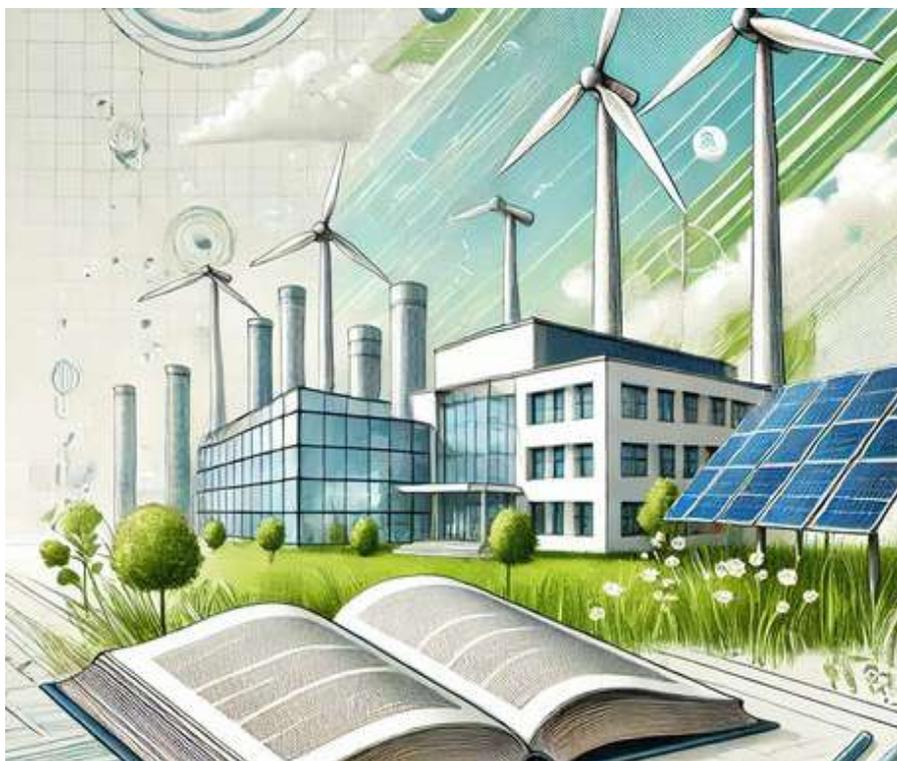


Energie Rinnovabili per le scuole

Il manuale del giovane ingegnere: principi di elettrotecnica e nozioni sulla progettazione di CER.



VALERIO ANGELUCCI

Vice responsabile del progetto di Ricerca di Sistema "l'Utente al centro della transizione energetica"

Prefazione

Una Comunità Energetica Rinnovabile (CER) che generi benefici economici, ambientali e sociali per i suoi membri e per il territorio circostante, richiede una pianificazione attenta di ogni fase del suo sviluppo. Questo processo inizia con l'analisi delle esigenze specifiche del territorio e dei potenziali membri, tra cui spiccano gli istituti scolastici. Le scuole agiscono come catalizzatori di cambiamento, svolgendo un ruolo essenziale nell'educare le nuove generazioni alla sostenibilità ambientale, incoraggiarli a partecipare a progetti di cittadinanza attiva, contribuendo così alla loro formazione civica. Investendo in efficienza energetica e in impianti a fonte rinnovabile, questi luoghi di formazione non solo testimoniano il processo di transizione energetica, ma ottengono significativi risparmi sui costi di approvvigionamento dell'energia, risparmi che possono essere reinvestiti per migliorare sia l'offerta didattica che l'infrastruttura edilizia. Dal punto di vista educativo, l'integrazione di una scuola in una CER offre agli studenti l'opportunità di apprendere, attraverso esperienze pratiche, il funzionamento delle tecnologie per la produzione di energia rinnovabile e le loro modalità di gestione. Tale coinvolgimento non solo arricchisce il loro percorso di studi, ma potenzia le loro capacità di ragionamento, di risoluzione di problemi pratici, di lavoro di squadra e di pensiero critico. In un mondo, dove la sostenibilità ambientale è diventata una priorità, gli studenti supportati da insegnanti ed esperti del settore, sono chiamati a diventare cittadini informati e responsabili: questo processo migliora l'immagine della scuola italiana e attrae aziende che riconoscono in queste pratiche educative un valore aggiunto per il futuro del lavoro. Questo manuale fornisce nozioni didattiche e informazioni pratiche per insegnare cosa sono le comunità rinnovabili, il contesto di riferimento in cui si collocano e i criteri di progettazione. È principalmente rivolto agli studenti di istituti tecnici e scientifici, ma è utile anche a chiunque

volesse acquisire conoscenze di base sul settore dell'energia. I contenuti di questo manuale non forniscono una trattazione esaustiva degli argomenti legati all'ampio mondo dell'elettrotecnica. Piuttosto, sono offerte nozioni di base spiegate in modo semplice per essere comprese dai lettori meno esperti, che sentono il bisogno di comprendere l'importanza delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) nel contesto della transizione energetica. Il manuale è strutturato in tre sezioni principali: la prima introduce i concetti fondamentali dell'elettrotecnica, necessari per affrontare le tematiche successive; la seconda esplora l'organizzazione del sistema di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica e infine, la terza sezione, contiene delle vere e proprie lezioni teoriche e pratiche, utili a progettare una comunità energetica con studenti delle superiori.

Il manuale è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico Italiano, nell'ambito dell'Accordo di Contratto tra RSE S.p.A. e il Ministero dello Sviluppo Economico - Direzione Generale per il Mercato Elettrico, le Energie Rinnovabili e l'Efficienza Energetica, l'Energia Nucleare, secondo quanto stabilito dal Decreto del 16 aprile 2018.

Ringraziamenti

Il manuale si rivela uno strumento essenziale per chiunque voglia acquisire competenze tecniche sul mondo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e desideri contribuire attivamente alla loro realizzazione, soprattutto nel contesto scolastico. Il testo mira a trasmettere un messaggio chiaro: *la sostenibilità non è solo un ideale teorico, ma una responsabilità condivisa che si concretizza attraverso azioni quotidiane e progetti tangibili*. I contenuti riportati sono stati pianificati con il supporto del corpo docente dell'Istituto di Istruzione Superiore "**Evangelista Torricelli**" di Milano. Un doveroso ringraziamento va:

Alla Preside *Georgia Lauzi*

Al Professor *Alberto Salioni*

Al professore *Daniele Monga*

Alla professoressa *Sonia Di Gioia*

Per il supporto nella divulgazione delle lezioni e lo sviluppo degli strumenti funzionali alla didattica, ai ricercatori RSE:

Paolo Serafini

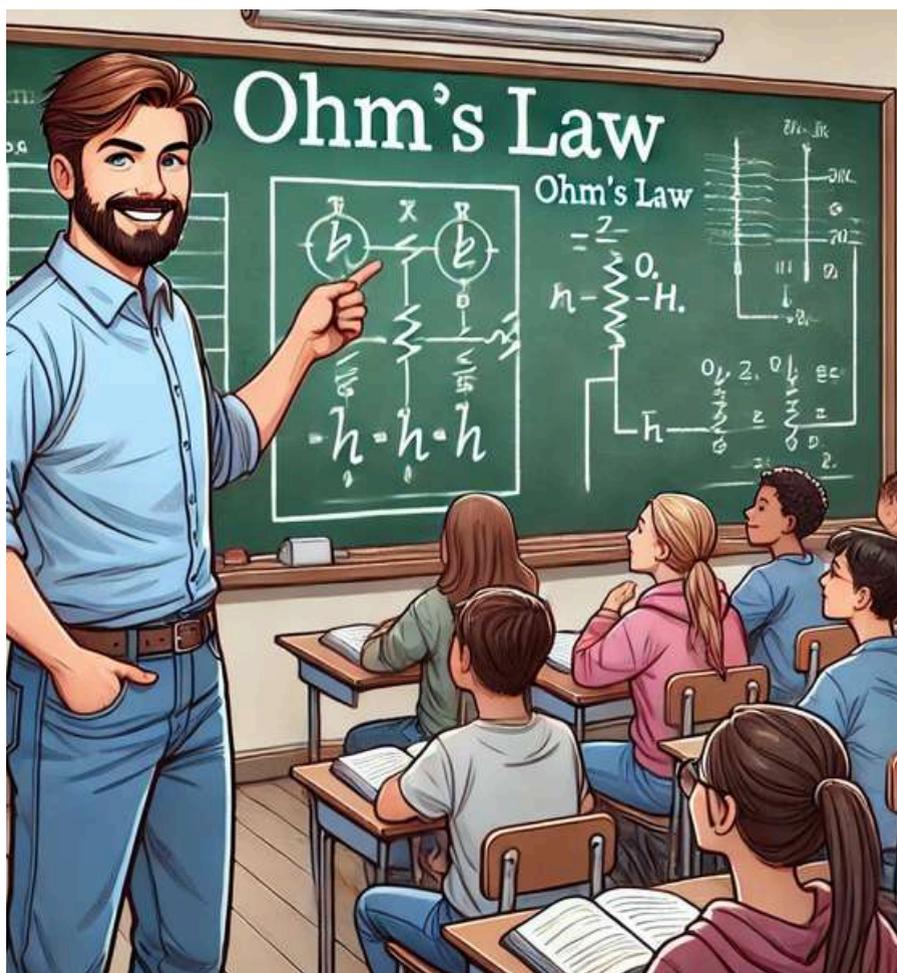
Enrico Morandini

Antonino Rollo

Federico Aleotti

Debora Cilio

Al Direttore *Michele Benini*, al Vicedirettore *Diana Moneta*, al responsabile del progetto "L'utente al centro della transizione energetica" *Matteo Zulianello*, al capo gruppo reti attive: gestione e distribuzione della domanda *Marco Rossi* e al Prof. Emilio Ghiani dell'università degli studi Cagliari, per la loro preziosa collaborazione nella fase di revisione della pubblicazione.



Parte 1:

principi di elettrotecnica



1.1 Cos'è l'elettricità

Con il termine “**elettricità**” si indica la presenza di cariche elettriche, che possono essere sia statiche che in movimento. Le cariche statiche, studiate nell'ambito dell'elettrostatica[1], possiedono energia potenziale[2], mentre le cariche in movimento, come gli elettroni che fluiscono attraverso un conduttore, manifestano energia cinetica[3]. Quest'ultima è essenziale per il funzionamento dei dispositivi elettrici ed elettronici che utilizziamo quotidianamente. L'elettricità ci permette infatti di illuminare le città, riscaldare e raffreddare gli edifici, supportare la produzione industriale e alimentare una vasta gamma di dispositivi come i motori elettrici, i computer e altri apparecchi elettronici. Il suo studio ha richiesto secoli di ricerca scientifica e, grazie agli sforzi di molti scienziati, oggi possiamo sfruttarla in modo efficiente e sostenibile. Di seguito, si riportano i principali progressi ottenuti nel campo dell'elettrotecnica, un ramo dell'ingegneria dedicato allo studio, alla progettazione, allo sviluppo e all'applicazione di tecnologie e sistemi elettrici:

- **Antichità:** il filosofo Talete di Mileto scoprì il fenomeno della forza elettrostatica osservando, che strofinando l'ambra (in greco “elektron”) con un panno, si potevano attirare piccoli oggetti.



[1] L'elettrostatica è il ramo della fisica che studia le forze e i fenomeni associati alle cariche elettriche stazionarie e alla loro modalità di accumulo.

[2] È l'energia che la carica possiede e che è pronta a rilasciare quando si muove verso un'altra carica.

[3] È l'energia che le cariche trasportano mentre si muovono e che può essere trasformata in altre forme come: luce, calore o energia meccanica, successivamente convertita in elettrica e utilizzata per alimentare dispositivi elettrici ed elettronici.



- **William Gilbert** (1544-1603): medico e fisico inglese, conìò il termine “elettricità” e studiò le proprietà elettriche di vari materiali. A lui va il merito di aver distinto l’elettricità dal magnetismo.
- **Otto von Guericke** (1602-1686): costruì la prima macchina elettrostatica, un dispositivo che genera cariche elettriche tramite attrito.
- **Benjamin Franklin** (1706-1790): dimostrò che i fulmini sono un fenomeno elettrico, introdusse per la prima volta il concetto di carica positiva (negativa) e inventò il parafulmine.
- **Alessandro Volta** (1745-1827): fisico italiano che inventò la prima batteria elettrica nel 1800, nota come pila voltaica, dimostrando che l’elettricità poteva essere generata chimicamente.
- **Michael Faraday** (1791-1867): scoprì l’induzione elettromagnetica nel 1831, il principio per cui una corrente elettrica può essere generata da un campo magnetico variabile. Faraday costruì anche il primo generatore elettrico.
- **André-Marie Ampère** (1775-1836): fisico e matematico francese che studiò l’elettrodinamica e formulò le leggi sull’interazione tra correnti elettriche.
- **Georg Simon Ohm** (1789-1854): fisico tedesco che descrisse la relazione tra tensione, corrente e resistenza in un circuito elettrico.
- **James Clerk Maxwell** (1831-1879): fisico scozzese che formulò le equazioni che unificarono le teorie dell’elettricità e del magnetismo nell’unica teoria del campo elettromagnetico.
- **Heinrich Hertz** (1857-1894): dimostrò l’esistenza delle onde elettromagnetiche, aprendo la strada allo sviluppo di tecnologie come la radio e il radar.



- **Ernst Werner von Siemens (1816-1892)**: svolse un ruolo fondamentale nello sviluppo delle prime linee telegrafiche e tecnologie relative ai generatori elettrici.
- **Nikola Tesla (1856-1943)**: inventore e ingegnere che sviluppò i principi della corrente alternata (AC), contribuendo alla nascita del sistema di distribuzione elettrica moderno.
- **Thomas Edison (1847-1931)**: inventore e imprenditore che sviluppò molte tecnologie elettriche, tra cui la lampadina a incandescenza e il sistema di distribuzione di corrente continua (DC).
- **Lee De Forest (1873-1961)**: inventore del triodo, ha reso possibile l'amplificazione elettronica, contribuendo allo sviluppo della radio, della televisione e di altri dispositivi elettronici.
- **Samuel Morse (1791-1872)**: inventò il telegrafo e il codice Morse, rivoluzionando le comunicazioni a lunga distanza.
- **Guglielmo Marconi (1874-1937)**: pioniere delle trasmissioni radio a lunga distanza, fondamentale per la moderna comunicazione wireless.
- **Charles Coulomb (1736-1806)**: formulò la legge di Coulomb, essenziale per la teoria dell'elettrostatica.
- **Joseph Henry (1797-1878)**: scoprì l'induzione elettromagnetica indipendentemente da Faraday, influenzando lo sviluppo delle tecnologie elettriche.
- **Emil Lenz (1804-1865)**: formulò la legge di Lenz che descrive la direzione della corrente indotta in un circuito a seguito di una variazione del campo magnetico.
- **Sir. Joseph Wilson Swan (1828-1914)**: ha inventato quasi contemporaneamente e indipendentemente da Thomas Edison la lampadina a incandescenza ed è stato un pioniere nello sviluppo

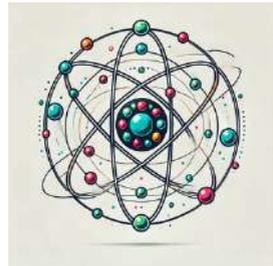


di tecnologie per l'illuminazione.

- **J.J. Thomson** (1856-1940): scoprì l'elettrone, aprendo nuove frontiere nella comprensione della struttura atomica e della fisica.
- **Gustav Kirchhoff** (1824-1887): individuò le leggi per calcolare la corrente e la differenza di potenziale in un circuito elettrico.
- **Robert Millikan** (1868-1953): misurò la carica dell'elettrone con il suo esperimento della goccia d'olio, confermando la quantizzazione della carica elettrica.

La materia alla base dei fenomeni elettrici

Prima di esplorare i fenomeni fisici legati alla corrente elettrica, è essenziale comprendere la struttura atomica della materia, poiché sono gli **elettroni** all'interno degli **atomi** a generare tali fenomeni. Ogni oggetto in natura è composto da atomi, i mattoni fondamentali del mondo che ci circonda, dai gas che respiriamo ai materiali solidi che utilizziamo quotidianamente. Un atomo è formato da un



nucleo centrale^[4] carico positivamente e da elettroni, che sono particelle minuscole con carica negativa. Al suo interno, l'atomo contiene un numero uguale di cariche positive e negative, che gli conferiscono uno stato energetico stabile di equilibrio. È importante notare che, sebbene gli atomi possano differire tra loro in natura, gli elettroni presentano sempre le stesse caratteristiche indipendentemente dall'atomo a cui appartengono.

i [4] Parte centrale dell'atomo che contiene protoni e i neutroni. I protoni hanno una massa di circa $1,67 \times 10^{-27}$ Kg e una carica positiva di $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb, uguale in valore ma opposta in segno alla carica degli elettroni, i quali hanno una massa di soli $9,11 \times 10^{-31}$ Kg. I neutroni, anch'essi nel nucleo, hanno una massa simile a quella dei protoni ma non hanno carica elettrica.



Queste cariche negative si distribuiscono intorno al nucleo dell'atomo su orbitali, cioè regioni dello spazio dove c'è una maggiore probabilità di trovare un elettrone. La disposizione degli elettroni lungo gli orbitali determina i cosiddetti "livelli energetici o bande di energia", fondamentali per comprendere le proprietà elettroniche dei materiali. In fisica e chimica, sono particolarmente importanti la **banda di valenza**, la **banda proibita** e la **banda di conduzione**. La banda di valenza determina le proprietà chimiche del materiale, mentre la banda proibita o gap energetico, è una regione che gli elettroni non possono occupare in condizioni normali (o di equilibrio). La larghezza di questa banda è fondamentale per stabilire la capacità di un materiale di condurre elettricità: *minore è il gap energetico e maggiore è la facilità degli elettroni di arrivare alla banda di conduzione*. I materiali si classificano in:



- **Isolanti:** se hanno un gap energetico molto ampio che impedisce agli elettroni di passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione.
- **Semiconduttori:** caratterizzati da un gap energetico più stretto, questi materiali permettono agli elettroni di raggiungere la banda di conduzione con un modesto apporto energetico, come quello fornito dalla luce (principio di funzionamento delle celle fotovoltaiche).
- **Conduttori (metalli):** in questi materiali la banda proibita è assente e poiché quella di valenza e conduzione coincidono o sono molto vicine, il passaggio degli elettroni è facilitato, garantendo una buona conducibilità elettrica[5].



La maggior parte dei materiali isolanti, conduttori e semiconduttori presenta una struttura cristallina composta da un reticolo spaziale di celle elementari, formate da atomi legati in modo regolare e periodico all'interno della struttura stessa. Nei materiali conduttori, gli elettroni di valenza sono distribuiti uniformemente nel reticolo e, se soggetti a campi di forza, si muovono attraverso di esso, dando origine al fenomeno della corrente elettrica.

1.2 Le cariche elettriche elementari e le grandezze che le governano

In fisica, si definisce **ionizzazione** il processo attraverso il quale un atomo o una molecola neutra perde o guadagna elettroni, formando uno **ione**. Può avvenire per vari motivi come la collisione tra particelle, l'esposizione a radiazioni ad alta energia, o l'influenza di un forte **campo elettrico esterno**. Le cariche elettriche elementari presenti nella materia sono dunque: gli **elettroni**, che hanno una massa molto piccola e gli **ioni**, positivi o negativi, la cui massa è praticamente quella dell'atomo o della molecola da cui derivano (notevolmente superiore a quella degli elettroni). All'interno dei materiali ioni ed elettroni interagiscono tra loro esercitando forze di tipo attrattivo o repulsivo, quantificabili attraverso la legge di Coulomb. Questa legge permette di valutare l'intensità della forza \vec{F} esercitata tra due cariche Q_1 e Q_2 poste a distanza r :

 [5] La conducibilità elettrica, o conduttività elettrica, è una proprietà fisica che esprime la facilità con cui gli elettroni o altre cariche elettriche possono muoversi attraverso un materiale quando è applicato un campo elettrico. Questa grandezza è l'inverso della resistività elettrica e viene comunemente misurata in Siemens per metro (S/m).



$$\vec{F} = K \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

\vec{F} : è la forza di attrazione o repulsione tra le due cariche;

Q_1 e Q_2 : sono le due cariche di riferimento;

r : è la distanza tra le cariche;

K : è la costante di Coulomb, che nel Sistema Internazionale di Unità (SI) vale $8,9875 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.

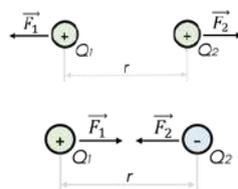
La forza \vec{F} è direttamente proporzionale al prodotto tra le cariche Q_1 e Q_2 e inversamente proporzionale al quadrato della distanza r che le separa. Cariche elettriche dello stesso segno si respingono mentre cariche elettriche aventi segno discorde si attraggono tra loro.

1.3 Il campo elettrico esercitato dalle cariche

Il fenomeno di attrazione o repulsione tra cariche elettriche distanti è causato dalla loro capacità di generare un campo di forze noto con il nome di **campo elettrico**. Il campo elettrico descrive l'interazione tra le cariche nello spazio circostante ed è definito attraverso la formula:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

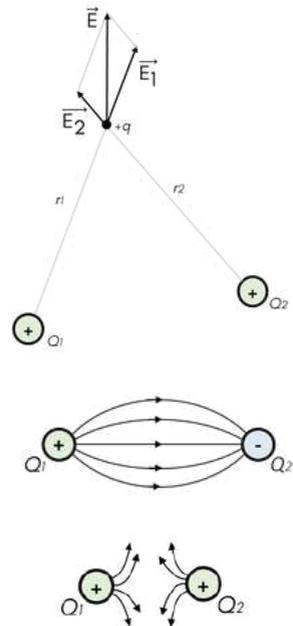
Per comprendere il concetto di campo elettrico, si può pensare a questo come a una zona invisibile che circonda una carica elettrica, che ha la capacità di esercitare una forza attrattiva o repulsiva su altre cariche elettriche situate nelle sue vicinanze. La misura di questo campo si ottiene osservando la forza esercitata su una piccola carica di prova q positiva, collocata in un punto qualunque del campo.





Il campo elettrico si rappresenta in qualsiasi punto dello spazio attraverso un vettore. Questo oggetto matematico non solo quantifica l'intensità di una forza, ma indica anche la direzione e il verso in cui essa agisce: il vettore del campo elettrico \vec{E} , mostra quindi la direzione e l'intensità della forza con cui una carica elettrica q è spinta o tirata in quel punto specifico. Come tutti i campi vettoriali, anche il campo elettrico obbedisce al principio di sovrapposizione.

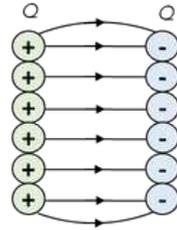
Questo principio stabilisce che \vec{E} in un punto è pari alla somma dei campi generati da ciascuna sorgente posta nelle vicinanze. Osservando la figura a lato, i campi elettrici \vec{E}_1 e \vec{E}_2 sono generati dalla quantità di carica presente in Q_1 e Q_2 e dipendono dalla loro distanza (r_1 , r_2) da q . Maggiore è la quantità di carica elettrica di Q_1 e Q_2 o più vicine sono le cariche a q , più elevata è l'intensità del campo da esse prodotto e di conseguenza quella del campo totale \vec{E} . Convenzionalmente, il campo elettrico è rappresentato da linee di forza che si allontanano dalle cariche positive per andare verso quelle negative; quando si avvicinano cariche dello stesso segno, le linee di forza tendono a divergere.



Posizionando a una certa distanza due strati estesi di cariche di segno opposto, si genera un campo elettrico uniforme nello spazio circostante; in questo campo le linee di forza hanno la stessa intensità, direzione e verso.



Un esempio di dispositivo che genera un campo elettrico uniforme è il condensatore piano, composto da lastre, lamine o nastri metallici: questi elementi, definiti armature, sono mantenuti separati da supporti isolanti che li stabilizzano e li isolano.



1.4 La differenza di potenziale elettrico

Per comprendere cosa sia la differenza di potenziale elettrico, consideriamo una regione dello spazio influenzata da un campo elettrico \vec{E} generato da una carica Q e immaginiamo di inserire in questo campo una carica elementare q . Questa carica è soggetta alla forza di Coulomb, che può essere attrattiva o repulsiva a seconda dei segni assunti dalle cariche Q e q . Spostando la carica q da un punto A a un punto B all'interno del campo, si verifica una variazione dell'energia potenziale^[6] di q , data da:

$$\Delta U = U_B - U_A = -W_{AB}$$

Dove:

U_A è l'energia potenziale elettrica di q nel punto A ;

U_B è l'energia potenziale elettrica di q nel punto B ;

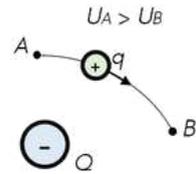
Il termine W_{AB} , riportato nella formula, indica il lavoro compiuto dalla forza elettrica mentre q si sposta da A verso B .



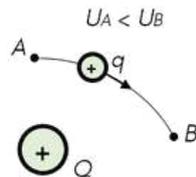
[6] è l'energia che la carica possiede e che è pronta a rilasciare quando si muove verso un'altra carica.



Un **lavoro positivo** avviene quando la direzione del movimento di q è la stessa della forza che agisce tra le cariche. Nell'esempio riportato di lato, q è una carica positiva che si sta muovendo in direzione della carica negativa Q . In questo caso, poiché q si muove in verso concorde con la forza presente tra le cariche (di attrazione), il campo elettrico compie un lavoro positivo su q e la stessa carica, nel movimento, perde energia potenziale che si trasforma in cinetica. Un **lavoro negativo** si verifica quando q deve muoversi contro la direzione della forza elettrica.



Ad esempio, se q è positiva e deve avvicinarsi a un'altra carica positiva Q , occorre compiere un lavoro per vincere la forza di repulsione esistente tra le due cariche: in questo caso, è necessario fornire energia esterna a q per spingerla verso Q . Il lavoro compiuto su q è negativo rispetto alla forza del campo elettrico, il che significa che q guadagna energia potenziale durante il movimento. Da queste considerazioni si può concludere che l'energia potenziale dipende sia dal valore della carica q e sia dalla posizione che la stessa carica assume all'interno del campo elettrico. Concentrandoci sulla dipendenza dalla posizione, possiamo introdurre il concetto di **differenza di energia potenziale**. Questa grandezza elettrica si esprime, per unità di carica, attraverso la formula:



$$\Delta V = \frac{U_B - U_A}{q}$$



Dove:

ΔV è la differenza di potenziale in volt (Joule/Coulomb);

U_A e U_B : sono rispettivamente le energie potenziali al punto A e B;

q : è la quantità di carica;

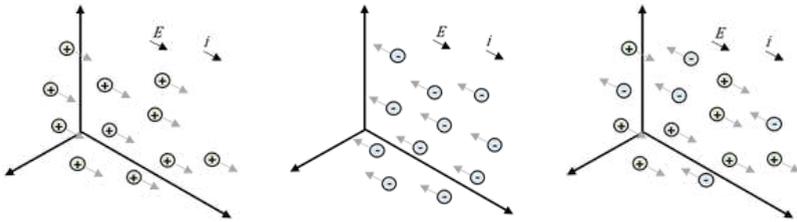
Da un punto di vista pratico, la differenza di potenziale elettrico, o tensione, indica quanta energia potenziale per unità di carica è necessaria per muovere una carica elettrica attraverso un campo elettrico all'interno di un conduttore.

1.5 La corrente elettrica

Una corrente elettrica è il movimento ordinato di cariche elettriche all'interno di un conduttore, che si verifica in risposta all'applicazione di una differenza di potenziale elettrico, ad esempio, tramite un generatore elettrico: *il campo elettrico creato dal generatore esercita una forza sulle cariche, causandone il movimento attraverso il conduttore*. L'intensità della corrente I è definita come la quantità di carica Q che attraversa una sezione trasversale S del conduttore in un intervallo di tempo Δt e si misura in amperes (**A**):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Un ampere corrisponde all'intensità di corrente prodotta dal trasporto di un Coulomb di carica attraverso la sezione del conduttore ogni secondo. Per convenzione, la direzione della corrente (rappresentata nei grafici di seguito riportati) è la stessa del campo elettrico applicato \vec{E} . Pertanto, se la corrente è generata dal movimento di particelle con carica negativa, come gli elettroni, la direzione convenzionale della corrente è opposta al movimento effettivo degli elettroni.



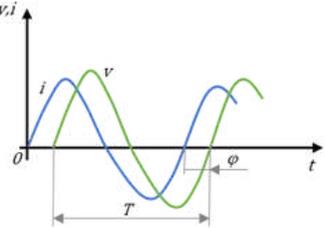
La corrente elettrica può essere continua o alternata. Nella corrente continua (DC), gli elettroni scorrono in modo costante e unidirezionale attraverso il conduttore. Questo movimento si realizza applicando



una tensione continua che stabilisce un campo elettrico uniforme. Gli elettroni si muovono dal punto di potenziale più basso al punto di potenziale più alto. Un esempio di sorgente di corrente continua è la batteria di un'automobile, che ha un morsetto positivo (di potenziale più alto) e uno negativo (di potenziale più basso). La corrente, nella convenzione dei generatori utilizzata in elettrotecnica, esce dal polo positivo della batteria, attraversa l'utilizzatore (ad esempio una lampadina) e ritorna nel polo negativo. Nella corrente alternata (AC), la direzione del flusso di elettroni si inverte periodicamente in risposta a una tensione che cambia verso in modo ciclico. Ogni ciclo T di inversione del verso della corrente o della tensione è chiamato "periodo" e il numero di cicli completi per secondo è detta frequenza e si misura Hertz (Hz). In Italia, la frequenza standard è di 50 Hz, il che significa che la direzione della corrente e tensione cambia 50 volte in un secondo. Due grandezze alternate, come la tensione e la corrente elettrica, si dicono "in fase" se raggiungono i loro valori massimi e minimi nello stesso istante.



Si dicono invece “sfasate” di un angolo φ se i loro valori massimi o minimi si verificano in istanti diversi. Una differenza di fase di 90 gradi, ad esempio, indica che un’onda ha raggiunto il suo massimo valore un quarto di ciclo prima o dopo l’altra.



Nel campo dell’elettrotecnica, l’angolo di sfasamento è comunemente espresso tramite il coseno dell’angolo anche detto “fattore di potenza”. La corrente e la tensione alternata sono le grandezze elettriche più comunemente utilizzate per la trasmissione di potenza su lunghe distanze e per la fornitura di energia elettrica. Questo perché, grazie all’uso di trasformatori, tali grandezze possono essere facilmente aumentate o ridotte in funzione delle esigenze del sistema di distribuzione.

1.6 La resistenza elettrica

La resistenza elettrica indica la proprietà di un materiale di opporsi al passaggio di corrente elettrica ed è definita come il rapporto tra la differenza di potenziale ai capi di un conduttore (o tensione elettrica) e la corrente elettrica che lo attraversa:

$$R = \frac{V}{I} \quad [\Omega]$$

La resistenza è una conseguenza dell’interazione tra gli atomi e il flusso di elettroni in movimento, che scorre nel materiale conduttore (corrente elettrica). Può essere vista come un “attrito” e provoca la perdita di energia che è dissipata sotto forma di calore. Questa grandezza elettrica dipende dalla tipologia del materiale conduttore, dalla sua lunghezza, sezione trasversale e temperatura di esercizio.



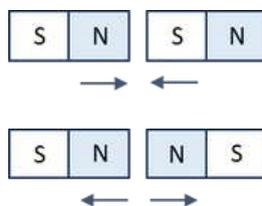
È proporzionale alla lunghezza del conduttore e inversamente proporzionale alla sua sezione. Inoltre, la resistenza aumenta con la temperatura, poiché al crescere di questa grandezza, le interazioni atomiche all'interno del materiale conduttore, rendono più difficile il passaggio degli elettroni. Materiali come il rame e l'argento hanno una bassa resistenza e sono eccellenti conduttori di elettricità, mentre materiali come il vetro e la gomma sono definiti isolanti perché hanno valori di resistenza molto elevati.

1.7 Le sorgenti di campo magnetico

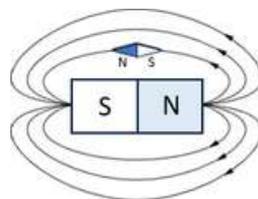
Alcuni minerali in natura, come la magnetite, possiedono la capacità di attrarre materiali ferrosi come, ad esempio le limature di ferro.

Questa capacità, chiamata magnetismo, si manifesta in specifiche aree della superficie del minerale denominate poli magnetici, che prendono il nome di polo Nord (N) e polo Sud (S) in analogia ai poli geografici terrestri.

Come per le cariche elettriche, anche i poli magnetici si respingono o si attraggono in funzione della loro tipologia (N o S). Tuttavia, esistono importanti differenze tra i campi magnetici ed elettrici:



1. Nei campi elettrici è possibile isolare cariche positive e negative mentre, nei campi magnetici, non è possibile separare i poli **Nord** e **Sud** che sono sempre uniti.



2. Un magnete altera la struttura fisica dello spazio circostante in modo simile a quanto fa un campo elettrico ma, mentre le linee di flusso in un campo



elettrico partono da una carica isolata e possono estendersi all'infinito, in un campo magnetico queste linee formano sempre un circuito chiuso.

Per visualizzare le linee di flusso del campo magnetico si può collocare un magnete sotto un vetro o un foglio di cartone cosparsi di limatura di ferro. Ponendo vicino al magnete un ago, anch'esso magnetizzato, si orienterà lungo le linee di flusso del campo magnetico, con il polo sud rivolto verso il polo nord del magnete.

1.8 Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica

Il fenomeno dell'induzione magnetica, che è alla base della legge di Faraday-Neumann-Lenz, può essere illustrato tramite un semplice esperimento che richiede un filo di rame, un magnete e un galvanometro [7]. Il filo di rame deve essere disposto su un tavolo a formare un cerchio, noto come spira [8] e il magnete deve essere posizionato a una certa distanza da esso. In questa configurazione iniziale, avvicinando progressivamente il magnete alla spira, si osserva la generazione di una corrente elettrica nel filo. Questo accade perché, nonostante la corrente elettrica sia tipicamente generata dall'applicazione di una tensione ai capi di un conduttore, in questo caso è il movimento del magnete a creare la tensione necessaria per indurre la corrente nella spira. Questo esperimento dimostra il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, descritto dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz:

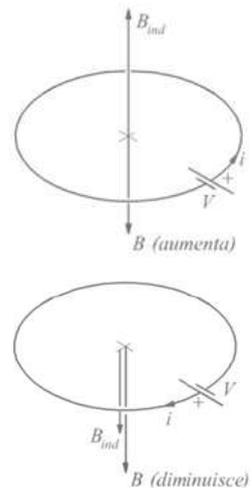
i [7] Un galvanometro è uno strumento estremamente sensibile utilizzato per misurare e rilevare piccole correnti elettriche, dell'ordine dei microampere (μA) o anche inferiori.

[8] Una spira è un circuito conduttore chiuso, attraverso cui può fluire una corrente elettrica.



$$\text{f.e.m.} = - \frac{d\Phi(\mathbf{B})}{dt}$$

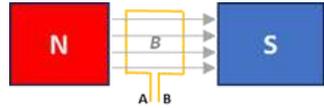
Il primo termine (f.e.m.) rappresenta la forza elettromotrice, mentre il secondo termine è la variazione del flusso del campo magnetico $\Phi(\mathbf{B})$ nel tempo[9]; il segno meno nella formula indica che la f.e.m. indotta si oppone alla variazione di flusso. Se il flusso del campo magnetico $\Phi(\mathbf{B})$ diminuisce, ad esempio, perché il magnete si allontana dalla superficie, la f.e.m. genera una corrente nella spira in modo tale che venga creato un campo magnetico indotto **Bind** che si somma al campo inducente **B**. L'effetto contrario si verifica invece se $\Phi(\mathbf{B})$ aumenta, per esempio, perché il magnete si avvicina alla superficie: *la campo indotto (**Bind**) in questo caso si oppone al campo inducente **B***. Questo fenomeno dimostra che il campo magnetico indotto **Bind** in una spira agisce sempre in modo da opporsi alla variazione del flusso **B** generato dal magnete. La legge di induzione elettromagnetica è fondamentale per il funzionamento dei generatori elettrici (o alternatori), che trasformano l'energia meccanica di rotazione in energia elettrica. Per comprenderne il principio di funzionamento, consideriamo una spira capace di ruotare all'interno in un campo magnetico **B**. Il movimento rotatorio cambia periodicamente l'orientamento della spira rispetto alle linee di forza del campo magnetico, alternando posizioni parallele



[9] Il flusso è la quantità totale di campo magnetico **B** che attraversa la superficie della spira in ogni istante di tempo.



e perpendicolari. In conseguenza di questa rotazione, anche il flusso magnetico $\Phi(\mathbf{B})$ attraverso la spira varia



nel tempo e per la legge di Faraday, questa variazione crea una forza elettromotrice (f.e.m.) nella spira. Se in questa condizione uniamo i morsetti **A** e **B** con un conduttore, la f.e.m indotta determina la circolazione di corrente elettrica nel circuito che, a sua volta, genera un proprio campo magnetico indotto (**Bind**) opposto a $\Phi(\mathbf{B})$. Se il circuito include un utilizzatore, come una lampadina, la corrente indotta attraverserà questo carico, esercitando lavoro sotto forma di luce e calore. Matematicamente il flusso indotto nella spira al tempo t si esprime attraverso la formula:

$$\Phi(\vec{B}) = A \cdot \vec{B} \cdot \cos(\omega t)$$

Con:

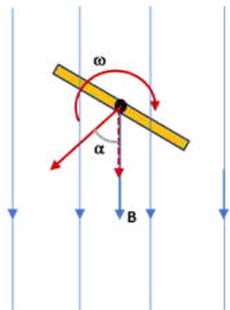
A: pari all'area della superficie della spira

a: uguale a $\omega t = 2\pi f \cdot t$ dove **f** è la frequenza di rotazione e **t** il tempo.

Il flusso indotto $\Phi(\mathbf{B})$ è:

- nullo quando la superficie della spira è parallela alle linee di forza del campo inducente **B**;
- massimo quando la superficie della spira è perpendicolare alle linee di forza di **B**.

Il segno del flusso (positivo o negativo) dipende dalla direzione relativa del campo magnetico rispetto al verso di rotazione della spira. La f.e.m.

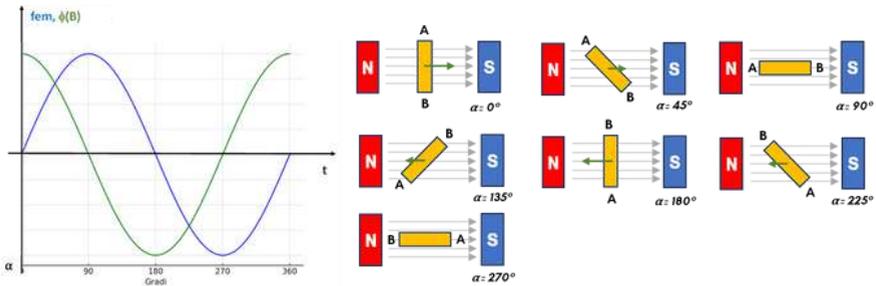




indotta si calcola come derivata del flusso Φ (**B**) e si esprime con la formula:

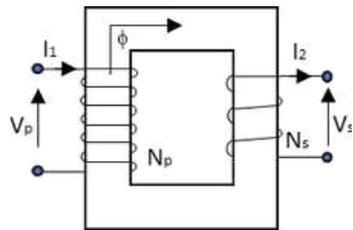
$$f.e.m. = -A \cdot B \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

In figura si evidenzia come la rotazione della spira provochi una variazione del flusso indotto Φ (**B**) e produca di conseguenza una fem (indicata in blu nel grafico) anch'essa variabile nel tempo e tale da opporsi alla variazione di Φ (**B**): quando Φ (**B**) diminuisce la f.e.m. aumenta e viceversa.



1.9 Il trasformatore

Il trasformatore sfrutta il principio di induzione elettromagnetica per modificare i livelli di tensione e corrente in un circuito elettrico. È composto da due o più avvolgimenti di filo conduttore, denominati avvolgimento primario e secondario, disposti attorno a un nucleo di materiale ferromagnetico. Il nucleo può essere di forma toroidale o a colonna e ha la funzione di concentrare e guidare il flusso magnetico attraverso gli avvolgimenti.





Quando si applica una tensione alternata all'avvolgimento primario (V_p) è generato un campo magnetico alternato nel nucleo, che induce una tensione nell'avvolgimento secondario (V_s). La relazione tra le tensioni nei due avvolgimenti è determinata dal rapporto tra il numero di spire dell'avvolgimento secondario (N_s) e primario (N_p), noto con il nome di rapporto di trasformazione k :

$$k = \frac{N_s}{N_p}$$

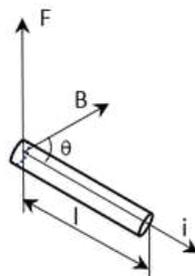
Attraverso k , si calcola la tensione sull'avvolgimento secondario con la formula:

$$V_s = k \cdot V_p$$

Il rapporto di trasformazione permette di aumentare o diminuire la tensione in funzione delle necessità del circuito e rende i trasformatori strumenti essenziali nelle reti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. Per consentire un trasporto efficiente dell'energia elettrica, la tensione deve essere aumentata presso le centrali elettriche in modo da ridurre le perdite di energia dovute alla trasmissione su lunghe distanze e, nei pressi dei centri abitati, deve essere ridotta a livelli sicuri e pratici per l'uso quotidiano in case e aziende produttive.

1.10 La forza di Lorentz

Un conduttore percorso da corrente elettrica, quando posto in un campo magnetico è soggetto a una forza F perpendicolare alla direzione della corrente. Questa forza, che è la risultante delle forze magnetiche esercitate su

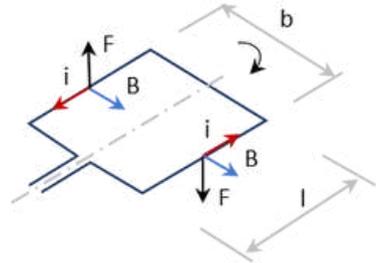




ciascuna delle cariche in moto, è proporzionale alla lunghezza del conduttore e si esprime con la formula:

$$F = l \cdot B \cdot i \cdot \sin\theta$$

dove θ è l'angolo formato dall'asse del conduttore con la direzione del vettore campo magnetico \mathbf{B} . Se il conduttore è parallelo al campo ($\theta=0^\circ$), la forza \mathbf{F} è nulla; al contrario, è massima quando il conduttore è perpendicolare al campo magnetico \mathbf{B} ($\theta=90^\circ$). La forza di Lorentz



stabilisce il principio di funzionamento di un motore elettrico. Ponendo una spira di materiale conduttore all'interno di un campo magnetico, si osserva la comparsa di una coppia di forze sui lati della spira, che sono perpendicolari alle linee di flusso del campo: queste due forze sono distanti tra loro b (larghezza della spira), hanno uguale valore (modulo) ma versi contrari. L'azione di queste forze contrapposte genera una coppia torcente che fa ruotare la spira. Nei motori elettrici, l'interazione di queste forze è responsabile della rotazione dell'albero motore e della produzione di lavoro meccanico.

1.11 I circuiti elettrici

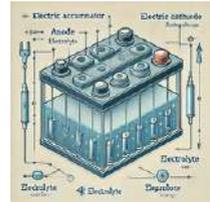
Un circuito elettrico consente il passaggio di corrente elettrica attraverso componenti interconnessi. Nella sua forma più semplice è costituito da:

- **Un generatore;**
- **Un utilizzatore;**
- **Conduttori** che collegano il generatore all'utilizzatore.



Come precedentemente visto, il generatore è un dispositivo che impone una differenza di potenziale (f.e.m.) ai suoi morsetti. Questa forza elettromotrice è responsabile del movimento degli elettroni nel circuito. È importante notare che la tensione effettiva ai morsetti del generatore può differire dalla f.e.m. a causa della resistenza interna del generatore stesso. I generatori possono essere:

- **Statici**, come gli accumulatori che sono reversibili e possono essere ricaricati, immagazzinando energia elettrica per un uso successivo.
- **Rotanti**, come alternatori e dinamo che trasformano l'energia meccanica in elettricità. Gli alternatori generano corrente alternata, mentre le dinamo sono note per la loro produzione di corrente continua.

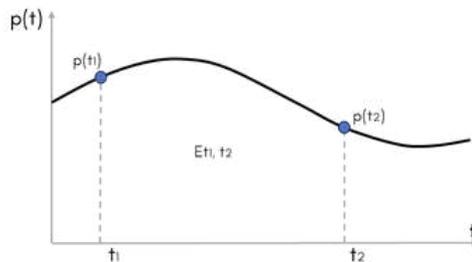


Entrambi i generatori sfruttano il principio dell'induzione elettromagnetica, che si verifica in presenza di conduttori in rotazione all'interno di un campo magnetico. Un generatore in linea generale è composto da una parte fissa, lo statore, e una parte mobile, il rotore. Entrambe le parti contengono conduttori elettrici organizzati in avvolgimenti che formano due circuiti distinti: uno per creare il campo magnetico (avvolgimento induttore o di eccitazione) e l'altro in cui è generata la forza elettromotrice indotta (avvolgimento indotto). Gli utilizzatori sono dispositivi che richiedono corrente elettrica per funzionare e si differenziano ampiamente per dimensione e scopo. Questi dispositivi spaziano dai piccoli apparecchi elettronici, come smartphone e laptop agli elettrodomestici e macchine elettriche industriali.



1.12 La potenza elettrica e energia

In elettrotecnica, la potenza è il flusso di lavoro per unità di tempo e, nel sistema internazionale si misura in watt ($W=J/s$). La potenza elettrica P_e varia in base al tipo di corrente che, come visto, può essere continua o alternata:



- corrente continua: $P_e = V \cdot I$
- corrente alternata monofase: $P_e = V \cdot I \cdot \cos\varphi$
- corrente alternata trifase: $P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$

Per erogare corrente alternata monofase o trifase si usano equivalenti sistemi. Un sistema monofase, comunemente utilizzato in ambienti residenziali, impiega due conduttori per trasportare l'energia elettrica: uno detto fase e l'altro neutro. La corrente fluisce attraverso il conduttore di fase mentre il neutro chiude il circuito e permette il passaggio di corrente.



Parte 2: il sistema elettrico nazionale



Un sistema elettrico è un insieme di componenti organizzati per gestire la produzione, la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica verso una varietà di utenze come le abitazioni residenziali, gli edifici commerciali e gli impianti industriali. Qui di seguito, vengono descritte le due principali tipologie di sistemi elettrici, centralizzati e distribuiti.

2.1 I sistemi elettrici centralizzati

Un sistema elettrico centralizzato è un modello di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica, che si avvale di grandi centrali e di linee di trasmissione a lunga distanza. Questo sistema è progettato per distribuire l'energia e alimentare le utenze dislocate su tutto il territorio nazionale.



La produzione di energia elettrica avviene attraverso la trasformazione di una fonte di energia primaria, che è utilizzata nella sua forma originale.



In funzione del numero di trasformazioni impiegate nel processo produttivo, si distinguono due metodi di conversione principali:

- **diretto:** sfrutta la fonte primaria nella sua forma originaria senza trasformazioni intermedie.
- **indiretta:** implica più stadi di trasformazione in una o più forme di energia intermedie.

Le fonti primarie di energia si dividono in due categorie principali:

1. **fonti rinnovabili:** che si rigenerano naturalmente e non si esauriscono nel tempo, come il vento e il sole.
2. **fonti non rinnovabili:** la cui disponibilità si riduce con il loro utilizzo, come i combustibili fossili.

Segue una classificazione delle principali fonti energetiche utilizzate per la produzione su larga scala di energia elettrica:

- **idraulica:** energia derivante dalle masse d'acqua confinate in bacini di accumulo o presenti nei corsi fluviali.
- **fossile:** energia proveniente da combustibili come olio, carbone e gas naturale.
- **nucleare:** energia generata attraverso processi di fissione.
- **geotermica:** energia prodotta dal calore endogeno della Terra, sfruttando vapore, acqua o rocce sotterranee.
- **solare:** energia ottenuta dalla luce e dal calore del sole, tramite processi diretti o intermedi.
- **eolica:** energia prodotta dal movimento delle masse d'aria.
- **combustibili non tradizionali:** come biomasse e biogas, derivati da residui agricoli.



Si riporta di seguito una breve descrizione della modalità di produzione dell'energia elettrica attraverso queste fonti primarie di energia.

2.2 Centrali idroelettriche

Le centrali idroelettriche sono uno dei sistemi più consolidati e diffusi per la produzione di energia rinnovabile. Questi impianti sfruttano l'energia potenziale dell'acqua per generare elettricità, attraverso l'utilizzo di tre componenti principali:

1. **Condotte forzate:** conducono l'acqua verso la turbina, permettendo la trasformazione dell'energia potenziale in energia di pressione[10].



2. **Turbine idrauliche:** trasformano l'energia di pressione dell'acqua in energia meccanica rotazionale. Tra le turbine più diffuse si annoverano:

- La turbina Kaplan, particolarmente adatta in luoghi con bassi dislivelli[11] ma grandi portate d'acqua. Solitamente, si utilizzano in fiumi che presentano un flusso abbondante d'acqua.



[10] L'energia di pressione rappresenta il lavoro potenziale che può essere svolto dall'acqua quando è sottoposta a pressione idrostatica. La pressione idrostatica, in un punto specifico, è determinata dalla pressione esercitata dalla colonna d'acqua situata al di sopra di quel punto. Questo tipo di energia riflette la capacità dell'acqua di compiere lavoro quando viene trasformata da energia potenziale a energia cinetica, ad esempio, quando scorre attraverso una turbina.



- La turbina Francis, si utilizza per dislivelli medi fino a 300 m e un'ampia gamma di portate d'acqua. Questa versatilità fa delle turbine Francis una scelta comune per centrali idroelettriche che non hanno né cadute estremamente alte né flussi eccessivamente bassi.
- La turbina Pelton, composta da una ruota con pale a forma di cucchiaino è ottima per dislivelli molto elevati, tipicamente superiori ai 300 metri, e portate d'acqua relativamente modeste. La Pelton è quindi ideale per siti montani dove l'acqua cade da grandi altezze.

3. **Generatore elettrico:** converte l'energia meccanica rotazionale della turbina in corrente alternata trifase sinusoidale.

Le centrali idroelettriche si classificano in due categorie:

1. **Centrali ad acqua fluente:** utilizzano direttamente la corrente di un fiume, sfruttando il dislivello naturale senza necessità di grandi sbarramenti (dighe), se non quelli minimi per la derivazione dell'acqua.
2. **Centrali a serbatoio:** realizzate creando un grande vaso tramite una diga che forma un lago artificiale. L'acqua è successivamente indirizzata verso la centrale tramite condotte forzate che si adattano alla morfologia del territorio.

Questi impianti rappresentano una soluzione efficace per la generazione di energia pulita, poiché sfruttano la forza naturale dell'acqua.

i [11] Il dislivello è la differenza di altezza tra due punti, come ad esempio tra l'inizio e la fine di una condotta forzata, o tra il livello superiore e quello inferiore di un fiume o di una diga. Questa differenza è importante per determinare la caduta di pressione e il potenziale energetico disponibile per la produzione di energia idroelettrica.



2.3 Centrali termoelettriche

Nelle centrali termoelettriche, il processo di conversione di una fonte primaria in energia elettrica avviene attraverso processi intermedi che sfruttano le proprietà termiche e meccaniche dei fluidi, tipicamente il vapore. La conversione della fonte primaria prevede:



- **la combustione e la produzione di vapore:** il combustibile (carbone, gas naturale, olio, o altro) è bruciato in una caldaia e il calore prodotto è utilizzato per riscaldare l'acqua contenuta nei tubi o nei serbatoi di un generatore di vapore.
- **Conversione del vapore in energia meccanica di rotazione:** il vapore ad alta pressione in uscita dal generatore spinge le pale di una turbina ponendole in rotazione.
- **Produzione di energia elettrica:** la turbina è collegata a un alternatore, che converte l'energia meccanica di rotazione in energia elettrica.
- **Condensazione:** il vapore in uscita dalla turbina è successivamente raffreddato in un condensatore e trasformato nuovamente in acqua che è riutilizzata nel ciclo.

Le centrali termoelettriche si classificano in:



- **Centrali a carbone:** utilizzano il carbone come combustibile principale. Sono tra le più diffuse sul pianeta ma anche tra le più inquinanti a causa delle alte emissioni di anidride carbonica e altri gas.
- **Centrali a gas naturale:** utilizzano un gas naturale meno inquinante del carbone. Sono più efficienti e hanno tempi di avviamento più rapidi rispetto alle centrali a carbone.
- **Centrali a olio combustibile:** simili a quelle a gas naturale, ma utilizzano oli combustibili pesanti. Sono meno efficienti e più inquinanti rispetto a quelle a gas.
- **Centrali a ciclo combinato:** combinano una turbina a gas e una turbina a vapore per migliorare l'efficienza complessiva del processo di produzione. Il calore residuo proveniente dalla turbina a gas è utilizzato per produrre vapore contribuendo a rendere più efficiente il ciclo di produzione dell'energia elettrica.

2.4 Centrali nucleotermoelettriche

Le centrali nucleari utilizzano la fissione nucleare di atomi radioattivi, come ad esempio l'uranio, per generare calore. Questi elementi sono scelti per la loro capacità di mantenere una reazione a catena controllata all'interno del reattore, che costituisce il cuore della centrale e il luogo dove avviene il processo di fissione [12].

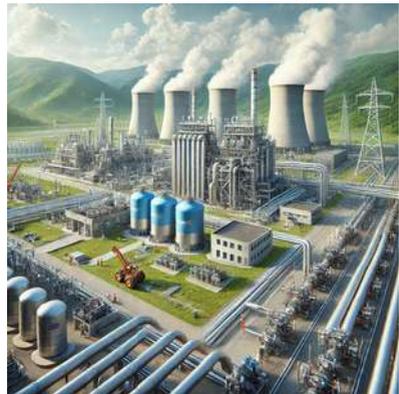




Nel reattore, il combustibile nucleare è contenuto insieme ad altri elementi come l'acqua o la grafite, che aiutano a controllare la reazione di fissione. Il calore generato in maniera continua e controllata è trasferito a un generatore di vapore e successivamente indirizzato in una turbina. La turbina trasforma l'energia termica e di pressione in energia meccanica, utilizzata per produrre energia elettrica tramite l'alternatore.

2.5 Centrali geotermoelettriche

Le centrali geotermiche utilizzano l'energia termica intrinseca della Terra per produrre calore ed energia elettrica. Si differenziano tra loro in funzione della tipologia di sistema idrotermale impiegato:



- **centrali geotermiche a dominanza di vapore:** sfruttano formazioni rocciose permeabili da cui il vapore saturo secco o surriscaldato viene estratto e inviato direttamente alle turbine.
- **centrali geotermiche ad alta temperatura a dominanza d'acqua:** utilizzano siti in cui sono presenti rocce permeabili che contengono acqua in pressione. Una volta portata in superficie, l'acqua si trasforma in una miscela bifase (acqua e vapore), da cui il vapore è estratto e indirizzato verso le turbine.

 [12] La fissione nucleare consiste nel bombardare nuclei pesanti, come l'uranio, il plutonio o il torio, con neutroni. Questo processo divide i nuclei in due frammenti



- **centrali geotermiche a bassa temperatura a dominanza d'acqua:** utilizzano il calore dell'acqua per riscaldare un fluido con un basso punto di ebollizione il cui vapore, espandendosi, aziona le turbine.

In tutte queste centrali, il lavoro meccanico prodotto dalla turbina è utilizzato per far ruotare un alternatore e produrre energia elettrica.

2.6 Conversione dell'energia solare

La conversione dell'energia solare in elettrica avviene attraverso due principali tecnologie:

- **Centrali solari a concentrazione:** utilizzano un campo di specchi orientabili chiamati eliostati, che riflettono e concentrano i raggi solari verso una caldaia. Il vapore prodotto ad alta temperatura è in seguito inviato a una turbina collegata a un alternatore. Questo metodo è particolarmente efficace in aree con elevata radiazione solare.
- **Pannelli fotovoltaici:** convertono direttamente la luce solare in elettricità sfruttando l'effetto fotovoltaico. Questo fenomeno, si verifica quando la radiazione luminosa dei fotoni colpisce un materiale semiconduttore come il silicio.



più piccoli, ciascuno con una carica positiva, che si respingono violentemente, allontanandosi l'uno dall'altro con elevata energia cinetica.



L'energia elettrica continua prodotta dai pannelli è convertita in corrente alternata tramite inverter statici, che la rendono compatibile con la rete elettrica di distribuzione dell'energia.



2.7 Centrali eoliche

Un impianto eolico converte l'energia cinetica del vento in meccanica e successivamente elettrica, attraverso il movimento rotatorio delle pale collegate a un generatore. La quantità di energia meccanica prodotta da una turbina eolica è direttamente proporzionale alla velocità del vento e la potenza elettrica generata, aumenta con il cubo della stessa. Ciò significa, che piccoli incrementi della velocità del vento,



possono produrre significativi aumenti nella produzione di energia. Per mantenere un'efficienza costante anche con venti più deboli, le turbine sono spesso dotate di pale di diametro maggiore. I componenti principali di un impianto eolico sono:

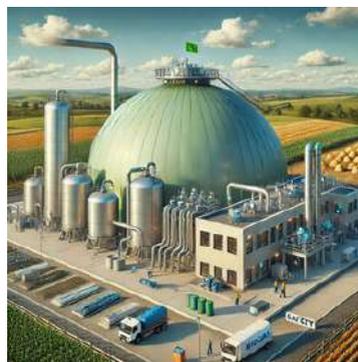
- **le pale:** grandi eliche, il cui diametro può raggiungere decine di metri, progettate per catturare l'energia cinetica del vento.
- **la navicella:** involucro situato sulla sommità della torre, che contiene componenti chiave come il generatore, la trasmissione e l'albero di rotazione delle pale.



- **la torre:** struttura che sostiene la navicella e le pale, elevandole a quote maggiori per sfruttare venti più forti e costanti.
- **Il generatore:** dispositivo che converte l'energia meccanica rotazionale delle pale in energia elettrica.

2.8 Centrali a combustibili poveri, rifiuti urbani, biogas

Le centrali che utilizzano combustibili poveri, rifiuti urbani o biogas, trasformano in energia elettrica risorse che altrimenti verrebbero scartate o sottoutilizzate. Per i materiali diversi dal biogas, l'incenerimento avviene in letti fluidizzati costituiti tipicamente da particelle solide inerti come la sabbia. Un flusso d'aria ascendente attraversa il letto, solleva e mescola le particelle e



rende la combustione più efficiente grazie allo stato di fluidizzazione. La co-combustione di rifiuti urbani con combustibili convenzionali, come il carbone è una importante applicazione di questa tecnologia. I rifiuti vengono: trattati, ridotti in particelle, miscelati con il carbone e bruciati nel letto fluidizzato, contribuendo alla riduzione del volume dei rifiuti e al recupero di energia.

Le centrali a biogas utilizzano la fermentazione anaerobica di materiali organici come i residui agricoli per produrre biogas, che è successivamente utilizzato per generare calore ed energia elettrica.



2.9 Energia dal mare

L'utilizzo dell'acqua marina per produrre energia elettrica si basa su tre metodi principali: energia delle maree, del moto ondoso e termica del mare. L'energia delle maree impiega un impianto idroelettrico a due bacini che opera seguendo i cicli delle maree. Durante l'alta marea, l'acqua si accumula nel bacino superiore, mentre nella bassa marea, fluisce verso il bacino inferiore; le turbine, collocate tra i due bacini, sfruttano il dislivello per generare energia. Un esempio storico è la centrale marina situata nell'estuario del fiume Rance in Bretagna (Francia). Gli impianti che sfruttano il moto ondoso, utilizzano l'energia cinetica e potenziale delle onde per generare elettricità. Il movimento naturale delle onde è convertito in energia meccanica e successivamente in elettrica, attraverso dispositivi installati sulla costa o in acque poco o molto profonde. Le principali tecnologie includono:



- **Boe:** questo sistema utilizza un insieme di bracci idraulici e ingranaggi per convertire le oscillazioni verticali delle onde in energia meccanica. L'energia meccanica è successivamente trasformata in energia elettrica tramite un generatore. Le boe sono particolarmente efficaci in aree con forte attività ondosa.
- **Colonna d'acqua oscillante (OWC):** questa tecnologia impiega una struttura fissa, generalmente installata lungo la costa, con una base aperta sotto il livello del mare e una parte superiore chiusa. Le onde che entrano nella struttura spingono una colonna.



d'aria verso l'alto, azionando una turbina collegata a un generatore elettrico. Questo metodo è efficace per convertire l'energia delle onde in energia elettrica senza l'uso di parti mobili in acqua.

- **Pelamis (serpente di mare):** composto da sezioni cilindriche articolate che si flettono l'una rispetto all'altra mentre galleggiano sulla superficie del mare. I movimenti relativi tra le sezioni, indotti dalle onde, vengono convertiti in energia elettrica attraverso sistemi idraulici e generatori. Questo dispositivo è adatto per acque profonde dove l'attività ondosa è consistente.
- **Energia termica del mare (OTEC):** efficace nelle zone tropicali, questa tecnologia sfrutta il gradiente termico tra gli strati d'acqua caldi superficiali e quelli freddi in profondità. L'acqua calda superficiale vaporizza un fluido a basso punto di ebollizione che, espandendosi aziona una turbina. Il vapore è in seguito raffreddato e condensato utilizzando l'acqua fredda degli strati più profondi, chiudendo il ciclo termico.





2.10 Il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica

Le reti di trasporto e distribuzione svolgono un compito fondamentale nell'assicurare che l'energia prodotta dalle centrali elettriche raggiunga in modo efficiente e sicuro i centri di consumo. Gli impianti di trasporto sono costituiti da elettrodotti ovvero linee ad alta tensione (AT), e da stazioni di partenza e di arrivo, equipaggiate con



trasformatori di tensione elevatori, lato centrale elettrica, e abbassatori, verso i baricentri delle zone di consumo dell'energia. La tensione usata per la trasmissione aumenta con la potenza elettrica da trasmettere e con la distanza tra la centrale e i baricentri di consumo. Gli elettrodotti sono costituiti da grandi tralicci in ferro su cui vengono ancorati, mediante sostegni, conduttori in corda di alluminio con anima di acciaio, talvolta collegati a fascio in numero da due a quattro per fase. Questi elettrodotti giungono nelle stazioni di conversione alta-media tensione, che permettono di alimentare le cabine di distribuzione secondarie attraverso reti in media e bassa tensione. Le reti di distribuzione sono preposte a smistare l'energia verso i luoghi di consumo (aree industriali o residenziali) e sono formate:

- da linee MT con tensione generalmente pari a 6 - 20 kV e
- da linee BT la cui tensione normalizzata può essere di 380 V (sistemi trifase) o 220 V (sistemi monofase).



2.11 I sistemi elettrici distribuiti

Un sistema elettrico distribuito rappresenta un'alternativa efficace e flessibile al tradizionale modello centralizzato di produzione e distribuzione dell'energia. Questo tipo di sistema avvicina la generazione ai punti di consumo, riducendo la necessità di impegnare le reti di trasporto e distribuzione per alimentare le utenze. Nei sistemi distribuiti, l'energia elettrica proviene da:

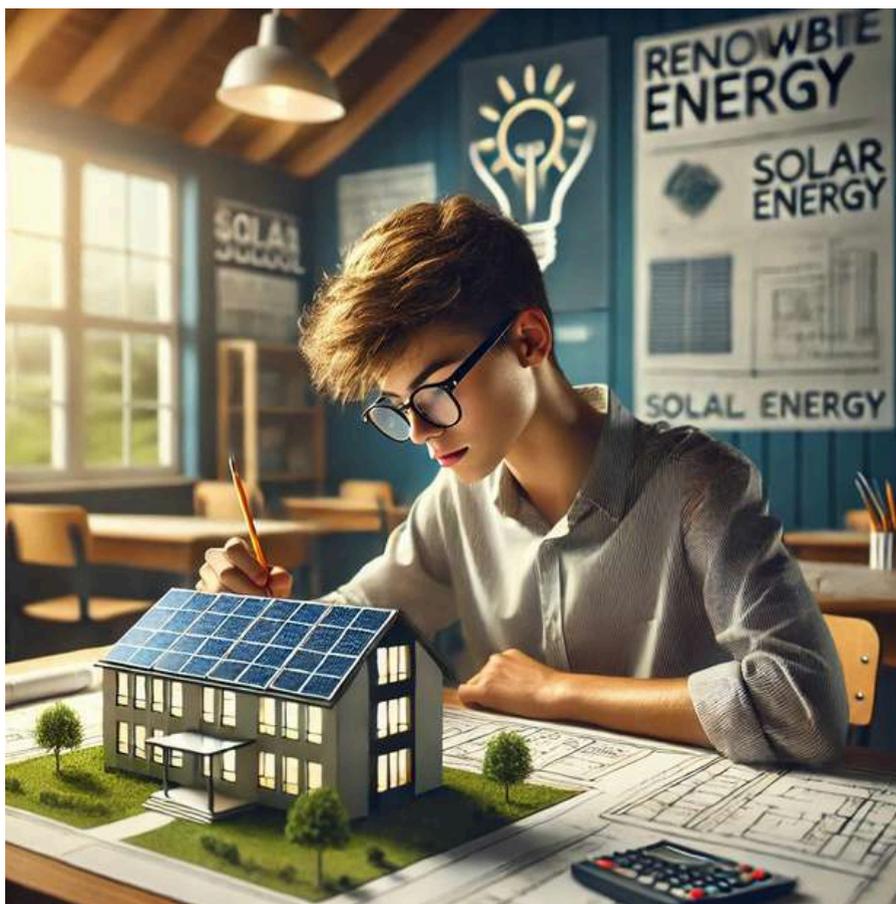
- **risorse rinnovabili locali:** come pannelli solari fotovoltaici, piccoli impianti eolici e centrali mini-idroelettriche, che possono essere installati direttamente nelle abitazioni, aziende o comunità energetiche.
- **generatori distribuiti:** di piccola dimensione che possono funzionare a gas naturale, biogas, o altri combustibili, situati vicino ai luoghi di utilizzo.
- **sistemi di accumulo di energia:** come batterie, che immagazzinano l'energia durante i picchi di produzione e la rilasciano quando la domanda aumenta.

I sistemi distribuiti stanno trasformando radicalmente il settore energetico, influenzando le politiche, le strategie di mercato e lo sviluppo tecnologico a livello globale. Un aspetto chiave di questo cambiamento è l'empowerment dei consumatori, un processo sociale che permette agli individui e alle popolazioni di acquisire una migliore comprensione e controllo sulla propria vita.





La diffusione della generazione distribuita offre ai cittadini non solo il controllo sulla produzione e gestione dell'energia, ma anche la possibilità di influenzare attivamente il processo di transizione energetica verso forme di produzione più sostenibili. Uno strumento fondamentale per rendere concreto questo processo sono le comunità energetiche rinnovabili, che permettono ai cittadini di unirsi per produrre, consumare, condividere e gestire le fonti rinnovabili presenti sul territorio in cui vivono. Le comunità energetiche sono un potente strumento di democrazia, che abilita i cittadini a partecipare attivamente al processo di trasformazione del sistema energetico e produce un impatto diretto sulla politica energetica locale, promuovendo cambiamenti che riflettono i valori e le necessità del territorio.



Parte 3:

Il percorso didattico di RSE per progettare le CER con gli studenti delle superiori.



Lezione 1 - *Introduzione alle comunità energetiche rinnovabili.*

Una Comunità Energetica Rinnovabile (**CER**) nasce dalla partecipazione diretta di cittadini, piccole e medie imprese, enti territoriali e locali, cooperative, enti di ricerca, enti



religiosi, organizzazioni del terzo settore e di protezione ambientale. Si realizza installando impianti a fonti rinnovabili e utilizza il modello regolatorio virtuale per condividere energia attraverso la rete di distribuzione pubblica. Questa configurazione energetica è sostenibile e catalizzatrice di cambiamenti positivi, perché apporta benefici nei differenti ambiti in cui opera: *l'obiettivo principale di una Comunità Energetica Rinnovabile è di rispondere ai bisogni ambientali, sociali ed economici dei suoi membri.* Partecipare a una CER offre numerosi vantaggi e permette di :

- **ridurre le emissioni di gas serra:** contribuendo attivamente alla lotta contro il cambiamento climatico;
- **promuovere il risparmio economico:** riducendo i costi energetici per i partecipanti, grazie all'impiego di fonti energetiche rinnovabili.
- **supportare la comunità locale:** rafforzando il tessuto economico e sociale, favorendo lo sviluppo di iniziative locali e stimolando la creazione di posti di lavoro.



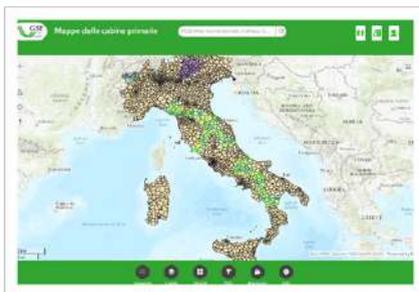
- **migliorare il processo di approvvigionamento dell'energia:** riducendo la distanza tra i luoghi di produzione e consumo, minimizzando così le perdite energetiche legate al trasporto su lunghe distanze.
- **favorire l'innovazione e sviluppo tecnologico:** stimola l'adozione di nuove tecnologie e soluzioni sostenibili.

La partecipazione a una comunità energetica rinnovabile (CER) non solo promuove la sostenibilità ambientale, ma consente anche di sviluppare progetti che favoriscono l'autosufficienza energetica. In tema sociale, la cooperazione tra i membri che condividono energia, promuove la costruzione di legami comunitari che possono stimolare la nascita di rapporti di fiducia tra le persone, uno degli aspetti fondamentali per combattere, ad esempio, i fenomeni di povertà anche energetica in aumento in Italia. In sintesi, le comunità energetiche rinnovabili non solo migliorano l'approvvigionamento energetico in modo sostenibile, ma rappresentano anche un elemento di stimolo per promuovere innovazione sociale, economica e tecnologica all'interno del territorio, un fattore di estrema importanza per favorire il processo di transizione energetica. La partecipazione a una Comunità Energetica Rinnovabile può avvenire in qualità di:

- **produttori di energia rinnovabile:** che installano e gestiscono impianti di generazione da fonti rinnovabili, come ad esempio, gli impianti solari fotovoltaici. Hanno come finalità principale la produzione di energia elettrica, che rendono disponibile alla CER per la condivisione.



- **autoconsumatori di energia rinnovabile:** possiedono impianti di produzione rinnovabile, utilizzano l'energia generata per soddisfare principalmente il loro fabbisogno energetico e condividono l'eccesso di produzione con gli altri membri.
- **consumatori di energia elettrica:** non hanno impianti di produzione ma partecipano alla CER con lo scopo di contribuire a generare energia condivisa.



Questi attori godono di un certo grado di libertà nel partecipare alla CER e hanno tutti il diritto di entrare o uscire dalla comunità secondo le condizioni previste dallo statuto. Possono scegliere in autonomia il fornitore di energia elettrica preferito (autoconsumatori di energia rinnovabile e consumatori di energia elettrica). Questa flessibilità è essenziale per garantire una partecipazione attiva e consapevole alla vita comunitaria. L'approccio delle CER è quindi volto a promuovere non solo l'uso di energia rinnovabile, ma anche a creare un sistema energetico più democratico e partecipativo, dove ogni membro può contribuire attivamente alla produzione, consumo e gestione dell'energia in modo responsabile e sostenibile. La costituzione di una CER richiede un approccio multidisciplinare che considera sia aspetti di tipo tecnico che legale. Dal punto di vista tecnico, è fondamentale localizzare le **aree geografiche idonee** all'installazione delle fonti rinnovabili.



Il luogo deve essere scelto considerando: l'accesso alla fonte primaria di energia, la vicinanza tra gli impianti di produzione e le utenze di prelievo e la tipologia della fonte rinnovabile (es. eolica, solare, biomassa, ecc.). È inoltre indispensabile scegliere la potenza di generazione da installare, sulla base del prelievo annuo degli utenti interessati a diventare membri della CER e della loro intenzione di essere eventualmente produttori di energia rinnovabile (prosumer = produttori e consumatori). Per identificare le aree idonee all'installazione degli impianti di generazione e individuare i confini dove realizzare la CER, il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) offre una mappa interattiva che aiuta a identificare il perimetro di attivazione della propria comunità[13]. Una volta stabilito il confine geografico, si procede alla definizione dello statuto della comunità: in questo documento si delinea la **struttura**, gli **obiettivi** e le **regole operative** della CER. La forma giuridica va scelta tra quelle presenti nell'attuale legislazione (es. associazione, cooperativa, consorzio, etc.) secondo le preferenze dei membri. Lo statuto deve garantire la **partecipazione libera e volontaria di ciascun membro**, definendo in modo chiaro e trasparente eventuali costi connessi all'uscita dalla comunità e le modalità di ripartizione dei ricavi generati dalla condivisione energetica che sono: l'incentivo, la vendita dell'energia prodotta e immessa in rete dagli impianti della comunità e le componenti tariffarie riconosciute dall'Autorità (ARERA) per la capacità che hanno le CER di sfruttare l'energia rinnovabile dove operano.



[13] <https://www.gse.it/servizi-per-te/autoconsumo/mappa-interattiva-delle-cabine-primarie>



PERCORSO DI REALIZZAZIONE DI UNA CER

1

Adesione

- raccolta manifestazioni di interesse.

2

Pianificazione tecnico economica

- verifica tecnica dei confini geografici (sito GSE).
- definizione della forma giuridica (atto costitutivo o statuto).
- studio di fattibilità tecnico economica.

3

Realizzazione

- progettazione, pratiche autorizzative.
- installazione impianti.
- iter di accreditamento presso il GSE.

4

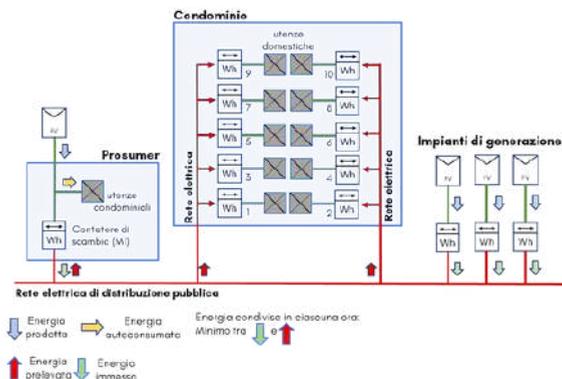
Nascita della CER

- promozioni delle attività previste dallo statuto.



Lezione 2 - La condivisione dell'energia e le tecnologie abilitanti.

Nella lezione 1 è stata definita la comunità energetica rinnovabile: un **“soggetto giuridico”** aperto alla partecipazione dei cittadini, delle autorità locali e delle imprese (di piccole e medie dimensioni); partecipazione che è di tipo volontario e che può essere interrotta in qualsiasi momento mantenendo comunque i propri diritti di consumatore finale. Si tratta di un **“modello democratico”**, in cui le scelte sono condivise tra i membri della comunità in modo indipendente e autonomo, senza avere una prevalente finalità di lucro. Per scambiare l'energia all'interno della CER, l'Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente (ARERA) ha definito il modello regolatorio virtuale, attraverso il quale è introdotto un elemento di innovazione in tema d'autoconsumo ossia il concetto di **condivisione dell'energia** (o condivisione energetica). La condivisione energetica si realizza utilizzando la rete di distribuzione pubblica come elemento di unione “virtuale” tra i punti di prelievo (Point Of Delivery -**POD**) e gli impianti della configurazione.





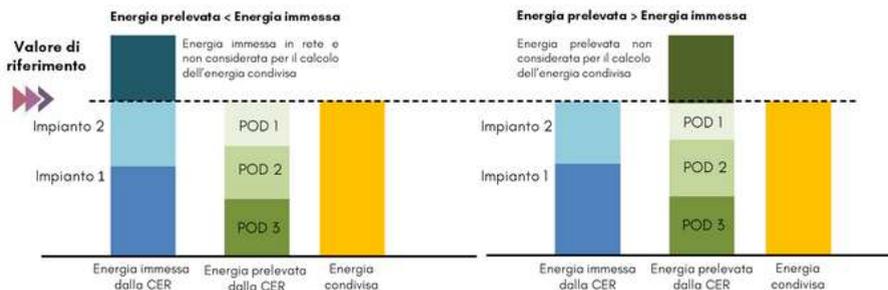
Dal punto di vista tecnico, il modello regolatorio virtuale non comporta alcuna modifica impiantistica: non esistono connessioni fisiche tra le utenze di consumo dei membri partecipanti e gli impianti a fonti rinnovabili a servizio delle stesse. Le utenze di consumo hanno un proprio punto di accesso alla rete pubblica (POD) e i membri:

- mantengono i loro diritti in qualità di consumatori finali, compreso quello di scegliere il proprio fornitore di energia elettrica;
- possono uscire in ogni momento dalla comunità dell'energia pagando, qualora stabilito nello statuto, i corrispettivi concordati in caso di recesso anticipato per la compartecipazione agli investimenti sostenuti, che devono comunque risultare equi e proporzionati;
- regolano i rapporti tramite un contratto di diritto privato (atto costitutivo o statuto), che tiene conto di quanto disposto nei punti precedenti.
- possono individuare un soggetto responsabile della gestione amministrativa della CER.

L'energia condivisa è valutata su base oraria ed è pari al valore minimo, in ciascun periodo orario t , tra l'energia elettrica prodotta e immessa in rete dagli impianti a fonti rinnovabili (E_{it}) e la somma dell'energia elettrica prelevata dall'insieme delle utenze degli n clienti finali associati nella configurazione (E_{uit}) :

$$E_{c_t} = \min(E_{i_t}, \sum_{i=1}^n E_{u_{it,2t,\dots,nt}})$$

La figura di seguito riportata mostra un esempio di calcolo dell'energia condivisa:



La valutazione di questa grandezza energetica e degli incentivi correlati è compito del GSE, che agisce come soggetto responsabile e a tale scopo, utilizza i dati raccolti dai contatori fiscali di seconda generazione (2G) installati nelle utenze dei membri. L'incentivo è successivamente erogato al soggetto referente della comunità energetica, che è incaricato di distribuirlo secondo le modalità stabilite nello statuto [14]. Il modello virtuale facilita la capacità di promuovere l'autoconsumo in forma diffusa su tutto il territorio nazionale rapidamente e in linea con gli obiettivi della politica energetica italiana ed europea. Evita inoltre la duplicazione dell'infrastruttura di rete, prevenendo così un aumento dei costi per i clienti finali interessati ad attivare una CER.

Condividendo energia, i membri della CER ottengono un incentivo e la restituzione di un corrispettivo economico stabilito dall'ARERA per aver supportato il sistema elettrico nazionale, prelevando energia dalla rete di distribuzione pubblica contestualmente alla produzione dei loro impianti di generazione.



[14] l'incentivo è ottenuto applicando la tariffa incentivante (TIP) all'energia oraria condivisa.



La tariffa incentivante

La tariffa incentivante (TIP) si applica all'energia condivisa nell'arco orario dalla CER ed è erogata per un periodo di 20 anni dalla data di entrata in esercizio di ciascun impianto rinnovabile della comunità. Il suo valore varia in funzione della potenza installata e del prezzo di vendita dell'energia sul mercato elettrico (P_z):

$$TIP = \text{Tariffa}_{\text{fissa}} + \text{Tariffa}_{\text{variabile}} = \text{Tariffa}_{\text{fissa}} + \max\{0, 180 - P_z\}$$

In tabella sono riportati i valori della componente fissa che sono funzione: della potenza di ciascun impianto di generazione e del luogo di installazione.

Tariffa massima impianti fotovoltaici (*)**

Potenza nominale [kW]	Tariffa fissa (*) [euro/MWh]	Tariffa variabile (**) [euro/MWh]	Tariffa massima per fonti non fotovoltaiche	SUD	CENTRO	NORD
$P \leq 200$	80	0 - 40	120	120	124	130
$200 > P \leq 600$	70	0 - 40	110	110	114	120
$P > 600$	60	0 - 40	100	100	104	110

(*) dipendente dalla potenza dell'impianto e dalla posizione geografica

(**) dipendente dal prezzo di vendita dell'energia sul mercato elettrico

(***) dislocati nelle aree del sud, centro e nord Italia

Per tener conto della minor producibilità degli impianti fotovoltaici installati nelle regioni centro settentrionali rispetto a quelli posizionati nelle regioni del sud Italia, il GSE riconosce queste maggiorazioni tariffarie:

- **+4 €/MWh**, per le regioni del **centro Italia** (Lazio, Marche, Toscana, Umbria, Abruzzo);
- **+10 €/MWh** per le regioni del **nord Italia** (Emilia-Romagna, Friuli-Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Trentino-Alto Adige, Valle d'Aosta e Veneto).



Infine, per le sole CER i cui impianti di produzione sono ubicati in comuni con una popolazione inferiore a 5.000 abitanti, si può accedere ai contributi in conto capitale^[15] fino alla misura massima del 40% dell'importo richiesto. L'ottenimento di questi contributi comporta però una decurtazione del 50% della tariffa premio. Un aspetto molto importante connesso all'incentivo riguarda la sua modalità di ripartizione. La legge stabilisce infatti, che superato il valore soglia del 55% di energia condivisa^[16], l'incentivo eccedentario debba essere erogato ai soli consumatori diversi dalle imprese e/o utilizzato per finalità sociali aventi ricadute sui territori, ove sono ubicati gli impianti per la condivisione. La verifica del superamento del valore soglia è effettuata dal GSE su base annuale.

I costi evitati per la rete elettrica

I benefici sistemici attribuibili all'energia condivisa sono riconducibili a:

- **una riduzione delle perdite di rete:** dovuta al minor impegno della rete elettrica nazionale, ottenuto grazie allo sfruttamento locale dell'energia generata nel perimetro della configurazione;
- **riduzione degli investimenti:** per il potenziamento o sviluppo di nuove reti che si rende necessario al crescere della generazione rinnovabile installata.

I partecipanti a una comunità energetica rinnovabile rimangono soggetti al pagamento dell'energia prelevata dalla rete pubblica ma, limitatamente alla quota condivisa, beneficiano di un "contributo per l'autoconsumo condiviso - CAC" pari al prodotto tra l'energia elettrica mensile condivisa (E_c) e la parte unitaria variabile della tariffa di trasmissione (TRASE) definita per le utenze in bassa tensione:

ⁱ [15] I contributi in conto capitale sono somme di denaro che vengono erogate da enti pubblici (come lo Stato o le Regioni) o privati a favore di un'impresa o di un altro ente. Questi contributi sono destinati a finanziare specifici investimenti o progetti e non devono essere restituiti, a differenza dei prestiti.



$$C_{AC} = TRAS_E \cdot E_c$$

Per il 2024 la componente TRAS_E vale 10,57 €/MWh.

Requisiti di accesso

Per accedere a queste forme di remunerazione gli impianti della CER devono:

- avere potenza non superiore a 1 MW;
- essere di nuova costruzione;
- essere sottesi alla stessa cabina primaria.

Lo schema di incentivazione prevede, inoltre, che tutta l'energia elettrica rinnovabile prodotta e immessa in rete, rimanga nella disponibilità dei produttori e possa essere venduta sul mercato elettrico (o ritirata dal GSE).

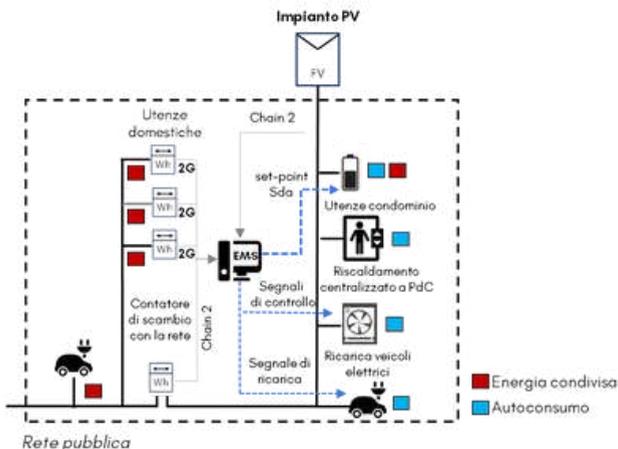
Le tecnologie abilitanti

Per beneficiare del massimo risparmio economico, i membri della CER devono impegnarsi a consumare energia quando gli impianti della comunità producono poiché, in caso contrario, l'incentivo ricevuto potrebbe non essere sufficiente a ripagare i costi sostenuti per attivarla. Per massimizzare i ricavi economici, possono essere utilizzati sistemi di accumulo e di ottimizzazione energetica, supportati da dispositivi domotici. Nell'esempio riportato, si fa riferimento a un gruppo di utenti abilitati a condividere energia all'interno di un condominio. Questa configurazione è ammessa dalla normativa italiana e prende il nome di **gruppo d'autoconsumo collettivo** (AUC). In questo caso, un impianto di generazione fotovoltaica, dotato di sistema di accumulo elettrico (SdA), alimenta:

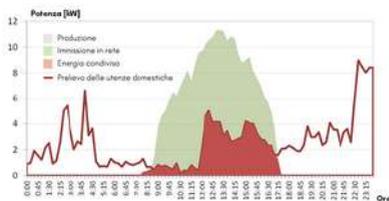
 [16] Calcolato sul totale dell'energia immessa in rete dall'impianto.



le utenze condominiali (ascensori e luci scale), un impianto di riscaldamento elettrico a pompa di calore (PdC) e un'infrastruttura per la ricarica dei veicoli elettrici.



L'impianto fotovoltaico è connesso alle utenze del condominio. L'energia prelevata (linea viola) che coincide con la produzione dell'impianto (area grigia) è direttamente fornita dallo stesso ed è chiamata autoconsumo (area celeste). Qualsiasi eccesso di energia prodotta (area verde) è immesso nella rete di distribuzione pubblica.



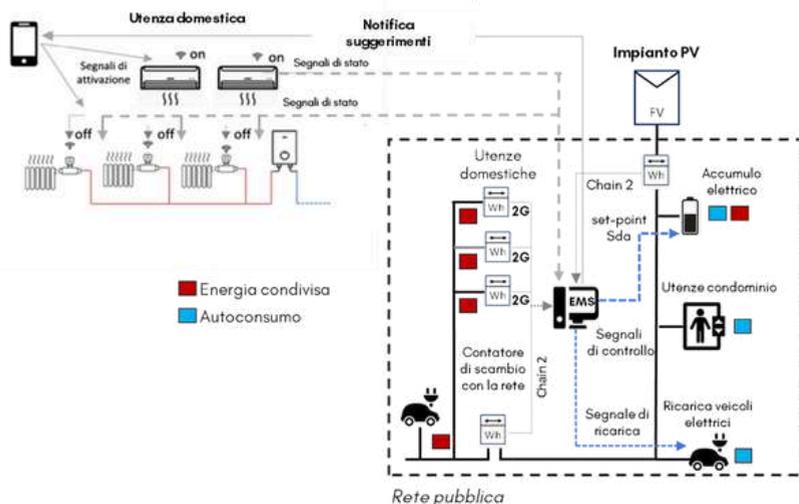
La produzione in eccesso immessa in rete (area verde) è utilizzata per generare energia condivisa (area rossa). Questa grandezza energetica si ottiene confrontando il prelievo totale della CER (linea rossa) con l'energia immessa in rete dai suoi impianti (area verde). Il suo valore corrisponde al minimo tra queste due quantità energetiche.

Nel grafico di figura, si riportano i profili giornalieri di produzione e consumo dei partecipanti al gruppo. L'energia prodotta dall'impianto è rappresentata in grigio chiaro, mentre quella istantaneamente consumata dalle utenze ad esso connesse, è rappresentata in azzurro e prende il nome di autoconsumo.



L'immissione in rete (area verde), pari alla differenza tra la produzione e l'autoconsumo istantaneo, è utilizzata per generare energia condivisa (area rossa). Dal punto di vista economico, il massimo beneficio è ottenuto:

1. **incrementando l'autoconsumo:** che in questo caso significa utilizzare l'infrastruttura di ricarica del veicolo elettrico, l'impianto di riscaldamento a pompa di calore o il sistema di accumulo quando l'impianto fotovoltaico produce.
2. **Incrementando l'energia condivisa:** suggerendo agli utenti di consumare prevalentemente energia durante la produzione fotovoltaica o quando l'accumulo immette in rete.



La scelta di quale grandezza massimizzare dipende dai corrispettivi economici utilizzati per valorizzare l'autoconsumo o la condivisione energetica. Se la tariffa incentivante applicata all'energia condivisa è maggiore delle componenti tariffarie applicate all'energia prelevata dalle utenze condominiali conviene limitare l'autoconsumo a vantaggio



di una maggiore immissione in rete e conseguente condivisione; nel caso contrario occorre dare priorità al consumo di questi utilizzatori con l'obiettivo di ridurre l'immissione in rete e la condivisione dell'energia. Valori elevati di autoconsumo si possono ottenere solamente in presenza di un numero sufficiente di utilizzatori connessi all'impianto e questa condizione non è sempre verificata all'interno dei condomini, specialmente se datati di impianti di riscaldamento centralizzati di tipo tradizionale (caldaie a gas). In tal caso, la sola opzione perseguibile per incrementare i risparmi economici, risulta la massimizzazione dell'energia condivisa, che si può ottenere gestendo in modo coordinato e ottimizzato i consumi dei membri del gruppo d'autoconsumo collettivo. Se in queste abitazioni sono presenti, ad esempio, sistemi di riscaldamento autonomi di tipo tradizionale (caldaie a gas) con integrazione di pompe di calore, si possono installare termovalvole IoT sui caloriferi e comandarle attraverso un sistema di gestione energetica EMS (Energy Management System) in modo centralizzato per:

- sospendere la distribuzione del fluido termovettore caldo e
- attivare i terminali locali a pompa di calore negli appartamenti in presenza di produzione dell'impianto fotovoltaico.

Un maggiore risparmio economico si avrebbe, inoltre, utilizzando elettrodomestici come lavatrici o lavastoviglie mentre l'impianto di generazione produce energia o, sistemi di accumulo, gestiti per immettere in rete al di fuori dell'intervallo di produzione dell'impianto. La logica di gestione presentata in questa lezione può essere applicata in qualsiasi edificio (es. scuole, uffici, negozi, supermercati, ospedali) in cui si vuole ottenere un risparmio economico autoconsumando e condividendo energia.

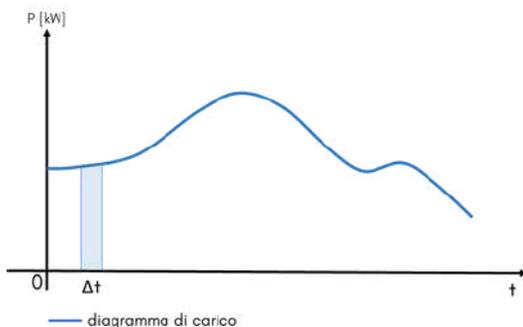


Lezione 3 - Stima del fabbisogno elettrico della scuola.

In questa lezione, sono introdotti i concetti essenziali per valutare il fabbisogno elettrico di un istituto scolastico e il diagramma di carico giornaliero, uno strumento chiave nel processo di dimensionamento dell'impianto fotovoltaico a servizio della CER.

Il fabbisogno elettrico di una scuola

L'energia elettrica prelevata da una scuola dipende da numerosi fattori come: la dimensione dell'edificio, le caratteristiche tecnologiche degli impianti di riscaldamento, sicurezza e sorveglianza, la presenza di fonti rinnovabili, la tipologia degli spazi didattici e, infine, il numero e le caratteristiche tecniche dei dispositivi elettronici e degli apparati di laboratorio presenti (es. pc, scanner, televisori e stampanti). Tipicamente, il prelievo di energia elettrica si concentra durante l'orario delle lezioni, con un incremento significativo al mattino dovuto all'accensione delle luci e dei dispositivi elettrici ed elettronici. Al termine delle lezioni, i prelievi tendono a ridursi sebbene possano aumentare in presenza di attività extrascolastiche nel pomeriggio. Nelle ore serali, infine, rimangono attivi solo i dispositivi essenziali come l'impianto di sorveglianza e di illuminazione degli spazi scolastici; la richiesta di energia è quindi pressoché costante per tutta la notte. Di seguito si riporta una rappresentazione di massima di un diagramma di carico, uno strumento analitico che offre una comprensione visiva e immediata di come varia la potenza prelevata in una scuola durante le diverse ore del giorno.



Sull'asse delle ordinate è riportata la potenza richiesta, espressa tipicamente in kilowatt (kW) o nel caso di complessi scolastici in megawatt (MW). Sull'asse delle ascisse è invece indicato l'intervallo temporale, che può variare dalle ore per i diagrammi giornalieri, a giorni, settimane, mesi o addirittura anni. L'area contenuta nell'intervallo Δt e sottesa al diagramma di carico è l'energia prelevata in uno specifico intervallo temporale (ad esempio un'ora di lezione) ed è la risultante di tutti i consumi dei dispositivi attivi nella scuola nell'intervallo considerato. In relazione allo specifico periodo temporale considerato, il diagramma di carico si classifica in:

- **giornaliero:** mostra le variazioni della potenza prelevata nell'arco di un singolo giorno, utilizzato per analizzare le fluttuazioni di consumo tipiche delle attività quotidiane;
- **settimanale/mensile/annuale:** evidenzia le variazioni della potenza prelevata su periodi più estesi, utile per identificare tendenze stagionali o cicliche a lungo termine;
- **carico medio e di picco:** mostrano rispettivamente il prelievo medio giornaliero e i periodi di massima richiesta di potenza elettrica, indispensabili per pianificare interventi volti alla riduzione dei consumi elettrici.



Attraverso l'analisi del diagramma di carico, si può ottenere una visione approfondita del modello di consumo elettrico di un istituto scolastico e promuovere misure di efficientamento energetico che possono includere: la riduzione dei consumi elettrici, l'adozione di fonti rinnovabili e la condivisione dell'energia all'interno della comunità.

Come valutare il fabbisogno elettrico di una scuola

Per stimare il fabbisogno elettrico di un istituto scolastico è indispensabile conoscere la potenza assorbita dagli utilizzatori elettrici, inclusi quelli non direttamente legati alla didattica. Se la scuola dispone di un sistema di monitoraggio è possibile valutare in modo accurato il diagramma di carico giornaliero. In assenza di tale sistema, si può comunque stimare il diagramma applicando metodologie basate su coefficienti statistici, il cui utilizzo è tipico nel campo della progettazione degli impianti elettrici ad uso civile. In questo caso, la potenza valutata è un'approssimazione del prelievo reale della scuola ed è definita "potenza convenzionale". Questa grandezza elettrica può essere stimata, inizialmente, utilizzando gli indicatori riportati in questa tabella:

POTENZE SPECIFICHE PER DIVERSE CATEGORIE DI UTENZE	
Tipologia di utenza	Potenza specifica (VA/mq)
Uffici	70
Scuole	50
Ospedali	60
Alberghi	80
Abitazioni	40



La potenza specifica, espressa in VA/m² (volt-ampere/metro quadrato), indica la quantità di potenza apparente (VA) distribuita per ogni metro quadrato di superficie. Per ottenere la potenza attiva (W), è necessario moltiplicare la potenza specifica per i metri quadrati di superficie dell'edificio e per il fattore di potenza ($\cos \varphi$) considerato:

$$\text{Potenza attiva (W)} = \text{Potenza apparente (VA)} \times \text{Fattore di potenza } (\cos \varphi)$$

Il fattore di potenza, in un ambiente scolastico, è influenzato dalla presenza e dal tipo di dispositivi elettrici utilizzati. In una scuola, sono presenti un'ampia varietà di lampade, come quelle incandescenti, fluorescenti e a LED, oltre a: computer, server, proiettori, sistemi audio e di sorveglianza. Si possono trovare, inoltre, attrezzature specifiche per i laboratori, che possono includere motori elettrici e altri dispositivi utilizzati per la didattica. Per questo motivo, tale fattore può essere ragionevolmente scelto all'interno dell'intervallo di valori compresi tra 0,8 e 0,98. Volendo fare un esempio applicativo, si può considerare una scuola con una superficie di 1000 m². Per questa tipologia di utenza civile, la potenza specifica vale 40 VA/m² e considerando un fattore di potenza tra 0,8 e 0,98, la potenza attiva prelevata è compresa tra 32 kW e 39 kW. Questo risultato può tuttavia non riflettere il valore effettivo di potenza prelevata nello specifico istituto in esame, poiché è determinato statisticamente. È infatti ottenuto facendo riferimento alla tipologia di utilizzatori elettrici comunemente presenti in una scuola, che potrebbero però differire per numero e caratteristiche tecniche, da quelli utilizzati nell'istituto di riferimento. Inoltre, la potenza attiva calcolata in questo modo, presuppone un prelievo costante durante tutto l'orario della didattica (nell'esempio precedente mediamente pari a 35,5 kWh), che può risultare eccessivo per due ragioni:



- alcune apparecchiature possono non essere utilizzate alla loro potenza nominale;
- è improbabile che tutte le apparecchiature funzionino simultaneamente.

Per ottenere un'immagine più accurata del reale prelievo della scuola, si può adottare una metodologia alternativa che prevede l'identificazione di tipologie simili di ambienti (es. aule, corridoi, laboratori) e la valutazione (misura o stima) dell'energia elettrica assorbita dagli utilizzatori presenti durante l'ora di lezione (impianto di illuminazione e dispositivi elettrici o elettronici). Nella pratica, si possono utilizzare tre metodi di calcolo, che pur generando risultati differenti, sono utili a determinare un intervallo di soluzioni da considerare per il successivo dimensionamento dell'impianto fotovoltaico da installare nella scuola:

- **Metodo 1:** misura diretta della potenza elettrica prelevata degli utilizzatori (impianto di illuminazione e dispositivi elettrici).
- **Metodo 2:** stima della potenza di esercizio dei dispositivi basata sulla correzione del loro valore di potenza nominale.
- **Metodo 3:** stima della potenza massima erogabile dalle prese nell'ambiente.

Occorre specificare che la potenza di generazione fotovoltaica, deve essere tale da garantire l'autoconsumo della scuola e la condivisione dell'energia all'interno della CER.

Si riportano di seguito i vantaggi e gli svantaggi di ciascun metodo:



METODI DI VALUTAZIONE DEL CONSUMO DEGLI UTILIZZATORI			
METODO	DESCRIZIONE	VANTAGGI	SVANTAGGI
1	misura diretta della potenza elettrica prelevata dagli utilizzatori	accuratezza	tempi di misura elevati che possono essere difficili da conciliare con la normale didattica degli studenti.
2	stima della potenza di esercizio dei dispositivi basata sulla correzione del loro valore di potenza nominale.	semplicità: può essere applicato dagli studenti in autonomia	può sovrastimare o sottostimare il reale prelievo degli utilizzatori elettrici se non applicato correttamente
3	stima della potenza massima erogabile dalle prese nell'ambiente	ha valenza educativa e può essere applicato direttamente dagli studenti	può sovrastimare o sottostimare il reale prelievo degli utilizzatori elettrici se non applicato correttamente

Maggiori dettagli sull'applicazione pratica dei tre metodi è riportata di seguito.

Valutazione della potenza prelevata dall'impianto di illuminazione di un ambiente scolastico

Per determinare la potenza richiesta dall'impianto di illuminazione in una stanza, esistono due principali metodi:

- **misurazione diretta:** utilizza multimetri o wattmetri per misurare la corrente o la potenza effettivamente richiesta dall'impianto di illuminazione.
- **metodo approssimato:** richiede l'uso di un luximetro per misurare l'intensità luminosa nella stanza, che utilizzata in combinazione con il dato di efficienza luminosa della tipologia di lampada presente, permette di stimare qualitativamente la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione. Questo approccio è meno



preciso del metodo di misurazione diretta ma risulta particolarmente utile in situazioni in cui l'accesso all'impianto elettrico è limitato o non praticabile.

Valutazione della potenza richiesta dall'impianto di illuminazione tramite misurazione diretta.

L'impianto di illuminazione di un ambiente scolastico è diviso in due o più circuiti, che permettono di illuminare zone della stanza in modo indipendente. Per eseguire una misurazione diretta dell'energia assorbita dall'impianto di illuminazione occorre:

- identificare gli interruttori che comandano i gruppi di lampade;
- accedere al circuito elettrico, rimuovendo la placca e il frutto per identificare il conduttore di fase su cui leggere il valore di corrente. Questa operazione necessita di un multimetro con pinza amperometrica e deve essere eseguita da personale qualificato.

La misurazione diretta è la soluzione ottimale per determinare con precisione la potenza richiesta dell'impianto di illuminazione. Inoltre, questo metodo, permette di valutare un coefficiente correttivo per la specifica tipologia di lampada. Quando applicato alla potenza nominale della stessa, questo coefficiente permette di valutare rapidamente la potenza effettivamente necessaria al funzionamento della tipologia di lampada.

Va osservato che, nelle scuole, le lampade utilizzate sono generalmente limitate a poche tipologie standard. In tal caso, applicare i coefficienti correttivi al totale della potenza nominale di ciascuna tipologia presente, permette di stimare in modo rapido e preciso la potenza effettivamente richiesta dall'intero impianto di illuminazione scolastico.



Valutazione della potenza richiesta dall'impianto di illuminazione con metodo approssimato.

Per stimare la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione, si può ricorrere all'uso di un luximetro. Questo strumento è dotato di un sensore fotosensibile capace di misurare il livello di illuminamento (in lux) su una specifica superficie, come la scrivania o la cattedra dell'insegnante [17]. La corrispondenza tra l'illuminamento e la potenza assorbita dalle lampade, si ottiene conoscendo:

- la superficie della stanza, misurata in metri quadrati;
- l'efficienza luminosa della tipologia di lampada utilizzata, espressa in lumen per watt (lm/W);
- l'illuminamento medio valutato a partire da misurazioni svolte in diversi punti della stanza.

La potenza P dell'impianto di illuminazione, espressa in watt, è uguale al flusso luminoso f (dato dall'illuminamento E in lux per l'area A dell'ambiente in m^2 [18]) diviso per l'efficienza luminosa η della lampada utilizzata.

Per quantificare, ad esempio, il prelievo elettrico dell'impianto di illuminazione di un ambiente con superficie pari a $20 m^2$, in cui sono presenti lampade con un'efficienza luminosa di 15 lumen/watt e un illuminamento di 150 lux, si procede come segue:

i [17] L'illuminamento, misurato in lux (lumen per metro quadrato), è una misura del flusso luminoso che cade su una determinata area. Questa grandezza indica l'effettiva illuminazione di una superficie: un lux è definito come un lumen che cade su un metro quadrato.

[18] Il flusso luminoso, misurato in lumen, rappresenta la quantità totale di energia luminosa percepita dall'occhio umano, che proviene da una fonte luminosa.



- si calcola il flusso luminoso ϕ utilizzando la formula:

$$\phi = E \times A = 150 \text{ lux} \times 20 \text{ m}^2 = 3.000 \text{ lumen}$$

- e si stima la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione P attraverso la formula:



$$P = \frac{\phi}{\eta} = \frac{3.000 \text{ lumen}}{15 \text{ lumen / watt}} = 200 \text{ watt}$$

Nella successiva tabella sono riportati i valori dell'efficienza luminosa di diverse tipologie di lampade, da utilizzare per stimare la potenza richiesta dall'impianto di illuminazione utilizzando un luximetro. Si invita a consultare la scheda tecnica delle tipologie di lampade presenti nella scuola per ricavare valori specifici di efficienza luminosa.

Tipologia di lampada	Efficienza luminosa tipica [lm/W]
Lampadina ad incandescenza al tungsteno	12,5 ÷ 17,5
Lampada alogena	16 ÷ 24
Lampada a fluorescenza	45 ÷ 75
Lampada a LED	100 ÷ 120
Lampada ad alogenuri metallici	75 ÷ 100
Lampada a vapori di sodio ad alta pressione	85 ÷ 150
Lampada a vapori di sodio a bassa pressione	100 ÷ 200
Lampada a vapori di mercurio	35 ÷ 65



Va osservato, che per ottenere un risultato ragionevole dall'applicazione di questo metodo, occorre isolare la componente del flusso luminoso, che proviene dalle finestre della stanza, da quella generata dalle lampade [19]. Tuttavia, anche utilizzando questa accortezza, il risultato ottenuto è comunque qualitativo poiché la misura dell'illuminamento nell'ambiente è condizionata dalle componenti di luce riflesse e rifratte dalle pareti.

Stima della potenza elettrica richiesta dai dispositivi attivi nell'ambiente didattico.

La potenza elettrica richiesta in un ambiente scolastico durante una lezione è influenzata da vari fattori, tra cui il numero di dispositivi elettrici attivi, il loro stato di funzionamento e la potenza istantanea necessaria al loro esercizio. Ad esempio, l'impianto di illuminazione quando attivo richiede una quantità di potenza costante, a meno che non sia possibile gestire gruppi di lampade separatamente. Invece, la potenza necessaria al funzionamento dei dispositivi elettronici, può variare rispetto al loro valore nominale, in funzione della loro modalità di utilizzo. Di seguito, sono presentati tre metodi pratici per il calcolo della potenza richiesta dai dispositivi elettronici.

Metodo I: misura diretta della potenza assorbita dai dispositivi.

Questo metodo prevede l'uso di multimetri digitali con pinze amperometriche e/o prese intelligenti. Questi strumenti, che devono essere acquistati preliminarmente in numero adeguato a quello degli studenti coinvolti nell'attività di valutazione, permettono di misurare direttamente la corrente assorbita durante l'attività didattica da questi dispositivi.

i [19] la misura deve essere svolta a finestre oscurate o per differenza. Nell'ultimo caso si misura l'illuminamento sulla superficie a luci accese e successivamente a luci spente e si ottiene il contributo delle fonti di luce esterna per differenza.



Per valutare la potenza complessivamente utilizzata, si moltiplica la tensione di rete standard pari a 220 V, per la somma delle correnti rilevate su ciascun dispositivo. Il risultato ottenuto è successivamente corretto applicando il fattore di potenza, che varia tipicamente tra 0,95 e 0,98.

$$P_{Tot} = V_n \cdot I_{Tot} \cdot \cos\varphi_n$$

L'implementazione di questo metodo potrebbe richiedere diversi giorni per completare accuratamente l'analisi di tutti gli spazi interessati e, per questo motivo, è fondamentale pianificare le attività di valutazione con sufficiente anticipo. Questa pianificazione permette di ridurre al minimo l'interruzione delle normali attività didattiche e di garantire che la raccolta dei dati avvenga nel modo più efficiente e meno invasivo possibile.

Metodo 2: stima della potenza basata sulla correzione del valore di potenza nominale dei dispositivi.

Se non si dispone di tempo e strumenti di misura per valutare la potenza assorbita dai dispositivi nell'ora di lezione, si può adottare un approccio più rapido basato sull'applicazione di un coefficiente correttivo. Nella pratica, si sommano le potenze nominali di tutti i dispositivi elettrici presenti e utilizzati nell'ambiente e si moltiplica il risultato per un coefficiente di riduzione globale. Questo coefficiente considera l'uso simultaneo dei dispositivi e il valore effettivo della potenza richiesta durante il loro normale esercizio, generalmente inferiore al valore nominale. Il coefficiente di riduzione globale è derivato da studi e test sperimentali riportati nei manuali tecnici utilizzati per il dimensionamento degli impianti.



Ambiente di utilizzazione	Coefficiente di riduzione
Alberghi	0,6 - 0,8
Ospedali	0,5 - 0,75
Grandi magazzini	0,7 - 0,9
Scuole	0,6 - 0,7

Pur non essendo preciso come il metodo di misurazione diretta (metodo 1) è molto rapido e può essere implementato dagli alunni senza il supporto di personale qualificato.

Metodo 3: stima della potenza massima erogabile dalle prese nell'ambiente.

Il metodo 3 permette di calcolare la potenza massima che le prese elettriche possono erogare in un ambiente didattico. Questo calcolo si basa su ipotesi preliminari riguardo al numero e alla tipologia degli utilizzatori elettrici attivi, alla loro modalità di utilizzo contemporaneo e alla percentuale di potenza effettivamente utilizzata rispetto al valore nominale. Importante è sottolineare che per l'applicazione di questo metodo non sono necessari strumenti di misura né dati specifici come, ad esempio, quelli del consumo presenti nelle bollette. Il calcolo inizia determinando la potenza massima P_M che può essere erogata da una presa elettrica operante alla tensione nominale di 220 V, corrente nominale 16 A e fattore di potenza che dipende dalla tipologia di sistema considerato (monofase o trifase):

$$P_M = V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n$$

con $\cos\varphi_n$ convenzionalmente assunto pari a 0,9.

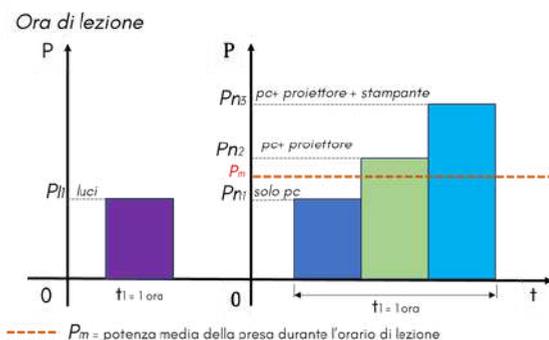
Per le prese trifase, la potenza massima si calcola come:



$$P_M = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n$$

con $\cos\varphi_n$ che può essere assunto convenzionalmente pari a 0,8.

Nel regime monofase, ogni presa elettrica da 16 A e fattore di potenza 0,9, può teoricamente erogare una potenza massima di 3168 W. Il valore effettivo erogato, dipende però dalla potenza realmente richiesta dai dispositivi nel normale funzionamento e dal loro utilizzo.



Per una stima accurata di questa grandezza energetica, si introducono due coefficienti correttivi: il coefficiente di utilizzazione (K_u) e il coefficiente di contemporaneità (K_c). Questi coefficienti aiutano a valutare l'effettivo utilizzo degli apparecchi elettrici e ad adeguare la potenza massima teorica erogata dalle prese alle condizioni di utilizzo reali:

- **il coefficiente di utilizzazione (K_u)**, tiene conto di quanto effettivamente un apparecchio richiede alla presa elettrica rispetto alla sua potenza nominale.
- **il coefficiente di contemporaneità (K_c)**, considera la probabilità che tutti gli apparecchi collegati siano in uso simultaneo.



Nel normale funzionamento, la massima potenza che le prese elettriche erogano si calcola come:

$$P_{\max_prese} = N \cdot P_M \cdot K_c \cdot K_u = N \cdot P_M \cdot K_g$$

$$K_u = \frac{\sum_{p=1}^N P_{m_p}}{\sum_{i=1}^N P_{n_i}} \quad K_c = \frac{P_{on}}{P_{tot}}$$

Con:

PM: potenza massima erogata dalle prese nel regime considerato (monofase o trifase);

N: numero di prese dell'ambiente;

- Ku: coefficiente di utilizzazione, pari alla somma della potenza che si stima le prese forniscano (P_m) e la potenza nominale complessiva dei dispositivi elettronici (P_n);
- Kc: coefficiente di contemporaneità, pari al rapporto tra il numero di prese che alimentano contemporaneamente i dispositivi della stanza (P_{on}) e il totale delle prese installate (P_{tot}).
- Kg= coefficiente globale pari al prodotto di Kc e Ku

I coefficienti di utilizzazione (Ku) e di contemporaneità (Kc) variano tra 0 e 1 e sono scelti ipotizzando un funzionamento realistico dei dispositivi durante l'ora di lezione. In letteratura il loro prodotto viene definito coefficiente di riduzione globale (Kg) e :



- per prese monofasi di tipo civile, tipiche in ambienti residenziali o uffici, assume valore compreso tra 0,05 e 0,2.
- per prese trifasi, comuni in contesti industriali o commerciali, si attesta tra 0,15 e 0,4.

Se si vuole personalizzare la valutazione dalla potenza erogata dalle prese d'ambiente, si può calcolare in autonomia K_u e K_c ricorrendo a misurazioni e osservando il contemporaneo utilizzo durante la didattica.

Considerazioni sui tre metodi

I tre metodi presentati, forniscono una valutazione qualitativa del diagramma di carico di una scuola e se impiegati congiuntamente, consentono di determinare il fabbisogno elettrico giornaliero minimo e massimo dell'istituto. Queste informazioni sono cruciali per la valutazione preliminare della potenza di generazione fotovoltaica da installare, che successivamente dovrà essere scelta considerando anche la disponibilità di superficie utile per l'installazione dell'impianto, le risorse economiche disponibili e lo scopo della CER, che è di promuovere la condivisione di energia proveniente da fonti rinnovabili.

Dimensionare l'impianto basandosi sul carico massimo stimato, può essere una valida strategia se la CER è prevalentemente composta da utenze domestiche e necessita quindi generazione rinnovabile. In tal caso, è fondamentale che la scuola si impegni a coinvolgere un numero sufficiente di membri per avere elevati livelli di condivisione che rendano sostenibile l'investimento. Questo approccio non solo favorisce l'utilizzo di energia rinnovabile, ma promuove anche il senso di comunità e cooperazione all'interno della CER.



Applicazione dei metodi a un caso studio reale: aula di 48 mq

L'aula in esame presenta vari dispositivi elettrici, ciascuno con caratteristiche tecniche ben definite:

- 8 Plafoniere, ciascuna equipaggiata con due lampade T8 da 1,2 metri e due alimentatori con reattore. La potenza nominale complessiva è di 608 W, corrispondente a 76 W per plafoniera.
- un pc, con un assorbimento di corrente dichiarato dal costruttore di 3 A.
- un monitor, con un assorbimento di corrente dichiarato di 1 A
- una lavagna luminosa, con assorbimento dichiarato di 4,5 A.

Alla tensione di rete di 220 V e fattore di potenza di 0,9, i tre dispositivi hanno potenze nominali rispettivamente di : 594 W (il PC), 198 W (il monitor) e 891 W (la lavagna luminosa), valutate con la formula:

$$P_n = V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi$$

La potenza totale necessaria ad illuminare l'ambiente didattico e per il funzionamento normale dei dispositivi è quindi stimata in 2291 W, stando alle potenze nominali valutate. Tuttavia, come più volte sottolineato, è fondamentale correggere questo valore per riflettere l'uso reale degli apparecchi. Si riporta di seguito l'applicazione dei metodi precedentemente descritti per valutare l'effettivo assorbimento dei dispositivi considerati.



Valutazione della potenza effettivamente richiesta applicando il metodo di misura diretta.

In questa stanza, l'illuminazione è garantita da 8 plafoniere suddivise in due circuiti elettrici distinti e ciascun circuito alimenta quattro plafoniere. Ogni plafoniera è equipaggiata con due lampade T8 e relativi alimentatori. La corrente erogata da ogni circuito alle quattro plafoniere è di circa 1 A. Considerando una tensione di 220 V e un fattore di potenza di 0,9 la potenza erogata alle quattro plafoniere (lampade + alimentatori) è di 198 W. Di conseguenza, la potenza effettivamente imputabile alla coppia di lampade contenute nella plafoniera, compresa la quota richiesta dagli alimentatori è di 49,5 W, un valore decisamente inferiore ai 76 W valutati con i dati del costruttore. Per calcolare il fattore correttivo applicabile a queste plafoniere, si può utilizzare la seguente formula:

$$K_{lamp} = \frac{P_m}{P_n} = \frac{49,5}{76} = 0,65$$

con P_m , potenza misurata e P_n , potenza nominale. Questo fattore correttivo indica che solo il 65% della potenza nominale richiesta dalle lampade e dagli alimentatori è effettivamente utilizzata. La potenza effettivamente richiesta dal complesso di plafoniere si calcola quindi:

- contando il numero totale delle plafoniere dello stesso tipo presenti nell'istituto;
- moltiplicando il numero di plafoniere per la potenza nominale dichiarata dal costruttore (76 W in questo caso);
- applicando il fattore di riduzione 0,65, al risultato ottenuto dal passaggio precedente.



Valutazione qualitativa della potenza richiesta dall'impianto di illuminazione.

Se la misurazione diretta della corrente assorbita dall'impianto di illuminazione non è possibile, si può utilizzare un luximetro per ottenere una stima qualitativa della potenza richiesta dalle lampade. Nel caso studio presentato, l'illuminamento massimo rilevato nella stanza nel tardo pomeriggio è di 232 lux. Per convertire questo dato in flusso luminoso, si moltiplica l'illuminamento per la superficie dell'ambiente considerato:

$$\Phi = E \times A = 232 \text{ lux} \times 48 \text{ m}^2 = 11136 \text{ lumen}$$

Disponendo del flusso luminoso totale e del valore di efficienza luminosa della lampada (in questo caso pari a 45 lumen/watt), la potenza richiesta dalle 8 plafoniere si calcola come:

$$P = \frac{\Phi}{\eta} = \frac{11136 \text{ lumen}}{45 \text{ lumen/watt}} = \mathbf{248 \text{ W}}$$

Con questo metodo di valutazione, ciascuna plafoniera richiede 31 W per il suo funzionamento, un valore inferiore a quello ottenuto con il metodo di misurazione diretta (45 W). Occorre specificare, che questo risultato è affetto da errore perché condizionato da diversi fattori come:

- la componente del flusso luminoso che proviene dalle finestre della stanza e la luce riflessa e rifratta dalle pareti, che introducono errore nel processo di valutazione dell'illuminamento.
- l'efficienza luminosa considerata per le lampade, che può non riflettere le condizioni reali di funzionamento delle stesse (l'efficienza dipende anche dall'invecchiamento delle lampade).



Questi fattori necessitano di essere attentamente valutati quando si utilizza il metodo di stima indiretta, per assicurare che il fabbisogno elettrico dell'istituto consideri anche queste incertezze.

Valutazione della potenza richiesta dai dispositivi

Sono di seguito evidenziati i risultati dell'applicazione dei tre metodi considerati.

Misura diretta della potenza richiesta dai tre dispositivi nel normale funzionamento: metodo 1

La tabella seguente riporta le correnti misurate e le potenze effettivamente richieste dai tre dispositivi elettronici attivi nell'ambiente didattico. I dati mostrano una significativa differenza tra la potenza nominale dichiarata dai costruttori e quella derivante dalle misurazioni.

Dispositivi	Corrente misurata	Potenza richiesta (*)	Potenza nominale (**)
Pc	0,2 A	39,6 W	594 W
Monitor	0,1 A	19,8 W	198 W
Lavagna luminosa	0,9 A	178,2 W	891 W
Totale	1,2 A	237,6 W	1773 W

(*) la potenza richiesta è valutata alla tensione 220 V e fattore di potenza 0,9

(**) la potenza nominale è valutata alla tensione 220 V, fattore di potenza 0,9 e corrente nominale dichiarata dalla casa costruttrice del dispositivo

Questi risultati confermano l'importanza di non basarsi esclusivamente sulla potenza nominale per valutare il diagramma di carico elettrico dell'istituto scolastico. In contesti come quello didattico, dove i dispositivi sono frequentemente utilizzati in modalità di risparmio



energetico, la potenza effettivamente utilizzata da questi tende ad assumere valori molto inferiori, rispetto a quelli dichiarati dalla casa costruttrice. Ciò implica che le stime del fabbisogno elettrico dell'istituto, ottenute a partire dal valore della potenza nominale, possono portare a sovradimensionare la potenza dell'impianto da installare nella scuola, rendendo l'investimento economico non sostenibile.

Stima della potenza richiesta dagli utilizzatori attraverso la correzione del loro valore nominale: metodo 2

Senza ricorrere al metodo di misurazione diretta, è possibile sommare le potenze nominali dei tre utilizzatori e moltiplicare il totale per il coefficiente di riduzione globale compreso tra 0,6 e 0,7. Per il caso studio considerato si è scelto il valore pari a 0,65.

Dispositivi	Potenza nominale (*)	Potenza richiesta	
		Metodo 1 (**)	Metodo 2
Pc	594 W	39,6 W	386,1 W
Monitor	198 W	19,8 W	128,7 W
Lavagna luminosa	891 W	178,2 W	579,15 W
Totale	1773 W	237,6 W	1094 W

(*) la potenza nominale è valutata alla tensione 220 V, fattore di potenza 0,9 e corrente nominale dichiarata dalla casa costruttrice del dispositivo
 (***) la potenza richiesta è valutata alla tensione 220 V e fattore di potenza 0,9



I risultati confermano che il metodo 2, nonostante produca valori decisamente superiori al metodo 1, offre una soluzione più accurata rispetto alla semplice somma delle potenze nominali dei dispositivi.

Stima della potenza massima potenza erogata dalle prese d'ambiente: metodo 3

Nell'aula sono presenti 2 prese elettriche da 16 A, ma solo una è funzionante durante la didattica. La massima potenza erogata da queste alla tensione di 220V e fattore di potenza 0,9 è di 3168 W. Sapendo che le prese per uso civile hanno un coefficiente di riduzione globale compreso tra 0,05 e 0,2, la potenza massima erogabile nell'aula didattica è compresa tra 317 e 1267 W.

$$P_{\max_prese} = N \cdot P_M \cdot K_g = 2 \cdot 3168 \cdot (0,05 \div 0,2) = 317 \div 1267$$

Volendo quantificare con precisione il coefficiente globale K_g , da utilizzare per questa tipologia di ambiente, si procede alla valutazione puntuale dei coefficienti K_c e K_u . Il rapporto tra la potenza misurata sulla presa elettrica e la somma delle potenze nominali dei tre utilizzatori connessi, consente di ottenere il valore di K_u , che è pari a:

$$K_u = \frac{P_{\text{misurata}}}{P_{\text{nom_tot}}} = \frac{237,6 \text{ W}}{1773 \text{ W}} = 0,134$$

Sapendo che una sola delle due prese è in esercizio durante la didattica, K_c è pari a 0,5. Il coefficiente globale, ottenuto moltiplicando tra loro K_c e K_u è uguale a 0,067. Nota la massima potenza fornita dalle due prese (6336 W), si applica a questa il coefficiente globale e si ottiene il valore aggiornato di potenza massima che le prese erogano nell'ambiente, in questo caso pari a 424,5 W. Il risultato ottenuto è chiaramente superiore rispetto al valore



effettivamente misurato sui dispositivi (237,6 W) perché è valutato applicando dei fattori correttivi al valore massimo erogato dalle prese elettriche. In questo caso, si assume che solo il 13,4 % della potenza massima delle prese (6336 W) è effettivamente fornito dalle stesse (848,9 W) e dato che solo una presa è funzionante durante l'ora di lezione, il valore massimo di potenza erogato nell'ambiente è di 424,5 W. Va osservato che, in analogia a quanto svolto per il calcolo del coefficiente di riduzione relativo all'impianto di illuminazione, anche in questo caso la valutazione di uno specifico Kg per l'aula permette di definire la potenza richiesta dal complesso di aule simili e agevolare, conseguentemente, l'elaborazione del diagramma di carico della scuola. Nella tabella seguente sono riepilogati i risultati dell'applicazione dei tre metodi:

Metodo	Coefficiente di riduzione
1 - Misura diretta	237,6 W
2 - Stima basata sulla correzione della potenza nominale dei dispositivi	1094 W
3- Massima potenza erogabile dalle prese d'ambiente senza aggiornare Kc e Ku	317 - 1267 W
3 - Massima potenza erogabile dalle prese d'ambiente	424,5 W

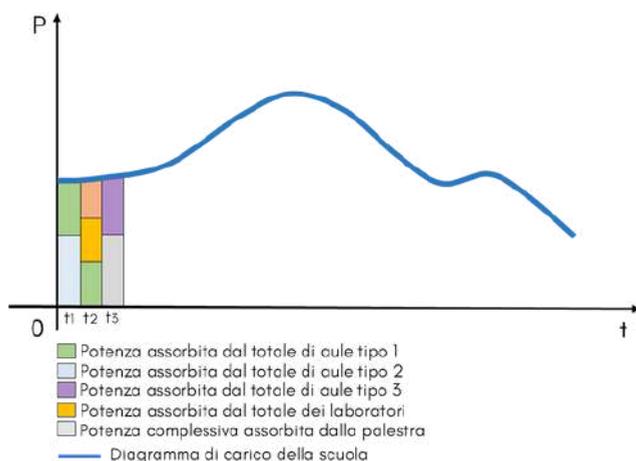
Questi risultati consentono di quantificare il valore di potenza massimo e minimo richiesto per l'ambiente, dati essenziali per determinare la potenza dell'impianto fotovoltaico da installare nella scuola. I metodi presentati possono essere impiegati in modo flessibile in funzione della disponibilità di strumenti di misura e di tempo. In mancanza di questi, si raccomanda di combinare il metodo 2 con il metodo 3, facendo uso dei coefficienti Kc e Ku calcolati statisticamente. Per prevenire il rischio di sovradimensionare l'impianto, è prudente escludere il valore massimo tra quelli calcolati



(1267 W nel caso specifico). Se sono disponibili i dati di misura, è preferibile applicare il metodo 1 insieme al metodo 3, che permettono di valutare il valore minimo che riflette il reale funzionamento dei dispositivi e il massimo teorico, che le prese d'ambiente possono erogare secondo lo specifico funzionamento dei dispositivi riscontrato nell'ambiente.

Correzione del diagramma con le misure reali del prelievo.

Valutando i consumi negli ambienti scolastici con i metodi precedentemente descritti è possibile ricostruire il diagramma di carico giornaliero della scuola come illustrato di seguito:



Come anticipato, questo diagramma è tuttavia qualitativo perché l'approccio metodologico adottato, può non riflettere la potenza effettivamente prelevata dall'intero istituto. Per migliorare il diagramma, si può procedere a correggere i risultati ottenuti utilizzando le misure lette sul contatore della scuola in diversi orari della giornata come, ad esempio, le ore 8:00, 11:00 e 13:00.



Raccogliendo i dati di misura per una settimana e valutando il loro valore medio, si procede a interpolare le stesse con i valori della potenza stimata valutando i consumi dei dispositivi e dell'impianto di illuminazione.

Con riferimento al diagramma di carico riportato in figura, per correggere la potenza stimata nell'intervallo t_2 si utilizza la formula:

$$P_{t_2} = P_{t_1} + \frac{P_{t_3} - P_{t_1}}{t_3 - t_1} \cdot (t_2 - t_1)$$

Con:

P_{t_1} e P_{t_3} : potenze misurate rispettivamente nell'intervallo precedente t_1 e successivo t_3 ;

t_2 : è l'istante temporale della potenza stimata da correggere;

t_1 e t_3 : sono gli istanti temporali delle misurazioni più vicine a t_2 .

Supponiamo, ad esempio, di svolgere una campagna di misura di una settimana, acquisendo i valori della potenza istantanea dal contatore della scuola alle ore 8:00 e alle ore 10:00 del mattino e di voler correggere la potenza stimata alle ore 09:00. I dati necessari per correggere l'istante t_2 sono:

- Potenza media settimanale misurata nel primo intervallo - t_1 (ore 08:00 AM) = 150 kW
- Potenza media settimanale misurata nel terzo intervallo - t_3 (ore 10:00 AM) = 190 kW



Applicando la formula:

$$P_{t_2} = P_{t_1} + \frac{P_{t_3} - P_{t_1}}{t_3 - t_1} \cdot (t_2 - t_1) = 150 \frac{190 - 150}{3 - 1} \cdot (2 - 1) = 170 \text{ kW}$$

Ripetendo la procedura di calcolo con le misure lette alle ore 11:00 e 13:00 è possibile correggere il valore stimato di potenza alle ore 12:00 migliorando nel complesso il diagramma di carico della scuola. Nel caso fosse previsto l'utilizzo degli spazi scolastici in orari differenti da quelli delle lezioni (es. per attività extrascolastiche pomeridiane), il diagramma di carico va aggiornato:

1. individuando preliminarmente gli ambienti e i dispositivi utilizzati al di fuori dell'orario di lezione
2. stimando l'incremento di potenza conseguente l'utilizzo di questi ambienti e
3. sommando questo incremento al diagramma di carico valutato nelle ore di didattica.



Lezione 4 - Principio di funzionamento di un impianto di generazione e criteri di dimensionamento.

Un impianto fotovoltaico è costituito da numerose piccole celle fotovoltaiche che convertono la radiazione solare [20] incidente in corrente continua, successivamente trasformata in alternata attraverso l'uso di un dispositivo chiamato inverter. Tale impianto permette di:

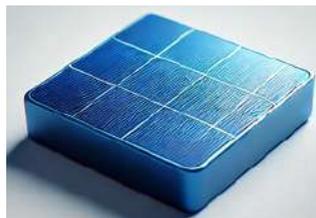
- **promuovere l'uso di energia rinnovabile:** la produzione di energia elettrica avviene direttamente nel punto di utilizzo e per tale motivo si riducono le perdite di energia dovute al trasporto della stessa da centrali elettriche distanti.
- **ridurre le emissioni inquinanti nell'ambiente:** la produzione di energia elettrica fotovoltaica non comporta emissioni di gas serra, particolati o inquinanti atmosferici.
- **ridurre l'uso di combustibili fossili:** risorse soggette a fluttuazioni di prezzo dovute a problemi di disponibilità e a questioni di natura geopolitica.

Gli impianti fotovoltaici hanno una vita utile che spesso supera i 20 anni e richiedono una manutenzione minima, che si limita generalmente alla pulizia dei pannelli e alla verifica delle connessioni elettriche. Sono soluzioni modulari che si adattano alle specifiche esigenze e possibilità economiche dell'utente finale. È possibile, infatti, installare inizialmente un sistema di piccole dimensioni ed espanderlo successivamente aggiungendo moduli per aumentarne la potenza.



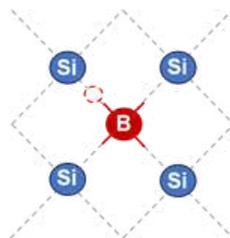
Principio di funzionamento di un impianto fotovoltaico

Il componente principale di un impianto di produzione di energia a fonte solare è la cella fotovoltaica, costituita da una sottile fetta di materiale semiconduttore, tipicamente silicio, con uno spessore di circa 0.3 mm e una superficie variabile tra i 100 e i



225 cm². La cella fotovoltaica genera corrente elettrica sfruttando l'effetto fotovoltaico, che si manifesta quando il silicio è "drogato", ossia arricchito intenzionalmente con impurità per modificarne le proprietà elettriche.

L'aggiunta di una piccola quantità di boro[21] (B), al silicio (Si) produce un semiconduttore di tipo P, caratterizzato da lacune dovute alla presenza di legami incompleti tra gli atomi di boro e di silicio. Queste lacune, originate dal deficit di elettroni, conferiscono alla struttura del reticolo cristallino una carica elettrica positiva.



L'aggiunta di fosforo (P)[22] al silicio genera un semiconduttore di tipo N. In questo caso, quattro degli elettroni dell'atomo di fosforo si legano con quattro elettroni del silicio, lasciando un quinto elettrone libero che contribuisce alla conduzione elettrica.



[20] La radiazione solare è la quantità totale di energia elettromagnetica solare che incide, in un dato intervallo temporale, su una superficie d'area unitaria, misurata in kWh/m². Comprende una componente diretta dal sole, una radiazione diffusa dal cielo e una radiazione riflessa dalle superfici circostanti.

i [21] Elemento appartenente al gruppo III della tavola periodica.

[22] Elemento appartenente al gruppo V della tavola periodica.



La combinazione di uno strato P con uno strato N crea una giunzione p-n, una regione di carica spaziale che facilita la diffusione e l'accumulo di elettroni nella regione P e di lacune nella regione N. Questo movimento di cariche crea una zona di "svuotamento", in cui le cariche mobili si neutralizzano per ricombinazione, lasciando solo le cariche fisse degli ioni dopanti: ioni positivi nella regione N e ioni negativi nella regione P; la separazione delle cariche genera un campo elettrico che agisce da barriera al movimento ulteriore di cariche. Quando un fotone colpisce il materiale semiconduttore, eccita gli elettroni, creando coppie elettrone-lacuna sia nella zona N che nella zona P. Il campo elettrico presente nella zona di svuotamento separa queste cariche, spingendo gli elettroni verso la regione N e le lacune verso la regione P. Il movimento degli elettroni, supportato dal campo elettrico nella zona di svuotamento, determina il passaggio di corrente elettrica fintanto che la cella è esposta alla luce e connessa a un circuito elettrico. Per massimizzare la produzione di corrente elettrica, è essenziale quindi che la superficie esposta al sole sia massima.





Dalla cella al modulo fotovoltaico

Dal punto di vista costruttivo, i moduli fotovoltaici sono tipicamente assemblati con 36 celle disposte in serie e parallelo su quattro file e hanno una superficie compresa tra 0.5 e 1 m². Un modulo standard include una lamina di protezione superiore in vetro temperato, un materiale di incapsulamento come l'EVA (Etilene Vinil Acetato) per isolare elettricamente le celle, un substrato di supporto e una cornice in alluminio.

Il moduli più diffusi in commercio sono in silicio cristallino, disponibile sia nella variante mono che poli cristallina. Le celle monocristalline, fatte di silicio di alta purezza, sono note per la loro elevata efficienza, variabile tra il 16,5% e il 21,5%. Questi moduli si distinguono per la loro lunga durata e capacità di mantenere circa il 92% del rendimento iniziale dopo 20 anni. Presentano una colorazione blu scuro dovuta al rivestimento antiriflettente di ossido di titanio che ottimizza l'assorbimento della luce solare.



I moduli policristallini, sono formati da cristalli di silicio che si aggregano in modi e orientamenti diversi, producendo caratteristiche iridescenze. Sebbene meno performanti dei monocristallini, con un'efficienza che varia dal 15,1% al 18,2%, i policristallini offrono un costo inferiore e una buona durata, mantenendo l'85% del rendimento iniziale dopo 20 anni.





Oltre al silicio cristallino esistono i moduli a film sottile, realizzati con diversi materiali, tra cui il tellururo di cadmio (CdTe) e il seleniuro di rame indio gallio (CIGS), che offrono buone prestazioni anche con bassa illuminazione e sono particolarmente resistenti a temperature estreme. Tuttavia, i moduli in silicio amorfo hanno una bassa efficienza, circa il 14%, e una maggiore fragilità, fattori che ne limitano l'uso nonostante il basso costo dei materiali.



Importanti per la protezione del modulo sono i diodi di bypass, che impediscono la formazione di punti caldi e proteggono dalle correnti inverse, particolarmente utili in caso di ombreggiamento parziale delle superfici. Recentemente, l'introduzione degli ottimizzatori di potenza ha migliorato ulteriormente la resa dei pannelli fotovoltaici, permettendo a ciascun modulo di operare ottimizzando indipendentemente la propria tensione e corrente per massimizzare la produzione energetica. Di seguito una sintesi dei vantaggi e svantaggi per le differenti tipologie di moduli esaminati.

	Rendimento	Vantaggi	Svantaggi
GaAs Arseniuro di Gallio	32,5 % (massima per applicazioni spaziali)	elevata resistenza alle alte temperature e uno dei più alti coefficienti di assorbimento di luce tra i materiali fotovoltaici.	tossicità dell'arsenico e disponibilità (anche se quella del gallio è meno problematica rispetto a materiali come l'indio).
Tellururo di Cadmio	12,4 ÷ 13,4%	basso costo di produzione e la relativa semplicità del processo di produzione delle celle.	tossicità del cadmio e carenza di tellurio a lungo termine.
CIS Diseleniuro di Indio e Rame	13,6 ÷ 14,6%	buona efficienza energetica anche in condizioni di luce non ottimali.	materiale tossico e carenza di indio a lungo termine.



	Rendimento	Vantaggi	Svantaggi
Silicio monocristallino	16,5 ÷ 21,5 %	Alto rendimento, tecnologia matura	elevata quantità di energia necessaria al processo di fabbricazione
Silicio policristallino	15,1 ÷ 18,2 %	Basso costo, fabbricazione semplice	sensibile alle impurità (maggiori accortezze durante il processo di fabbricazione)
Silicio amorfo	8 ÷ 14 %	basso costo, comportamento stabile al variare della temperatura, resa energetica alta con radiazione diffusa	dimensioni elevate (rendimento basso),

Dal modulo all'impianto fotovoltaico

Più moduli collegati meccanicamente ed elettricamente formano un pannello, ossia una struttura che può essere ancorata al suolo o ad un edificio. Più pannelli collegati elettricamente in serie costituiscono una stringa e l'insieme di stringhe, collegate in parallelo, realizza un impianto fotovoltaico.

Per convertire la corrente continua dei moduli in corrente alternata, compatibile con la rete elettrica nazionale è necessario un inverter. Questo dispositivo utilizza la modulazione di larghezza di impulso (PWM), una tecnica che consiste nell'accendere e spegnere rapidamente interruttori statici, per ottenere una corrente alternata, la cui forma d'onda è regolata agendo sulla durata degli impulsi. Gli inverter dispongono inoltre della tecnologia MPPT (Maximum Power Point Tracking), che ottimizza la produzione energetica regolando la tensione e la corrente dell'impianto per massimizzare la potenza in qualsiasi condizione meteorologica.





Gli impianti fotovoltaici si classificano in due tipologie principali:

1. Isolati (Stand-alone): questi sistemi non sono connessi alla rete elettrica pubblica e si affidano a moduli fotovoltaici combinati con sistemi di accumulo per fornire energia anche in assenza di luce solare diretta. Sono particolarmente vantaggiosi in aree remote o difficilmente raggiungibili, sostituendo o affiancando i gruppi elettrogeni. Questi impianti sono spesso dimensionati per coprire il fabbisogno diurno di energia e per accumulare l'eccesso prodotto per l'utilizzo serale. Applicazioni tipiche includono:

- ripetitori radio e stazioni di rilevamento;
- sistemi di illuminazione stradale e segnaletica;
- applicazioni in camper, rifugi di montagna e strutture pubblicitarie;

2. Connessi alla rete (Grid-connected): Questi sistemi sono integrati con la rete elettrica esistente. Durante le ore in cui la produzione fotovoltaica non soddisfa il fabbisogno elettrico, il sistema attinge energia dalla rete pubblica mentre, in caso contrario, l'eccesso di produzione è immesso nella stessa rete. Questi impianti possono anche non richiedere batterie di accumulo, dato che l'energia in eccesso può essere venduta sul mercato elettrico.



Stand-alone



Grid-connected



Fattori che influenzano la produzione annua di un impianto fotovoltaico

La quantità di energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico nell'arco di un anno dipende principalmente da tre fattori:

1. disponibilità della radiazione solare: si rende necessario valutare questa grandezza perché la produzione fotovoltaica dipende dall'irraggiamento, che varia nel tempo e luogo di riferimento. In Italia, i dati sulla radiazione solare media possono essere ottenuti da:

- **norme tecniche** come quelle dei comitati CEI e UNI;
- **atlanti solari**, come quello sviluppato da RSE (<https://sunrise.rse-web.it/>);
- **banche dati**;
- **Software** come il sistema informativo geografico fotovoltaico PVGIS fornito dalla Commissione Europea.

2. Orientamento e Inclinazione dei Moduli: la Terra ruota intorno al sole con un'inclinazione rispetto al proprio asse di circa 23.45 gradi. Questa caratteristica influisce sull'angolo di incidenza che i raggi solari formano con i pannelli fotovoltaici. Tale aspetto va considerato in fase di progettazione e installazione perché l'efficienza di produzione di un impianto fotovoltaico è ottima quando i raggi solari incidono perpendicolarmente ai pannelli. Per avere la massima producibilità occorre agire su queste grandezze:

- **Azimut:** indica la direzione ottimale verso cui orientare i pannelli. Nell'emisfero boreale, come in Italia, l'orientamento ideale è verso sud per massimizzare l'esposizione solare. In luoghi del mondo dove le estati sono molto calde, un orientamento est o ovest può prevenire il surriscaldamento pomeridiano.



- **Tilt:** rappresenta l'angolo di inclinazione dei pannelli rispetto al suolo. Un buon punto di partenza è impostare l'inclinazione allo stesso valore della latitudine del sito di installazione. Per ottimizzare la produzione estiva, l'angolo può essere ridotto di circa 15° , mentre in inverno, aumentato di circa 15° per captare meglio il sole più basso all'orizzonte.

3.Prevenzione ombreggiamento: la massima producibilità di un impianto è ottenuta in assenza di ombreggiamenti dovuti a edifici o alberi circostanti, che devono essere valutati prima dell'installazione dei pannelli fotovoltaici.

Metodi di installazione e configurazioni

I moderni moduli fotovoltaici si prestano bene a essere utilizzati in differenti contesti architettonici. In funzione del loro grado di integrazione, si distinguono tre macrocategorie di impianti fotovoltaici:

1.impianti non integrati: includono moduli installati al suolo o su elementi di arredo urbano. Possono anche essere collocati sulle superfici esterne degli edifici o di altre strutture edilizie, in modalità che non corrispondono alle tipologie di integrazione parziale o totale.

2.Impianti parzialmente integrati: i moduli sono installati su elementi di arredo urbano, superfici esterne degli edifici o altre strutture, senza sostituire il materiale da costruzione originario (sono complanari al tetto o alla facciata).

3.Impianti con integrazione architettonica completa: questi impianti sostituiscono in tutto o in parte gli elementi architettonici degli edifici, come coperture, superfici verticali opache, superfici trasparenti o semitrasparenti e superfici apribili come: porte, finestre, vetrine, anche non apribili.



Gli impianti di questa tipologia, oltre ad assolvere la funzione di produzione dell'energia, devono presentare caratteristiche meccaniche e termiche che gli permettono di replicare la funzione degli elementi architettonici che sostituiscono.



Lezione 5 - Stima della producibilità fotovoltaica.

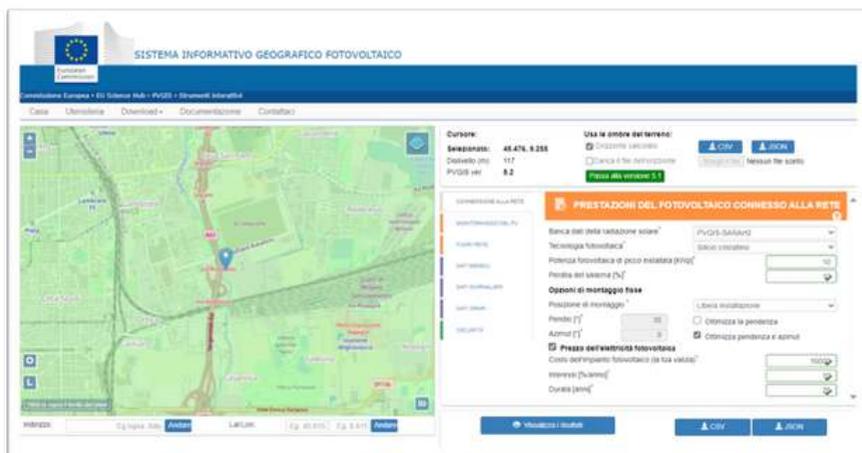
Per valutare la produzione di un impianto fotovoltaico in una specifica zona geografica, è fondamentale l'uso di strumenti software avanzati. Questi strumenti sono essenziali sia nella fase di pianificazione, per determinare il corretto dimensionamento dell'impianto, sia dopo l'installazione, per monitorare il funzionamento dei pannelli e identificare eventuali malfunzionamenti. Uno degli strumenti più utili forniti dall'Unione Europea per assistere i cittadini nella scelta e valutazione di un impianto fotovoltaico è il software gratuito **PVGIS** (Photovoltaic Geographical Information System). PVGIS è una piattaforma web che offre agli utenti l'accesso a dati dettagliati sulla radiazione solare e stime della produzione energetica dei sistemi fotovoltaici per quasi tutte le località nel mondo. Questo strumento si rivela particolarmente utile per i progettisti di sistemi fotovoltaici e per qualunque soggetto desideri comprendere meglio le potenzialità di produzione energetica solare del suo sito. L'interfaccia di PVGIS è intuitiva e permette agli utenti di ricevere in tempo reale stime della produzione nella località di interesse inserendo informazioni come: *l'orientamento dei pannelli, l'inclinazione e il tipo di tecnologia fotovoltaica utilizzata*. PVGIS fornisce anche mappe solari e grafici che illustrano il potenziale energetico mensile e annuale, aiutando gli utenti a prendere decisioni informate sulla posizione e sul design del loro impianto.

Dati di input per la simulazione

Per effettuare una simulazione accurata con PVGIS, l'utente deve prima selezionare la posizione geografica dove desidera valutare la



produzione annua dell'impianto fotovoltaico che intende installare. Questa selezione può essere fatta attraverso diverse modalità:



- **clickando sulla mappa:** utilizzando la funzione zoom per raggiungere il livello di dettaglio desiderato;
- **inserendo un indirizzo specifico:** compilando il campo “address” situato sotto la mappa;
- **inserendo latitudine e longitudine:** compilando i campi dedicati, sulla base delle indicazioni fornite nel manuale d’uso.

Durante la fase di calcolo, PVGIS può valutare l’impatto degli ombreggiamenti causati da elementi naturali come colline o montagne poste nelle vicinanze dell’impianto fotovoltaico. Selezionando l’opzione “**orizzonte calcolato**”, il software sfrutta le informazioni disponibili, per analizzare gli effetti dell’orizzonte e dell’elevazione del terreno sulla radiazione solare ricevuta. In alternativa, gli utenti esperti possono caricare un file con i dati altimetrici specifici della località in esame per un’analisi più veritiera e personalizzata. Questi dati sono fondamentali per capire come l’elevazione del terreno influenzi



l'irradiazione solare e di conseguenza, la producibilità dell'impianto nella località di interesse.

Per valutare accuratamente la produzione annua di un impianto fotovoltaico, PVGIS utilizza banche dati che contengono misure di radiazione solare raccolte dal 2005 al 2023. Questi dati, in gran parte derivati da immagini satellitari, forniscono una base solida per le simulazioni fotovoltaiche. Le banche dati attualmente disponibili su PVGIS sono:

1. **PVGIS-SARAH2/3:** è il database predefinito per Europa, Asia, Africa e Sud America. Offre dati ad alta risoluzione e viene frequentemente aggiornato.
2. **PVGIS-NSRDB:** specifico per l'America, questo database fornisce dati solari di alta qualità derivati da osservazioni satellitari e stazioni terrestri.
3. **PVGIS-ERA5:** valido a livello globale, questo database contiene dati non esclusivamente satellitari, inclusi dati meteorologici e atmosferici. È particolarmente utile per aree meno coperte dai satelliti o per applicazioni che richiedono dati integrati di altri fenomeni atmosferici oltre alla sola radiazione solare.

Per valutare in modo affidabile l'energia prodotta dagli impianti fotovoltaici in diverse aree geografiche del mondo, si raccomanda di selezionare la banca dati più adatta. Nello specifico, per:



- Europa, Asia, Africa e Sud America: utilizzare il database PVGIS-SARAH2/3 per beneficiare di dati dettagliati e aggiornati che coprono queste aree.
- America del Nord e del Sud: optare per PVGIS-NSRDB per sfruttare dati specifici e dettagliati che riflettono le condizioni solari uniche di queste regioni.
- Altre aree del mondo: PVGIS-ERA5 offre una copertura globale che può essere utilizzata per qualsiasi area del mondo, inclusi dettagli utili per condizioni atmosferiche variabili.

Altri parametri di input richiesti da PVGIS per la simulazione di impianti fotovoltaici sono:

- **la tipologia di tecnologia fotovoltaica:** PVGIS permette di stimare le perdite dovute agli effetti della temperatura e dell'ombreggiamento per diverse tipologie di celle fotovoltaiche, incluse quelle in silicio cristallino e i moduli a film sottile realizzati in CIS, CIGS e CdTe. Selezionando l'opzione "sconosciuto", PVGIS applicherà una perdita di potenza presunta del 8% dovuta agli effetti della temperatura, ottenuta attraverso la valutazione di dati empirici relativi a climi temperati.
- **la potenza di picco installata:** l'utente può inserire la potenza di picco dell'impianto che desidera simulare. Se l'area dei moduli e l'efficienza di conversione sono note, la potenza di picco può essere calcolata con la formula:

$$\text{Potenza} = \frac{\text{Area} \cdot \text{Efficienza}}{100}$$



- **le perdite di sistema:** PVGIS assume che le perdite nei componenti (pannelli, inverter e collegamenti), la scarsa manutenzione e l'invecchiamento dei moduli, riducano la produzione media annua del 14%. In alternativa si può inserire un valore personalizzato;
- **la posizione di montaggio:** l'utente può specificare se i moduli sono montati in modo indipendente su strutture che permettono la ventilazione o se sono integrati nell'edificio dove non c'è flusso d'aria dietro i moduli.
- **Slope (inclinazione):** indica l'angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale per un montaggio fisso. Questo parametro è cruciale per massimizzare l'assorbimento della radiazione solare (vedi lezione 4).
- **Azimut (o orientamento):** dei moduli fotovoltaici rispetto al sud geografico. Un azimut di 90° corrisponde a est, 0° a sud e 90° a ovest.
- **Opzioni di ottimizzazione inclinazione e azimut:** PVGIS offre la possibilità di calcolare l'inclinazione e, se necessario, anche l'azimut ottimale che massimizzano la produzione energetica annuale, assumendo che questi parametri rimangano fissi durante l'anno.
- **Calcolo del costo dell'elettricità fotovoltaica (LCOE):** per determinare il costo medio di generazione dell'energia, si richiede il costo di installazione dell'impianto, il tasso di interesse annuo pagato e la vita utile presunta dell'impianto. Nel calcolo, PVGIS assume che la manutenzione annua abbia un costo pari al 2% di quello di installazione.

PVGIS offre anche diverse schede aggiuntive che permettono agli utenti di:



- Simulare le prestazioni di impianti con inseguimento solare.
- Eseguire calcoli per impianti isolati.
- Visualizzare e scaricare i dati medi mensili di radiazione solare e temperatura su un periodo pluriennale.
- Consultare il profilo medio giornaliero della radiazione solare e della temperatura dell'aria per un determinato mese.

Per approfondimenti e istruzioni dettagliate, si consiglia di consultare il manuale tecnico disponibile sul sito ufficiale.

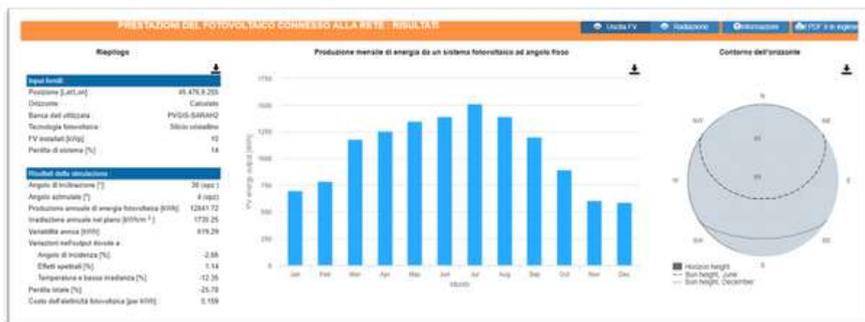
Risultati della simulazione

I risultati forniti includono:

- **la sintesi delle grandezze energetiche annuali:** come la produzione totale di energia (espressa in kWh) e l'irraggiamento solare per l'intero anno. Questi dati rappresentano una stima affidabile dell'energia che l'impianto è in grado di produrre annualmente, tenendo conto delle condizioni medie locali di irradiazione.
- **la visualizzazione dei valori mensili delle grandezze energetiche:** PVGIS fornisce grafici dettagliati che mostrano la distribuzione mensile della produzione di energia e dell'irraggiamento solare. Questi grafici sono particolarmente utili per comprendere le fluttuazioni stagionali dell'energia prodotta. La visualizzazione di questi dati in forma grafica aiuta a identificare rapidamente i periodi dell'anno in cui l'impianto funzionerà al massimo della sua potenza e quando potrebbero verificarsi cali di produzione, ad esempio, durante i mesi invernali o in periodi di minor soleggiamento.



- la visualizzazione dei valori mensili delle grandezze energetiche:** PVGIS fornisce grafici dettagliati che mostrano la distribuzione mensile della produzione di energia e dell'irraggiamento solare. Questi grafici sono particolarmente utili per comprendere le fluttuazioni stagionali dell'energia prodotta. La visualizzazione di questi dati aiuta a identificare rapidamente i periodi dell'anno in cui l'impianto funzionerà al massimo della sua potenza e quando potrebbero verificarsi cali di produzione, ad esempio durante i mesi invernali o in periodi di minor soleggiamento.



Come risultati, sono riportati anche i contributi delle principali grandezze energetiche all'incremento o decremento della produzione e irraggiamento dell'impianto (l'incidenza della radiazione solare, effetti dello spettro della radiazione solare, influenze della temperatura e scarso irraggiamento). Sono inoltre mostrate le perdite complessive dell'impianto e il costo di produzione per ogni kWh generato sulla base dei costi inseriti dall'utente. Questo strumento offre agli utenti diverse opzioni per ottenere e visualizzare i risultati delle simulazioni fotovoltaiche, rendendo accessibili i dati in vari formati adatti a diverse esigenze:



1. visualizzazione diretta nel browser web:

- i risultati possono essere visualizzati come numeri e grafici direttamente nel browser web.
- Tutti i grafici mostrati possono essere salvati come file immagine, permettendo agli utenti di conservare una copia visiva dei dati per analisi future o per report.

2. esportazione in formato CSV:

- PVGIS offre la possibilità di scaricare i dati in formato testo (CSV), utili per analisi specifiche o per l'uso in altre applicazioni software.
- I formati di output e le specifiche del file CSV sono dettagliatamente descritti nella sezione "Strumenti" del sito.

3. generazione di Documenti PDF:

- Dopo aver visualizzato i risultati nel browser, gli utenti possono generare un documento PDF che riassume i dati della simulazione. Questa opzione è particolarmente utile per presentazioni o archiviazione documentale.

4. utilizzo delle API di PVGIS:

- Per gli sviluppatori e per applicazioni automatizzate, PVGIS offre servizi web non interattivi attraverso le sue API. Questi servizi permettono l'integrazione dei dati di simulazione direttamente in applicazioni di terze parti. Le funzionalità e l'uso delle API sono spiegate in dettaglio nella sezione "Strumenti" del sito.

5. Visualizzazione Grafica dell'Orizzonte:

- Oltre ai dati numerici e grafici della produzione energetica, PVGIS include un grafico dell'orizzonte che offre una rappresentazione visiva degli ostacoli naturali o artificiali che potrebbero influenzare la radiazione solare ricevuta.

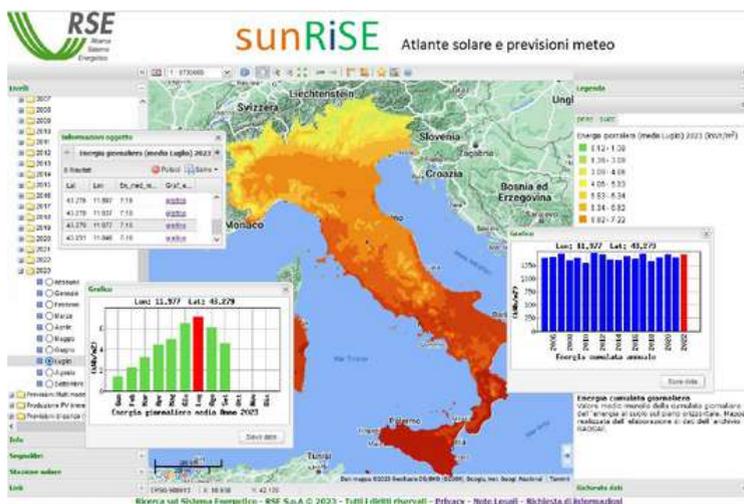


Per offrire un confronto realistico, PVGIS può mostrare anche un'immagine scattata dalla stessa posizione con una telecamera, fornendo una vista panoramica che aiuta a comprendere meglio il contesto locale.



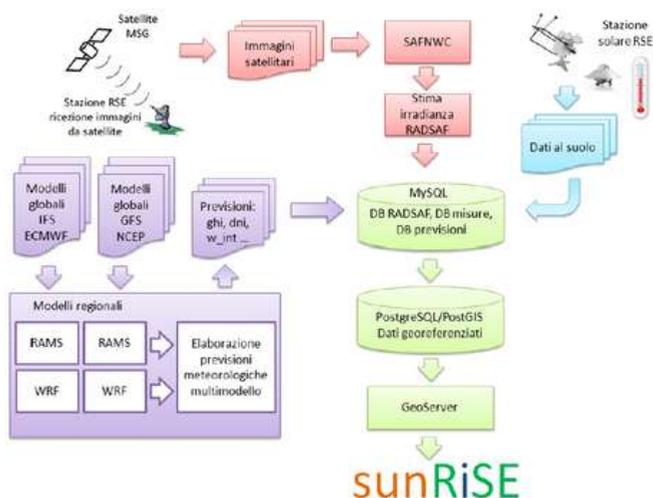
Lezione 6 - SunRiSE il portale RSE.

SunRiSE (<https://sunrise.rse-web.it>) è il portale webGIS di RSE per persone esperte, dedicato alla pianificazione e gestione delle energie rinnovabili, con un focus particolare sul fotovoltaico. Un punto di forza del portale è l'accesso alle mappe di irradianza, ottenute attraverso l'analisi di immagini satellitari provenienti da MSG Meteosat Second Generation disponibili dal 2005. Inoltre, il sito fornisce previsioni meteorologiche multimodello di variabili che influenzano la produzione di energie rinnovabili, nonché previsioni areali di fonti rinnovabili non programmabili (FRNP) e della domanda elettrica. Tutte le mappe sono interattive e consentono agli utenti di monitorare l'evoluzione temporale delle misurazioni per specifici punti geografici. SunRiSE rende disponibili anche dati di alta qualità sulla radiazione solare raccolti presso la sede RSE di Milano.





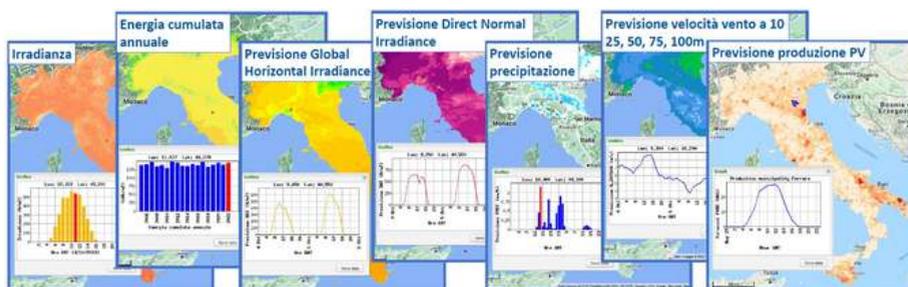
Poiché l'irradianza al suolo è influenzata da fattori astronomici come l'altezza solare e fattori atmosferici quali: la tipologia, lo spessore delle nubi e la presenza di aerosol, RSE ha implementato per SunRiSE un metodo statistico chiamato RADSAF, che stima l'irradianza basandosi sull'altezza solare e sulle caratteristiche della nuvolosità, dedotte dall'elaborazione delle immagini del satellite meteorologico MSG. Queste immagini sono disponibili ogni 15 minuti e coprono l'intero territorio italiano. Le stime di irradianza, raccolte in modo continuativo dal 2005, costituiscono la base per le mappe di irradianza ed energia disponibili sul sito.



Le previsioni meteorologiche orarie, che coprono un orizzonte temporale di due giorni, sono generate attraverso la combinazione delle previsioni provenienti da due modelli meteorologici a scala locale (RAMS e WRF), ciascuno inizializzato con due diversi set di dati globali (IFS e GFS). Questo processo produce quattro differenti configurazioni di previsione: RAMS+IFS, RAMS+GFS, WRF+IFS e WRF+GFS.



I dati raccolti da RADSAF sono inseriti nel database geografico PostgreSQL PostGIS, che assolve la funzione di repository delle informazioni utilizzate per creare le mappe disponibili sul portale. La piattaforma web SunRiSE permette agli utenti di accedere e consultare queste informazioni comodamente via Internet.



Sunrise è a supporto di utenti privati in possesso di impianti fotovoltaici, ricercatori, operatori del sistema elettrico, produttori, pianificatori e aziende di Operation & Maintenance. Per ulteriori approfondimenti si rimanda ai rapporti di Ricerca di Sistema:

- E. Collino, P. Marcacci e A. Toppetti, «Classificazione delle proprietà ottiche delle nubi da satellite Meteosat e completamento della stazione solare di Milano,» Ricerca di sistema, RSE, n. 12001018, Milano, 2012.
- G. Decimi, E. Collino, P. Marcacci, «SunRiSE : realizzazione di un portale per la diffusione di dati e previsioni per le FRNP,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 17001777, Milano, 2017.
- G. Decimi, E. Collino, P. Marcacci, «Sviluppo di strumenti web GIS per la diffusione di previsioni di energia prodotta da FRNP,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 18001914, Milano, 2018.



Lezione 7 - Dimensionamento di massima di un impianto fotovoltaico per una CER.

Questa lezione conclude il percorso formativo dedicato alla progettazione di una comunità energetica rinnovabile, in cui la scuola non solo è un luogo di apprendimento ma anche un promotore attivo di sostenibilità ambientale. Il caso studio considerato, prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto della scuola, connesso al contatore elettrico dell'istituto per generare un risparmio economico da autoconsumo e un incentivo connesso alla condivisione dell'energia. L'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, oltre a soddisfare i bisogni energetici della scuola, viene infatti condivisa con le famiglie residenti nelle vicinanze, creando così una vera e propria comunità energetica rinnovabile. Nelle prime due lezioni è stata studiata la CER sia dal punto di vista normativo che tecnico, evidenziando come le utenze di consumo possano cooperare tra loro per sfruttare l'energia rinnovabile prodotta dagli impianti comunitari e generare vantaggi economici, ambientali e sociali attraverso la condivisione della produzione in eccesso. Sono stati descritti i metodi per calcolare il fabbisogno energetico della scuola, stimare la producibilità di un impianto fotovoltaico nella posizione geografica desiderata e ottimizzare l'autoconsumo e l'energia condivisa, in funzione delle risorse presenti negli edifici della CER (es. accumuli elettrici, impianto di riscaldamento e raffrescamento a pompa di calore, stazioni di ricarica dei veicoli elettrici). Come fase conclusiva di questo percorso didattico, si intende mettere a fattor comune gli insegnamenti dati, attraverso un semplice foglio di calcolo Excel, da utilizzare come supporto per la scelta della potenza fotovoltaica da installare sul tetto di un edificio scolastico. Il foglio di calcolo RSE



“Scuola_CER”, di seguito presentato, è disponibile sul portale autoconsumo: cerpedia.rse-web.it.

Interfaccia grafica

Inserisci il profilo di carico della scuola e premi il pulsante carica:		Calcola	
potenza da installare	10	[kWp]	
influenza della CER	0	[%]	
costo impianto	14000	[euro]	
taxa di interesse	5	[%]	
prezzo vendita energia	100	[euro/MWh]	
prezzo acquisto energia	150	[euro/MWh]	
componente TRAE	10,07	[euro/MWh]	
costo energia elettrica prodotta (da PVGIS)	0,119	[euro/kWh]	
Risultati simulazione energetica			
Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico	13210	[kWh/anno]	
Energia prodotta dalla scuola	3313	[kWh/anno]	
Energia prodotta dagli utenti domestici	26500	[kWh/anno]	
Energia autoconsumata dalla scuola	1090	[kWh/anno]	
Energia immessa in rete dall'impianto	12215	[kWh/anno]	
Energia ceduta alla CER	9696	[kWh/anno]	
Risultati simulazione economica			
incasso CER	3202	[euro/anno]	
Costi di inter-ribalti	303	[euro/anno]	
Energia venduta alla rete	3225	[euro/anno]	
Ripartimento autoconsumo scuola	752	[euro/anno]	
Totale	2679	[euro/anno]	
Costo sostenuto per produrre l'energia	2188	[euro/anno]	
tempo di ritorno	6	[anni]	

Scuola_CER è dotato di un'interfaccia grafica intuitiva e automatizzata che semplifica l'inserimento dei dati e l'avvio delle simulazioni. Questo strumento di calcolo permette agli studenti di determinare, con buona approssimazione, la dimensione ottimale dell'impianto fotovoltaico da installare sul tetto del loro edificio scolastico, nonché i ricavi economici derivanti dalla produzione di energia rinnovabile e dalla partecipazione attiva alla comunità energetica.



Il foglio di calcolo è progettato per essere uno strumento essenziale nel processo decisionale e offrendo scenari basati su dati concreti, permette agli studenti di valutare l'impatto e la fattibilità della loro iniziativa. L'interfaccia di inserimento dati è composta da cinque macro-sezioni, tre di queste (area celeste, verde e viola) sono utilizzate per inserire i dati di ingresso necessari alla simulazione mentre, le restanti due (rossa e gialla), mostrano rispettivamente, i risultati energetici ed economici.

Acquisizione dei profili medi giornalieri di prelievo e produzione

Nell'area celeste, i menù e i pulsanti consentono agli utenti di:

- selezionare la regione dove costituire la Comunità Energetica Rinnovabile (CER);
- scegliere la potenza contrattuale per il tipo di utente domestico considerato;
- importare il profilo medio giornaliero di produzione prodotto da PVGIS e inserito nella scheda **Data_PVGIS** del foglio di calcolo;
- importare il profilo di consumo medio giornaliero dell'utente tipo, per la regione e la potenza contrattuale selezionata;
- inserire manualmente il profilo di carico giornaliero della scuola (sezione viola) e importarlo all'interno del foglio di calcolo.

I profili di consumo medi giornalieri degli utenti tipo, sono derivati dai dati forniti dall'Autorità (ARERA), disponibili sul loro sito [23].



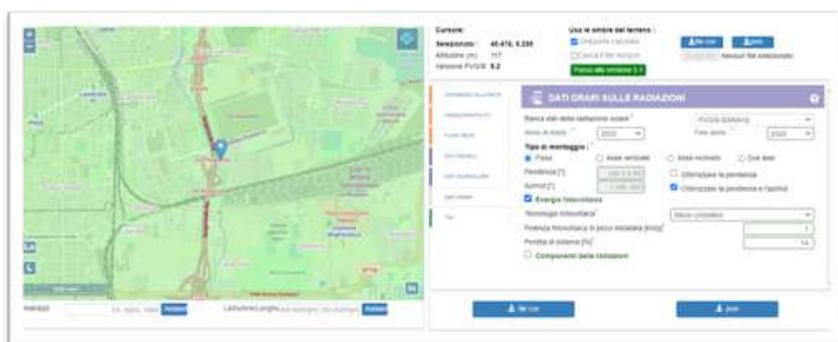
[23] <https://www.arera.it/dati-e-statistiche/dettaglio/analisi-dei-consumi-dei-clienti-domestici>



La serie dati PVGIS da utilizzare nel foglio di calcolo

Per generare il profilo medio giornaliero da inserire nella scheda Data_PVGIS, si procede come segue:

1. Si avvia il tool PVGIS accedendo al sito;
2. Si inserisce l'indirizzo del luogo desiderato nel campo address.
3. Si seleziona la cartella dati orari.

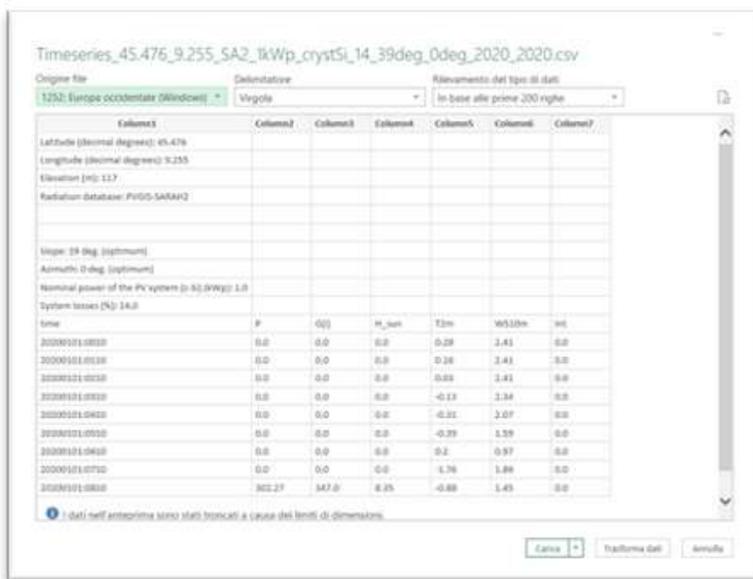


Nella scheda di inserimento dati, compilare i campi come indicato di seguito:

- **Banca dati della radiazione solare:** selezionare PVGIS-SARAH2/3;
- **Anno di inizio e fine:** impostare su 2005-2023;
- **Tipologia di montaggio:** scegliere l'opzione desiderata;
- **Pendenza e azimut:** selezionare la casella "Ottimizzare la pendenza e l'azimut";
- **Energia fotovoltaica:** selezionare l'opzione corrispondente;
- **Tecnologia fotovoltaica:** scegliere l'opzione desiderata;
- **Potenza fotovoltaica di picco installata [kWp]:** impostare su 1;
- **Perdita di sistema [%]:** se non si conosce, utilizzare l'opzione di default di PVGIS (14%);



Una volta inseriti tutti i campi richiesti, premere il pulsante “file csv” per esportare i dati e salvarli sul proprio PC. Occorre successivamente caricare il file csv in un nuovo file Excel[24], per estrarre la serie annuale di produzione da inserire nella scheda Data_PVGIS del foglio di calcolo RSE.



Dopo aver importato i dati, la struttura del foglio excel si presenta come in figura:

i [24] Per importare il file, dalla scheda Dati di Excel selezionare l’opzione Da testo/CSV e scegliere il file navigando fino al percorso della cartella desiderata.



PVGIS - SARAH2						
altitude (decimal degrees):45.476						
longitude (decimal degrees):9.255						
elevation (m):117						
radiation database:PVGIS-SARAH2						
slope: 39 deg. (optimum)						
azimuth: 0 deg. (optimum)						
nominal power of the PV system (c-50) (kWp):1.0						
system losses (%):14.0						
time	P	G(j)	H_sun	T2m	WS10m	lat
0200101:0010	0.0	0.0	0.0	0.28	2.41	0.0
0200101:0110	0.0	0.0	0.0	0.16	2.41	0.0
0200101:0210	0.0	0.0	0.0	0.03	2.41	0.0
0200101:0310	0.0	0.0	0.0	-0.13	2.34	0.0
0200101:0410	0.0	0.0	0.0	-0.31	2.07	0.0
0200101:0510	0.0	0.0	0.0	-0.39	1.59	0.0
0200101:0610	0.0	0.0	0.0	0.2	0.97	0.0
0200101:0710	0.0	0.0	0.0	-1.76	1.86	0.0
0200101:0810	302.27	347.0	8.35	-0.88	1.45	0.0
0200101:0910	527.06	614.41	14.88	-2.3	0.97	0.0
0200101:1010	652.81	788.21	19.38	-5.19	0.76	0.0
0200101:1110	698.69	853.67	21.42	-7.11	1.1	0.0
0200101:1210	680.84	831.32	20.78	-8.34	1.31	0.0
0200101:1310	599.83	723.19	17.53	-8.96	1.52	0.0
0200101:1410	443.79	527.79	12.01	-8.92	1.66	0.0
0200101:1510	215.01	265.05	4.69	-8.02	1.72	0.0

Nella parte alta del foglio sono riportate le seguenti informazioni:

- **Latitudine e longitudine:** coordinate geografiche del sito di installazione.
- **Altitudine:** elevazione del sito espressa in metri.
- **Banca dati della radiazione solare:** in Italia corrispondente alla PVGIS-SARAH2/3.
- **Inclinazione e azimuth ottimali:** angoli ideali per il posizionamento dei pannelli solari.
- **Potenza nominale:** potenza dell'impianto espressa in kilowatt picco (kWp).
- **Perdite dell'impianto:** perdite complessive dell'impianto di generazione.

Le colonne del foglio contengono ulteriori informazioni dettagliate come segue:



time: timestamp in formato AAAAMMGG che indica l'anno, il mese e il giorno della simulazione, seguito dall'ora specifica.

P: potenza prodotta in watt dall'impianto fotovoltaico in ogni ora specifica.

G(i): irradianza solare globale incidente, misurata in watt per metro quadrato.

H_sun: altezza del sole sopra l'orizzonte al momento della misurazione, espressa in gradi.

T2m: temperatura ambientale a 2 metri dal suolo, espressa in gradi Celsius.

WS10m: velocità del vento a 10 metri dal suolo, espressa in metri al secondo.

Per utilizzare correttamente il foglio di calcolo RSE, occorre:

- selezionare gli 8760 valori della variabile P, che corrisponde alla produzione oraria di un impianto fotovoltaico da 1 kWp installato nel luogo desiderato.
- copiare questi valori nella scheda Data_PVGIS (colonna A) del foglio di calcolo RSE, verificando che il separatore decimale sia impostato sulla virgola.

Successivamente, premendo il pulsante **“Carica il profilo medio dell'impianto di produzione”** nella scheda **“Simulatore_Scuola”** è acquisito il profilo medio giornaliero di produzione dell'impianto da 1 kWp. Questo profilo può essere adeguato alla potenza dell'impianto che si intende valutare modificando le variabili presenti nell'area verde dell'interfaccia. Infine, gli altri due pulsanti presenti nella sezione celeste sono utilizzati per:

- caricare il profilo medio di consumo giornaliero della tipologia di utente scelto, in base alla potenza contrattuale e alla regione selezionate nei menù.



- caricare il profilo di consumo della scuola, che l'utente inserisce manualmente nei campi appositamente creati (area viola dell'interfaccia).

Dati di ingresso necessari alla valutazione energetica ed economica della CER

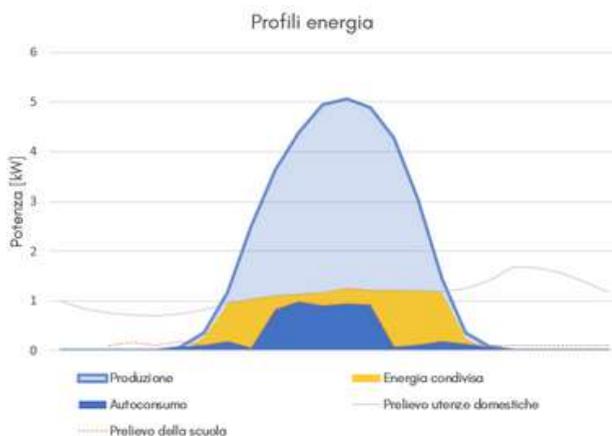
Nella sezione verde dell'interfaccia, è possibile variare la potenza dell'impianto da installare e il numero di utenti partecipanti alla CER, in modo da adeguare automaticamente i profili di produzione e prelievo per adattarli alla CER che si intende simulare. Per valutare la sostenibilità economica dell'impianto di generazione, il foglio di calcolo richiede l'inserimento dei seguenti parametri economici:

- **costo dell'impianto:** può essere stimato attraverso indagini di mercato.
- **tasso di interesse:** si può fare riferimento al tasso applicato dalla BCE sui prestiti di denaro.
- **prezzo di vendita dell'energia:** si valuta osservando l'andamento del prezzo di vendita dell'energia sul sito del Gestore del Mercato Elettrico - GME.
- **prezzo di acquisto dell'energia (o PUN):** si valuta osservando l'andamento di questo prezzo sul sito del GME.
- **componente TRASE:** è riportata sul sito dell'Autorità (ARERA) e nel 2024 vale circa 10,6 euro/MWh.
- **costo dell'energia elettrica prodotta:** è uno dei risultati generati dal simulatore PVGIS. Per ottenerlo occorre svolgere una simulazione utilizzando la scheda "**prestazioni del fotovoltaico connesso alla rete**", compilando i campi con gli stessi dati inseriti nella scheda "**Dati orari**". Per ulteriori dettagli su come svolgere la simulazione, fare riferimento alla lezione 5.

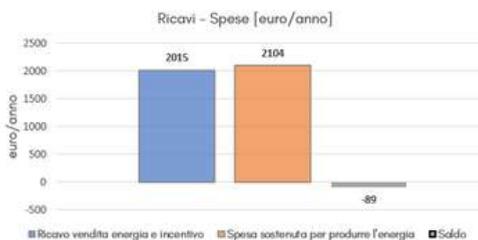


I risultati energetici ed economici della simulazione.

Variando la taglia dell'impianto fotovoltaico e il numero di membri della CER, il foglio di calcolo aggiorna automaticamente le grandezze energetiche ed economiche di interesse per il dimensionamento dell'impianto di generazione fotovoltaico, in modo che l'utente possa comprendere come ottimizzare la distribuzione dei consumi della scuola per generare maggiore autoconsumo o includere un numero più elevato di utenti per incrementare il valore di energia condivisa.

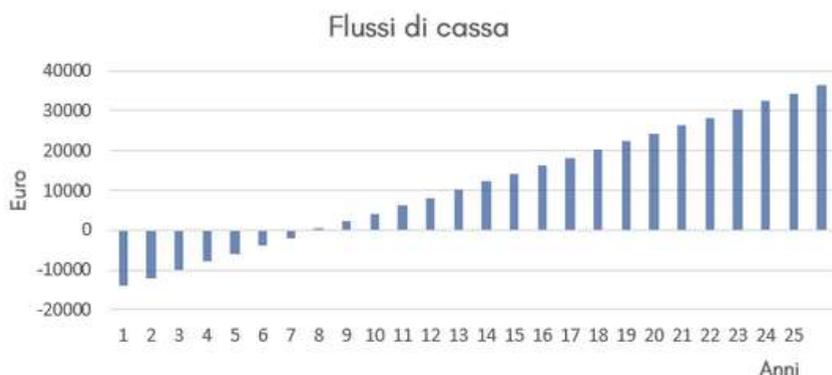


Ad ogni variazione della potenza installata o del numero di utenti, corrisponde l'aggiornamento delle grandezze energetiche e dei costi e ricavi della CER scolastica.





Per valutare la sostenibilità economica dell'iniziativa, il foglio di calcolo fornisce anche un grafico che evidenzia i flussi di cassa per l'orizzonte temporale di investimento, di durata fissata in 25 anni (vita utile presunta di un impianto fotovoltaico).



Questo grafico fornisce informazioni come:

- il tempo di ritorno dell'investimento, cioè il numero di anni che servono per pagare le spese di acquisto dell'impianto fotovoltaico.
- il ricavo netto al termine della vita utile dell'impianto (valore riportato al venticinquesimo 25).

Tutti i risultati grafici delle grandezze energetiche ed economiche sono riepilogati in forma numerica nella sezione rossa e nella sezione gialla dell'interfaccia. Il foglio di calcolo RSE è utile a far comprendere agli studenti come intervenire all'interno della loro scuola o quali attività strutturare per promuovere una più ampia partecipazione di membri esterni alla loro comunità energetica rinnovabile.



Scheda attività 1 - Il pensiero degli studenti sulle CER – questionario da somministrare.

Il questionario intende raccogliere le opinioni di studenti e docenti riguardo alla possibile partecipazione dell'istituto a un progetto di comunità energetica rinnovabile. Le informazioni raccolte saranno utilizzate per comprendere interessi, aspettative e per identificare potenziali attività extracurricolari collegate al progetto.

I questionari somministrati andranno analizzati dagli studenti e presentati al termine del percorso formativo. Si consiglia di digitalizzare il questionario.

Informazioni generali

- Studente
- Docente
- Altro – specificare: _____

Parte 1: il tema delle rinnovabili

Hai già studiato argomenti legati alle energie rinnovabili a scuola?

- Sì
- No

Quanto ritieni di sapere sulle energie rinnovabili?

- Molto
- Abbastanza
- Poco
- Niente



Quali fonti di energia rinnovabile conosci?

- Solare
- Eolico
- Idroelettrico
- Biomassa
- Altro - specificare: _____

Come hai acquisito la maggior parte delle tue informazioni sulle energie rinnovabili?

- Scuola
- Internet
- Famiglia o amici
- Media (TV, giornali)
- Altro - specificare: _____

Parte 2: le comunità energetiche rinnovabili

Sai cos'è una comunità energetica rinnovabile?

- Sì
- No
- Non del tutto

Pensi che la partecipazione a una CER possa avere un impatto positivo sulla scuola?

- Sì, in modo significativo
- Sì, ma limitato
- No
- Non sono sicuro/a



- Sì
- No
- Non del tutto

Sai come avviene la condivisione dell'energia all'interno di una comunità energetica rinnovabile?

- Sì
- No

Sai che è possibile ricevere un incentivo economico condividendo l'energia rinnovabile all'interno di una comunità energetica?

- Sì
- No

Parte 3: aspettative ed esperienze

Sei interessato alle comunità energetiche rinnovabili?

- Sì
- No

Perché sei interessato alle comunità energetiche rinnovabili?

- Curiosità personale
- Importanza ambientale
- Potenziali benefici economici
- Altro - specificare: _____

Cosa ti aspetti di imparare o ottenere partecipando a una comunità energetica rinnovabile?

- Conoscenze tecniche specifiche (es. come funziona un pannello solare)
- Benefici ambientali delle energie rinnovabili
- Capacità di influenzare le scelte energetiche nella scuola, a casa o nella comunità
- Competenze pratiche (es. installazione di tecnologie rinnovabili)
- Altro - specificare: _____



Parte 4: partecipazione e coinvolgimento

Sei interessato a partecipare attivamente a progetti o attività legate alle energie rinnovabili a scuola?

Sì

No

Quali attività ti piacerebbe vedere implementate nella tua scuola legate su questo tema?

Workshop o seminari

Progetti di ricerca studenteschi

Competizioni di idee o progetti

Campagne di sensibilizzazione

Installazione di tecnologie rinnovabili nella scuola

Visite a impianti di produzione di energia rinnovabile

Altro - specificare: _____

Parte 5: potenziali servizi e spostamento casa-scuola

Come ti sposti da casa a scuola?

A piedi

In bicicletta

Con i mezzi pubblici

In auto

Altro - specificare: _____



I mezzi di trasporto che utilizzi per andare a scuola utilizzano fonti di energia rinnovabile?

- Sì
- No
- Non lo so

Nella tua scuola sono presenti colonnine di ricarica dei veicoli elettrici o altri mezzi di trasporto (bus navetta, monopattini, biciclette elettriche)?

- Sì
- No

Quali iniziative pensi possano essere utili per rendere il tragitto casa-scuola più sostenibile?

- Promozione dell'uso di biciclette elettriche
- Organizzazione di un servizio di carpooling eco-sostenibile
- Miglioramento dell'accesso ai mezzi pubblici alimentati da energie rinnovabili
- Campagne di sensibilizzazione sull'uso di mezzi di trasporto ecologici
- Installazione di pannelli solari nelle fermate dei bus
- Altro - specificare: _____

Sarebbe di tuo interesse partecipare a iniziative per promuovere l'uso di energie rinnovabili nel tragitto casa-scuola?

- Sì
- No

Parte 6: reinvestimento dei risparmi in attività extrascolastiche

Quali tipi di attività extrascolastiche vorresti vedere implementate o potenziate nella tua scuola con i risparmi ottenuti dall'eventuale partecipazione della scuola a una CER?

- Attività teatrali
- Attività sportive
- Gite di classe



- Sviluppo di progetti basati sulle nuove tecnologie digitali.
- Laboratori artistici

Come pensi che queste attività extrascolastiche possano influenzare la tua esperienza scolastica?

- In modo positivo: aumentano il mio interesse per la scuola
- In modo neutro: non influenzano l'idea personale che ho della scuola.
- In modo negativo: mi distraggono dagli studi.
- Altro -specificare: _____

Parte 7: Commenti Finali



Scheda attività 2 - Il monitoraggio dei consumi elettrici della scuola.

In questa lezione, si affronta il tema del monitoraggio dei consumi energetici in un ambiente scolastico, con l'obiettivo di comprendere come l'energia è utilizzata durante la didattica. È indispensabile sapere che ogni ambiente scolastico utilizza l'energia in modi diversi. Ad esempio, nei corridoi la potenza è prevalentemente assorbita dall'impianto di illuminazione, mentre nelle aule e negli uffici della segreteria l'energia è consumata sia dall'illuminazione che dai dispositivi elettronici, come computer, stampanti e monitor. Comprendere il valore della potenza istantanea assorbita da questi utilizzatori, è fondamentale per determinare la potenza media (P_m) erogata da ogni presa elettrica e stimare il coefficiente di utilizzazione, da considerare per valutare il consumo di tutti dispositivi elettronici presenti nell'ambiente (Lezione teorica n.3).

Strumenti di Misura

Per valutare la potenza assorbita in uno spazio scolastico, si possono utilizzare:

- **multimetri o tester:** questi strumenti elettronici sono capaci di misurare tensione, corrente e resistenza. I modelli più avanzati possono anche misurare capacità, frequenza e temperatura. Per misurare la potenza assorbita da un PC, ad esempio, si accende il multimetro, si seleziona la modalità di misura per la corrente alternata (AC), si posiziona la pinza amperometrica attorno al conduttore di fase del cavo di alimentazione del PC e si legge il valore della corrente sul display. La tensione è generalmente stabile (220 V per monofase e 380 V per trifase), ma può anche



essere misurata collegando i puntali del multimetro alla presa di corrente (consigliato solo a personale qualificato).

- **Smartplug (prese intelligenti):** Questi dispositivi si inseriscono tra una presa di corrente e l'apparecchio da monitorare; sono dotati di connettività wireless per il controllo e il monitoraggio tramite app. Misurano corrente e tensione e calcolano la potenza moltiplicando il valore di corrente e tensione misurati dalla presa stessa.
- **Luximetri:** strumenti utilizzati per valutare la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione. Per maggiori dettagli, si veda la lezione teorica n.3



Preparazione alla Misurazione dei Consumi Energetici

Prima di procedere alla misurazione dei consumi, è necessario identificare gli ambienti che, per dimensioni e tipologia di dispositivi presenti, sono simili tra loro. Questa attività preliminare ha l'obiettivo di ridurre i tempi necessari alla raccolta dei dati e a identificare ambienti simili (o tipo) che saranno utilizzati per costruire il diagramma di carico orario della scuola.



Preparazione alla Misurazione dei Consumi Energetici

Per raccogliere le informazioni utili alla valutazione del diagramma di carico giornaliero dell'istituto scolastico, si consiglia di predisporre delle schede contenenti:

- il nome identificativo della tipologia di ambiente.
- la superficie dell'ambiente, espressa in metri quadrati.
- il numero di aule tipo presenti nell'istituto.
- le ore giornaliere di utilizzo dell'ambiente.
- la tipologia e il numero di dispositivi elettronici presenti.

Analisi dei Consumi

Una volta caratterizzati gli ambienti tipici della scuola, si procede ad analizzare il consumo energetico di ciascun ambiente individuato, misurando la potenza assorbita dai dispositivi e dalle lampade di illuminazione presenti. A tale scopo, si può utilizzare un luximetro per stimare la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione e un multimetro o delle smartplug per misurare l'assorbimento dei dispositivi.

Sulla base dei dati raccolti, si valutano i coefficienti di utilizzazione e di contemporaneità e si stima la potenza assorbita nell'ambiente durante un'ora di attività.



Considerando le ore giornaliere di utilizzo di ciascun ambiente, si procede alla valutazione del diagramma di carico dell'istituto scolastico e a una eventuale correzione dello stesso, secondo le modalità presentate nella lezione teorica n.3

Raccolta dei Dati

Un fac-simile di foglio per la raccolta delle informazioni necessarie a valutare i consumi degli ambienti scolastici è riportato nella successiva pagina.

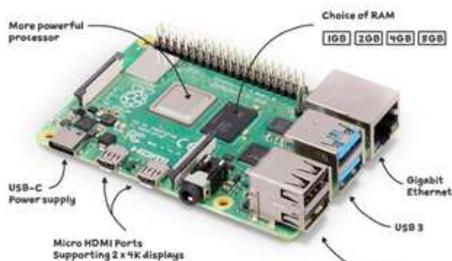
Valutazione della potenza assorbita negli ambienti didattici				
Ambiente				
Nome:			Superficie (m ²):	
Numero di ambienti di questa tipologia nella scuola:		Ore giornaliere di utilizzo dell'ambiente:		
Illuminazione				
Tipologia di lampade		Illuminamento sulla superficie considerata (lux)		Efficienza luminosa (lm/W)
Impianto elettrico				
Tipologia presa	Quantità	Corrente nominale (A)	cos(φ) considerato	numero prese attive in contemporanea
Monofase (M20)		20	0,95 + 0,99	
Monofase (M16)		16	0,95 + 0,99	
T trifase (T 30)			0,7 + 0,85	
T trifase (T 32)			0,7 + 0,85	
Dispositivi		Prese elettriche		
ID	Nome dispositivo	Potenza nominale (W)		Categoria presa (es. M20)
1				Corrente misurata sulla presa (A)
2				ID dispositivi connessi alla stessa presa
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				



Scheda attività 3 - Monitoraggio dei consumi elettrici tramite smart-plug.

a cura di Enrico Morandini

Le prese intelligenti o smart-plug sono dispositivi che si inseriscono tra l'apparecchio elettrico e la presa di corrente e rilevano il consumo di energia elettrica degli utilizzatori collegati. Queste prese sono dotate di connettività wireless, funzionalità di controllo remoto (accensione/spegnimento) e capacità di monitorare le principali grandezze elettriche, come tensione, corrente, potenza attiva ed energia consumata. Grazie a specifici protocolli di comunicazione, le smart-plug possono inviare le misurazioni in tempo reale ad applicazioni proprietarie o salvarle in database utilizzando software dedicati, come il software open source OpenHAB, che consente di gestire e visualizzare i dati in modo integrato. Di seguito sono riportati i tutorial utili per configurare un sistema di monitoraggio dei consumi elettrici, composto da smart-plug e un computer SBC (Single Board Computer), utilizzato per trasferire le misurazioni dalle prese intelligenti al software OpenHAB.





Il computer SBC opera come server, per ospitare e gestire i software necessari al monitoraggio e alla gestione delle smart-plug. Nel caso specifico, questi software sono:

1. **OpenHAB**, che serve a monitorare e gestire le smart-plug.
2. **InfluxDB**, utilizzato per il salvataggio e l'archiviazione dei dati.
3. **Grafana**, utilizzato per la visualizzazione e l'analisi dei dati raccolti.

L'accesso alle funzionalità del sistema avviene tramite una rete LAN e per il salvataggio dei dati è necessario disporre di una scheda MicroSD adeguata.

GUIDA ALLA CONFIGURAZIONE HARDWARE E SOFTWARE

Come formattare la scheda SD usando **SD Card Formatter**

<https://www.youtube.com/watch?v=FdR4jMFlyNw>

1. Come installare **OpenHABian** sulla scheda SD e successivamente sul computer SBC.
2. Download delle immagini ufficiali di **OpenHABian** per **computer SBC**

<https://www.youtube.com/watch?v=4Fy0u7uOsh8>
<https://github.com/openhab/openhabian/releases>

Installazione del sistema operativo sul **computer SBC**

<https://www.youtube.com/watch?v=-Vb9nK3REzQ>

Configurazione agevolata dei container software tramite **IoTStack**

<https://learnembeddedsystems.co.uk/easy-raspberry-pi-iot-server>
https://www.youtube.com/watch?v=_DO2wHI6JWQ

Come integrare **OpenHAB** in **Grafana**

https://www.youtube.com/watch?v=n7-d5TcQq_4



GUIDA ALLA CONFIGURAZIONE HARDWARE E SOFTWARE

Come integrare **OpenHAB**, **InfluxDB** e **Grafana** tra loro

<https://smarthomeblog.net/openhab-persistence-grafana-dashboard/>

Configurazione delle prese **Z-Wave** con **OpenHAB**

<https://www.youtube.com/watch?v=R2T5Mg3RLq0>

Configurazione delle pinze amperometriche **Z-Wave** con OpenHAB

https://www.openhab.org/addons/bindings/zwave/thing.html?manufacturer=aeon&file=zw095_0_0.html

Seguendo i tutorial elencati, sarà possibile configurare un sistema integrato per monitorare, archiviare e analizzare i consumi energetici utilizzando le smart-plug e il computer SBC. Una volta completata la configurazione dell'hardware e dei software indicati, OpenHAB permetterà di visualizzare in tempo reale lo stato e le misurazioni rilevate dalle prese Smart-plug.





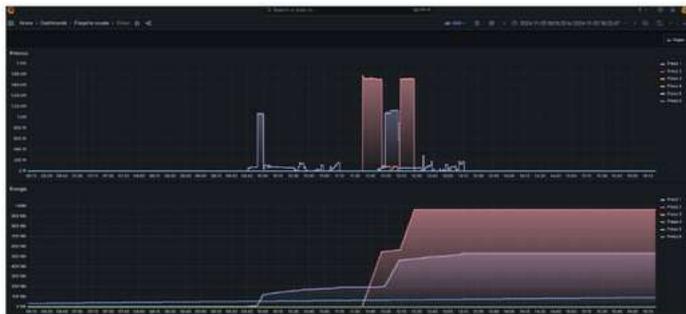
Questa dashboard è stata sviluppata utilizzando la modalità HABpanel di OpenHAB. Per la creazione di interfacce simili, è possibile seguire il tutorial disponibile al seguente link:

Configurazione di una dashboard **HABpanel**:

<https://smarthomeblog.net/openhab-persistence-grafana-dashboard/>

Attraverso l'utilizzo combinato di OpenHAB, InfluxDB e Grafana, si può visualizzare in tempo reale i dati di misurazione delle Smart-Plug con grafici personalizzabili, come quelli mostrati di seguito:





Queste dashboard sono state sviluppate utilizzando il software Grafana, che mostra i dati prelevati dal database InfluxDB; quest'ultimo archivia le misure provenienti dalle Smart-plug, trasferite tramite il software OpenHAB. Per approfondire la creazione di dashboard all'interno di Grafana, si rimanda ai seguenti link:

RISORSE UTILI:

Canale YouTube ufficiale di **Grafana**:

<https://www.youtube.com/@Grafana>

Cos'è una dashboard **Grafana** e come crearne una:

<https://www.youtube.com/watch?v=vTilkdDwT-0&t=17s>

Creazione di grafici a torta in **Grafana**:

https://www.youtube.com/watch?v=A_IDhM9w4_g

Time series in **Grafana**:

<https://www.youtube.com/watch?v=RKtW87cPxsw>



Tabelle in **Grafana**:

<https://www.youtube.com/watch?v=PCY7O8EJeJY>

Ringraziamenti:

Si ringraziano gli utenti di YouTube che hanno realizzato i video tutorial linkati, il cui contenuto è stato fondamentale per la creazione di questa scheda. Un particolare ringraziamento va inoltre al collega Paolo Serafini per il contributo nella realizzazione delle Dashboard Grafana e della Dashboard HABPanel su OpenHAB.



Scheda attività 4 - Applicativi RSE per la condivisione energetica.

A cura di Paolo Serafini.

A supporto delle lezioni teoriche sono stati sviluppati due applicativi da utilizzare durante le esercitazioni in classe. Le interfacce web sono progettate con l'obiettivo di rendere l'apprendimento della teoria più coinvolgente e stimolante. Lo sviluppo delle applicazioni si è basato sul framework open-source **Streamlit**, che utilizza il linguaggio di programmazione Python per creare soluzioni web dinamiche. Questi applicativi sono stati utilizzati durante le attività didattiche svolte presso l'Istituto di Istruzione Superiore Evangelista Torricelli di Milano.

Installazione di Streamlit.

Per l'installazione di **Streamlit**, si consiglia di consultare la documentazione ufficiale disponibile alla pagina:

<https://docs.streamlit.io/get-started/installation>

Per dettagli sul codice sorgente, si può fare riferimento alla sezione scuole del portale web CERpedia. Inoltre, per specifiche informazioni o supporto, si può compilare l'apposito modulo di contatto presente sul sito.

Primo applicativo web: simulazione della producibilità di un fotovoltaico.

La prima interfaccia web, denominata "**Home**", è stata sviluppata per aiutare gli studenti a comprendere quali grandezze influenzano direttamente la producibilità di un impianto fotovoltaico. L'applicativo elabora il profilo di produzione basandosi su quattro parametri di progetto:



- **Il comune di installazione dell'impianto**, utilizzato per determinare le coordinate geografiche di riferimento.
- Il **tilt**, ossia l'inclinazione dei pannelli solari installati (Lezione 4).
- L'**azimut**, ovvero l'orientamento dei pannelli solari (Lezione 4).
- **La potenza totale di picco**, espressa in watt (W), dei pannelli che si intendono installare.

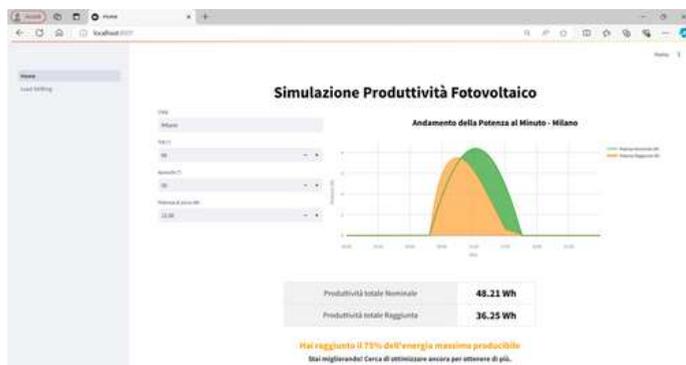
Di seguito è riportato un esempio di simulazione effettuata con l'applicativo.

Città	Milano
Tilt (°)	90 - +
Azimuth (°)	50 - +
Potenza di picco (W)	12.00 - +

Definiti i parametri di progetto, il software mostra:

- la produzione fotovoltaica per il tilt e l'azimut impostato (profilo giallo);
- la produzione fotovoltaica con tilt uguale 0° e azimut pari a 40° (profilo verde);

I grafici sono prodotti con intervallo temporale di un minuto per permettere di apprezzare le differenze tra i due profili al variare dei parametri di progetto. Tra gli output prodotti, l'interfaccia rende disponibile anche il valore numerico dell'energia giornaliera prodotta e della differenza percentuale tra il profilo verde e quello giallo.



Questo approccio permette di analizzare in modo dettagliato l'impatto dei parametri di progetto sulla produttività dell'impianto fotovoltaico.

Secondo applicativo web: gestione ottimizzata del prelievo di un insieme di utenze domestiche.

Il secondo applicativo educa gli studenti a gestire attivamente i loro consumi energetici per ridurre la spesa grazie all'autoconsumo e la condivisione dell'energia rinnovabile. In particolare, suggerisce gli orari ottimali di utilizzo di due tipologie di elettrodomestici (lavatrici e lavastoviglie), per massimizzare lo sfruttamento dell'energia fotovoltaica prodotta da un impianto a servizio di una configurazione d'autoconsumo collettivo o di una comunità energetica rinnovabile. Per svolgere il processo di ottimizzazione sono richiesti i parametri riportati nella figura a destra.

Città
Milano

Tilt (°)
60 - +

Azimuth (°)
0 - +

Potenza di picco (W)
3000 - +

Utenze Prosumer
0 - +

Utenze Consumer
10 - +

Numero di lavatrici
10 - +

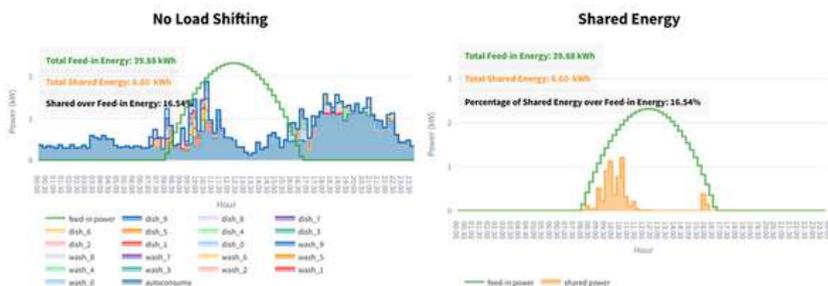
Numero di lavastoviglie
10 - +



I grafici sottostanti mostrano il calcolo dell'energia condivisa generata dai prelievi degli elettrodomestici prima dell'ottimizzazione degli orari di utilizzo. La figura a sinistra evidenzia i profili di consumo dei singoli elettrodomestici che contribuiscono alla condivisione energetica, mentre la figura a destra mostra l'energia complessivamente condivisa.

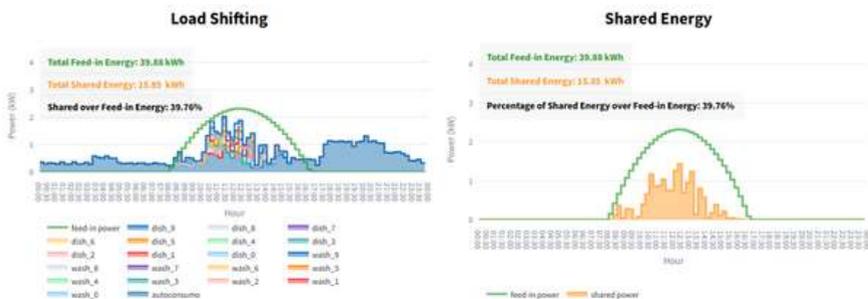


In entrambe le figure sono riportati il totale dell'energia immessa in rete, l'energia condivisa e le rispettive percentuali. L'applicazione web consente, inoltre, di simulare utenti prosumer (produttori e consumatori). In questo caso, il grafico include anche il profilo di prelievo di queste utenze, utile per analizzare il livello di autoconsumo.





Premendo il pulsante **Ottimizza** , sono visualizzati i profili di consumo aggiornati degli elettrodomestici, da cui è possibile ricavare l'orario di attivazione ottimo, che permette di ottenere il massimo valore di energia condivisa e il relativo incentivo. Le figure sottostanti illustrano i risultati del processo di ottimizzazione nell'esempio analizzato.



L'applicativo web fornisce i valori numerici delle grandezze energetiche e mostra l'incremento percentuale dell'energia condivisa ottenuto, se il piano ottimizzato di attivazione degli elettrodomestici è effettivamente seguito dagli utenti.

