dall'anidride carbonica. https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/special-programs/Education_in_Agriculture/sobybean-science/GRC%20Photosynthesis%20lesson-final.pdf (<https://opentextbc.ca/biology/chapter/5-1-overview-of-photosynthesis/>).





Ispirati da questo efficiente sistema di conversione energetica, i ricercatori hanno sviluppato tecnologie innovative come i sistemi fotovoltaici (PV) bio-ispirati. Ad esempio, la "foglia PV" imita la traspirazione delle piante per raffreddare le celle solari, migliorando l'efficienza energetica e riducendo la perdita di calore. <https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/> Allo stesso modo, le celle solari a perovskite sono state migliorate utilizzando tecniche biomimetiche che replicano le membrane lipidiche naturali per proteggere dalla degradazione ambientale mantenendo un'elevata efficienza. <https://techxplora.com/news/2023-08-bio-inspired-solar-devices-boost-stability.html>) (<https://list.solar/news/bio-inspired-1/>)

La realtà aumentata offre un modo unico per visualizzare questi processi. Le applicazioni AR consentono agli studenti di esplorare la fotosintesi a livello molecolare, osservando come la luce eccita le molecole di clorofilla o come gli elettroni viaggiano attraverso la membrana tilacoide. Questi strumenti rendono tangibili e coinvolgenti i concetti scientifici astratti, favorendo una comprensione più profonda del legame tra biologia e tecnologie per le energie rinnovabili. https://stileapp.com/static/CLL%20handouts/Lesson_035_handout.pdf) (<https://sinovoltatics.com/technology/solar-fuels-an-introduction-to-artificial-photosynthesis/>)

Esaminando come le piante catturano l'energia solare e applicando questi principi ai sistemi artificiali, gli studenti acquisiranno una maggiore comprensione delle soluzioni energetiche sostenibili. Questa unità non solo evidenzia l'importanza dell'apprendimento interdisciplinare nelle discipline STEM, ma incoraggia anche gli studenti a pensare in modo creativo per risolvere problemi del mondo reale, prendendo spunto dalla natura.

Come le piante catturano l'energia solare

La natura rappresenta una fonte di ispirazione ricca e dinamica per le innovazioni nel campo dei materiali, aprendo la strada alla creazione di nuovi materiali noti come "materiali bioispirati". Questi materiali presentano caratteristiche strutturali e funzionali migliorate, derivate da composizioni e sostanze già esistenti (Liu et al., 2017). Il concetto di "bioispirazione" nasce dall'approccio di trarre spunti dalle strutture e funzionalità naturali per progettare materiali artificiali avanzati con proprietà superiori (Zhang et al., 2024).

Le fonti biologiche di ispirazione, sia dal regno vegetale che da quello animale, forniscono le basi per lo sviluppo di materiali artificiali che replicano o sono influenzati dalle loro proprietà e funzioni (Zhang et al., 2020). Numerose strutture biologiche sono state studiate per il loro potenziale nella progettazione di materiali bioispirati, tra cui la madreperla, la seta di ragno, le foglie di loto, gli occhi di mosca e le ali di farfalla (Sun et al., 2019). Le piante, comparse per la prima volta circa 400 milioni di anni fa, hanno subito significativi progressi evolutivi per adattarsi e prosperare in ambienti ostili (Pires e Dolan, 2012). Nonostante i loro limitati elementi costitutivi fondamentali, le piante mostrano una notevole diversità strutturale e funzionale, che ha ispirato lo sviluppo di superfici e interfacce ad alte prestazioni, come il meccanismo di trasporto direzionale dei liquidi ispirato alla *Nepenthes* (Chen et al., 2016).

Inoltre, l'integrazione di materiali e strutture ispirati alle piante ha migliorato significativamente l'efficienza di varie tecnologie, tra cui sistemi di raccolta, conversione e stoccaggio dell'energia, nonché dispositivi di desalinizzazione e purificazione dell'acqua, meccanismi di separazione e raccolta e soluzioni di rinforzo e irrobustimento strutturale (Yu et al., 2024).



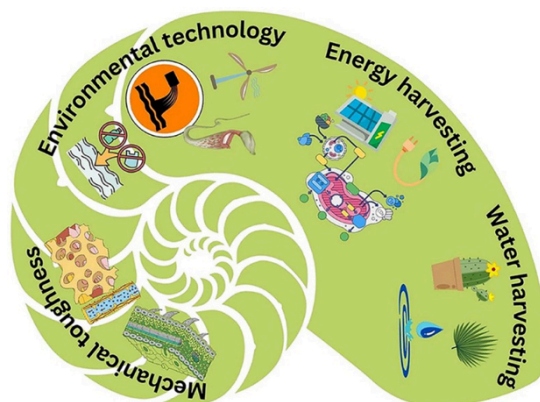
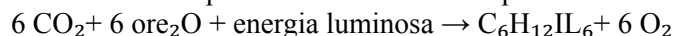


Figura 1. Illustrazione grafica di superfici e interfacce ispirate alle piante per varie applicazioni, fonte: Wijerathne et al., 2025.

La fotosintesi è un processo complesso attraverso il quale piante, alghe e alcuni batteri convertono l'energia luminosa in energia chimica. Questo processo è fondamentale per la vita sulla Terra, in quanto fornisce l'energia e i composti organici che sostengono la maggior parte degli ecosistemi.

La reazione complessiva della fotosintesi può essere riassunta dalla seguente equazione:



In questo processo, l'anidride carbonica e l'acqua vengono convertite in glucosio e ossigeno utilizzando la luce solare come fonte di energia. <https://www.britannica.com/science/photosynthesis>)

Il processo di fotosintesi è fondamentale per la vita sulla Terra. Produce ossigeno come sottoprodotto, elemento essenziale per la maggior parte degli organismi viventi. Inoltre, i composti organici creati attraverso la fotosintesi costituiscono la base della maggior parte delle catene alimentari.

La fotosintesi è svolta da organismi fotoautotrofi, in grado di produrre il proprio nutrimento utilizzando l'energia luminosa. Tra questi figurano piante, alghe e alcuni batteri.

Comprendere la fotosintesi non è importante solo per la biologia, ma anche per affrontare le sfide globali. I combustibili fossili che usiamo oggi sono il risultato della fotosintesi avvenuta milioni di anni fa. Inoltre, la ricerca sulla fotosintesi artificiale potrebbe portare a nuove tecnologie energetiche sostenibili. <https://www.britannica.com/science/photosynthesis>).

Piante, alghe e alcuni batteri hanno perfezionato l'arte di sfruttare la luce solare per sostenere la vita sulla Terra. Questo processo, chiamato fotosintesi, permette loro di convertire l'energia solare in energia chimica, producendo l'ossigeno che respiriamo e il cibo che mangiamo. Comprendere come le piante catturano e immagazzinano l'energia in modo efficiente può ispirare soluzioni sostenibili per il fabbisogno energetico umano.



Come funziona la fotosintesi?

La fotosintesi avviene all'interno dei **cloroplasti**, strutture specializzate nelle cellule vegetali. Queste contengono **clorofilla**, il pigmento verde che assorbe la luce solare. Utilizzando luce, acqua e anidride carbonica, le piante producono **glucosio** (uno zucchero utilizzato per produrre energia) e **ossigeno** (rilasciato in aria).

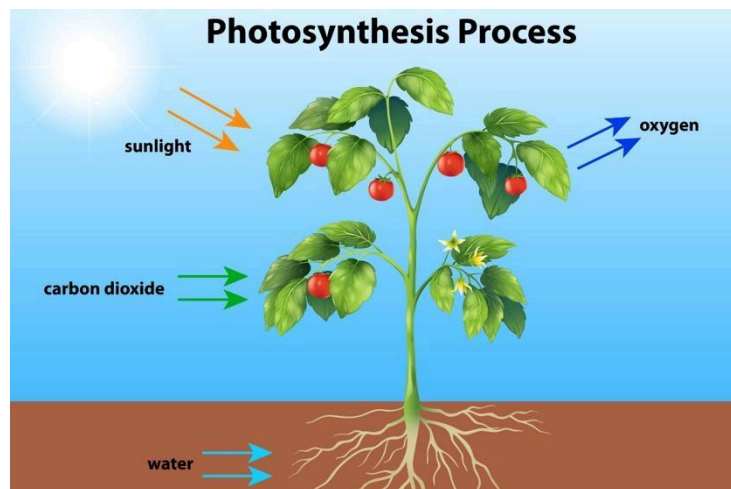


Figure 2. Process of photosynthesis, source:

<https://dotandlinelearning.com/blog/biology/chapter-6-photosynthesis/>

Il processo si articola in due fasi principali:

Fase 1: Cattura dell'energia luminosa (reazioni dipendenti dalla luce)

- Avviene nelle membrane tilacoidali dei cloroplasti.
- La luce solare viene assorbita dalla clorofilla, eccitando gli elettroni e dando inizio a un processo... processo di trasferimento di energia.
- Le molecole d'acqua vengono scisse in ossigeno, protoni ed elettroni, rilasciando ossigeno gassoso nel movimento.
- L'energia catturata viene immagazzinata in molecole speciali chiamate **ATP** (adenosina trifosfato) e **NADPH** (nicotinamide adenina dinucleotide fosfato) che verrà utilizzato nella fase successiva.



Fase 2: Produzione di energia (Ciclo di Calvin)

- Avviene nello stroma, il fluido all'interno dei cloroplasti.
- L'anidride carbonica presente nell'aria viene utilizzata per costruire molecole di glucosio.
- L'ATP e il NADPH della prima fase forniscono l'energia per convertire l'anidride carbonica in zuccheri.
- Questa energia immagazzinata viene utilizzata per la crescita delle piante, la riproduzione e la produzione di materiali essenziali come l'amido e la cellulosa.

Perché la fotosintesi è essenziale?

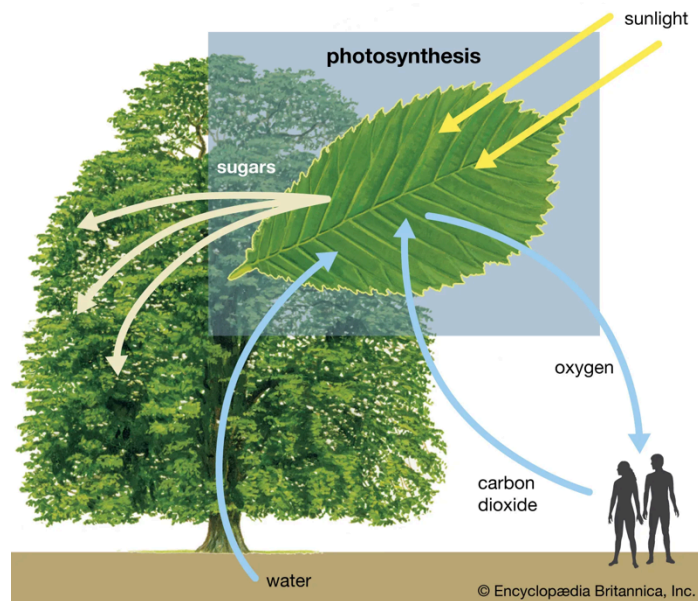


Figura 3. La fotosintesi è essenziale, fonte: <https://www.britannica.com/science/photosynthesis>
La fotosintesi è il fondamento della vita sulla Terra, sostiene gli ecosistemi e mantiene l'equilibrio ambientale. I suoi contributi principali includono:

- **Produzione di ossigeno:** Le piante rilasciano ossigeno, rendendo possibile la vita per gli animali e per gli esseri umani.
- **Accumulo di energia:** La luce solare viene convertita in energia chimica, che favorisce la crescita delle piante e fornisce nutrimento ad altri organismi.
- **Bilancio del ciclo del carbonio:** La fotosintesi contribuisce a regolare l'anidride carbonica atmosferica, riducendo gli effetti dei cambiamenti climatici.

Imparare dalle piante: come la fotosintesi ispira le energie rinnovabili

La capacità delle piante di catturare efficacemente la luce solare ha ispirato **progressi tecnologici** nell'ambito dell'energia sostenibile. Gli scienziati stanno studiando la fotosintesi per sviluppare **sistemi di fotosintesi artificiale** che imitano la produzione di energia delle piante, potenzialmente portando a **soluzioni per l'energia pulita** ad esempio:

- **Pannelli solari:** Le celle fotovoltaiche dei pannelli solari funzionano come la clorofilla, assorbendo la luce e convertendola in energia utilizzabile.





- **Biocarburanti:** Alcuni microrganismi utilizzano la fotosintesi per creare combustibili che potrebbero sostituire i combustibili fossili.
- **Foglie resistenti:** Gli scienziati stanno sviluppando materiali sintetici in grado di utilizzare la luce solare per produrre energia pulita, proprio come le foglie vere.

La natura ha perfezionato la **conversione dell'energia solare** attraverso la fotosintesi, un processo che sostiene la vita e mantiene in equilibrio il nostro ambiente. Studiando le piante, scienziati e ingegneri stanno scoprendo nuovi modi per **raccogliere energia in modo sostenibile**. Se riuscissimo a imparare a catturare la luce solare con la stessa efficienza delle piante, potremmo avvicinarci a un mondo migliore. **Un futuro più pulito e più verde.**

Efficienza fotosintetica

L'efficienza fotosintetica si riferisce a quanto efficacemente le piante convertono l'energia solare in energia chimica. Mentre l'efficienza massima teorica è di circa l'11% in condizioni ideali, l'efficienza reale varia tra il 3 e il 6% a causa di fattori quali i limiti di assorbimento della luce e le perdite di energia durante i processi di conversione. (<https://www.britannica.com/science/photosynthesis/Energy-efficiency-of-photosynthesis>). Per esempio:

- Sono utilizzabili solo i fotoni con lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm.
- Durante il trasporto degli elettroni e la sintesi degli zuccheri si verificano perdite di energia.

Tecnologia solare bioispirata

Tecnologia solare bioispirata, nota anche come **fotovoltaico biologico**, è un campo all'avanguardia che trae ispirazione dalla **capacità della natura di catturare e convertire la luce solare in energia utilizzabile**. Il processo di fotosintesi, evolutosi nel corso di miliardi di anni, rimane uno dei più importanti **meccanismi di conversione energetica efficienti** esistenti. Imitando **sistemi fotosintetici naturali**, scienziati e ingegneri mirano a sviluppare **altamente efficiente, sostenibile ed economicamente vantaggiosi** soluzioni di energia solare che possono contribuire alla transizione del mondo verso **fonti di energia pulita e rinnovabile**.





Con la crescente domanda di **soluzioni energetiche sostenibili** le tecnologie fotovoltaiche (FV) tradizionali, pur essendo efficaci, presentano delle limitazioni, quali ad esempio: **costi di produzione elevati, scarsità di materiali e vincoli di efficienza**. I ricercatori ora guardano alla natura per trovare soluzioni, sviluppando **celle solari bioibride, sistemi di fotosintesi artificiale e piattaforme fotovoltaiche biologiche** che utilizzano **componenti naturali o bioispirati** per migliorare la conversione dell'energia solare. Questo approccio non solo mira a migliorare la **efficienza e stabilità dei pannelli solari** ma promuove anche **metodi di produzione ecocompatibili** che minimizzano **sprechi e dipendenza da materiali rari**.

In che modo la natura ispira l'innovazione nel settore dell'energia solare?

La fotosintesi nelle piante, nelle alghe e in alcuni batteri fornisce un **progetto** per **iltecnologie per l'energia solare di prossima generazione**. In sostanza, la fotosintesi assorbe la luce solare in modo efficiente, scinde le molecole d'acqua per produrre ossigeno e converte l'anidride carbonica in composti ricchi di energia come il glucosio. Gli scienziati stanno lavorando per... **replicare e migliorare questi processi** utilizzando materiali che **imitano la clorofilla, le catene di trasporto degli elettroni e le reazioni di fissazione del carbonio** per generare **energia elettrica e combustibili sintetici**.

Esistono diverse strategie in **tecnologia solare bioispirata**. Attualmente oggetto di studio:

1. **Celle solari bioibride:**

Queste celle solari integrano componenti biologici, come le proteine fotosintetiche (Fotosistema I e Fotosistema II), con materiali sintetici, migliorando l'assorbimento della luce e il trasferimento di energia. I ricercatori hanno estratto con successo proteine fotosintetiche da piante come gli spinaci per creare dispositivi solari che migliorano l'efficienza di conversione dell'energia (https://en.wikipedia.org/wiki/Biohybrid_solar_cell?utm).

2. **Fotovoltaico biologico (BPV):**

I BPV utilizzano organismi viventi, come cianobatteri o alghe, per raccogliere la luce solare e generare corrente elettrica. Questi sistemi sfruttano le proprietà di autoriparazione e autosostentamento dei materiali biologici, offrendo un'alternativa economica e sostenibile alle tradizionali celle solari a base di silicio. (https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_photovoltaics?utm).

3. **Sistemi di fotosintesi artificiale:**

La fotosintesi artificiale cerca di ricreare la capacità della natura di convertire la luce solare, l'acqua e l'anidride carbonica in combustibile. Tecnologie come la Foglia Bionica, sviluppata dai ricercatori di Harvard, utilizzano catalizzatori per scindere le molecole d'acqua in idrogeno e ossigeno, quindi combinano la CO₂ con batteri per creare combustibili liquidi. Questi sistemi hanno raggiunto un'efficienza superiore alla fotosintesi naturale, rendendoli una soluzione promettente per la produzione di combustibili puliti. (https://en.wikipedia.org/wiki/Bionic_Leaf?utm).

4. **Pannelli solari autopulenti e autoriparanti:**

Le piante hanno sviluppato meccanismi di autoriparazione che consentono loro di ripristinare le proteine fotosintetiche danneggiate nel tempo. Ispirati da ciò, i ricercatori stanno sviluppando pannelli solari con capacità di autoriparazione, utilizzando la luce reattiva. Polimeri e rivestimenti fotoattivi che imitano i processi di riparazione naturali. Queste innovazioni prolunghino la durata dei pannelli solari e ne mantengono l'efficienza nel tempo.

5. **Assorbimento della luce regolabile ispirato alle foglie:**

A differenza dei pannelli solari convenzionali, che possono essere inefficienti in





condizioni di luce variabili, le piante hanno sviluppato meccanismi adattivi che consentono loro di regolare la loro efficienza di raccolta della luce in base alle condizioni ambientali. Ispirandosi a ciò, gli ingegneri stanno progettando pannelli solari dinamici che regolano il loro tasso di assorbimento a seconda dell'ora del giorno e dell'intensità della luce solare, imitando il movimento naturale delle foglie e delle strutture dei cloroplasti. <https://www.axios.com/sponsored/the-technology-paving-the-way-for-the-future-of-solar-energy?utm>).

Recenti progressi e applicazioni:

- **La biomimetica nel design:** Gli innovatori si rivolgono sempre più alla natura per trovare soluzioni sostenibili. Ad esempio, il design del treno ad alta velocità Shinkansen serie 500 giapponese si ispira al martin pescatore, con conseguente miglioramento dell'efficienza e riduzione del rumore. Questo principio di biomimetica viene applicato in diversi campi, tra cui la tecnologia solare, per sviluppare sistemi che si armonizzano con i processi naturali. <https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/>).
- **Celle tandem perovskite-silicio:** Aziende come Qcells hanno ottenuto risultati rivoluzionari combinando materiali perovskitici con le tradizionali celle solari al silicio, stabilendo nuovi record di efficienza. Questo progresso potrebbe portare a pannelli solari più compatti ed efficienti, risolvendo i problemi di spazio negli impianti solari. <https://www.reuters.com/business/energy/qcells-says-technology-breakthrough-could-reduce-space-needed-solar-panels-2024-12-18/>).
- **Vernice solare per veicoli elettrici:** Sono in fase di sviluppo innovazioni come la vernice solare per consentire ai veicoli elettrici di sfruttare direttamente l'energia solare, riducendo potenzialmente la dipendenza da infrastrutture di ricarica esterne e alleviando l'ansia da autonomia tra gli utenti. <https://www.thetimes.com/uk/technology-uk/article/mercedes-benz-solar-paint-charge-evs-rp86z8hd?region=global>).

Dalle foglie alle celle solari: approcci biomimetici all'energia sostenibile

L'urgente necessità di tecnologie di conversione energetica sostenibili ed ecocompatibili continua a crescere, mentre il mondo cerca soluzioni efficaci per combattere le sfide ambientali e raggiungere emissioni nette zero entro il 2050. La natura, in particolare le piante, offre un modello altamente efficiente per la raccolta dell'energia solare, l'assorbimento e la conversione dell'anidride carbonica e il rapido trasporto di elettroliti attraverso le loro strutture biologiche. Questi processi naturali hanno ispirato gli scienziati a sviluppare materiali e dispositivi che replicano le caratteristiche strutturali e funzionali dei tessuti e delle cellule vegetali. Le innovazioni basate su materiali bioispirati sono state integrate con successo in vari settori delle tecnologie energetiche sostenibili. Ad esempio, nel campo dell'energia solare, i materiali bioispirati hanno contribuito al progresso delle celle solari e dei dispositivi fotovoltaici, migliorando significativamente la loro capacità di assorbire la luce solare e convertirla in elettricità con maggiore efficienza. Imitando l'efficienza della fotosintesi naturale e dei sistemi di trasporto, queste tecnologie stanno aprendo la strada a soluzioni energetiche più efficaci ed ecocompatibili. Studiando il processo di fotosintesi nelle piante, i dispositivi fotocatalitici per la conversione della CO₂ catturata sono stati sviluppati. Sono stati sviluppati metodi innovativi per convertire l'energia solare in biocarburanti, come etanolo, amido e altri combustibili a base di bicarbonato, sfruttando l'irradiazione solare. A differenza dei processi diretti di raccolta e conversione dell'energia solare, la generazione di energia ispirata alle piante è stata notevolmente integrata con l'energia cinetica e meccanica. I dispositivi idrovoltaiici ispirati alle piante





convertono l'energia di diffusione dell'acqua in elettricità, apprendendo dall'effetto del gradiente di diffusione dell'acqua nelle piante. Prendendo ispirazione dalle proprietà di trasporto nanofluidico e dalle strutture cellulari selettive, sono stati sviluppati materiali bioispirati per dispositivi avanzati di accumulo di energia per scenari reali, come batterie e supercondensatori. Ad esempio, è stata osservata una maggiore conduttività ionica e ritenzione idrica in elettroliti allo stato solido incorporati con nanofibre di cellulosa di bambù naturale, che hanno migliorato le prestazioni elettrochimiche della batteria zinco-aria flessibile (Du et al., 2024). Una batteria simile a una pianta (FlowER: un sistema redox a flusso di evaporazione) con una durata prolungata è stata progettata in modo ecocompatibile per alimentare le reti di sensori wireless a supporto dell'agricoltura di precisione (Navarro-Segarra, 2022). Design simili ispirati alle piante sono stati applicati anche ad altre batterie a base di metalli attivi, comprese le batterie agli ioni di zinco (Zhang et al., 2024, Dong et al., 2023). Per mostrare come la bioispirazione apra la strada a un ulteriore miglioramento delle prestazioni delle tecnologie energetiche sostenibili, classifichiamo i materiali ispirati alle piante in base alle tipologie di tecnologie emergenti.

Innovazioni ispirate alle piante nella raccolta e trasformazione dell'energia solare

Le principali sfide nella raccolta e conversione dell'energia solare in elettricità o altre fonti di energia sostenibile risiedono nell'assorbimento efficiente della radiazione solare e nell'efficacia della conversione energetica. Le celle solari rappresentano una categoria consolidata di dispositivi per la conversione di energia sostenibile che trasformano direttamente la radiazione solare in elettricità. Questi dispositivi sono stati ampiamente adottati e installati in diverse località in tutto il mondo.

L'efficienza delle celle solari ha raggiunto un limite che richiede un miglioramento significativo, poiché oltre il 70% dell'energia in ingresso viene dispersa sotto forma di calore. Ciò non solo riduce l'efficienza complessiva, ma solleva anche problemi di sicurezza. Ispirandosi agli alberi, che trasportano efficacemente l'acqua dalle radici alle foglie attraverso la traspirazione per mantenere il raffreddamento e l'idratazione, è stata sviluppata una foglia fotovoltaica ibrida multigenerazionale bioispirata (PV-leaf). Questo design consente il flusso passivo dell'acqua da un serbatoio alla superficie della cella per l'evaporazione, catturando al contempo l'acqua evaporata e convertendola in acqua pulita (Wijerathne et al., 2025).

- Foglia fotovoltaica (foglia PV)

Nel corso di miliardi di anni di evoluzione, gli organismi naturali hanno sviluppato metodi altamente efficienti per raccogliere l'energia solare e immagazzinarla sotto forma di idrocarburi, come zuccheri e amido, per sostenere la crescita e la sopravvivenza. La ricerca ha dimostrato che le foglie delle piante contengono strutture antenna per la raccolta della luce, note come cloroplasti, che consentono l'assorbimento di un ampio spettro di luce solare. Queste strutture funzionano anche come canali a lungo raggio che trasferiscono gli eccitoni dagli stati elettronici eccitati della clorofilla, in seguito all'assorbimento di fotoni, ai centri di reazione dove avviene la fotosintesi (Mirkovic et al., 2017).

All'interno di una foglia naturale sono presenti reti tridimensionali interconnesse di pori e canali che ottimizzano l'assorbimento della luce e facilitano il movimento delle sostanze essenziali. Ispirandosi a queste strutture e ai meccanismi della fotosintesi naturale, i ricercatori hanno ampiamente sviluppato processi artificiali di conversione dell'energia solare in combustibili, consentendo la trasformazione





dell'anidride carbonica in prodotti a più atomi di carbonio, nonché la generazione di idrogeno tramite energia solare (Liu et al., 2021).

Replicando la struttura della clorofilla e i processi funzionali della fotosintesi nelle foglie delle piante, sono state sviluppate foglie artificiali per consentire la raccolta e la conversione dell'energia solare bioispirata (Van Noorden, 2021, Reece et al., 2011, Nguyen et al., 2017).

Per migliorare la diffusione dei gas e l'efficienza di raccolta della luce, i sistemi fotosintetici artificiali tridimensionali sono spesso progettati con una struttura di elettrodi gerarchica simile a quella di una foglia naturale. Ad esempio, sono state sviluppate foglie artificiali utilizzando nanomateriali sintetici incorporati in strutture derivate da piante, formando sistemi bioibridi (Zhou, 2013).

La foglia fotovoltaica imita il processo di traspirazione delle foglie delle piante per raffreddare le celle solari, migliorandone l'efficienza. Questo design incorpora un **strato di traspirazione biomimetico** Realizzato con fibre di bambù e celle di idrogel che spostano passivamente l'acqua da un serbatoio per raffreddare la superficie del pannello solare. Riducendo le temperature di esercizio fino a 26 °C, il PV-leaf migliora l'efficienza elettrica e può generare contemporaneamente elettricità, calore e acqua pulita.

Durante il processo di sintesi, l'architettura naturale e i sistemi di venatura della foglia sono stati replicati direttamente e incorporati nel sistema fotosintetico artificiale, creando una rete di macropori gerarchica tridimensionale. Queste foglie artificiali, costruite con catalizzatori artificiali, catturano efficacemente la luce e facilitano la fotoriduzione dell'anidride carbonica, imitando i processi fotochimici naturali per convertire l'anidride carbonica e l'acqua in idrocarburi di alto valore sotto luce solare naturale o simulata. Oltre ai dispositivi bioispirati per la cattura e la conversione dell'anidride carbonica, la ricerca dell'ultimo decennio ha esplorato la scissione solare dell'acqua utilizzando strutture ispirate alle foglie. Essendo una fonte di energia pulita senza emissioni di carbonio, si prevede che l'idrogeno svolgerà un ruolo cruciale nei futuri sistemi energetici, in particolare quando generato attraverso reazioni di scissione dell'acqua. Il concetto di produzione di idrogeno tramite scissione dell'acqua è stato influenzato anche dai meccanismi naturali della fotosintesi (Velasco-Garcia e Casadevall, 2023). La struttura di una tipica foglia di pianta è costituita da cellule fotosintetiche, fasci vascolari (nervature), cellule spugnose, stomi, cuticola ed epidermide, come mostrato nella Figura 1a. Il trasporto dell'acqua all'interno della pianta avviene attraverso un processo guidato da forze capillari e pressione osmotica, che permette il movimento dell'acqua liquida dal terreno alle foglie. I fasci vascolari contengono microcanali che distribuiscono efficacemente l'acqua in tutta la foglia, la quale poi evapora dalle superfici cellulari durante la traspirazione.

Ispirandosi all'efficienza della traspirazione e alla struttura delle foglie naturali, è stata sviluppata una struttura di traspirazione biomimetica per la PV-leaf, come illustrato nella Figura 1b. Questo design integra uno strato di traspirazione biomimetica (BT) applicato sul retro di una cella fotovoltaica, migliorando la dissipazione del calore. La funzione dei fasci vascolari è replicata utilizzando fasci di fibre di bambù naturali, garantendo un efficace trasporto e distribuzione dell'acqua. Allo stesso tempo, le celle di idrogel con un'elevata superficie specifica e superiori proprietà di assorbimento dell'acqua fungono da sostituto delle cellule spugnose, favorendo un'evaporazione efficiente.

La configurazione dettagliata della struttura di traspirazione fogliare PV è mostrata in Figura 1c, e comprende uno strato di BT (~1 mm di spessore), una rete di supporto (0,5 mm di spessore) e uno strato di celle PV (~150 µm di spessore), che copre un'area effettiva di 10 × 10 cm². All'interno dello strato di BT sono incorporati circa 30 ramificazioni di fasci di fibre di bambù, distribuite uniformemente in un idrogel di polimero superassorbente (SAP) di poliacrilato di potassio (PAAK), che facilita una



distribuzione uniforme dell'acqua su tutto lo strato. Le estremità delle ramificazioni delle fibre sono raccolte e immerse in acqua, mantenendo un'idratazione continua.

Il processo di fabbricazione passo passo della struttura di traspirazione fogliare PV è presentato nella Figura supplementare 1, mentre la Figura supplementare 2 fornisce uno schema elettrico che illustra in dettaglio il sistema di misurazione elettrica utilizzato per la valutazione delle prestazioni (Huang et al., 2023).

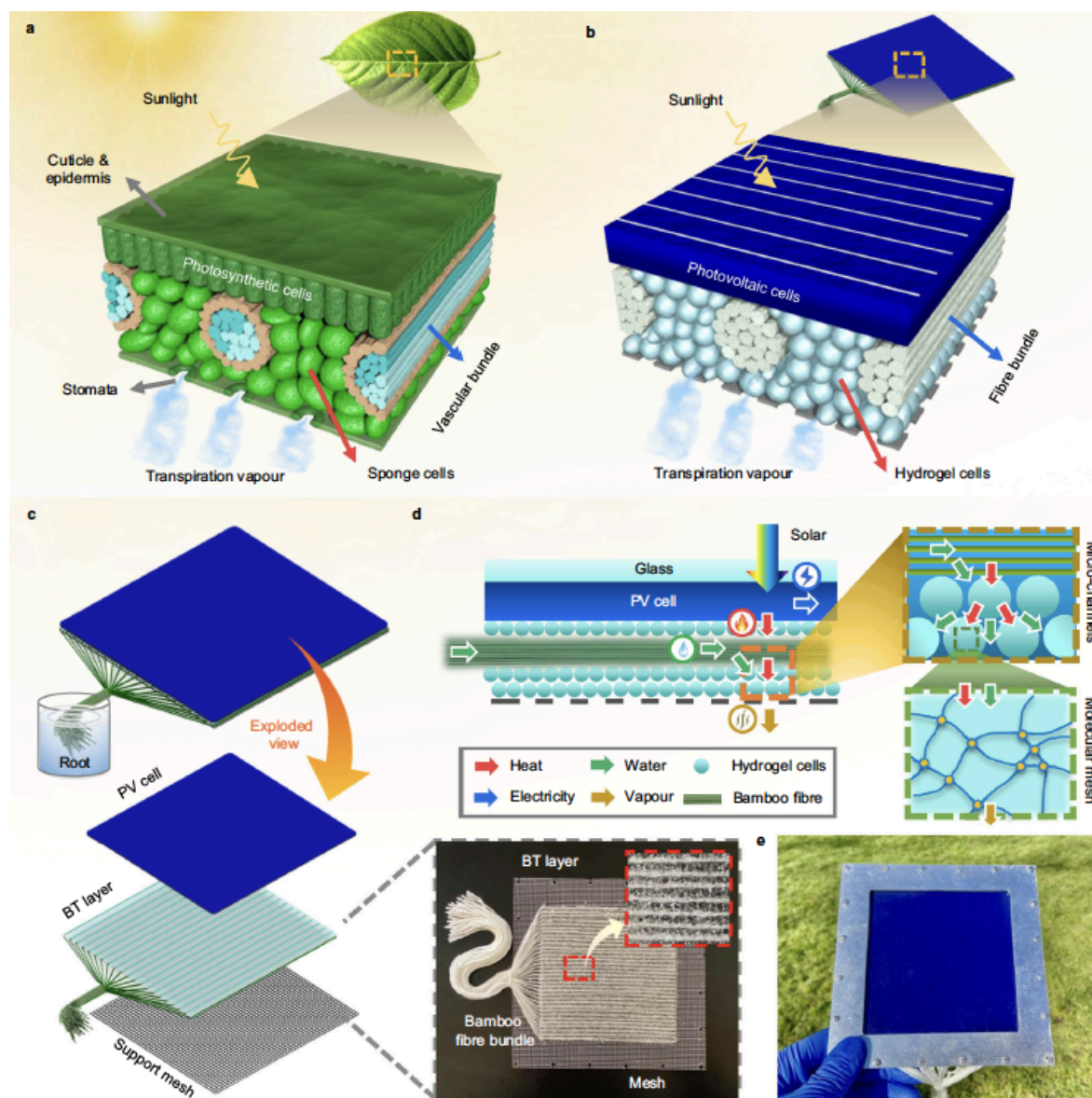


Figura 4. Struttura e funzione della foglia PV bioispirata. a. Una foglia naturale ha **fasci vascolari** che distribuiscono uniformemente l'acqua sulla sua superficie, consentendo **raffreddamento tramite traspirazione**, che protegge la fotosintesi. b. La foglia PV bioispirata imita questo processo utilizzando **fasci di fibre idrofile** E **cellule di idrogel** replicare le funzioni di trasporto e accumulo dell'acqua di una vera foglia. c. Il **strato di traspirazione biomimetico (BT)** è fatto di **fasci di fibre di bambù** E **cellule di idrogel**, con le radici fibrose immerse in acqua per un apporto continuo di umidità. d. L'acqua si muove dalle **radici di fibre alle cellule dell'idrogel** Attraverso **azione capillare e osmosi**. Quando l'acqua evapora, rimuove il calore dalla cella fotovoltaica, mantenendola fredda. e. Un esempio concreto **fotografia del prototipo PV-leaf** mostra come questa struttura bioispirata venga applicata a una cella solare funzionante (Huang et al., 2023).

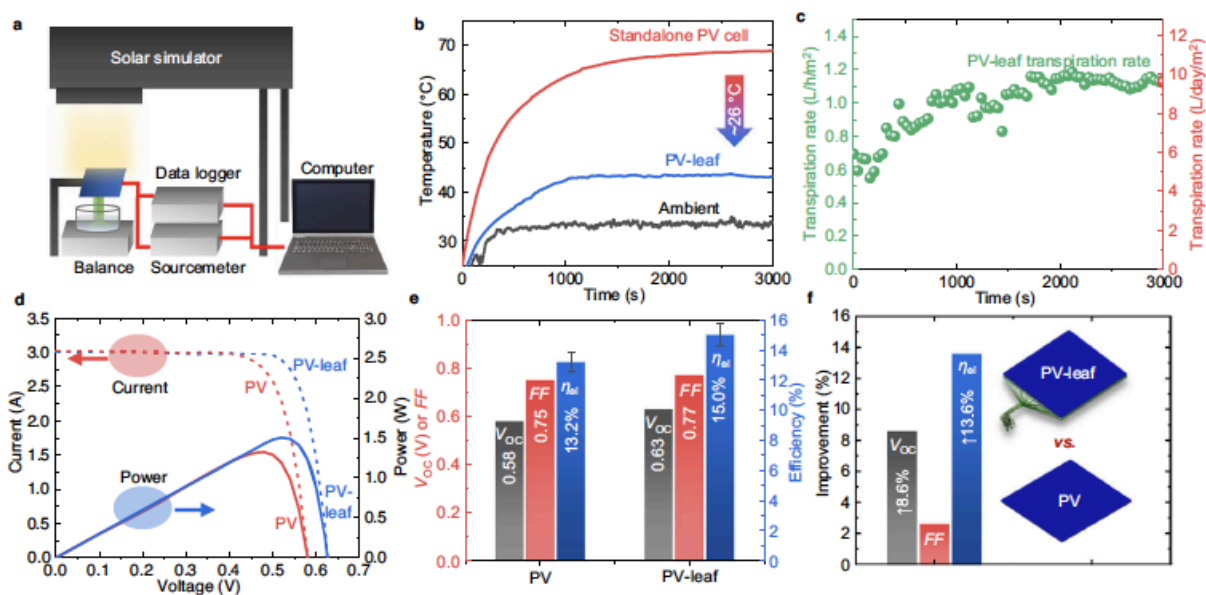


Figura 5. Come PV-Leaf migliora le prestazioni del pannello solare. Per testare l'efficacia della foglia fotovoltaica, è stata creata una configurazione speciale utilizzando un simulatore solare che produce luce simile alla luce solare. Questa configurazione aiuta a misurare l'efficacia della foglia fotovoltaica. **effetto di raffreddamento E efficienza energetica** a. della foglia fotovoltaica rispetto a un normale pannello solare. b. La foglia fotovoltaica rimane molto **più fresca** rispetto a un pannello solare convenzionale. I test hanno dimostrato che il **strato di traspirazione biomimetico** contribuisce ad abbassare significativamente la sua temperatura, prevenendo il surriscaldamento e migliorando le prestazioni. c. La foglia PV rilascia acqua attraverso **traspirazione**, proprio come una vera foglia. Questo processo aiuta a rimuovere il calore dal pannello solare, rendendolo più efficiente. La quantità di acqua evaporata nel tempo mostra quanto bene funziona il sistema di raffreddamento. d. La foglia fotovoltaica produce **più energia** rispetto a un pannello solare standard. Il sistema di raffreddamento migliorato aiuta le celle solar **generare una maggiore potenza in uscita**, rendendoli più efficaci nel catturare e utilizzare la luce solare. e. Le misurazioni chiave mostrano che il **PV-leaf ha prestazioni migliori** in termini di produzione di energia ed efficienza rispetto a un normale pannello solare. f. Nel complesso, il PV-leaf migliora la conversione dell'energia solare mantenendo il pannello fresco e garantendo **maggior efficienza durante tutta la giornata**. Questo design bio-ispirato può contribuire a rendere i pannelli solari più efficienti. **più efficace e sostenibile** in futuro (Huang et al., 2023).





Fattori che influenzano la fotosintesi e il loro ruolo nella tecnologia solare bioispirata

La fotosintesi è un processo biochimico complesso influenzato da vari fattori. **fattori ambientali e fisiologici**. Questi fattori determinano **ilvelocità con cui le piante convertono l'energia luminosa in energia chimica**, con un impatto diretto sulla crescita delle piante, sull'assorbimento di carbonio e sulla produzione di ossigeno. Comprendere questi fattori non solo aiuta a migliorare l'efficienza agricola, ma **ancheguida lo sviluppo di sistemi di fotosintesi artificiale e di tecnologie solari bioispirate**.

1. Intensità luminosa: il potere della luce solare

La luce è la forza motrice della fotosintesi. **maggiore è l'intensità luminosa**, maggiore è l'energia disponibile per eccitare gli elettroni nella clorofilla, portando a **unaumento del tasso di fotosintesi**. Tuttavia, c'è un **punto di saturazione**. Oltre a questo limite, una maggiore quantità di luce non migliora ulteriormente il processo, poiché i meccanismi biochimici della pianta non sono in grado di elaborare l'energia in eccesso in modo efficiente.

- **Condizioni di scarsa illuminazione**(ad esempio, ambienti ombreggiati o alghe di acque profonde) rallentano la fotosintesi a causa dell'insufficiente disponibilità di fotoni.
- **Troppa luce** può portare a **fotoinibizione**, dove la luce in eccesso danneggia i pigmenti fotosintetici e riduce l'efficienza.
- **Connessione solare ispirata alla natura**: Ingegneri progettano **pannelli solari E sistemi di fotosintesi artificiale** Studiare come le piante ottimizzano l'assorbimento della luce. Alcuni ricercatori stanno sviluppando **pannelli solari adattivi** che imitano la capacità delle foglie di regolare il loro orientamento per la massima esposizione alla luce solare (https://www.rsb.org.uk/images/15_Photosynthesis.pdf).

2. Concentrazione di anidride carbonica: combustibile per la fissazione del carbonio

anidride carbonica (CO_2) è essenziale per il **ciclo di Calvin**, dove si trova **convertito in glucosio**. Più alto è il **CO_2 concentrazione**, più rapido è il tasso di fissazione del carbonio, fino a un certo limite. Tuttavia, a concentrazioni molto elevate, l'effetto si stabilizza a causa delle limitazioni nell'attività enzimatica e nell'apporto energetico.

- **Limitare la CO_2 Livelli**: In condizioni di bassa CO_2 In ambienti contaminati, la fotosintesi rallenta perché le piante non riescono a generare zuccheri in modo efficiente.
- **Impatto industriale e urbano**: Aumento della CO_2 livelli derivanti dalle attività umane **migliorare la fotosintesi** può anche portare a **squilibri climatici** che influisce sulla crescita delle piante.
- **Connessione solare ispirata alla natura**: Gli scienziati stanno esplorando modi per **catturare e utilizzare la CO_2 efficientemente** nella fotosintesi artificiale, sviluppando sistemi che convertono la CO_2 atmosferica in combustibili sostenibili (Wang et al., 2022).

3. Temperatura: il ruolo degli enzimi nella conversione dell'energia

La temperatura influenza significativamente la fotosintesi perché influisce **attività enzimatica**, in particolare **RubisCO**, l'enzima responsabile della fissazione del carbonio.

- **Intervalli di temperatura ottimali**: La fotosintesi raggiunge in genere il suo picco entro un **intervallo di temperatura moderato (15–30 °C)** Al di sotto di questo intervallo, l'attività





enzimatica rallenta, e a temperature più elevate, gli enzimi denaturano, con conseguente riduzione dell'efficienza.

- **Calore estremo e perdita d'acqua:** Le alte temperature causano anche traspirazione eccessiva riducendo la disponibilità di acqua, fondamentale per la fotosintesi.
- **Connessione solare ispirata alla natura:** I sistemi di fotosintesi artificiale devono essere termicamente stabili, garantendo un'efficiente conversione energetica in diverse condizioni di temperatura. Gli scienziati stanno esplorando catalizzatori resistenti al calore che imitano la tolleranza alla temperatura delle piante del deserto.

4. Disponibilità di acqua: essenziale per le reazioni fotosintetiche

L'acqua è scissa durante le reazioni dipendenti dalla luce della fotosintesi, fornendo elettroni e protoni. Necessaria per la produzione di energia. Disponibilità limitata di acqua rallenta o arresta la fotosintesi, causando chiusura stomatica per conservare l'umidità ma anche ridurre la CO₂ assorbimento.

- **Condizioni di siccità:** Le piante negli ambienti aridi hanno sviluppato meccanismi specializzati, come ad esempio: **Fotosintesi del metabolismo acido delle Crassulacee (CAM)** per conservare l'acqua pur continuando a svolgere la fotosintesi.
- **Connessione solare ispirata alla natura:** Gli scienziati stanno sviluppando fotosintesi artificiale a basso consumo idrico sistemi che funzionano efficacemente anche in ambienti a bassa umidità, imitando adattamenti delle piante del deserto.

5. Lunghezza d'onda e qualità della luce: oltre la semplice luminosità

Non tutta la luce è ugualmente efficace per la fotosintesi. **La clorofilla assorbe principalmente la luce rossa e blu.**, con un assorbimento minimo nella gamma del verde, motivo per cui le foglie appaiono verdi.

- **Fonti di luce artificiale:** La tecnologia LED è ora utilizzata in ambienti di coltivazione controllati A ottimizzare la crescita delle piante fornendo le lunghezze d'onda più efficienti.
- **Connessione solare ispirata alla natura:** Ricerca su materiali per la raccolta della luce ispirato da complessi antenna fotosintetici. L'obiettivo è migliorare l'efficienza delle celle solari, catturando uno spettro più ampio di luce solare per la conversione in energia.

La fotosintesi come modello per le soluzioni energetiche del futuro

Oltre a sostenere la vita, la fotosintesi serve come ispirazione per i sistemi di energia artificiale. Gli scienziati stanno sviluppando attivamente tecnologia solare bioispirata A replicare e potenziare i meccanismi naturali di conversione dell'energia:

- **Fotosintesi artificiale:** Imita la capacità delle piante di scindere l'acqua e immagazzinare energia nei legami chimici, producendo potenzialmente combustibile a idrogeno pulito.
- **Celle solari bioibride:** Integrare proteine o pigmenti naturali derivati dalle piante nei dispositivi fotovoltaici per aumentarne l'efficienza.





- **Pannelli solari autoriparanti:** Ispirato dalla natura autoriparante delle cellule vegetali, i ricercatori stanno sviluppando materiali che possono riparare i danni causati dall'esposizione al sole, prolungando la durata di vita del pannello.

Comprendere i fattori che influenzano la fotosintesi non solo ci aiuta ad apprezzare l'efficienza dell'impianto, ma anche guida le innovazioni future nell'energia solare. Studiando l'assorbimento della luce, la CO_2 cattura, la regolazione della temperatura e l'accumulo di energia nelle piante, gli scienziati stanno compiendo progressi significativi verso la creazione di tecnologie solari più intelligenti, efficienti e sostenibili.

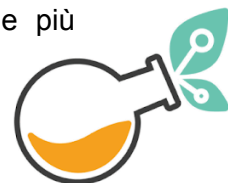
Integrare la realtà aumentata nelle foglie solari: come le piante ci insegnano a raccogliere energia

1. Introduzione: Migliorare l'apprendimento con la realtà aumentata

La realtà aumentata (AR) sta trasformando l'istruzione creando ambienti di apprendimento immersivi e interattivi che colmano il divario tra conoscenza teorica e applicazione nel mondo reale. Nell'insegnamento delle scienze, la realtà aumentata consente agli studenti di visualizzare concetti astratti, interagire con simulazioni 3D e manipolare oggetti virtuali che altrimenti sarebbero inaccessibili in un'aula tradizionale.

Con la crescente importanza attribuita all'istruzione STEM (Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica), la realtà aumentata (AR) offre agli studenti nuove opportunità per confrontarsi con principi scientifici complessi attraverso l'apprendimento esperienziale. Studi hanno dimostrato che l'apprendimento basato sulla realtà aumentata porta a tassi di memorizzazione più elevati e a una migliore comprensione concettuale rispetto ai metodi di insegnamento convenzionali. L'uso della realtà aumentata nelle classi di scienze migliora la cognizione spaziale, aiutando gli studenti a comprendere processi biologici e fisici complessi in modo più efficace (Kaiwen e Wang, 2024).

Nel contesto dell'energia solare e delle tecnologie bioispirate, la realtà aumentata (AR) si rivela uno strumento prezioso per dimostrare i principi della fotosintesi ed esplorare come gli scienziati replicano questi processi naturali nelle moderne tecnologie solari. La possibilità di visualizzare i meccanismi di assorbimento della luce, trasferimento di elettroni e accumulo di energia tramite la realtà aumentata aiuta gli studenti a collegare l'efficienza biologica con le tecnologie solari create dall'uomo. Questa unità formativa integra la realtà aumentata nel tema "Foglie solari: come le piante ci insegnano a raccogliere energia" per facilitare una comprensione più





approfondita, stimolare la curiosità e ispirare l'innovazione nelle soluzioni energetiche sostenibili.

2. Implementazione della realtà aumentata nell'unità formativa "Foglie Solari"

L'integrazione della realtà aumentata in questa unità formativa segue un approccio strutturato per **migliorare la comprensione, il coinvolgimento e l'applicazione pratica** della fotosintesi e delle tecnologie solari bio-ispirate. Sfruttando **Simulazioni in realtà aumentata, modelli 3D ed esperienze interattive** Gli studenti acquisiscono una prospettiva diretta su come le piante convertono la luce solare in energia e su come gli scienziati applicano questi principi allo sviluppo delle energie rinnovabili.

Una delle principali applicazioni di realtà aumentata utilizzate in questa unità è **McGraw Hill, Arkansas**, che offre modelli 3D interattivi che illustrano **la struttura dei cloroplasti, reazioni della fotosintesi dipendenti e indipendenti dalla luce e percorsi molecolari coinvolti nella conversione dell'energia**. Gli studenti possono manipolare questi modelli per **Osservare come la luce solare viene assorbita dalla clorofilla, come gli elettroni si muovono attraverso la catena di trasporto degli elettroni e come vengono sintetizzati ATP e NADPH**. Questa interazione pratica **rafforza le conoscenze teoriche** e consente agli studenti di **vedere processi che altrimenti sarebbero invisibili a occhio nudo** (McGraw Hill, Arkansas).

Oltre a visualizzare la fotosintesi naturale, la realtà aumentata aiuta gli studenti a esplorare **tecnologie solari bio-ispirate**, che cercano di imitare l'efficienza delle piante nella raccolta dell'energia solare. Applicazioni come **PhotosynthesisVR** consentono agli studenti di **Sperimentare con sistemi di fotosintesi artificiale, simulare progetti di pannelli solari basati su strutture vegetali e confrontare meccanismi di conversione energetica naturali e sintetici**. Attraverso queste simulazioni, gli studenti possono valutare i **vantaggi delle celle solari bioispirate, come la loro maggiore efficienza e la capacità di autoripararsi, in modo simile a come si rigenerano le foglie** (<https://avrd.medien-campus.h-da.de/projekt/95635/?utm>).

Oltre agli strumenti di realtà aumentata esistenti, **esperienze AR personalizzate** possono essere sviluppati utilizzando piattaforme come **Fondazione Unity AR**, che consente agli educatori di creare **Contenuti AR interattivi e specifici per il curriculum scolastico**. Utilizzando **Applicazioni AR basate su Unity**, gli studenti possono condurre **esperimenti di laboratorio virtuale** dove regolano variabili come **intensità luminosa, lunghezza d'onda e temperatura** e osservare come questi fattori influenzano la fotosintesi e l'assorbimento dell'energia solare. Ciò consente **esperienze di apprendimento individuali**, dove gli studenti **testare attivamente le ipotesi e analizzare i dati in tempo reale** in un ambiente virtuale.

Un altro aspetto fondamentale dell'integrazione della realtà aumentata è il suo potenziale di **migliorare la collaborazione di gruppo e l'apprendimento tra pari**. Attraverso il coinvolgimento di **modelli AR condivisi**, gli studenti possono **discutere le osservazioni, confrontare i risultati sperimentali e sviluppare soluzioni in modo collaborativo**. alle sfide del mondo reale nel campo delle energie rinnovabili. L'uso di **Esperienze AR multigiocatore**, dove più studenti interagiscono con lo stesso modello virtuale in tempo reale, **Promuove il lavoro di squadra, il pensiero critico e le capacità di risoluzione dei problemi**.

Nonostante i suoi vantaggi, l'integrazione della realtà aumentata nell'educazione scientifica presenta delle sfide, come ad esempio: **accessibilità tecnica, qualità dei contenuti e adattamento all'apprendimento**. Non tutti gli studenti potrebbero avere accesso a **dispositivi compatibili con la realtà aumentata** e gli educatori potrebbero richiederlo. **Formazione su come implementare efficacemente gli strumenti di realtà aumentata nel curriculum scolastico**. Inoltre, **Sono ancora in fase di sviluppo applicazioni di realtà aumentata di alta qualità in linea con specifici obiettivi di apprendimento**. Affrontare queste sfide implica **offrire opzioni di condivisione dei dispositivi**,





programmi di sviluppo professionale per gli insegnanti e selezionare contenuti di realtà aumentata scientificamente validati.(Kaiwen e Wang, 2024).

Grazie a un'attenta progettazione delle attività di apprendimento basate sulla realtà aumentata, questa unità formativa garantisce che gli studenti acquisiscano una **Comprensione olistica della fotosintesi, tecnologia solare bioispirata e futuro dell'innovazione energetica sostenibile.**

La realtà aumentata rappresenta un **un cambiamento trasformativo nel modo in cui gli studenti si rapportano ai concetti scientifici**, passando dall'apprendimento passivo verso **esperienze interattive ed esplorative**. Integrando la realtà aumentata nel **Foglie solari** unità di formazione, gli studenti non solo **Scopri tutto sulla fotosintesi e sulla conversione dell'energia solare**.ma anche **vivere questi processi in un modo che approfondisca la comprensione e promuova l'innovazione.**

Mentre il mondo si avvia verso **soluzioni per le energie rinnovabili**, la capacità di **imitare l'efficienza della natura** La raccolta di energia solare svolgerà un ruolo cruciale nello sviluppo **tecnologie sostenibili** Apprendimento basato sulla realtà aumentata **colma il divario tra biologia e ingegneria** incoraggiando gli studenti a esplorare **come le scoperte scientifiche in natura possono contribuire a sviluppare soluzioni energetiche all'avanguardia** L'utilizzo della realtà aumentata **stimola la curiosità, la creatività e la capacità di risolvere i problemi** che sono competenze essenziali per la prossima generazione di scienziati e ingegneri.

Il continuo progresso di **Tecnologie di realtà aumentata, intelligenza artificiale e apprendimento automatico** amplierà ulteriormente il potenziale per **esperienze di apprendimento personalizzate e basate sui dati** Ricerche future potrebbero esplorare come **esperimenti di realtà aumentata in tempo reale, feedback tattile, E Simulazioni basate sull'intelligenza artificiale** possono creare ambienti educativi ancora più coinvolgenti, garantendo che **Gli studenti non solo comprendono la scienza, ma partecipano attivamente alla sua evoluzione.** (https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/?utm_source=chatgpt.com).

Adottando la realtà aumentata come strumento fondamentale nell'educazione scientifica, noi... **Preparare gli studenti al futuro dell'apprendimento interdisciplinare, dove biologia, tecnologia e sostenibilità convergono.** L'integrazione della realtà aumentata in questa unità formativa fornisce un **Un approccio dinamico e lungimirante all'insegnamento dell'energia solare, delle tecnologie bioispirate e delle scienze ambientali.** fornire agli studenti le conoscenze e le competenze necessarie per affrontare le sfide energetiche globali.

Esempio di esecuzione e miglioramento:

L'integrazione della tecnologia nell'istruzione ha trasformato il modo in cui gli studenti si avvicinano a concetti scientifici complessi, rendendo l'apprendimento più interattivo e accessibile. **Realtà aumentata (RA)** si è affermato come un potente strumento educativo che migliora i metodi di insegnamento tradizionali fornendo interazioni immersive e in tempo reale con i contenuti digitali. A differenza **Realtà virtuale (VR)**, La realtà aumentata (AR), che crea ambienti completamente nuovi, sovrappone informazioni digitali al mondo reale, consentendo agli studenti di visualizzare processi astratti in modo più tangibile e coinvolgente.

Uno dei concetti biologici più difficili da comprendere per i giovani studenti è **fotosintesi**, il processo mediante il quale le piante convertono la luce solare in energia chimica. Gli approcci didattici tradizionali basati su testi e lezioni frontali spesso faticano a rendere questo concetto chiaro e coinvolgente, poiché gli studenti trovano difficile visualizzare le interazioni molecolari e le trasformazioni energetiche. Per ovviare a questo problema, si ricorre all'uso di **applicazioni mobili basate sulla realtà aumentata** ha guadagnato terreno come metodo di insegnamento innovativo. Queste applicazioni consentono agli studenti di interagire con modelli 3D di piante, osservare processi di fotosintesi animati e manipolare variabili per comprendere i diversi effetti ambientali sulla conversione energetica delle piante.

I benefici educativi di **Realtà aumentata nell'apprendimento scientifico** sono stati ampiamente riconosciuti. Gli studi hanno dimostrato che la realtà aumentata migliora la comprensione





forne**ndo visualizzazioni interattive** che colmano il divario tra conoscenza teorica e comprensione pratica. Ricerche precedenti hanno dimostrato che le applicazioni di realtà aumentata migliorano il coinvolgimento e le prestazioni degli studenti in varie discipline scientifiche, tra cui: **progettazione meccanica, matematica e astronomia**. Ad esempio, è stato riscontrato che i metodi di insegnamento supportati dalla realtà aumentata migliorano significativamente la comprensione degli studenti su **fasi lunari e analisi matematica** rispetto agli approcci convenzionali.

Nel contesto dell'educazione alla fotosintesi, la tecnologia AR può svolgere un ruolo fondamentale **in affrontare le sfide concettuali** che studenti e persino insegnanti si trovano ad affrontare. La ricerca ha indicato che molti educatori non sono consapevoli delle idee sbagliate degli studenti sulla fotosintesi e spesso non dispongono di dimostrazioni sperimentali adeguate per chiarire efficacemente questi concetti. Le lezioni tradizionali combinate con attività pratiche, come la costruzione di modelli fisici di cloroplasti, hanno dimostrato di migliorare il coinvolgimento degli studenti. Tuttavia, la realtà aumentata (AR) fa un ulteriore passo avanti offrendo... **simulazioni interattive in tempo reale**, consentendo agli studenti di visualizzare la fotosintesi sia a livello macroscopico che molecolare.

Per valutare l'efficacia dell'apprendimento basato sulla realtà aumentata, **Questo studio esamina uno specifico esercizio didattico che utilizza un'applicazione mobile in realtà aumentata per insegnare la fotosintesi ai giovani studenti.** (vedere la descrizione completa nel documento allegato: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10645875>).

Panoramica dell'esercizio

Questo esercizio didattico esplora l'utilizzo della tecnologia della realtà aumentata (AR) come strumento innovativo per insegnare ai giovani studenti la fotosintesi. I metodi di insegnamento tradizionali, come i libri di testo e le lezioni frontali, spesso faticano a rendere questo complesso processo biologico coinvolgente e comprensibile per gli studenti. L'applicazione mobile basata sulla realtà aumentata utilizzata in questo esercizio offre un'esperienza di apprendimento interattiva, consentendo agli studenti di visualizzare la fotosintesi in tempo reale attraverso modelli e animazioni 3D di piante.

A differenza dei metodi convenzionali, che si basano principalmente su diagrammi statici e spiegazioni verbali, questa applicazione di realtà aumentata offre un'esperienza dinamica e coinvolgente, rendendo i concetti astratti più tangibili. Attraverso questo approccio digitale, gli studenti possono osservare le strutture delle piante, simulare l'assorbimento della luce e seguire la trasformazione dell'energia solare in energia chimica in modo altamente interattivo. L'esercizio non solo migliora la comprensione concettuale, ma aumenta anche il coinvolgimento, la motivazione e la memorizzazione delle conoscenze scientifiche da parte degli studenti.

Attuazione dell'esercizio AR

1. Obiettivi di apprendimento

L'esercitazione si propone di:

- Introdurre gli studenti al processo di fotosintesi, sottolineando come le piante convertano la luce solare in energia chimica.
- Migliorare le tue capacità di visualizzazione utilizzando modelli 3D interattivi per esplorare il ruolo delle diverse strutture vegetali.
- Consentire agli studenti di manipolare variabili ambientali, come l'intensità luminosa e i livelli di anidride carbonica, per osservarne gli effetti sulla fotosintesi.
- Promuovere l'apprendimento attivo e la ricerca scientifica incoraggiando gli studenti a sperimentare, analizzare e trarre conclusioni.





2. Esperienza di apprendimento basata sulla realtà aumentata

L'applicazione mobile in realtà aumentata simula le fasi chiave del processo di fotosintesi e consente agli studenti di interagire con modelli digitali di piante utilizzando i propri dispositivi mobili o tablet. L'esercizio prevede le seguenti caratteristiche principali:

- **Interazione modello-pianta** Gli studenti possono ingrandire e ruotare modelli 3D di piante, concentrandosi su strutture chiave come foglie, cloroplasti e stomi. Possono toccare diversi componenti per scoprirne le funzioni nella fotosintesi.
- **Simulazione dell'assorbimento della luce** L'applicazione illustra come la clorofilla assorbe l'energia luminosa e innesca una sequenza di reazioni. Attraverso animazioni, gli studenti possono seguire l'eccitazione degli elettroni e la scissione delle molecole d'acqua, che rilascia ossigeno.
- **Osservazione del processo di fotosintesi** Un'animazione passo passo guida gli studenti attraverso le reazioni dipendenti dalla luce e il ciclo di Calvin, evidenziando la trasformazione dell'energia luminosa in ATP e NADPH e la successiva conversione dell'anidride carbonica in glucosio.
- **Fattori ambientali regolabili:** Gli studenti possono modificare l'intensità della luce, CO₂ livelli e temperatura all'interno della simulazione per osservare come queste variabili influenzano il tasso di fotosintesi. Questa funzionalità consente la sperimentazione in tempo reale, permettendo agli studenti di testare ipotesi e analizzare i risultati.
- **Meccanismo di valutazione e feedback** L'applicazione include strumenti di valutazione integrati, come quiz ed esercizi interattivi, per monitorare la comprensione e i progressi di apprendimento degli studenti. Queste valutazioni misurano:
 - Comprensione dei concetti chiave (ad esempio, identificazione dei reagenti e dei prodotti della fotosintesi).
 - Capacità di analizzare dati sperimentali (ad esempio, prevedere come le variazioni delle condizioni di luce influiscano sulla produzione di ossigeno).
 - Coinvolgimento nella simulazione (ad esempio, esplorazione delle diverse strutture delle piante e del loro ruolo nella conversione energetica).

Confronto con i metodi di insegnamento tradizionali

Una delle principali difficoltà dell'istruzione tradizionale risiede nella scarsa capacità degli studenti di visualizzare i processi molecolari che avvengono a livello microscopico. I libri di testo e i diagrammi statici offrono solo una visione limitata della natura dinamica della fotosintesi. Inoltre, le lezioni frontali spesso non riescono a coinvolgere attivamente gli studenti nell'apprendimento pratico.

Al contrario, l'approccio basato sulla realtà aumentata (AR) migliora la chiarezza concettuale consentendo agli studenti di interagire con modelli digitali, osservare simulazioni in tempo reale e manipolare variabili per visualizzare risultati immediati. La tabella seguente evidenzia le principali differenze:

Aspetto	Insegnamento tradizionale	Apprendimento basato sulla realtà aumentata
Visualizzazione	Diagrammi statici e testo	Modelli e animazioni 3D interattivi
Coinvolgimento degli studenti	Ascolto e lettura passivi	Partecipazione attiva ed esplorazione in tempo reale
Esperimenti	Limitato alle risorse della classe	Simulazioni virtuali con condizioni regolabili
Comprensione concettuale	Può generare idee sbagliate	Dimostrazioni chiare e interattive





Valutazione	Quiz e test cartacei	Quiz e feedback integrati tramite app
-------------	----------------------	---------------------------------------

L'esercizio in realtà aumentata colma il divario tra teoria e applicazione pratica, rendendo l'apprendimento più coinvolgente, flessibile ed efficace.

Benefici dell'esercizio di fotosintesi basato sulla realtà aumentata

L'implementazione della realtà aumentata nell'insegnamento della fotosintesi offre diversi vantaggi:

1. Maggiore chiarezza concettuale: i modelli 3D interattivi e le animazioni rendono più facili da comprendere i processi biologici astratti.
2. Maggiore coinvolgimento degli studenti: l'esperienza di apprendimento pratica e ludica incoraggia gli studenti a partecipare attivamente all'esplorazione scientifica.
3. Sperimentazione in tempo reale: modificando i fattori ambientali, gli studenti possono analizzare le relazioni di causa-effetto nella fotosintesi.
4. Accessibilità e praticità: l'applicazione mobile basata sulla realtà aumentata è portatile e intuitiva, consentendo agli studenti di apprendere al proprio ritmo.

Fase	Descrizione
Esplorare	- Ricerca e scoperta: Indagare su come funziona la fotosintesi naturale nelle piante e su come essa ispira le tecnologie solari.
	- Sviluppo dei contenuti: Sviluppare materiali di base sulla tecnologia solare bioispirata, la fotosintesi e l'integrazione della realtà aumentata.
	- Analisi dei bisogni: Valutare la comprensione degli studenti in merito alla fotosintesi, all'energia solare e all'integrazione delle discipline STEM per personalizzare le esperienze di apprendimento.
Eseguire	- Implementazione del curriculum: Fornire lezioni interattive sull'energia solare ispirate alla biologia vegetale utilizzando strumenti di realtà aumentata.
	- Esercizi interattivi: Utilizzare applicazioni di realtà aumentata (ad esempio, PhotosynthesisVR, McGraw Hill AR) per simulare la fotosintesi e progettare pannelli solari bioispirati.
	- Raccolta di feedback: Raccogliere il feedback di studenti e insegnanti sull'efficacia della realtà aumentata e sui risultati di apprendimento attraverso discussioni e riflessioni.
Migliorare	- Integrazione AR: Incorpora simulazioni AR per visualizzare i processi molecolari della fotosintesi e testare l'efficienza dei pannelli solari.
	- Apprendimento interattivo: consentire agli studenti di manipolare fattori ambientali come l'intensità luminosa e la CO ₂ concentrazione in AR.
	Contenuti ludicizzati: -Punti e distintivi Premia gli studenti che completano le sfide in realtà aumentata (ad esempio, la costruzione di un prototipo funzionante di pannello solare). -Classifiche Classifica gli studenti o le squadre in base alle loro prestazioni nelle simulazioni di efficienza energetica. -Missioni e livelli: Progettare sfide progressive, dalla fotosintesi di base alla creazione di celle solari.





	-Ricompense per l'esplorazione Nascondere informazioni o componenti energetiche nei modelli AR per incoraggiare un'esplorazione più approfondita.
	-Compiti collaborativi gamificati il team creano e ottimizzano pannelli solari virtuali per massimizzare l'efficienza.
	Valutazioni basate sulla realtà aumentata: -Includere simulazioni in realtà aumentata e laboratori virtuali come parte delle valutazioni formative per dimostrare la comprensione dei concetti di conversione dell'energia solare.

Apprendimento basato sui dati: gli strumenti di valutazione integrati forniscono un feedback immediato, aiutando insegnanti e studenti a monitorare i progressi in modo efficace.

Risorse:





Chen H, Zhang P, Zhang L, Liu H, Jiang Y, Zhang D, Han Z e Jiang L 2016 Trasporto direzionale continuo dell'acqua sulla superficie del peristoma di *Nepenthes alata* *Nature* **532** 85–89

Dong H et al 2023 Elettroliti polianionici bioispirati per batterie agli ioni di zinco altamente stabili *Angew. Chem., Int. Ed.* **62** e202311268

Dou H, Xu M, Zhang Z, Luo D, Yu A e Chen Z 2024 Elettrolita allo stato solido di biomassa con abbondanti canali ionici e d'acqua per batterie zinco-aria flessibili *Adv. Mater.* **36** 2401858

Huang.G, Xu.J, N.Markides.C,. (2023) Foglia fotovoltaica ibrida multigenerazionale bioispirata ad alta efficienza, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38984-7>

Kaiwen.Y, Wang.S, 2024 Insegnare la fotosintesi ai giovani studenti utilizzando la realtà aumentata, DOI:10.1109/ICALT61570.2024.00018, *Conferenza internazionale IEEE sulle tecnologie avanzate per l'apprendimento (ICALT) del 2024*

Liu M, Wang S e Jiang L 2017 Sistemi di superbagnabilità ispirati alla natura *Nat. Rev. Mater.* **2** 17036.

Liu G, Gao F, Gao C e Xiong Y 2021 Bioispirazione verso sistemi fotosintetici efficienti: dai bioibridi alla biomimetica *Chem. Catal.* **1** 1367–77.

Mirkovic T, Ostroumov E E, Anna J M, van Grondelle R, Govindjee e Scholes G D 2017 Assorbimento della luce e trasferimento di energia nei complessi antenna degli organismi fotosintetici *Chem. Rev.* **117** 249–93.

Navarro-Segarra M, Tortosa C, Ruiz-Díez C, Desmañele D, Gea T, Barrena R, Sabaté N e Esquivel J P 2022 Una batteria simile a una pianta: una fonte di energia biodegradata eco-ingegnerizzata per l'agricoltura di precisione *Energy Environ. Sci.* **15** 2900–15.

Nguyen P D, Duong T M e Tran P D 2017 Progressi attuali e sfide nell'ingegneria di foglie artificiali funzionali per la scissione solare dell'acqua *J. Sci.: Adv. Mater. Devices* **2** 399–417

Pires N D e Dolan L 2012 Evoluzione morfologica nelle piante terrestri: nuovi modelli con vecchi geni *Phil. Trans. R. Soc. A* **367** 508–18.

Reece S Y, Hamel J A, Sung K, Jarvi T D, Esswein A J, Pijpers J J H e Nocera D G 2011 Scissione solare dell'acqua senza fili utilizzando semiconduttori a base di silicio e catalizzatori abbondanti sulla Terra *Science* **334** 645–8





Sun Z, Liao T, Li W, Qiao Y e Ostrikov K 2019 Oltre le conchiglie: dispositivi fotonici e fotoelettronici 2D bioispirati Adv. Funct. Mater. [29 1901460](#)

Van Noorden R 2012 La “foglia artificiale” affronta un ostacolo economico Natura (<https://doi.org/10.1038/nature.2012.10703>)

Velasco-Garcia L e Casadevall C 2023 Sistemi fotocatalitici bioispirati per la fotosintesi artificiale compartmentalizzata Commun. Chem. 6 263.

Wang.Z, Hu.Y, Zhang.S e Sun.Y. 2022. Sistemi di fotosintesi artificiale per la conversione e l'immagazzinamento dell'energia solare: piattaforme e loro realtà, DOI: 10.1039/d1cs01008e

Wijerathne.B, Liao.T, Jiang.X, Zhou.J e Sun.Z. (2025). Superfici e interfacce ispirate alle piante per tecnologie sostenibili, <https://doi.org/10.1088/2752-5724/ad93ea>

Yu L, Li X, Luo C, Lei Z, Wang Y, Hou Y, Wang M e Hou X 2024 Iontronica nanofluidica bioispirata per il calcolo simile al cervello Nano Res. [17 503–14](#)

Zhang F, Liao T, Yan C e Sun Z 2024 Progettazione bioispirata in batterie attive a base di metalli Nano Res. [17 587–601](#)

Zhang Y, Mei J, Yan C, Liao T, Bell J e Sun Z 2020 Nanomateriali 2D bioispirati per applicazioni sostenibili Adv. Mater. [32 1902806](#)

Zhang F, Liao T, Yan C e Sun Z 2024 Progettazione bioispirata in batterie attive a base di metalli Nano Res. [17 587–601](#)

Zhou H, Guo J, Li P, Fan T, Zhang D e Ye J 2013 Sistema fotosintetico artificiale gerarchico 3D con architettura a foglia di titanati di perovskite per la fotoriduzione della CO₂ in combustibili idrocarburici Sci. Rep. 3 1667

<https://avrd.medien-campus.h-da.de/projekt/95635/?utm>

https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/?utm_source=chatgpt.com

https://www.rsb.org.uk/images/15_Photosynthesis.pdf

<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>

https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/special-programs/Education_in_Agriculture/soybean-science/GRC%20Photosynthesis%20lesson-final.pdf

<https://opentextbc.ca/biology/chapter/5-1-overview-of-photosynthesis/>





<https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/>

<https://techxplore.com/news/2023-08-bio-inspired-solar-devices-boost-stability.html>

<https://list.solar/news/bio-inspired-1/>

https://stileapp.com/static/CLL%20handouts/Lesson_035_handout.pdf

<https://sinovoltaics.com/technology/solar-fuels-an-introduction-to-artificial-photosynthesis/>

<https://dotandlinelearning.com/blog/biology/chapter-6-photosynthesis/>

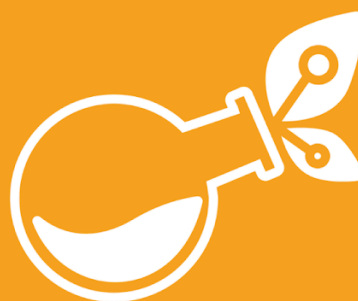
<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>

<https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/>





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.