



Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale
(sede di Fermo)

**UN APPROCCIO BASATO SULLA PROGRAMMAZIONE
MATEMATICA PER IL PROBLEMA DEL POSIZIONAMENTO
DI PANNELLI FOTOVOLTAICI**

**A MATHEMATICAL PROGRAMMING BASED APPROACH
FOR THE PHOTOVOLTAIC PANEL POSITION PROBLEM**

Relatrice:
Prof.ssa Ornella Pisacane

Tesi di Laurea di:
Francesca Cocca
1080351

A.A. 2023 / 2024

*A mamma e papà,
grazie per avermi fornito le ali per volare e le radici per rimanere salda.*

Prima di avviare la trattazione, desidero dedicare alcune righe a coloro che mi hanno sostenuto in questo percorso di crescita personale e professionale.

In primo luogo, un ringraziamento speciale va alla professoressa Pisacane. La sua immensa pazienza, i preziosi consigli e le profonde conoscenze condivise sono stati fondamentali per il successo di questo percorso. Grazie di cuore per avermi trasmesso non solo conoscenze accademiche, ma anche i valori della perseveranza e della precisione nel lavoro. Lei è stata per me una mentore straordinaria e una fonte continua di ispirazione.

Mamma e papà, vi sono immensamente grata per essere sempre al mio fianco. Il vostro immenso amore e il vostro supporto hanno rappresentato per me una fonte inesauribile di forza e motivazione. Con i vostri continui incoraggiamenti, mi avete aiutato a costruire ali robuste e resistenti, rendendo le vette che un tempo sembravano irraggiungibili, ora superabili. Grazie a voi, ho trovato la forza e il coraggio per affrontare le sfide e raggiungere altezze che da sola non avrei mai potuto raggiungere. Questo traguardo è principalmente merito vostro.

Un ringraziamento di cuore va anche a Filippo e Giulia, i miei fratelli, custodi della mia vera essenza. Avete condiviso con me ogni esperienza, dalle gioie più grandi alle preoccupazioni più profonde, e nei momenti difficili siete stati un sostegno inestimabile. La vostra discreta presenza e i vostri sorrisi sinceri hanno rappresentato per me un rifugio sicuro e un costante punto di riferimento.

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine ai miei nonni, nonna Licia, nonna Maria e nonno Antonio. Il vostro amore incondizionato ha arricchito la mia vita in modi che non potrò mai dimenticare. Grazie per i giorni di spensieratezza trascorsi insieme, per le risate e i momenti di gioia che hanno reso la mia infanzia così speciale. I vostri preziosi consigli mi hanno guidato e mi hanno mostrato la bellezza dei piccoli gesti quotidiani, insegnandomi a trovare la felicità nelle cose semplici.

Vorrei anche dedicare un pensiero affettuoso a nonno Filippo, che purtroppo non ho avuto l'onore di conoscere personalmente. Tuttavia, sono certa che ogni giorno mi sia stato accanto, vegliando su di me con amore e protezione. La sua presenza, sebbene invisibile, ha rappresentato per me una fonte di forza e ispirazione.

Desidero ringraziare i miei zii e i miei cugini per essere stati sempre presenti in ogni mio traguardo e per avermi sempre incoraggiata con parole di affetto. La vostra costante presenza e il vostro sostegno sono stati un faro nella mia vita, illuminando il mio percorso con saggezza e amore.

A Marco, che fin dall'inizio è stato al mio fianco in questo percorso, mostrandomi costantemente il suo sostegno quando la demotivazione si faceva sentire e regalandomi momenti di gioia nei periodi più difficili. La sua fiducia in me e il suo incoraggiamento costante mi hanno spinto a mettere in mostra le mie qualità migliori e a superare le sfide con determinazione.

Alle mie amiche di sempre, Maddalena e Ilaria, che sono state al mio fianco in ogni avventura e disavventura della vita, desidero dedicare un sentito ringraziamento. Con voi condivido un'amicizia sincera, libera da condizioni, gelosie e invidie.

In ultimo, desidero esprimere un sentito ringraziamento alle mie colleghe del servizio civile e ai ragazzi del centro diurno "Madonna di Lourdes". Nonostante il breve periodo trascorso insieme, avete reso ogni momento speciale e avete contribuito a creare legami che spero siano duraturi nel tempo. Grazie per le gioiose esperienze condivise e per la vostra preziosa amicizia, che ha reso questi giorni così memorabili e significativi per me.

Sommario

Abstract	6
Capitolo 1- Introduzione	7
1.1 Il contesto	7
1.2 Aspetti teorici	8
1.2.1 Componenti principali di un impianto fotovoltaico.....	8
1.2.2 L'effetto fotovoltaico.....	9
1.2.3 La radiazione solare.....	10
1.2.4 Radiazione globale su piano inclinato	12
1.2.5 Posizionamento pannelli solari	13
1.2.6 Diffusione del fotovoltaico in Italia	14
1.2.7 Incentivi e agevolazioni	15
1.2.8 Fotovoltaico nello spazio: il futuro luminoso dei pannelli.....	16
1.3 Obiettivi	17
1.4 Struttura della tesi	18
Capitolo 2- Definizioni	19
2.1 Introduzione	19
2.2 Il rendimento.....	19
2.3 L'ottimo energetico	20
Capitolo 3- Modello matematico	22
3.1 Introduzione	22
3.2 Formulazione matematica	22
Capitolo 4- Implementazione, risultati e analisi	28
4.1 Introduzione	28
4.2 Il processo di validazione.....	28
4.3 Implementazione e risultati	30
4.4 L'analisi di sensitività	33
4.4.1 Variazione $Q_{minthermal}$	33
4.4.2 Variazione η_{hydro}	35
Capitolo 5- Conclusioni e discussione	37
Riferimenti bibliografici	39
Sitografia	40

Abstract

In questa tesi, si affronterà il problema della localizzazione di moduli fotovoltaici per minimizzare costi di generazione di un impianto fotovoltaico e costi aggiuntivi derivanti dalla natura variabile dell'energia solare. La produzione di energia solare è fluttuante a causa delle variazioni delle condizioni meteorologiche e dell'alternanza tra giorno e notte, richiedendo soluzioni efficaci per mantenere una produzione energetica costante e affidabile.

Questo lavoro di tesi si concentra sull'ottimizzazione dell'angolazione e del posizionamento dei pannelli solari come strategia chiave per affrontare queste sfide. A tal proposito si considerano fattori come siti d'installazione, periodi di tempo e altre caratteristiche specifiche.

In particolare, si prende in considerazione un modello di ottimizzazione matematica già proposto in letteratura, si analizzano le soluzioni ottenute su scenari opportunamente generati. Infine, si propone un'analisi di sensitività su due parametri critici per valutarne l'effetto sui risultati ottenuti dal modello di ottimizzazione.

I risultati della tesi dimostrano che un posizionamento ottimale dei pannelli solari può aumentare significativamente l'efficienza della produzione di energia, riducendo al contempo la necessità di strutture di accumulo costose. Questo approccio non solo contribuisce a una maggiore sostenibilità economica degli impianti fotovoltaici, ma migliora anche la stabilità e l'affidabilità del servizio elettrico.

Le conclusioni fornite possono essere utilizzate per migliorare l'efficienza e la sostenibilità degli impianti fotovoltaici, offrendo un contributo significativo al settore delle energie rinnovabili.

Capitolo 1- Introduzione

1.1 Il contesto

Al giorno d'oggi, l'energia solare rappresenta una delle risorse più incoraggianti per far fronte a questa difficoltà. La crescente preoccupazione per i cambiamenti climatici e la necessità di ridurre le emissioni di gas serra hanno reso nota la necessità di adottare soluzioni energetiche sostenibili e a basso impatto ambientale.

L'energia solare si distingue per la sua pulizia e rinnovabilità: utilizzando la luce del sole, siamo in grado di generare elettricità senza produrre emissioni dannose per l'ambiente. Questo non solo contribuisce a ridurre l'inquinamento atmosferico, ma ci avvicina anche all'obiettivo di una futura società a basse emissioni di carbonio.

Questo tipo di energia si basa sul concetto di flusso, ciò significa che il costante uso non ne riduce la quantità. È quindi, oltre che una fonte energetica pulita capace di fornire una reale soluzione alla questione dell'approvvigionamento di energia mondiale, anche inesauribile.

L'avvento delle fonti rinnovabili ha dato vita a innumerevoli cambiamenti anche di tipo economico. Ha, infatti introdotto una nuova figura che si staglia sempre più prepotentemente: il prosumer. Il concetto di "prosumer" nasce dalla fusione delle parole "produttore" e "consumatore", indicando un attore che partecipa attivamente a tutte le fasi del processo produttivo energetico anziché limitarsi a consumare passivamente energia. Nel contesto dell'energia solare, il prosumer non solo utilizza l'energia generata, ma può anche contribuire direttamente alla sua produzione tramite l'installazione di pannelli fotovoltaici o altri sistemi di cattura e conversione. Questo approccio non solo favorisce il consumo sostenibile, ma può anche promuovere l'indipendenza energetica dei singoli paesi.

1.2 Aspetti teorici

1.2.1 Componenti principali di un impianto fotovoltaico



FIGURA 1

I componenti fondamentali di un impianto fotovoltaico sono essenzialmente tre (figura1):

1. Pannelli Fotovoltaici.

I componenti essenziali di un impianto fotovoltaico sono i *pannelli solari*, composti da celle fotovoltaiche collegate tramite legami metallici per creare circuiti sia in serie che in parallelo. Di solito, queste celle sono realizzate principalmente in silicio cristallino e hanno il compito di convertire la luce solare direttamente in elettricità tramite l'effetto fotovoltaico. Per proteggere il sistema, viene utilizzato un vetro di copertura speciale, trattato appositamente per massimizzare l'efficienza energetica. I pannelli solari utilizzano la luce solare piuttosto che il calore dell'aria, il che significa che non dipendono da un clima particolarmente caldo per funzionare efficacemente; anzi, la loro efficienza è massima quando la temperatura delle celle rimane al di sotto dei 25°C.

2. Inverter

Nel processo, gli inverter giocano un ruolo cruciale trasformando la corrente continua (CC) generata dai pannelli solari in corrente alternata (CA), che è il tipo di energia elettrica comunemente utilizzato da molti apparecchi elettrici domestici. Gli inverter per i pannelli fotovoltaici, simili in alcuni aspetti a un quadro elettrico, costituiscono circuiti elettrici complessi racchiusi in involucri metallici.

La loro posizione può variare, con possibilità di installazione sia vicino ai pannelli solari che nel sottotetto dell'edificio, con opzioni di montaggio interno o esterno. Un aspetto critico da considerare è la dimensione degli inverter, che deve essere adatta alla potenza massima del sistema fotovoltaico e al tipo di alimentazione elettrica utilizzata.

3. Batterie

Le batterie costituiscono un elemento chiave di un impianto solare, consentendo di conseguire l'indipendenza energetica e di ridurre significativamente i costi delle bollette. L'integrazione di batterie all'interno di un sistema fotovoltaico non solo offre

una maggiore flessibilità operativa, ma consente anche una gestione più efficiente dell'energia prodotta. Questo approccio contribuisce a migliorare la resilienza del sistema, consentendo di affrontare con maggiore efficacia sfide come l'intermittenza solare e garantendo un approvvigionamento energetico stabile anche in condizioni di scarsa luminosità solare. L'impiego delle batterie in un impianto solare rappresenta dunque un passo significativo verso l'ottenimento dell'indipendenza energetica e la riduzione dei costi associati alla bolletta energetica, oltre a promuovere un utilizzo più sostenibile delle risorse energetiche disponibili.

1.2.2 L'effetto fotovoltaico

L'effetto fotovoltaico è il principio fondamentale che consente la conversione dell'energia solare in energia elettrica utilizzabile, rappresentando una soluzione sostenibile per l'alimentazione di abitazioni e industrie. La sua scoperta risale al 1839, quando il fisico Alexandre Edmond Becquerel, durante esperimenti con elettrodi immersi in una soluzione conduttiva, osservò la generazione di una corrente elettrica quando esposti alla luce solare. Questo fenomeno, denominato "effetto fotovoltaico", deriva dalla combinazione della parola greca "photos" (luce) e "voltaico" (in onore di Alessandro Volta), descrivendo il processo mediante il quale le radiazioni solari trasferiscono energia quando interagiscono con materiali specifici.

Nel corso dei decenni successivi, diversi scienziati hanno contribuito alla comprensione e allo sviluppo di questo fenomeno. Nel 1876, gli scienziati Smith, Adams ed Evans condussero studi sull'effetto della luce sul selenio, osservando che illuminandolo emetteva una leggera energia.

Questa scoperta portò nel 1879 a Charles Fritts a creare la prima cella fotovoltaica con selenio e oro, sebbene fosse poco efficiente e costosa. Successivamente, Albert Einstein avanzò ulteriormente la comprensione dell'effetto fotovoltaico nel 1909, durante la sua tesi sull'effetto fotoelettrico, definendo la luce come un flusso di "pacchetti di energia". Il vero salto tecnologico avvenne nel 1954, quando i Laboratori Bell svilupparono la prima cella solare al silicio, più efficiente e pratica, inaugurando una nuova era nella tecnologia fotovoltaica. La commercializzazione della tecnologia iniziò negli Stati Uniti nel 1963, accelerata dalla crisi energetica degli anni '70.

In Italia, il primo impianto fotovoltaico da 1 kW fu installato nel 1979 al Passo della Mandriola. A partire dagli anni '90, l'Italia è stata leader nell'installazione di impianti fotovoltaici, contribuendo significativamente alla diffusione e all'adozione di questa importante fonte di energia rinnovabile.

Per spiegare l'effetto fotovoltaico, possiamo fare riferimento alla teoria quantistica di Max Planck, la quale suggerisce che la luce è costituita da particelle chiamate fotoni, che si muovono alla velocità della luce.

Secondo questa teoria, un fascio di luce trasporta una quantità di energia determinata da:

$$E=hf$$

dove E indica l'energia, h la costante di Planck e f la frequenza.

Quando un fascio luminoso colpisce una superficie metallica, i suoi fotoni interagiscono con gli atomi del materiale. Durante questo processo, alcuni fotoni trasferiscono la loro energia cinetica agli elettroni degli atomi, causandone l'eccitazione. Gli elettroni eccitati acquisiscono un surplus di energia e possono liberarsi dall'orbita del loro atomo di origine, migrando verso un altro atomo. Questo movimento degli elettroni tra gli atomi crea un flusso di cariche elettriche, generando una corrente elettrica. Questo fenomeno si verifica quando gli elettroni transiteranno dalla banda di valenza, lo strato più esterno degli atomi in cui gli elettroni sono strettamente legati al nucleo atomico, alla banda di conduzione, uno strato più esterno dove gli elettroni non sono più vincolati al nucleo atomico e possono muoversi liberamente tra gli atomi.

In semiconduttori come il silicio, la percentuale di energia solare convertita in energia elettrica non supera mai il 44%; la maggior parte dell'energia solare assorbita viene dissipata sotto forma di calore.

1.2.3 La radiazione solare

La radiazione solare rappresenta l'energia radiante emessa dal Sole, generata dalle reazioni di fusione nucleare che avvengono nel suo nucleo. Queste reazioni producono enormi quantità di energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. La radiazione solare è composta da una varietà di componenti, ognuna con caratteristiche specifiche e rilevanza nel contesto dell'energia solare:

- La **radiazione diretta** rappresenta l'energia solare che giunge direttamente dalla superficie del Sole alla Terra; senza essere deviata o attenuata da ostacoli atmosferici, come nuvole o vapore acqueo.
- La **radiazione diffusa** si riferisce all'energia solare che raggiunge la superficie terrestre attraverso il vapore acqueo o le particelle presenti nell'atmosfera. Questi elementi causano la dispersione della radiazione solare in diverse direzioni, creando un pattern disordinato di piccoli raggi luminosi. La radiazione diffusa è

generalmente meno intensa rispetto a quella diretta, poiché parte dell'energia solare viene dispersa e non arriva direttamente dalla superficie del Sole.

- La **radiazione riflessa** rappresenta l'energia solare che viene rimandata da elementi circostanti verso il punto di osservazione. Questa quantità può variare in base al colore e al tipo di materiale degli elementi che riflettono la luce solare. Per misurare la radiazione riflessa, viene calcolato il coefficiente di albedo per ciascun materiale, il quale fornisce un'indicazione della percentuale di luce solare riflessa dalla superficie. (Tabella1)

Tipo di superficie	Albedo
Asfalto	0,05
Superfici acquose	0,07
Asfalto invecchiato	0,10
Tetto scuro	0,13
Prato verde	0,25
Neve	0,6
Prato secco	0,20
Albedo medio terrestre	0,3

TABELLA 1

(fonte dati: <https://www.isac.cnr.it/sites/default/files/2020-03/Albedo.pdf>)

Di conseguenza, la somma totale della radiazione solare incidente risulta essere:

$$R_t = R_d + R_{diff} + R_{rif}$$

La densità di potenza o **irraggiamento**, espressa in kW/m², rappresenta la quantità di energia solare che incide su una superficie unitaria nell'unità di tempo.

In altre parole, misura la potenza solare ricevuta per unità di area durante un dato intervallo temporale;

- al di fuori dell'atmosfera terrestre, la potenza solare incidente su una superficie unitaria, posta perpendicolarmente ai raggi solari, si attesta a circa 1360 W/m². Tale valore può variare entro il $\pm 3\%$ a causa dell'ellitticità dell'orbita terrestre. Questo valore è noto come costante solare, rappresentando la quantità di energia solare che arriva al nostro pianeta in condizioni ideali.
- Sulla superficie terrestre, al livello del mare, in condizioni meteorologiche ideali e con il sole allo zenit a mezzogiorno, la densità di potenza solare si attesta a circa 1000 W/m². Questo valore rappresenta l'**irraggiamento standard** che si può aspettare in tali circostanze.

L'irraggiamento standard di 1000 W/m² è quello a cui è riferita la **potenza nominale** dell'impianto fotovoltaico.

In Italia la radiazione media annuale varia:

- dai 3.6 kWh/m² /giorno della Pianura Padana
- ai 4.7 kWh/m² /giorno del centro sud
- ai 5.4 kWh/m² /giorno della Sicilia

1.2.4 Radiazione globale su piano inclinato

La radiazione solare su un piano inclinato è influenzata da diversi fattori, tra i quali l'angolo di inclinazione del piano stesso, la latitudine geografica e la stagione dell'anno. Quando il sole colpisce il piano inclinato con un angolo diverso da quello perpendicolare, la quantità di energia solare ricevuta varia di conseguenza. Durante il corso della giornata e delle stagioni, l'angolo di incidenza del sole cambia, influenzando così l'intensità e la distribuzione della radiazione solare sul piano inclinato. Questa variazione è cruciale per la progettazione e l'ottimizzazione degli impianti fotovoltaici e solari termici, poiché un corretto orientamento e inclinazione del piano possono massimizzare l'efficienza energetica del sistema.

La radiazione globale su un piano inclinato può essere sintetizzata come segue:

$$G_t = \frac{G_{bo}}{\cos\theta_z} \cos\theta + G_{dh} \frac{1+\cos\beta}{2} + G_o\rho \frac{1-\cos\beta}{2},$$

dove:

- G_t = radiazione globale su piano inclinato, misurata in Wh/m^2
- G_o = radiazione globale su piano orizzontale, misurata in Wh/m^2
- G_{bo} = radiazione diretta sul piano orizzontale, misurata in Wh/m^2
- G_{dh} = radiazione diffusa sul piano orizzontale, misurata in Wh/m^2
- θ = angolo di incidenza tra sole e piano inclinato, misurato in °
- θ_z = angolo zenitale tra sole e zenit, misurato in °
- β = angolo di inclinazione del piano, misurato in °
- ρ = albedo o coefficiente di riflessione

Attraverso quest'ultima equazione, si evidenzia come la radiazione solare sia strettamente correlata agli angoli di installazione, tant'è che l'angolo θ varia in funzione dell'azimut (angolo tra la direzione a cui il pannello solare è orientato e la direzione nord o sud) e del tilt (angolo di inclinazione del pannello rispetto al piano orizzontale); ovvero $\theta = f(\alpha, \beta, \vartheta, \mu)$.

1.2.5 Posizionamento pannelli solari

Nell'individuare la posizione e la disposizione ottimali dei moduli fotovoltaici, è essenziale considerare e valutare vari fattori che influenzano l'irraggiamento solare. Questo è cruciale per massimizzare la produzione energetica annua o soddisfare le esigenze di picco durante determinati momenti della giornata. L'entità della radiazione solare incidente su una superficie è principalmente influenzata dalla latitudine e dalla longitudine del luogo di installazione dei moduli.

Pertanto, la scelta della localizzazione sarà fondamentale per ottenere i migliori risultati in termini di produzione energetica.

- La **latitudine** di un luogo è l'angolo formato dalla linea che congiunge il centro della Terra con il punto di interesse e il piano dell'Equatore.
- La **longitudine** è l'angolo che il piano meridiano del luogo forma con il piano meridiano di riferimento, che è il meridiano di Greenwich.

Altro aspetto che caratterizza la posizione del Sole nel cielo è la declinazione solare, dipendente dal giorno dell'anno.

- La **declinazione** è l'angolo formato dalla retta Sole-Terra con il piano dell'Equatore.

A causa della rotazione della Terra e dell'inclinazione del suo asse, lo strato atmosferico attraversato dalla radiazione solare varia in spessore durante il corso del giorno e durante le diverse stagioni dell'anno.

Ad esempio, nei mesi estivi, l'emisfero settentrionale è inclinato verso il Sole, mentre durante i mesi invernali è inclinato nella direzione opposta. Per un osservatore solidale con la Terra, il sole segue un percorso apparente da est a ovest lungo una traiettoria curva. Tuttavia, per definire con precisione l'angolo dei raggi solari rispetto alla superficie del modulo fotovoltaico, è necessario considerare attentamente due variabili (Figura2):

- **Azimet**= l'angolo tra la direzione a cui il pannello solare è orientato e la direzione nord o sud. Un azimuth di zero gradi indica che il pannello è orientato direttamente verso il nord o il sud, mentre un azimuth di 180 gradi indica che è orientato esattamente verso est o ovest.
- **Tilt**= l'angolo del generatore fotovoltaico (la direzione verticale dal basso all'alto), ovvero l'angolo di inclinazione dei pannelli rispetto al piano orizzontale.

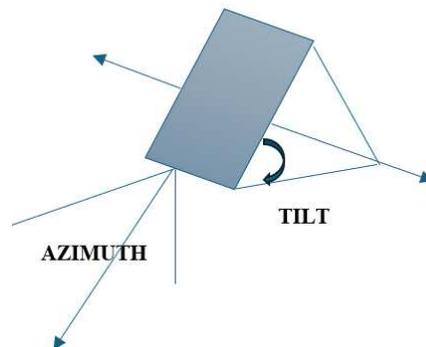


FIGURA 2

1.2.6 Diffusione del fotovoltaico in Italia

All'inizio, nel lontano 1979, fu piantato il seme del fotovoltaico nel suolo italiano con l'installazione del primo impianto al Passo della Mandriola, incastonato tra le maestose vette degli Appennini, con una modesta potenza di 1 kW.

Da allora, il nostro paese ha compiuto notevoli progressi, con spinte sempre più vigorose dagli anni '80 e un'impressionante accelerazione negli anni '90, quando i pannelli fotovoltaici hanno iniziato a diffondersi nelle case dei cittadini italiani.

In quegli anni, l'Italia ha abbracciato con slancio la rivoluzione fotovoltaica, con investimenti massicci per lo sviluppo di questo settore emergente.

È in questo contesto che, a partire dai primi anni del nuovo millennio e soprattutto con l'entrata in vigore del Conto Energia, il programma europeo finalizzato ad incentivare la produzione di energia da impianti fotovoltaici collegati alla rete, abbiamo assistito a un'ulteriore accelerazione del settore.

Numerosi fattori hanno contribuito a questo successo, tra cui una crescente sensibilità verso le questioni ambientali e i cambiamenti climatici, tematiche che hanno conquistato il cuore dell'Europa e dell'Italia, e i conseguenti incentivi fiscali e detrazioni per il fotovoltaico offerto nel corso degli anni.

Il trend positivo continua a manifestarsi, con oltre un milione di impianti fotovoltaici installati entro la fine del 2021, registrando un aumento complessivo della potenza (+4%) rispetto all'anno precedente.

Oggi, l'energia solare in Italia assume un ruolo cruciale nel promuovere e accelerare la transizione energetica, in linea con gli obiettivi stabiliti dall'Unione Europea, che include la decarbonizzazione e la riduzione del fabbisogno di energia primaria europea del 32,5% entro il 2030.

A partire dal 31 dicembre 2023, in Italia erano attivi ben 1.594.974 impianti fotovoltaici, con una capacità totale installata pari a 30,28 gigawatt (GW). Di questa

capacità complessiva, il 28% (equivalente a 8,56 GW) è attribuibile al settore residenziale, che comprende impianti con una potenza non superiore a 20 kilowatt (kW).

Il settore commerciale e industriale rappresenta il 50% della capacità totale, con impianti superiori a 20 kW ed inferiori a 1 megawatt (MW). Il rimanente 22% è rappresentato dal comparto utility-scale, costituito da impianti con una potenza superiore a 1 MW. (Figura5)

Questi dati evidenziano il ruolo significativo che il settore fotovoltaico sta assumendo nel panorama energetico italiano, con una distribuzione equilibrata tra diversi segmenti di mercato.

Tale diffusione non solo contribuisce alla riduzione delle emissioni di gas serra e alla lotta contro il cambiamento climatico, ma rappresenta anche una grande opportunità per promuovere la crescita economica e l'indipendenza energetica del Paese.

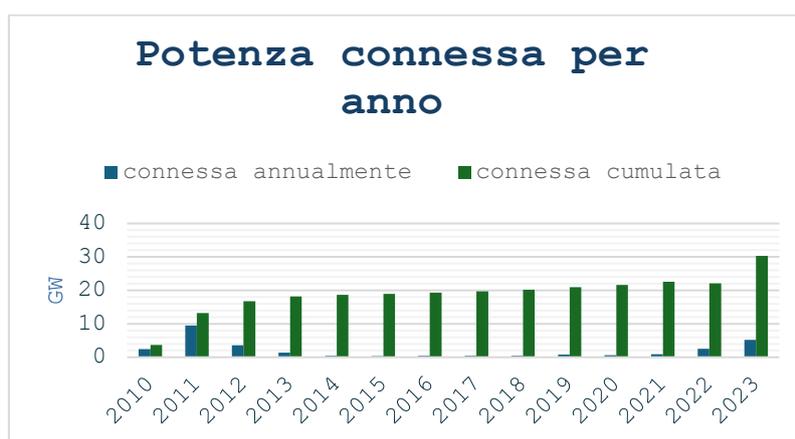


FIGURA 3(FONTE DATI: GSE_2023_RAPPORTO STATISTICO_SOLARE FOTOVOLTAICO)

1.2.7 Incentivi e agevolazioni

Si tratta di agevolazioni riconosciute dal governo italiano a coloro (sia persone fisiche che giuridiche, enti non commerciali, istituzioni pubbliche o condomini) che optano per l'installazione di un sistema fotovoltaico per la generazione di energia elettrica.

Le agevolazioni destinate al settore fotovoltaico sono disciplinate da normative specifiche e decreti governativi.

Il programma nazionale volto a promuovere la produzione di energia elettrica attraverso impianti fotovoltaici, noto come "Conto

Energia", è stato istituito per la prima volta nel settembre 2005 (Primo Conto Energia - DM 28/07/2005).

Queste agevolazioni sono state interrotte il 6 luglio 2013, quando è stato raggiunto il tetto massimo di spesa stimato di 6,7 miliardi di euro.

Attualmente, sebbene il programma di incentivi statali sia giunto a termine, investire nell'energia solare attraverso l'installazione di pannelli fotovoltaici rimane un'opportunità conveniente. Le più recenti tecnologie di pannelli solari offrono prestazioni sempre più elevate, mentre i loro costi sono progressivamente diminuiti nel corso degli anni.

Inoltre, fino al 31 dicembre 2024, è ancora possibile beneficiare di una detrazione fiscale del 50%.

In determinati casi, soggetti a specifici requisiti di reddito e uso, è persino possibile accedere al superbonus del 90%.

1.2.8 Fotovoltaico nello spazio: il futuro luminoso dei pannelli

L'Agencia internazionale dell'energia (IEA) ribadisce da tempo che l'energia solare sarà la prossima dominatrice nel settore elettrico, una predizione che il tempo sta confermando. Nel 2022, la produzione globale di energia fotovoltaica è aumentata del 26%, registrando il tasso di crescita più alto tra tutte le fonti rinnovabili. Inoltre, secondo le previsioni dell'organizzazione, il solare presto supererà l'eolico e l'idroelettrico per diventare la principale fonte energetica, e detronizzerà il carbone entro il 2027.

Questo boom dell'energia solare è reso possibile dalla facilità di installazione dei pannelli fotovoltaici, in contrasto con le turbine eoliche che richiedono altezze notevoli, e dalla disponibilità della fonte primaria, il Sole.

Tuttavia, nonostante i vantaggi, ci sono anche degli svantaggi: i parchi solari occupano molto spazio e sono soggetti alla posizione del Sole nel cielo. Inoltre, durante la notte, i giorni nuvolosi e l'inverno, la produzione di energia può essere ridotta o addirittura interrotta. Per risolvere questi problemi, è stata proposta un'idea innovativa: posizionare i pannelli solari nello spazio.

Il fotovoltaico nello spazio è un concetto intrigante e futuristico che rappresenta una possibile soluzione reale per garantire un approvvigionamento continuo di energia solare senza le limitazioni della terraferma.

Questa idea innovativa propone di posizionare pannelli solari direttamente in orbita intorno alla Terra, dove possono essere costantemente esposti alla luce solare, senza essere ostacolati da nuvole, condizioni atmosferiche o ciclo giorno-notte; in questo modo si riuscirebbe a produrre energia in modo continuo e affidabile.

Questa nuova frontiera tecnologica, nota come Space-Based Solar Power (SBSP), potrebbe sembrare tratta da un film di fantascienza, ma affonda le sue radici nel lontano 1958, quando le forze armate degli Stati Uniti impiantarono sei celle solari sul satellite Vanguard 1, aprendo la strada ad un'audace visione dell'energia solare nello spazio.

Recenti esperimenti e prototipi dimostrano la fattibilità delle centrali solari orbitali. A giugno, il California Institute of Technology (Caltech) ha annunciato con successo il trasferimento di energia solare dallo spazio alla Terra in modalità wireless attraverso il prototipo denominato Maple. Questo risultato pionieristico evidenzia il potenziale di questa tecnologia e ne dimostra la reale possibilità di implementazione.

Nonostante questi progressi, ci sono ancora numerosi ostacoli da superare prima che questa innovazione possa affermarsi pienamente. Le condizioni estreme dello spazio accelerano il degrado dei pannelli solari, aumentando l'impatto ambientale attraverso la necessità di frequenti sostituzioni. Inoltre, il trasferimento di energia tramite microonde solleva interrogativi sulla sicurezza e sull'innocuità, richiedendo ulteriori ricerche e valutazioni approfondite. Tuttavia, nonostante le sfide, il potenziale del SBSP nell'offrire un approvvigionamento continuo di energia solare, senza le limitazioni della terraferma, continua a ispirare la ricerca e lo sviluppo in questo campo innovativo. Con ulteriori progressi tecnologici e un impegno costante nella risoluzione dei problemi tecnici e ambientali, la visione di una rete di centrali solari nello spazio potrebbe diventare una realtà tangibile, aprendo nuove frontiere nell'utilizzo dell'energia solare per le future generazioni.

1.3 Obiettivi

L'energia solare, grazie ai suoi molteplici vantaggi ambientali ed economici, assume un ruolo sempre più significativo nel contesto energetico globale. Tuttavia, nonostante i suoi benefici, presenta delle limitazioni dovute alla natura fluttuante e variabile dell'irraggiamento solare.

Questa variabilità implica che l'energia solare da sola potrebbe non essere sufficiente per soddisfare completamente il fabbisogno energetico di un'area, poiché dipende da fattori come il ciclo giorno-notte, le condizioni meteorologiche e le stagioni.

La necessità di integrare l'approvvigionamento energetico solare con la rete elettrica nazionale diventa, quindi, essenziale per garantire un'offerta continua e affidabile di

energia elettrica. Tuttavia, per massimizzare l'efficienza e ridurre i costi associati all'utilizzo dell'energia solare, è fondamentale studiare attentamente il posizionamento ottimale dei pannelli fotovoltaici.

La mia tesi si concentra proprio sul problema del posizionamento strategico mediante lo studio di un modello di ottimizzazione matematica la cui funzione obiettivo, da minimizzare, rappresenta il costo totale. Nel proseguo, si farà riferimento al lavoro di Hartner et al. Il modello preso in considerazione, dopo uno studio della letteratura è stato implementato utilizzando il linguaggio di modellazione matematica AMPL (AMPL - Optimizing the World's Most Complex Tasks) e risolto utilizzando il solver ILOG CPLEX (versione 20.1). Questo modello è stato validato su un caso di studio di base e successivamente testato su scenari realistici e complessi.

1.4 Struttura della tesi

La ricerca nel campo dell'ottimizzazione matematica ha assunto un ruolo sempre più cruciale nell'ambito dello sviluppo di soluzioni efficienti ed innovative per una vasta gamma di problemi reali. Questa tesi si propone di esplorare e analizzare approcci basati sull'ottimizzazione matematica e sarà strutturata nel seguente modo:

Capitolo 1: Introduzione

- Presentazione del contesto e dell'importanza della ricerca
- Obiettivi della tesi

Capitolo 2: Definizioni

- Introduzione di definizioni chiave per comprendere l'importanza di un'inclinazione ottimale dei pannelli solari

Capitolo 3: Modello matematico

- Descrizione del modello matematico preso in considerazione

Capitolo 4: Implementazione, risultati e analisi

- Descrizione dei risultati ottenuti, su due casi di studio
- Analisi di sensitività relativa ad alcuni parametri considerati di maggiore interesse

Capitolo 5: Conclusioni e discussione

- Considerazioni finali sul lavoro svolto
- Possibili sviluppi futuri della ricerca

Capitolo 2- Definizioni

2.1 Introduzione

In questo capitolo, verranno esaminati alcuni concetti chiave utili alla comprensione, successiva, del modello proposto da Hartner et al, tra cui il valore del rendimento e dell'ottimo energetico dei pannelli fotovoltaici, mettendo in evidenza le ragioni per cui un'inclinazione diversa da quella ottimale può comportare significative riduzioni nella produzione complessiva di energia. La posizione e l'orientamento dei pannelli solari sono fattori cruciali per massimizzare l'assorbimento della luce solare e, di conseguenza, l'efficienza del sistema. Anche piccole deviazioni dall'angolo ottimale possono tradursi in perdite energetiche rilevanti.

L'analisi si concentrerà sulla relazione tra l'inclinazione dei pannelli e il rendimento energetico, illustrando come una corretta configurazione possa ottimizzare la produzione di energia. Verranno inoltre brevemente considerati alcuni fattori esterni, che possono influenzare l'impatto delle discrepanze nell'inclinazione sull'efficienza complessiva del sistema fotovoltaico.

2.2 Il rendimento

Il rendimento di un pannello solare è definito come la proporzione di energia solare catturata e convertita in energia elettrica per ogni unità di superficie del pannello. È fondamentale per la produzione di energia rinnovabile ed è strettamente influenzata da una serie di variabili interconnesse. Tra queste, la radiazione solare riveste un ruolo di primaria importanza. Questo fattore dipende dalla posizione geografica e dalle condizioni meteorologiche, e ha un impatto diretto sul rendimento complessivo del sistema.

Oltre alla radiazione solare, l'area e la superficie dei pannelli fotovoltaici giocano un ruolo cruciale nel determinare la quantità di energia che può essere convertita in elettricità. L'ampiezza della superficie di interesse determina la quantità di luce solare che può essere assorbita e trasformata in energia utilizzabile. Pertanto, una maggiore area di raccolta si traduce generalmente in una maggiore produzione di energia.

Tuttavia, il rendimento effettivo dei pannelli fotovoltaici non dipende solo dalle dimensioni e dalla posizione, ma anche dall'efficienza intrinseca dei pannelli stessi. Quest'ultima è influenzata da diversi fattori, tra cui; la qualità dei materiali utilizzati,

il design del pannello, la tecnologia delle celle fotovoltaiche e la temperatura ambiente.

Per garantire coerenza e comparabilità tra i dati di rendimento dei pannelli solari, i produttori adottano standard di valutazione ben definiti. Tipicamente, i test vengono condotti sotto le cosiddette “Standard Test Conditions (STC)”, che includono un irraggiamento solare di 1000 W/m^2 e una temperatura ambiente di 25°C .

Queste condizioni standardizzate permettono di ottenere valori di potenza uniformi e confrontabili tra i diversi produttori e modelli di pannelli fotovoltaici.

In sintesi, il rendimento di un pannello solare si definisce come la proporzione di energia solare catturata e convertita in energia elettrica per ogni unità di superficie del pannello e dipende da diversi fattori che interagiscono tra loro.

Questa complessa relazione può essere sintetizzata attraverso la seguente equazione matematica:

$$q_{t,\alpha,\beta,l}^{FV} = G_{t,\alpha,\beta,l} A_{\alpha,\beta,l} \eta_t^{FV}$$

- $q_{t,\alpha,\beta,l}^{FV}$ = rendimento FV al tempo t , con angoli di installazione α e β in posizione l , misurata in Wh
- $G_{t,\alpha,\beta,l}$ = radiazione solare su superficie inclinata al tempo t , con angoli di installazione α e β nella posizione l , misurata in Wh/m^2
- $A_{\alpha,\beta,l}$ = area fotovoltaica con angoli di installazione α e β nella posizione l , misurata in m^2
- η_t^{FV} = efficienza totale dei moduli al tempo t

2.3 L'ottimo energetico

Per ogni luogo di installazione dei pannelli fotovoltaici esiste una combinazione di angoli, definita come $\alpha^{\text{max_out}}$ e $\beta^{\text{max_out}}$, che consentirà di ottenere la massima resa energetica durante il periodo considerato, identificato come il picco di produzione $Q^{\text{max_out}}$, ovvero come il momento di massima efficienza energetica:

$$Q^{\text{max_out}} = \max_{\alpha,\beta} \int_0^T q(t, \alpha, \beta) dt$$

Se il valore dell'elettricità rimane costante nel tempo, questa configurazione angolare assicurerà il massimo rendimento per l'intero impianto.

Tuttavia, è fondamentale considerare che il valore dell'elettricità prodotta cambia in base all'alternanza tra giorno e notte e alle stagioni, risultando quindi variabile, quindi la combinazione ottimale degli angoli per un modulo fotovoltaico ($\alpha^{\max_out}, \beta^{\max_out}$) che massimizza la produzione complessiva del sistema (V^{opt}),

dal punto di vista puramente energetico, può essere espressa come:

$$V^{opt} = \max_{\alpha, \beta} \int_0^T q(t, \alpha, \beta) p(t) dt$$

Il valore di V^{opt} può essere influenzato da diversi fattori:

- strutture di accumulo: è evidente che, tramite l'ausilio di strutture di stoccaggio altamente efficienti con grandi capacità, risulta più economico massimizzare la produzione e distribuirla durante il giorno attraverso l'impiego di queste strutture. In generale, minori sono le capacità di stoccaggio, maggiori sono le probabilità di deviazioni dagli angoli ottimali.
- Profilo di domanda: anche i pattern di consumo avranno un impatto sui risultati. Infatti, la produzione fotovoltaica è strettamente correlata ai momenti di picco della domanda.
- Posizione geografica e condizioni climatiche nei siti fotovoltaici: le aree caratterizzate da una generosa esposizione solare durante tutto l'anno offrono un ambiente ottimale per la produzione di energia solare.

Grazie a condizioni meteorologiche particolarmente favorevoli, gli impianti fotovoltaici ubicati in regioni più assolate sono in grado di generare una quantità di energia notevolmente superiore rispetto a quelli situati in zone meno luminose. Ciò consente ai pannelli solari di operare a pieno regime per prolungati periodi durante il giorno, massimizzando così la produzione complessiva di energia durante tutto il giorno. Questi elementi rappresentano solo una parte dei fattori che incidono sulle prestazioni di un sistema.

Per quanto riguarda, invece, α^{\max_out} e β^{\max_out} possiamo adottare due diverse prospettive per interpretarli. Essi possono, infatti, essere considerati come:

1. la configurazione angolare che conduce alla massima diminuzione dei costi di combustibile e delle emissioni di CO₂ per l'intero impianto;
2. la disposizione ottimale che massimizza il profitto di un investitore privato, il quale può vendere l'energia elettrica prodotta in base ai prezzi di mercato.

Capitolo 3- Modello matematico

3.1 Introduzione

In questa sezione, verrà descritto in dettaglio il modello matematico proposto da Hartner et al. L'obiettivo è di minimizzare i costi variabili di generazione e quelli marginali del sistema. È ampiamente riconosciuto che all'aumentare del livello di penetrazione dell'energia fotovoltaica, i costi tendono a diminuire. Questo sottolinea l'importanza di un alto rendimento ed efficienza del sistema fotovoltaico, evidenziando il ruolo chiave giocato dai fattori descritti nei capitoli precedenti.

3.2 Formulazione matematica

La modellazione dell'angolazione dei pannelli solari è fondamentale al fine di minimizzare una serie di costi, tra cui i costi variabili di generazione dell'impianto (come quelli legati al combustibile e alle emissioni di CO₂) e i costi di rampa. A tal proposito, si ipotizza che i pannelli utilizzati siano composti di silicio e che per ridurre al minimo i costi sia possibile scegliere una $FV_install_{l,a}$ per ogni combinazione di angoli e per ogni sito di installazione. La produzione di energia elettrica dei pannelli, basata sulla combinazione di angoli e sul sito di installazione, viene calcolata su base oraria. La capacità massima degli impianti fotovoltaici in ciascuna regione è limitata da un valore massimo, indicato come FV_max_l , che rappresenta il massimo livello di penetrazione dell'energia solare fotovoltaica consentito per ciascuna località. Inoltre, vi è un parametro che stabilisce la potenza minima necessaria ($Q_min^{thermal}$) per garantire la stabilità della rete e un parametro per limitare la potenza di uscita, rappresentato da una soglia ($Q_j^{thermal}$).

Si utilizzerà, a tal proposito, la seguente notazione.

INSIEMI	DESCRIZIONE
a	Combinazioni di angoli di installazione FV, $[1 \dots, a, \dots, A]$
l	Siti di localizzazione degli impianti, $[1 \dots, l, \dots, L]$
h	Impianti di accumulo idroelettrico, $[1 \dots, h, \dots, H]$
j	Centrali termoelettriche, $[1 \dots, j, \dots, J]$
t	Fasce orarie, $[1 \dots, t, \dots, T]$
PARAMETRI	DESCRIZIONE
C_{ramp_j}	Costi specifici di rampa dell'impianto j , $[\text{€}/\text{MW}]$
C_{var_j}	Costi di generazione dell'impianto j , $[\text{€}/\text{MW } h]$
D_t	Domanda di energia oraria t , $[\text{MW}]$
η^{hydro}	Efficienza delle pompe e delle turbine, $[-]$
$inflow_t$	Afflusso idroelettrico naturale, $[\text{MW } h]$

$Q_{min}^{thermal}$	Produzione termica minima necessaria alla rete di stabilizzazione, [MW]
$FV_profile_{l,\alpha,t}$	Potenza nominale del FV avente angolo α in posizione l al tempo t , [MW h/MW]
FV_max_l	Capacità massima dell'impianto in posizione l
RES_t	Produzione preesistente di energia da fonti rinnovabili al tempo t , [MW]
$ramp_max_j$	Valore di rampa massimo dell'impianto j , [MW]
SC_max_h	Capacità massima di stoccaggio dell'accumulo h , [MW h]
Q_h^{pump}	Potenza massima di pompaggio dell'accumulo idroelettrico h , [MW]
Q_h^{turb}	Potenza massima della turbina idroelettrica dell'impianto di stoccaggio h , [MW]
$Q_j^{thermal}$	Potenza massima dell'impianto termico j , [MW]
VARIABILI	DESCRIZIONE

$x_{l,\alpha}$	Capacità dei nuovi impianti fotovoltaici installati con angolo α nella posizione l , [MW]
$y_{h,t}$	Livello di stoccaggio dell'impianto di accumulo h al tempo t , [MWh]
$z_{h,t}$	Potenza di pompaggio del serbatoio h al tempo t , [MW]
$k_{h,t}$	Potenza turbina del sistema di stoccaggio h al tempo t , [MW]
b_t	Potenza elettrica dei nuovi impianti fotovoltaici al tempo t , [MW]
$c_{j,t}$	Potenza dell'impianto termico j al tempo t , [MW]
$d_{j,t}$	rampa dell'impianto termico j al tempo t , [MW]

L'obiettivo è, infatti, ridurre i costi associati alla generazione di energia delle centrali termoelettriche; ovvero i costi cosiddetti *variabili*, cioè, legati ai prezzi dei combustibili e i costi di rampa dell'impianto. (1)

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T c_{j,t} \cdot C_{var j} + d_{j,t} \cdot C_{ramp j} \quad (1)$$

Il vincolo di domanda stabilisce che la potenza totale del sistema fotovoltaico deve essere sufficiente a generare l'energia elettrica richiesta dall'utente in un preciso istante e luogo. (2)

$$\sum_{j=1}^J c_{j,t} + RES_t + \sum_{h=1}^H k_{h,t} - z_{h,t} + b_t = dt \quad \forall t \in T \quad (2)$$

Il vincolo di produzione implica che la produzione elettrica di ciascuna configurazione angolare e spaziale, calcolata su base oraria, debba corrispondere all'ottimo energetico. (3)

$$q_t^{PV} = \sum_{l=1}^L \sum_{a=1}^A FV_profile_{l,a,t} \cdot x_{l,a} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

Il vincolo di capacità dell'impianto fotovoltaico stabilisce che la capacità installata dei sistemi fotovoltaici in ogni regione è vincolata da un limite, denominato FV_max_l , che rappresenta un determinato livello massimo di penetrazione del fotovoltaico per ciascuna località. (4)

$$\sum_{a=1}^A x_{l,a} \leq FV_max_l \quad \forall l \in L \quad (4)$$

Il vincolo di livello dell'accumulo definisce il livello di accumulo. (5)

$$y_{h,t} = y_{h,t-1} + z_{h,t} \cdot \eta^{hydro} + \frac{k_{h,t}}{\eta^{hydro}} + inflow_t \quad \forall h \in H, t \in T \quad (5)$$

I vincoli di accumulo stabiliscono dei limiti massimi per la potenza di pompaggio del serbatoio, per la potenza della turbina del sistema e per il livello di accumulo del sistema di stoccaggio, basati sulla capacità massima di quest'ultimo e sulla sua potenza massima di pompaggio delle pompe e turbine. (6) (7) (8)

$$k_{h,t} \leq \min(Q_{h,t}^{turb}, y_{h,t-1}) \quad \forall h \in H, t \in T \quad (6)$$

$$z_{h,t} \leq Q_{h,t}^{pump} \quad \forall h \in H, t \in T \quad (7)$$

$$y_h \leq SC_max_h \quad \forall h \in H \quad (8)$$

Il vincolo di potenza garantisce che la potenza raggiunta dall'impianto termico al tempo t non superi mai la potenza massima consentita dall'impianto. (9)

$$c_{j,t} \leq Q_j^{thermal} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (9)$$

Il vincolo di rampa stabilisce il valore della rampa del sistema, ovvero la variazione della potenza di quest'ultimo nel tempo. (10)

$$d_{j,t} = c_{j,t} - c_{j,t-1} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (10)$$

Il vincolo di limite di rampa ci fornisce il valore massimo accettabile della variazione della potenza del sistema. (11)

$$d_{j,t} \leq ramp_max_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (11)$$

Il vincolo di minimo termico implica che la somma della potenza di ogni impianto termico, corrisponda almeno al valore della produzione termica minima necessaria alla stabilizzazione della rete. (12)

$$\sum_{j=1}^J c_{j,t} \geq Q_min^{thermal} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (12)$$

Capitolo 4- Implementazione, risultati e analisi

4.1 Introduzione

In questo capitolo, saranno discussi i risultati computazionali derivati dalla risoluzione del modello, descritto nel Capitolo 3, e sarà presentata un'analisi di sensitività riguardante alcuni parametri di maggiore interesse. A tal proposito, verrà illustrato il caso di studio impiegato durante la fase di validazione del modello matematico e che è stato implementato utilizzando il linguaggio di modellazione algebrica AMPL.

4.2 Il processo di validazione

È stato generato un caso di studio “giocattolo” per poter validare l’implementazione del modello descritto. Questo caso di studio “giocattolo” è caratterizzato come segue (Tabella 2):

INSIEMI	NUMERO DI ELEMENTI (CASO DI STUDIO GIOCATTOLO)
<i>a (combinazione angoli)</i>	2
<i>l (ubicazione impianti)</i>	2
<i>h (impianti di stoccaggio)</i>	8
<i>j (potenza termica)</i>	2
<i>t (fasi orarie)</i>	2

TABELLA 2

Nelle tabelle sottostanti sono presentati i risultati

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO

Funzione obiettivo: 22

		l1	l2
X	a1	0	8,956
	a2	0	0

TABELLA 3

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO

Funzione obiettivo: 22

		h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
y	t1	30	20	0	0	0	0	0	80
	t2	30	20	30	40	50	50	40	0

TABELLA 4

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO

Funzione obiettivo: 22

		h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
z	t1	0	0	0	0	0	0	0	0
	t2	0	0	0	0	0	0	0	0

TABELLA 5

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO

Funzione obiettivo: 22

		h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
k	t1	0	0	0	0	0	0	0	0
	t2	0	0	0	0	0	0	0	0

TABELLA 6

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO			
<i>Funzione obiettivo: 22</i>			
b		t1	t2
		268,68	179,12

TABELLA 7

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO			
<i>Funzione obiettivo: 22</i>			
c		j1	j2
	t1	2,2	0
	t2	0	0

TABELLA 8

SOLUZIONE CASO DI STUDIO GIOCATTOLO			
<i>Funzione obiettivo: 22</i>			
d		j1	j2
	t1	0	0
	t2	0	0

TABELLA 9

4.3 Implementazione e risultati

Il modello descritto nel capitolo precedente è stato implementato utilizzando il linguaggio di modellazione algebrica AMPL. A tal proposito, sono stati creati due file: un file .mod per la definizione del modello e un file .dat contenente i dati in input. Il file .mod contiene le dichiarazioni delle variabili, i vincoli e la funzione obiettivo, mentre il file .dat specifica i valori dei parametri necessari per la risoluzione del modello.

In particolare, il caso di studio è caratterizzato come segue (Tabella 10):

INSIEMI	NUMERO DI ELEMENTI (CASO DI STUDIO ORIGINALE)
<i>a</i> (combinazione angoli)	10
<i>l</i> (ubicazione impianti)	5
<i>h</i> (impianti di stoccaggio)	8
<i>j</i> (potenza termica)	5
<i>t</i> (fasi orarie)	3

TABELLA 10

Questi elementi sono stati scelti per riflettere le diverse condizioni operative degli impianti fotovoltaici e per garantire una modellazione accurata della produzione e del consumo energetico. Gli impianti fotovoltaici considerati hanno una potenza nominale in kilowatt (Kw) che varia da 6 a 90, a seconda del sito di ubicazione e della combinazione degli angoli d'installazione.

Questa variabilità permette di simulare diverse configurazioni e di analizzare le prestazioni degli impianti in diverse condizioni. I costi di rampa e di generazione degli impianti assumono valori fittizi, ma verosimili a quelli reali in funzione della potenza termica di ciascun impianto. La stessa metodologia è stata utilizzata per la domanda elettrica, il cui valore è definito in base alle fasce orarie: mattino, mezzogiorno e sera.

Questo approccio ha permesso di valutare l'efficacia del modello proposto nel minimizzare i costi operativi degli impianti fotovoltaici considerati, ottimizzando l'efficienza energetica.

Nelle seguenti tabelle, verranno esplicitati i risultati ottenuti.

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE						
Funzione obiettivo: 3300						
		l1	l2	l3	l4	l5
X	a1	0	0	0	0	0
	a2	0	0	0	716	0
	a3	0	0	0	0	0
	a4	0	0	0	0	0
	a5	0	0	0	0	0
	a6	0	0	0	0	0
	a7	0	0	0	0	0
	a8	0	0	0	0	0
	a9	0	0	0	0	0
	a10	0	0	0	0	0

TABELLA 11

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE

Funzione obiettivo: 3300

		t1	t2	t3
y	h1	300	0	300
	h2	225	0	225
	h3	0	0	310
	h4	0	0	546
	h5	0	0	70,4
	h6	0	0	0
	h7	0	0	0
	h8	415,7	0	0

TABELLA 12

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE

Funzione obiettivo: 3300

		t1	t2	t3
z	h1	0	0	0
	h2	0	0	0
	h3	0	0	0
	h4	0	0	0
	h5	0	0	0
	h6	0	0	0
	h7	0	0	0
	h8	0	0	0

TABELLA 13

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE

Funzione obiettivo: 3300

	t1	t2	t3
b	14315,4	21473,1	42946,3

TABELLA 14

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE						
Funzione obiettivo: 3300						
		j1	j2	j3	j4	j5
c	t1	0	0	0	0	0
	t2	0	0	0	0	0
	t3	0	2,2	0	0	0

TABELLA 15

SOLUZIONE CASO DI STUDIO ORIGINALE						
Funzione obiettivo: 3300						
		j1	j2	j3	j4	j5
d	t1	0	0	0	0	0
	t2	0	0	0	0	0
	t3	0	0	0	0	0

TABELLA 16

4.4 L'analisi di sensitività

È, generalmente utile, eseguire un'analisi di sensitività per valutare l'impatto che queste variazioni possono avere sulla soluzione ottimale, consentendoci di identificare i parametri più influenti e di valutare la robustezza del nostro modello.

Un obiettivo chiave dell'analisi di sensitività è, infatti, individuare i parametri cosiddetti sensibili, cioè quelli i cui valori non possono essere modificati senza influire sulla soluzione ottima.

Nel nostro caso abbiamo considerato interessante variare, uno alla volta, i seguenti parametri: produzione termica minima necessaria alla rete di stabilizzazione ($Q_{min}^{thermal}$) ed efficienza di pompe e turbine (η^{hydro}).

4.4.1 Variazione $Q_{min}^{thermal}$

L'analisi di sensitività condotta sulla variazione di $Q_{min}^{thermal}$ è stata suddivisa in due fasi principali. In primo luogo, abbiamo incrementato il parametro e successivamente lo abbiamo ridotto, per osservare nel dettaglio se e come la soluzione ottima variava di conseguenza. Per semplicità, abbiamo scelto di incrementare o decrementare, di volta in volta, il parametro di un valore costante, pari a ± 0.3 . (Tabella 17- Tabella 18)

Da questa analisi, è emerso che la soluzione ottima è altamente sensibile ad una sua possibile variazione. Infatti, aumentando la produzione termica minima necessaria alla stabilizzazione della rete, il costo complessivo aumenta, mentre riducendola, il costo diminuisce. Questo comportamento è prevedibile in quanto un aumento del parametro comporta una maggiore produzione termica per il funzionamento dell'intero sistema, il che si traduce in un possibile aumento del dispendio economico. Al contrario, riducendo il parametro, si necessita di una minore produzione termica minima, con una conseguente diminuzione dei costi.

Di seguito verranno mostrati dei grafici, rappresentanti le modifiche apportate al valore del parametro originale e l'effetto che queste variazioni hanno sulla soluzione ottima.

➤ **INCREMENTO**

	PARAMETRO	SOLUZIONE
VARIAZIONE 1	2.2	3300
VARIAZIONE 2	2.5	3750
VARIAZIONE 3	2.8	4200
VARIAZIONE 4	3.1	4650
VARIAZIONE 5	3.4	5100

TABELLA 17

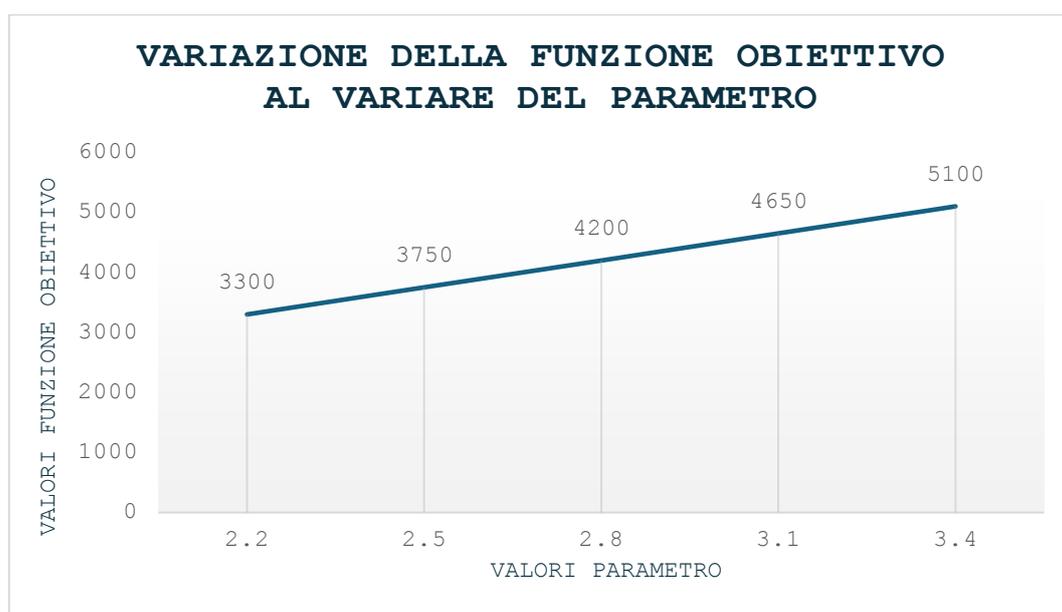


FIGURA 4

➤ DECREMENTO

	PARAMETRO	SOLUZIONE
VARIAZIONE 1	2.2	3300
VARIAZIONE 2	1.9	2850
VARIAZIONE 3	1.6	2400
VARIAZIONE 4	1.3	1950
VARIAZIONE 5	1	1500

TABELLA 18

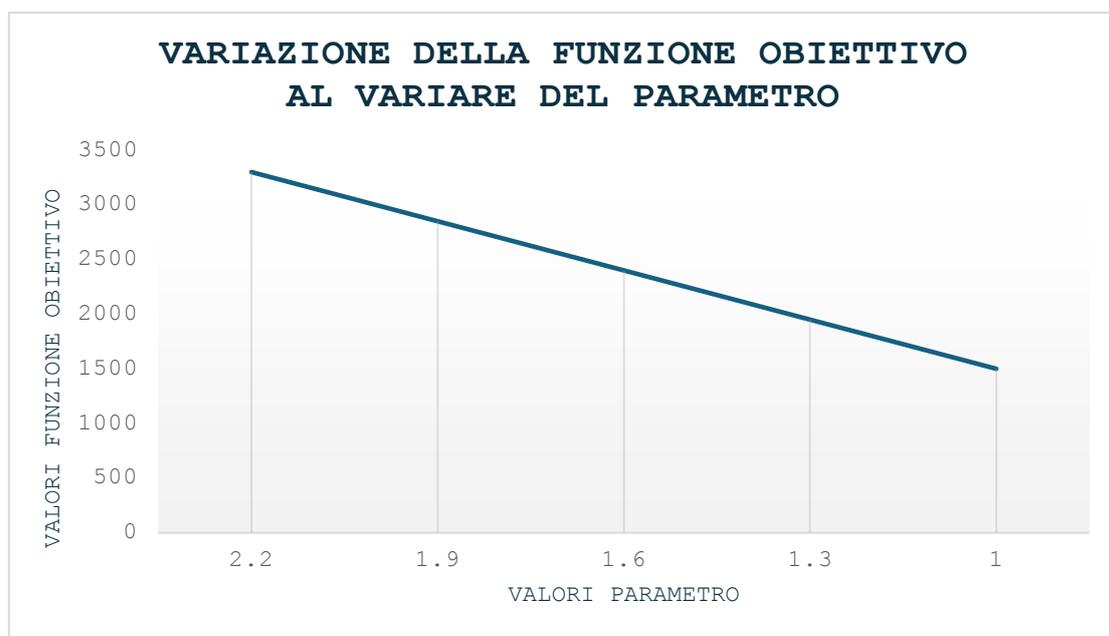


FIGURA 5

4.4.2 Variazione η^{hydro}

Anche per il secondo parametro considerato nell'analisi di sensitività, il procedimento è stato lo stesso: abbiamo prima esaminato l'effetto di un possibile aumento del parametro, seguito dall'impatto della sua riduzione.

Come nel caso precedente, è stata fissata una variazione costante di ± 200 . (Tabella 19-Tabella 20)

Tuttavia, le modifiche apportate a questo parametro non sembrano influenzare la soluzione ottima, né avere un impatto diretto su di essa. Pertanto, l'efficienza di pompe e turbine risulta essere un parametro non "sensibile".

La ragione per cui la variazione di questo parametro non altera la soluzione ottimale potrebbe risiedere nella struttura del modello e nelle relazioni tra i parametri stessi.

➤ **INCREMENTO**

	PARAMETRO	SOLUZIONE
VARIAZIONE 1	1000	3300
VARIAZIONE 2	1200	3300
VARIAZIONE 3	1400	3300
VARIAZIONE 4	1600	3300
VARIAZIONE 5	1800	3300

TABELLA 19

➤ **DECREMENTO**

	PARAMETRO	SOLUZIONE
VARIAZIONE 1	1000	3300
VARIAZIONE 2	800	3300
VARIAZIONE 3	600	3300
VARIAZIONE 4	400	3300
VARIAZIONE 5	200	3300

TABELLA 20

Capitolo 5- Conclusioni e discussione

L'obiettivo principale di questa tesi è stata l'analisi di un modello matematico, introdotto nel lavoro di Hartner et al, per il problema del posizionamento di moduli fotovoltaici, al fine di minimizzare i costi complessivi.

Il modello è stato implementato usando il linguaggio di modellazione algebrica AMPL ed è stato validato su un esempio giocattolo e testato su un esempio di più grandi dimensioni. Infine, è stata condotta un'analisi di sensitività al variare di alcuni parametri ritenuti più critici.

Sviluppi futuri potrebbero riguardare:

1. **Integrazione di variabili ambientali**: estendere il modello per includere delle variabili di tipo ambientali come la temperatura, la copertura nuvolosa e le condizioni meteorologiche stagionali, al fine di migliorare la precisione delle previsioni di rendimento energetico.
2. **Analisi economica dettagliata**: condurre un'analisi economica più dettagliata che includa i costi di manutenzione e di aggiornamento tecnologico degli impianti fotovoltaici, oltre ai costi di installazione e produzione.
3. **Valutazione di nuove tecnologie**: valutare l'impatto di nuove tecnologie fotovoltaiche, come i pannelli bifacciali o le celle solari ad alta efficienza, sulle strategie di ottimizzazione degli angoli di installazione.
4. **Studio di sistemi ibridi**: analizzare l'integrazione di sistemi di accumulo di energia di altre fonti rinnovabili con gli impianti fotovoltaici, per migliorare ulteriormente l'efficienza energetica e la riduzione dei costi complessivi.
5. **Approccio multi-obiettivo**: sviluppare modelli di ottimizzazione multi-obiettivo che non solo minimizzino i costi, ma considerino anche altri fattori cruciali come la sostenibilità a lungo termine.

Questi sviluppi futuri possono fornire una visione più completa e accurata delle potenzialità degli impianti fotovoltaici e contribuire a una maggiore efficienza e sostenibilità nel settore delle energie rinnovabili, settore in costante sviluppo. In un contesto globale caratterizzato dalla transizione verso fonti di energia sostenibile, l'ottimizzazione dell'installazione dei moduli fotovoltaici non solo rappresenta un vantaggio economico, ma contribuisce anche alla riduzione dell'impatto ambientale.

Tecnologie emergenti, miglioramenti nei materiali fotovoltaici e avanzamenti negli algoritmi di ottimizzazione rendono questo campo di ricerca estremamente dinamico e rilevante.

Le sfide legate all'efficienza energetica, alla riduzione dei costi di installazione e manutenzione, e all'adattamento a diverse condizioni geografiche e climatiche rendono essenziale un continuo aggiornamento e innovazione in questo campo.

Riferimenti bibliografici

- [1] Hartner, M., Ortner, A., Hiesl, A., & Haas, R. (2015). East to west–The optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective. *Applied Energy*, 160, 94-107.
- [2] Benganem, M. J. A. E. (2011). Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 88(4), 1427-1433
- [3] Rowlands, I. H., Kemery, B. P., & Beausoleil-Morrison, I. (2011). Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, 39(3), 1397-1409.
- [4] Mondol, J. D., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2008). Solar radiation modelling for the simulation of photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 33(5), 1109-1120.
- [5] Hiller F., Lieberman G., 2010, “Introduction to Operations Research”, nona edizione, McGraw-Hill, Milano

Sitografia

<https://intesagreen.com/impianti-fotovoltaici-vantaggi-e-svantaggi/>

<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/gigawhat/cerca-articles/articles/2023/03/pannelli-fotovoltaici-struttura-funzionamento>

<http://www.energyexpert.it/impianto-solare-per-produzione-energia-termica/la-radiazione-solare>

<https://luce-gas.it/%20il-fotovoltaico-dal-1839-a-oggi-la-%20storia-di-%20un%20importante-innovazione>

<https://www.andreaminini.org/fisica/effetto-fotovoltaico#:~:text=L'effetto%20fotovoltaico%20%C3%A8%20un,una%20quantit%C3%A0%20aggiuntiva%20di%20energia.&text=Cos'%C3%A8%20la%20banda%20di%20valenza%3F>

<https://www.wired.it/article/lenergia-solare-nello-spazio-progetti/#:~:text=Le%20centrali%20solari%20orbitali%20sono,alla%20Terra%20in%20modalit%C3%A0%20wireless.>

<https://archivio.greenreport.it/news/economia-ecologica/fotovoltaico-nellultimo-anno-litalia-ha-installato-523-gw-suddivisi-in-374mila-impianti/>

<https://www.otovo.it/blog/potenza-pannello-fotovoltaico/>