



POLITECNICO DI TORINO
DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E DESIGN
Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'INTEGRAZIONE DEL FOTOVOLTAICO IN ARCHITETTURA: ANALISI E PROSPETTIVE

Relatore

Prof. Enrico Fabrizio

Candidato

Alessia Monetta

matricola 300920

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Ai miei genitori, colonne portanti della mia vita,
A mia sorella Katia, sole quotidiano,
A Marco, sostegno e certezza,
Alle mie amiche, conforto e leggerezza.

Ai miei nonni che sarebbero orgogliosi di me.

/ ABSTRACT	5
/ INTRODUZIONE	7
1 / LA CRISI CLIMATICA	9
1.1 / COP27: momento decisivo nella lotta al cambiamento climatico	9
1.2 / Report IPCC: da crisi climatica a crisi di sistema	12
1.3 / Gli scenari dell'IPCC: dalla situazione europea alle possibili direzioni future globali	18
2 / LE POLITICHE VERSO LA NEUTRALITA' CLIMATICA	25
2.1 / Cause e settori che influenzano il cambiamento climatico: lo scenario europeo	25
2.2 / Il ruolo delle politiche in atto: il Green Deal come obiettivo	28
2.3 / Le energie rinnovabili protagoniste della decarbonizzazione	31
2.4 / Adattamento al cambiamento climatico: la responsabilità dello spazio costruito	34
3 / IL SISTEMA FOTOVOLTAICO	40
3.1 / Etimologia del termine	40
3.2 / Grandezze e unità di misura	40
3.3 / Il principio di funzionamento	44
3.4 / I componenti dell'impianto	45
3.5 / Progresso e sviluppo: dal passato alle prospettive future	54
4 / LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA COME RISPOSTA SOSTENIBILE	62
4.1 / Il ruolo dell'energia solare nel campo della progettazione	62
4.2 / BAPV e BIPV	65
4.3 / Requisiti e standard della tecnologia fotovoltaica integrata	73

5 / I DISPOSITIVI COME STRUMENTO DI PROGETTO	77
5.1 La tecnologia fotovoltaica integrata alla composizione architettonica	77
5.2 Identificazione dei dispositivi progettuali	80
5.3 Analisi casi di studio	86
6 / CONSIDERAZIONI FINALI	153
6.1 I dispositivi come obiettivo di progetto	153
6.2 Analisi e confronto dei risultati energetici	158
/ CONCLUSIONI	161
/ BIBLIOGRAFIA	162
/ SITOGRAFIA	169
/ RINGRAZIAMENTI	172

/ ABSTRACT

Le negative e irreversibili conseguenze dettate dalla crisi climatica pongono importanti responsabilità nella progettazione e costruzione di nuovi edifici.

Il presente lavoro di tesi nasce dalla decisiva consapevolezza che i cambiamenti climatici rappresentano la sfida più importante di questa epoca: l'architettura costituisce una delle più significative leve per contrastare e mitigare la crisi in atto.

L'obiettivo della seguente trattazione è dimostrare l'importanza e il ruolo determinante dell'architettura in relazione all'emergenza climatica: oggi l'architetto deve saper unire qualità compositiva ed estetica con modelli e soluzioni sostenibili che utilizzano l'energia rinnovabile.

Lo studio pone come soluzione estremamente valida ed efficiente l'applicazione della metodologia BIPV, Building Integrated Photovoltaics.

La tecnologia fotovoltaica integrata permette di definire l'edificio come uno strumento energeticamente attivo e produttivo.

La prima parte dello studio di tesi è volta a delineare l'inquadramento attuale relativo alla crisi climatica: è importante descrivere in primo luogo le cause e i settori che determinano l'aumento della temperatura a livello globale, modificando gli equilibri naturali.

Le politiche verso la neutralità climatica, dalle linee guida esposte dal Green Deal agli obiettivi delineati dal pacchetto «Fit for 55», pongono come scopo la riduzione drastica delle emissioni per raggiungere l'impatto climatico zero.

In seguito è stato analizzato il sistema fotovoltaico in relazione al funzionamento dei componenti che caratterizzano l'impianto, con un approfondimento relativo alle nuove tecnologie e ai materiali utilizzati.

La sezione di introduzione al sistema fotovoltaico termina analizzando il processo storico relativo agli studi e agli esperimenti condotti e descrivendo le prospettive future rispetto al potenziale della tecnologia fotovoltaica.

L'integrazione della tecnologia fotovoltaica oggi rappresenta un fondamento cardine per l'innovazione della progettazione architettonica. Il progetto del sistema fotovoltaico integrato all'edificio deve seguire e rispettare normative specifiche, in particolare le norme BS EN 50583-1:2016 e BS EN 50583-2:2016, le quali evidenziano gli standard europei e i requisiti dei moduli fotovoltaici come prodotti da costruzione.

Il progetto del sistema fotovoltaico deve essere sviluppato nella fase embrionale del programma architettonico. Energia e composizione devono unirsi in maniera intrinseca per dare forma a una architettura che unisca qualità, funzionalità e prestazione.

La seguente trattazione analizza casi di studio BIPV. Le architetture selezionate e analizzate descrivono diverse e valide soluzioni per definire il progetto fotovoltaico integrato all'edificio. L'architetto, oltre alla progettazione energeticamente positiva, deve saper controllare altri parametri definiti «dispositivi»: il sistema fotovoltaico deve rappresentare insieme all'architettura una composizione d'insieme che si integri dal punto di vista edilizio, funzionale, paesaggistico, percettivo ed energetico.

La presente trattazione è stata redatta con l'obiettivo di definire un valido approccio verso la progettazione che integra energia e composizione, attraverso l'approfondimento di architetture esistenti analizzate mediante i «dispositivi di integrazione», strumento per definire un'architettura di qualità compositiva ed energeticamente attiva.

/ INTRODUZIONE

Il tema della crisi climatica determina oggi un fenomeno sempre più significativo che coinvolge i paesi di tutti i continenti.

Le emissioni di gas a effetto serra, derivate dalle attività dell'uomo, rappresentano la causa principale del cambiamento climatico.

L'Onu dichiara che l'unica soluzione per dimezzare le emissioni di CO₂ entro il 2030 sia rappresentata da una «trasformazione rapida e radicale della società a partire dal settore energetico». [1]

António Guterres, segretario generale delle Nazioni Unite, sostiene l'importanza di un cambiamento in tutti i settori, dall'industria ai trasporti, dai sistemi alimentari ai sistemi finanziari. Il punto cruciale di questo dibattito sul clima è determinato dall'uso da parte dell'uomo di combustibili fossili, la nuova ed immediata direzione deve investire in modo drastico sulle fonti rinnovabili.

Qual è il ruolo e il contributo dell'architettura rispetto alla crisi climatica in atto?

L'architettura svolge un ruolo fondamentale per contrastare l'emergenza climatica.

E' possibile identificare le più sofisticate strategie energetiche nel campo delle costruzioni sfruttando risorse naturali, dall'utilizzo di pompe di calore al condizionamento affidato alla tecnologia geotermica, dalla gestione delle acque attraverso vasche di accumulo fino all'utilizzo di materiali contenenti componenti riciclati.

La seguente trattazione pone come obiettivo dimostrare, mediante l'analisi di casi di studio, in che modo il BIPV rappresenti una soluzione valida ed efficiente.

L'installazione della tecnologia fotovoltaica integrata all'edificio consente, oltre alla produzione di energia attraverso l'irradiazione solare, l'utilizzo del sistema tecnologico come un vero e proprio elemento di progetto architettonico.

L'obiettivo 9 dell'agenda 2030¹ riporta:

«Sviluppare infrastrutture di qualità, affidabili, sostenibili e resilienti [...] per supportare lo sviluppo economico e il benessere degli individui». [2]

L'applicazione di sistemi e innovazioni tecnologiche che limitino l'impatto ambientale uniti ad una qualità compositiva architettonica permettono di delineare soluzioni che integrano la composizione e l'energia: i protagonisti sono l'uomo e l'ambiente, gli obiettivi la qualità, il benessere e la produzione di energia attraverso fonti rinnovabili.

Come evidenziato all'interno della nuova revisione EPBD emendamento articolo 9 bis relativo all'energia solare negli edifici, «tutti i nuovi edifici siano progettati in modo da ottimizzare il loro potenziale di produzione di energia solare».

Oggi il tema del progetto fotovoltaico non rappresenta un'opzione progettuale bensì uno strumento imprescindibile e fondamentale per sostenere e incrementare la produzione di energia da fonti rinnovabili in campo architettonico.

¹ Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile

1 / LA CRISI CLIMATICA

1.1 / COP27: momento decisivo nella lotta al cambiamento climatico

«L'organizzazione della COP27 nella [...] città di Sharm El-Sheikh quest'anno segna il trentesimo anniversario dell'adozione della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici. Nei trent'anni successivi, il mondo ha fatto molta strada nella lotta al cambiamento climatico e ai suoi impatti negativi sul nostro pianeta; ora siamo in grado di comprendere meglio la scienza alla base del cambiamento climatico, valutare [...] i suoi impatti e sviluppare [...] strumenti per affrontarne le cause e le conseguenze». [s1]

Queste sono state le parole con le quali il presidente della Repubblica araba d'Egitto Abdel Fattah El-Sisi ha iniziato il proprio messaggio di benvenuto all'ultima Conferenza delle Nazioni Unite del 2022, evidenziando l'importanza di sostenere il dibattito globale sul clima in un Paese in via di sviluppo come l'Africa.

L'acronimo COP indica «Conferenza delle Parti», rappresenta l'organismo decisionale dell'UNFCCC², ovvero la Convenzione Quadro dell'ONU sui cambiamenti climatici. COP27 evidenzia e sostiene come traguardo il non superamento del limite soglia pari a 1,5 gradi Celsius di aumento delle temperature rispetto ai livelli preindustriali: nel 2021 a Glasgow, durante la COP26, le Parti hanno affermato nuovamente come obiettivo la limitazione della temperatura sostenuto dall'Accordo di Parigi. [s1]

«La COP27 riconosce che per mantenere l'obiettivo di 1,5°C è necessaria una riduzione delle emissioni climalteranti del -43% al 2030 rispetto al 2019: con gli impegni di decarbonizzazione attuali [...] il taglio di emissioni sarebbe solo dello 0,3% al 2030 rispetto al 2019, un valore totalmente irrilevante ed estremamente preoccupante». [3]

² United Nations Framework Convention on Climate Change

Con il termine «decarbonizzazione» si intende «il processo di riduzione del rapporto carbonio-idrogeno nelle fonti energetiche»: l'obiettivo principale è la riduzione di CO₂ nell'atmosfera. [4]

Dall'affermazione riportata da rete clima, emerge in modo chiaro ed evidente che le politiche a tutela del clima in atto non consentono di limitare e ridurre in modo efficace e imminente l'aumento della temperatura.

Il decennio 2020-2030 determina in modo definitivo il superamento o meno della soglia di sicurezza di 1,5°C. I modelli matematici descrivono i cambiamenti climatici in modo preoccupante: dalla fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo è possibile evidenziare le forti e irreversibili conseguenze che il riscaldamento globale ha determinato e determina ogni giorno rispetto all'ambiente e agli ecosistemi.

L'aumento delle temperature modifica i modelli meteorologici, incrementa il fenomeno di siccità, sconvolge gli equilibri della natura e in modo più evidente causa catastrofi ambientali di entità notevoli.

E' importante evidenziare che 1,5°C come limite di sicurezza non è un dato arbitrario: lo scienziato svedese Johan Rockström³ [s2] definisce tale numero come «planetary boundary» ovvero «confine planetario», il superamento di questo margine definirebbe in modo irreversibile il rischio di cambiamenti climatici. [5]

Il grafico riportato in figura 1.1 descrive la temperatura media globale analizzata dai 6 dataset più affidabili a livello mondiale, esaminando l'arco temporale compreso tra il 1850 e il 2022. [6]

L'Organizzazione meteorologica mondiale (Omm) afferma che l'anno 2022 è stato almeno 1,15°C più caldo rispetto al periodo preindustriale. [7]

³ Johan Rockström direttore congiunto dell'Istituto di Potsdam per la ricerca sull'impatto climatico

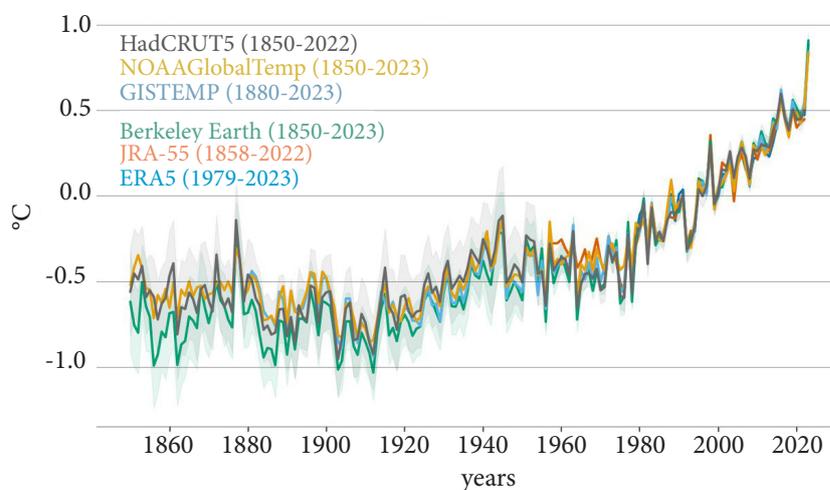


Figura 1.1 - Global Mean Temperature for August (°C)

fonte: WMO, World Meteorological Organization

Il «global warming» è in forte incremento e i dati del riscaldamento globale relativi all'anno 2022 confermano «la tendenza di lungo termine di aumento costante della temperatura media del Pianeta». [7]

L'ultimo rapporto IPCC⁴ sostiene che «la finestra per l'azione» per limitare l'aumento di temperatura globale sia in fase di rapida chiusura. [8]

E' possibile affermare che COP27 non ha determinato esiti positivi in termini di mitigazione della crisi climatica, in relazione alla riduzione delle emissioni, le strategie non hanno subito modifiche rispetto agli obiettivi posti in precedenza. [3]

«[...] l'unico obiettivo definito è solo la riduzione della produzione elettrica a carbone con emissioni non abbattute, non l'eliminazione. Gas e combustibili fossili non sono stati citati». [3]

L'evoluzione nel tempo del cambiamento climatico ha determinato approcci diversi in relazione alla problematica del clima: in una prima fase l'obiettivo posto ha

⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change

riguardato l'esclusiva riduzione delle emissioni di gas a effetto serra.

L'avanzamento del fenomeno ha concretizzato gli effetti negativi irreversibili sul sistema ambiente, anticipati da numerosi esperti e in gran parte sottovalutati.

I cambiamenti climatici di origine antropica hanno provocato impatti sulla natura e sulle vite umane in modo irrevocabile ed ingiustificabile. [11]

Durante la 27a Conferenza della Parti dell'UNFCCC è stato istituito il fondo economico «Loss and Damage» per sostenere i Paesi maggiormente colpiti dai disastri climatici causati dal cambiamento climatico. [3]

Non è stata ancora specificata una definizione all'interno di UNFCCC per l'espressione «Loss and Damage», identificato con la sigla L&D può indicare «i potenziali impatti negativi che si materializzano in Paesi in via di sviluppo particolarmente vulnerabili, a causa sia di eventi estremi, che dei cosiddetti eventi «a lenta insorgenza» [...], dopo che siano state realizzate tutte le possibili misure di mitigazione e adattamento». [s3]

1.2 / Report IPCC: da crisi climatica a crisi di sistema

«Cambiamenti climatici 2022: impatti, adattamento e vulnerabilità» è il titolo del report IPCC relativo ai cambiamenti climatici, presentato da Working Group II (AR6). I report redatti da Intergovernmental Panel on Climate change assumono un ruolo fondamentale in quanto propongono strategie di «adattamento e mitigazione», fornendo valutazioni periodiche sui rischi climatici.

AR6 Sesto Rapporto di valutazione è il primo report IPCC a studiare ed analizzare il fenomeno del cambiamento climatico integrando l'aspetto sociale, economico e le scienze naturali: la ricerca e l'approfondimento relativi alle conseguenze e ai rischi dovuti al riscaldamento globale, risultano strettamente interconnessi al tema della biodiversità, degli ecosistemi e della società umana. [10]

L'IPCC, in quest'ultimo report, valuta e riporta un'analisi a 360 gradi: il cambiamento climatico è una problematica di livello mondiale e fondamentale è considerare il

sistema come unico, si sottolinea il diverso impatto sull'ambiente e, in particolar modo, sulle regioni ad alta vulnerabilità dove la crisi climatica contribuisce ad aumentare la fame, la mancanza di acqua e la povertà. [10]

«sbagliato definire la crisi climatica come una crisi ambientale, perché è a tutti gli effetti una crisi di sistema. E questo rapporto sottolinea l'interdipendenza tra clima e società, legando con un doppio nodo le scienze climatiche a quelle sociali ed economiche». [10]

Serena Giacomini, presidente di Italian Climate Network

La figura 1.2 rappresenta in modo chiaro come il cambiamento climato coinvolga la società, gli ecosistemi e la biodiversità, generando un effettiva crisi di sistema.

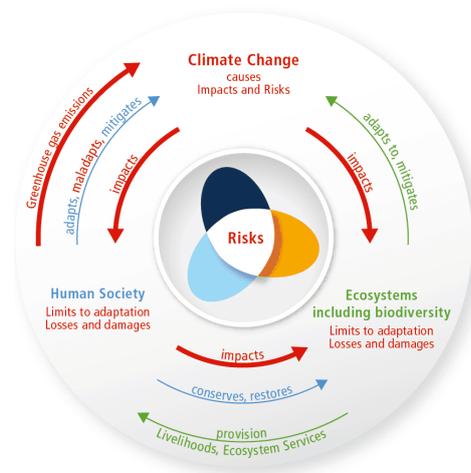


Figura 1.2 - Climate risk to climate resilient development: climate, ecosystems and human society
 fonte: IPCC, AR6 - Summary for Policymakers

La ricerca mostra che il rischio è dato dalla sovrapposizione dei seguenti fattori:

● pericoli climatici ● vulnerabilità ● esposizione

relativamente a

- sistemi umani
- ecosistemi e della loro biodiversità

«La società umana provoca il cambiamento climatico. Il cambiamento climatico, attraverso i pericoli, l'esposizione e la vulnerabilità, genera impatti e rischi che possono superare i limiti di adattamento e provocare perdite e danni. La società umana può adattarsi, disadattarsi e mitigare il cambiamento climatico, gli ecosistemi possono adattarsi e mitigare entro certi limiti. [...] La società umana ha un impatto sugli ecosistemi e può ripristinarli e conservarli». [11]

I termini impatto, adattamento, mitigazione, vulnerabilità, in stretta correlazione tra loro, sintetizzano in modo chiaro i temi contenuti in AR6.

L'enciclopedia Treccani alla voce «impatto ambientale» riporta: «alterazione da un punto di vista qualitativo e quantitativo dell'ambiente, considerato come insieme delle risorse naturali e delle attività umane a esse collegate, [...] di rilevante entità». [12]

Oggi si possono distinguere diversi tipi di impatto ambientale da cui derivano diversi tipi di inquinamento quali atmosferico, idrico, radioattivo, del suolo, acustico, questi rappresentano solo alcune delle principali conseguenze dell'attività umana sul sistema ambiente.

Il report evidenzia che «alcuni impatti del cambiamento climatico non conoscono adattamento», questi si definiscono come «limiti hard», ovvero condizioni ambientali e climatiche in cui l'uomo non può vivere.

Il rapporto AR6 specifica la differenza tra adattamento e mitigazione: il primo risulta essere «l'insieme degli aggiustamenti nei sistemi ecologici, sociali o economici in risposta a stimoli climatici in atto o previsti e ai loro effetti», il secondo invece consiste in «azioni messe in atto per ridurre le emissioni di gas climalteranti o per potenziare i pozzi naturali di riassorbimento». [10]

Le soluzioni di adattamento definite nel corso degli anni sono numerose e variano rispetto al luogo in cui si opera: in Italia un caso emblematico è rappresentato dal MOSE di Venezia, sistema di dighe mobili con il fine di difesa della città dal fenomeno dell'acqua alta.

Il metodo e i sistemi di adattamento variano in modo significativo se si interviene in un Paese in via di sviluppo dove risulta «sempre più ampio il divario tra le azioni intraprese e ciò che è necessario fare», da qui la coniazione di un nuovo termine «maladaptation». [10]

Le politiche di mitigazione dovrebbero avere come focus la valutazione del rischio per progettare le misure più indicate e vantaggiose a contenere e diminuire l'impatto del cambiamento climatico sul sistema ambiente. Risultano di fondamentale importanza i dati registrati dopo fenomeni naturali, come per esempio alluvioni e terremoti, per misurare l'entità del danno e per studiare le cause e conseguentemente definire sistemi di prevenzione. [13]

Il report evidenzia una mancanza di attenzione e studio verso i dati: «nonostante i vantaggi che portano, la raccolta e la condivisione dei dati non sono una priorità, e gruppi ed istituzioni ancora non agiscono in maniera coordinata al riguardo. I dati non sono disponibili prontamente o non sono accurati e consistenti fra le diverse sorgenti». [13]

Specificando la crisi climatica come crisi di sistema si evidenzia l'importanza di considerare tale fenomeno come globale, le azioni di adattamento e le politiche di mitigazione devono definire un disegno di approccio comune concretizzando le azioni verso la sostenibilità e la transizione energetica.

Le analisi, i dati e lo sviluppo tecnologico devono determinare contributi a livello globale, con una visione completa, riconoscendo nella crisi climatica i due sistemi chiave: il sistema ambientale e il sistema sociale.

La figura 1.3 rappresenta il naufragio al molo di Sheikh Wali, nel nord-est del lago di Urmia. Nella foto scattata da Solmaz Daryani si evidenzia la forte siccità di queste aree dovuta al cambiamento climatico.



Figura 1.3 - The Eyes of Earth, of Solmaz Daryani

fonte: emerge-mag.com

« Con l'adattamento si punta a gestire l'inevitabile,
con la mitigazione a evitare l'ingestibile »

Filippo Giorgi, climatologo italiano

1.3 / Gli scenari dell'IPCC: dalla situazione europea alle possibili direzioni future globali

Il sesto rapporto IPCC dedica un intero capitolo all'analisi della condizione europea, evidenziando la regione mediterranea come area particolarmente a rischio rispetto alla questione clima.

«Il Mediterraneo è considerato un vero e proprio hot spot del cambiamento climatico: si è riscaldato e continuerà a riscaldarsi più della media mondiale.

Già oggi la temperatura media è di +1,5°C rispetto al livello preindustriale, contro una media globale di +1.1°C». [10]

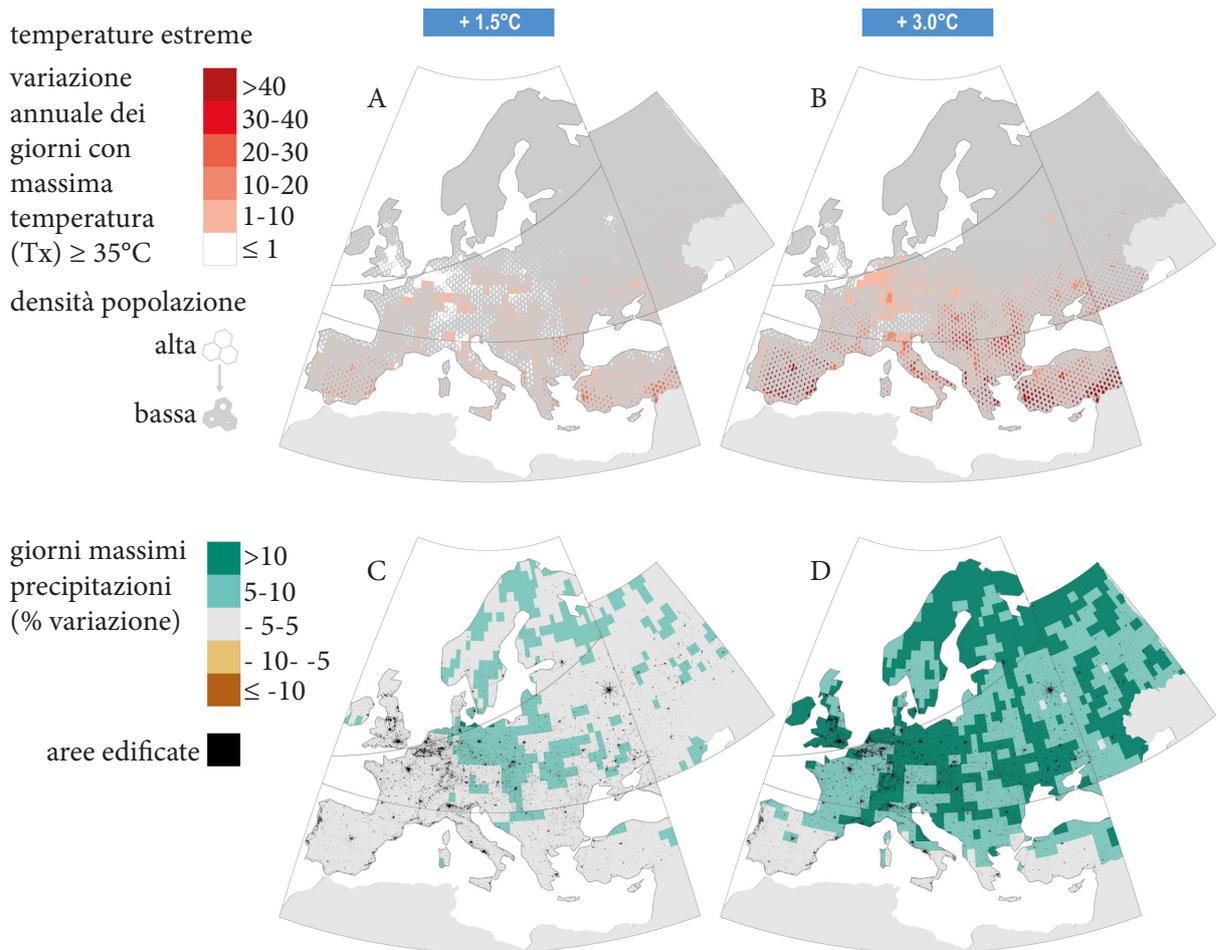
L'IPCC ha identificato 4 categorie di rischi chiave per l'Europa: l'aumento delle temperature con conseguenti ondate di calore, scarsità della risorsa acqua e in correlazione siccità, rischi per l'agricoltura, frequenti ed intense inondazioni causate dall'innalzamento del livello del mare e dal cambiamento delle precipitazioni. [10]

Gli scienziati del gruppo WGII sostengono che la regione mediterranea sarà più arida «per effetto combinato della diminuzione della precipitazione e dell'aumento dell'evapotraspirazione», in parallelo si verificheranno precipitazioni estreme di elevata intensità. [10]

«In tutti gli scenari esaminati, nell'Europa meridionale il numero di giorni con insufficienti risorse idriche è destinato ad incrementare: nel caso, molto probabile, di un aumento a +1,5°C, la scarsità idrica riguarderà il 18% della popolazione, a +2°C la percentuale sale al 54%». [10]

L'immagine riportata in figura 1.4 evidenzia i fattori che influenzano il clima nella fascia europea: sono descritti i cambiamenti in relazione ai rischi climatici per il

riscaldamento globale rispetto a +1,5°C e +3°C, in combinazione con informazioni sull'esposizione attuale e sulla vulnerabilità.



A - B: numero di giorni con temperatura massima superiore ai 35°C

C - D: % giorni di precipitazioni massimi

Figura 1.4 - Climate impacts drivers and socio-ecological vulnerabilities

fonte: IPCC, AR6 - Summary for Policymakers

I dati e i modelli meteorologici sono espliciti: l'aumento di concentrazione di gas serra e il conseguente aumento di temperatura globale superficiale modificano in maniera profonda gli equilibri naturali. [s4]

L'aumento di siccità, precipitazioni estreme dovute all'aumento di umidità, l'innalzamento degli oceani causato dall'aumento di volume delle acque e dallo scioglimento dei ghiacciai, la perdita di specie animali e vegetali definiscono solo alcuni degli scenari che si concretizzeranno in modo definitivo se l'intervento dell'uomo non sarà in grado di attuare le giuste misure per modificare la direzione climatica.

Il rapporto AR6, sempre analizzando il fenomeno Mediterraneo, sostiene che il livello del mare aumenterà in linea con la media globale «raggiungendo valori potenzialmente prossimi al metro nel 2100, in caso di un alto livello di emissioni». [10]

Si evidenzia come anche la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra definirebbe in egual modo uno scenario «irreversibile e progressivo».

A livello globale l'IPCC definisce gli SSP Shared Socioeconomic Pathways, Percorsi Socioeconomici Condivisi che descrivono una raccolta di scenari climatici.

«Non sono previsioni. Sono la rappresentazione di un futuro che guarda alle conseguenze di specifici comportamenti e determinate azioni. Un futuro che viene definito a partire dalle scelte che compiamo nel presente». [s5]

Il grafico illustrato nella figura 1.5 mette in luce, attraverso un diverso gradiente di colore, il livello di rischio per la società e gli ecosistemi in funzione del cambiamento climatico.

Si descrivono 4 diverse categorie di rischio per l'Europa nel caso di scarso o medio adattamento. La rappresentazione inoltre evidenzia il concetto relativo a crisi climatica come crisi di sistema attraverso la descrizione dei diversi ambiti di rischio coinvolti.

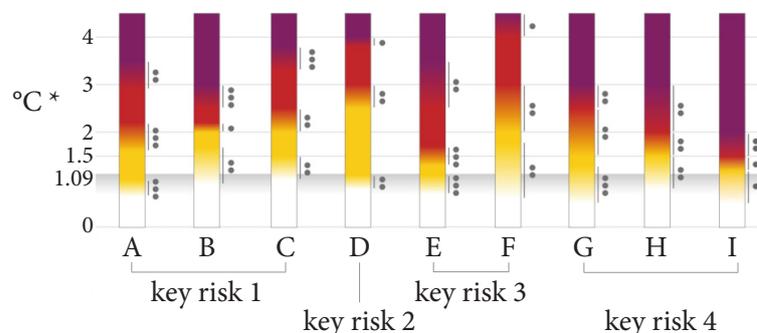


Figura 1.5 - Key risks for Europe under low to medium adaptation

fonte: IPCC, AR6 - Summary for Policymakers

* variazione globale della temperatura dell'aria superficiale rispetto (1850-1900)

Key Risk 1: A - mortalità per aumento delle temperature; B - distruzione ecosistema marino; C - distruzione ecosistema terrestre

Key Risk 2: D - perdite di produzione agricola

Key Risk 3: E - scarsità di acqua in sud Europa; F - scarsità di acqua in Europa occidentale e centrale

Key Risk 4: G - inondazioni fluviali e pluviali; H - inondazioni costiere; I - rischi per il patrimonio culturale e infrastrutture

Gli scienziati del gruppo WGII hanno definito 5 «possibili futuri climatici», con lo scopo di analizzare il cambiamento climatico e le attività di mitigazione e adattamento attraverso l'uso di indicatori socioeconomici, unendo ad essi traiettorie relative alle emissioni di carbonio.

E' possibile affermare che gli scenari hanno il compito di unire e esaminare il cambiamento climatico e in parallelo le politiche di adattamento e mitigazione: si evidenzia quindi nuovamente l'importanza di considerare i due sistemi chiave, il sistema ambientale e il sistema sociale. Il sistema sociale, rappresentato dalla responsabilità dell'uomo e dalle politiche attuate, influisce in modo determinante sul sistema ambientale e l'impatto antropico caratterizza la condizione del territorio. [s5]

I 5 scenari descritti nel report sono i seguenti: SSP1 mondo connotato da crescita sostenibile e uguaglianza, SSP2 mondo «di mezzo» dove i trend seguono ampiamente i loro modelli storici, SSP3 mondo frammentato da «neo-nazionalismi», SSP4 mondo con disuguaglianze sempre crescenti, SSP5 mondo caratterizzato da crescita rapida senza restrizioni nella produzione economica e nell'uso dell'energia. [s5]

SSP1 e SSP5 descrivono gli scenari più ottimistici per l'umanità, con «investimenti sostanziali in istruzione e salute, rapida crescita economica e istituzioni ben funzionanti». In SSP1 prevalgono pratiche sostenibili mentre in SSP5 l'economia è basata su combustibili fossili. [s5]

SSP3 e SSP4 sono gli scenari «più pessimisti» in quanto «la società nel suo complesso investirà poco nell'istruzione o nella salute nei paesi più poveri, con una popolazione in rapida crescita e crescenti disuguaglianze». [s5]

SSP2 descrive lo scenario intermedio, «i modelli di sviluppo storici continuano per tutto il XXI secolo». [s5]

La figura 1.6 riporta un grafico ascisse-ordinate con le diverse combinazioni di sfide per la mitigazione e l'adattamento al cambiamento climatico rispetto ai percorsi socio-economici condivisi (SSP).

«Lo - spazio delle sfide - che deve essere attraversato dagli SSP, diviso in cinque domini con un SSP situato all'interno di ogni dominio, rappresentato da una stella». [s5]

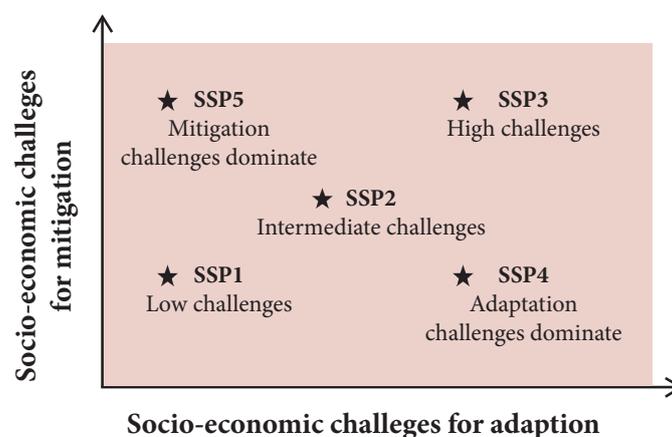


Figura 1.6 - Space for challenges

fonte: ipccitalia.cmcc.it

I grafici in figura 1.7 descrivono gli scenari futuri in relazione alla popolazione globale e il PIL: le principali differenze tra i diversi SSP sono definite dalle ipotesi relative a fattori di domanda come la crescita demografica a livello mondiale, l'accesso all'istruzione, l'urbanizzazione, la crescita economica, la disponibilità di risorse, lo sviluppo tecnologico e i cambiamenti dello stile di vita. [14]

Gli studiosi hanno utilizzato modelli demografici basati su ipotesi di fertilità, mortalità, immigrazione e istruzione future per definire diversi scenari rispetto a ciascun SSP. Il livello di popolazione più basso si registra in SSP1 e SSP5, viceversa SSP2 e SSP4 sono più moderati e il livello di popolazione raggiunge un picco tra il 2070 e il 2080. [14]

Tutti gli scenari SSP prevedono una crescita notevole dell'economia globale, con un PIL globale nel 2100 superiore da quattro a dieci volte quello del 2010.

SSP5 definisce la crescita più alta del PIL, con rapido sviluppo e convergenza dei paesi, SSP3 descrive invece la crescita del PIL più bassa, lenta a svilupparsi e frammentata. [14]

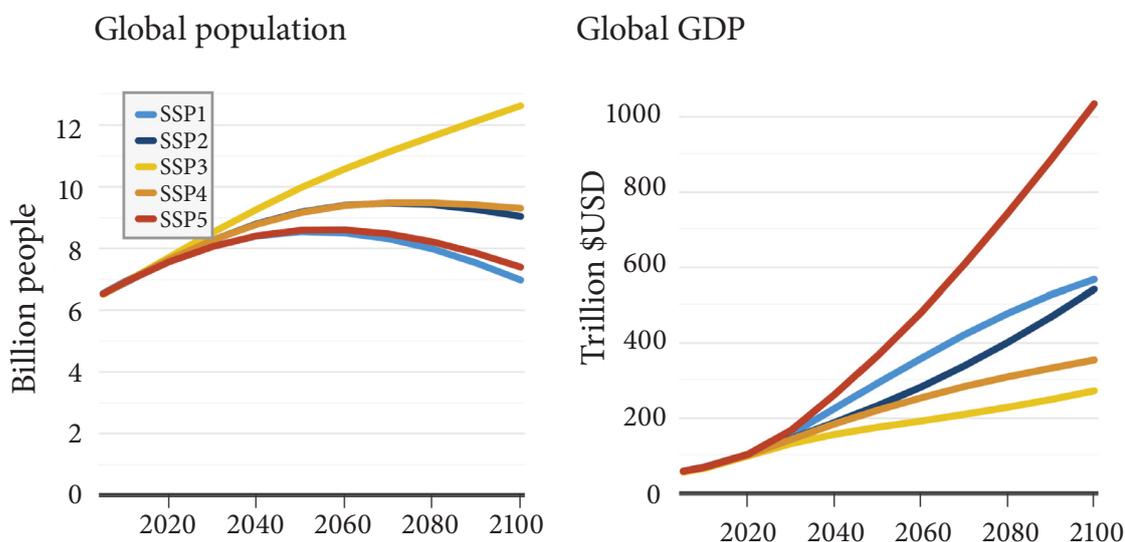


Figura 1.7 - Global population and Global GDP

fonte: carbonbrief.org

Nei grafici riportati in figura 1.8 si evidenzia come i ricercatori attraverso l'analisi di sei modelli di valutazione integrata (IAM) hanno aggiunto una dimensione sociale al modello energetico, definendo come il fattore popolazione, la crescita economica e l'utilizzo di energia influenzano il clima fisico. [14]

«Sulla base di fattori socioeconomici, IAM crea scenari su come le emissioni di gas serra cambieranno in futuro e su come cambieranno l'uso di energia, la produzione e l'attività economica per raggiungere gli obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici». [14]

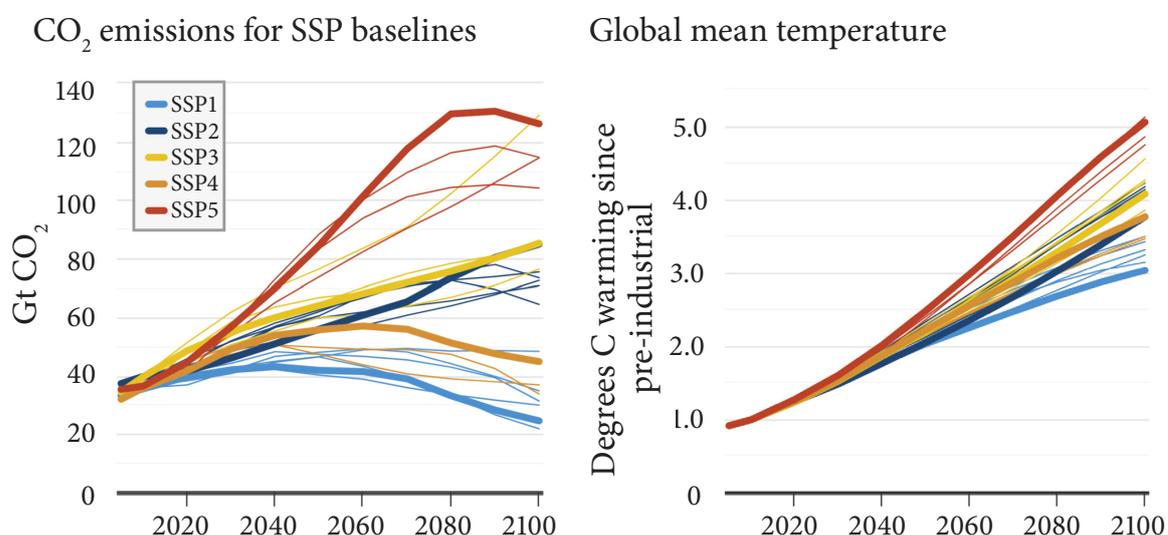


Figura 1.8 - CO₂ emissions for SSP baselines and Global mean temperature

fonte: carbonbrief.org

Lo scenario SSP1 mostra che, in assenza di politiche specifiche climatiche, le emissioni registreranno un picco nell'arco temporale 2040-2060, di conseguenza il riscaldamento nel 2100 è di +3,3 °C. SSP2 definisce un aumento di emissioni «moderato» fino alla fine del secolo, analizzando invece la temperatura media globale di SSP3 è stimato nel 2100 tra i +3,9 °C e + 4,6°C.

Lo scenario SSP4 descrive emissioni relativamente basse grazie al rapido progresso tecnologico delle fonti con basse emissioni di carbonio, infine SSP5 descrive emissioni più elevate rispetto agli altri scenari con un riscaldamento globale compreso tra + 4,7 °C e + 5,1°C. [14]

2 / LE POLITICHE VERSO LA NEUTRALITA' CLIMATICA

2.1 / Cause e settori che influenzano il cambiamento climatico: lo scenario europeo

Il metodo IPCC afferma che i gas serra assorbendo la radiazione infrarossa intrappolano calore nell'atmosfera. Tale effetto significa che le emissioni di gas causate dall'attività umana generano il riscaldamento globale. [s6]

La sigla GHG⁵ indica i gas che generano l'effetto serra: [s7]

- anidride carbonica (CO₂)
- metano (CH₄)
- protossido di azoto (N₂O)
- idrofluorocarburi (HFC)
- perfluorocarburi (PFC)
- esafluoruro di zolfo (SF₆)

All'interno del Protocollo di Kyoto⁶ si evidenzia che il vapore acqueo, «responsabile maggiore all'effetto serra naturale», non viene considerato come gas serra in quanto non è direttamente generato dall'attività umana. [15]

A livello globale i governi sono tenuti a riferire alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite (UNFCCC) gli inventari nazionali, le stime delle emissioni e degli assorbimenti relativi ai gas effetto serra. [s6]

Insieme al Protocollo di Kyoto, l'Accordo di Parigi rappresenta una tra le principali misure adottate relativamente al cambiamento climatico.

«L'accordo di Parigi sulla lotta al cambiamento climatico è il primo accordo globale sul clima legalmente vincolante e universale della storia». [s8]

⁵ GHG indica Greenhouse Gases, i gas che causano l'effetto serra

⁶ Protocollo di Kyoto (1997) primo trattato al mondo sulla riduzione delle emissioni di gas serra

Adottato nel dicembre 2015 l'Accordo di Parigi pone come obiettivo il mantenimento dell'aumento di temperatura globale sotto i 2°C rispetto ai livelli preindustriali e allo stesso tempo limitare l'incremento a 1,5°C.

I limiti posti dall'Accordo risultano fondamentali quando, nel novembre 2019, il Parlamento europeo dichiara l'emergenza climatica a livello globale: il superamento del limite soglia pari a 1,5°C definisce conseguenze irreversibili e inevitabili. [s6]

Tra le cause naturali del surriscaldamento globale l'IPCC afferma che solo il 5% del cambiamento climatico può essere ricondotto a cause naturali come l'attività solare, il 95% è per responsabilità dell'attività dell'uomo.

L'European Environment Agency⁷ ha definito un rapporto che analizza il progresso e gli scenari futuri previsti per limitare l'incremento del cambiamento climatico. Tale rapporto è stato redatto sulla base dei dati comunicati dai 27 stati membri dell'Unione Europea (UE-27), si includono anche Islanda e Norvegia. [16]

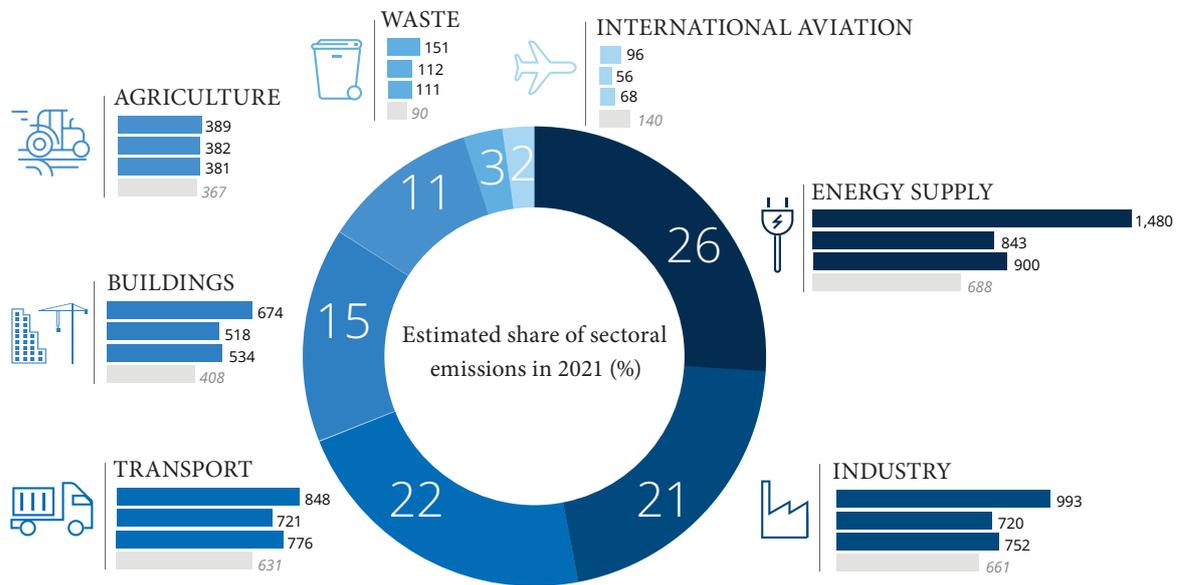
Si evidenziano come misure chiave, insieme alla riduzione delle emissioni di gas serra, l'uso di energie rinnovabili per contribuire ad una migliore efficienza energetica.

I dati riportati in figura 2.1 evidenziano l'andamento delle emissioni della quota di CO₂ per i settori influenti rispetto al cambiamento climatico. Si sottolinea l'importante incidenza del settore energetico il quale è responsabile della quota maggiore all'interno delle emissioni in UE e parallelamente a questo dato è significativo indicare il -43% di emissioni dal 2005 al 2020.

Un altro dato rilevante riportato è la percentuale di fonti rinnovabili nello stesso settore, dal 2005 al 2020 tale quota ha registrato un incremento del 21%.

L'EEA specifica che i progressi e il miglioramento relativo alle «prestazioni ambientali» sono dovuti, prevalentemente, alle politiche europee attuate, le quali stabiliscono «valori limite di emissione giuridicamente vincolanti». [17]

⁷ Agenzia europea dell'ambiente (EEA)



Emissions (Mt CO₂)

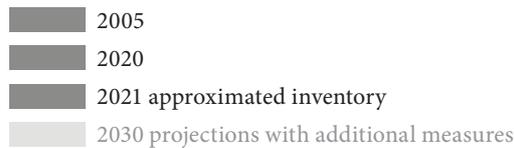


Figura 2.1 - Sectoral trends and progress towards achieving 2020 - 2030 targets in the UE-27

fonte: EEA Report, «Trends and projections in Europe 2022», European Environment Agency, 2022.

«La quantità di combustibili fossili utilizzati è diminuita del 35%, poiché la produzione di energia si sposta verso fonti rispettose del clima e il carbone non è più il combustibile più utilizzato nei grandi impianti di combustione in Europa». [17]

Esaminando il settore delle costruzioni esso incide con una quota pari al 15% sul totale delle emissioni dell'UE-27 nel 2021. I dati riportati dalla fonte EEA sottolineano che le emissioni da teleriscaldamento, energia elettrica e i consumi degli edifici stessi sono riportati nella quota del settore energetico. All'interno del 15% rientra l'utilizzo di fonti rinnovabili per il riscaldamento e per il raffrescamento, tra il 2005 e il 2020 l'incidenza di tale parametro è aumentato di 0,7 punti percentuali all'anno in UE-27, fino a raggiungere il 23% nel 2020.

Il report sottolinea che la diffusione delle pompe di calore, seppur in modo lento, è in forte aumento: l'uso di tale sistema, oltre ad essere fondamentale per incrementare l'uso delle fonti rinnovabili nel settore delle costruzioni, è utile per il raggiungimento dell'obiettivo di consumo energetico posto dall'UE. [16]

Evidenziando come misure chiave la riduzione delle emissioni di gas serra, l'utilizzo e lo sviluppo di energie rinnovabili e il miglioramento dell'efficienza energetica, risulta fondamentale monitorare e modificare il sistema verso politiche green, analizzando e studiando i diversi criteri e metodi da applicare in ogni settore.

2.2 / Il ruolo delle politiche in atto: il Green Deal come obiettivo

Il comunicato stampa attraverso il quale il Parlamento europeo dichiara, nel novembre 2019, l'emergenza climatica, rappresenta in modo chiaro il peso e la rilevanza della crisi a livello globale.

Lo scopo centrale è definito dalla «neutralità climatica»: il Green Deal descrive l'insieme di iniziative mirate per dirigere l'UE verso la transizione verde «con il fine ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050». [18]

Il Green Deal europeo specifica tra gli obiettivi principali la trasformazione dell'UE «in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva», garantendo inoltre i seguenti scenari: [s7]

- nel 2050 l'obiettivo è raggiungere la neutralità delle emissioni di gas a effetto serra
- la crescita economica non sia connessa dall'uso delle risorse
- inclusione della totale società e di ciascun luogo

«I cambiamenti climatici sono la sfida più grande della nostra epoca, ma rappresentano anche un'opportunità per costruire un nuovo modello economico». [s9]

Il Green Deal europeo descrive le linee guida per poter concretizzare un nuovo sistema economico creando nuove opportunità per l'innovazione, investimenti e occupazione. [s9]

L' accordo verde evidenzia gli aspetti fondamentali sintetizzabili nei seguenti punti:

- riduzione delle emissioni
- promuovere la creazione di posti di lavoro e favorire la crescita economica
- contrastare la povertà energetica
- diminuire la dipendenza dall'energia esterna non rinnovabile
- promuovere il miglioramento della salute e del benessere delle persone

Lo schema in figura 2.2 sintetizza i «dati essenziali» relativi al Green Deal:

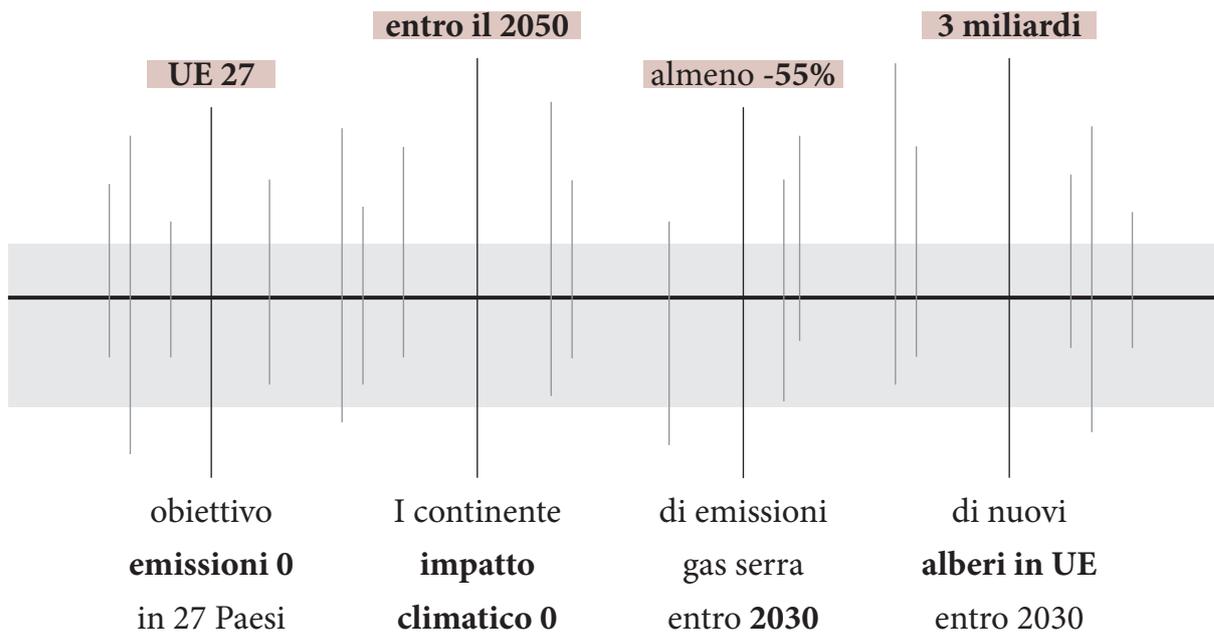


Figura 2.2 - Dati essenziali Green Deal

fonte: Commissione europea, «Un Green Deal europeo [...]», Direzione generale della Comunicazione.

I punti in figura 2.3 descrivono le tappe fondamentali del Green Deal europeo e le prospettive future per il 2030 e 2050.



Figura 2.3 - Tappe fondamentali Green Deal e prospettive future

fonte: Commissione europea, «[...]il Green Deal europeo», Direzione generale della Comunicazione.

2.3 / Le energie rinnovabili protagoniste della decarbonizzazione

Il processo di decarbonizzazione assume un ruolo sempre più rilevante nella transizione ecologica: le fonti energetiche rinnovabili rappresentano la soluzione, dal punto di vista sostenibile, più favorevole per concretizzare l'obiettivo di neutralità climatica entro il 2050 definito dagli accordi del Green Deal.

«Il passaggio dal fossile al rinnovabile, punto chiave nella lotta al cambiamento climatico e nella direzione della sostenibilità, rappresenta un cambio di paradigma».[s10]

Il percorso che pone come obiettivo chiave la messa in atto della «neutralizzazione delle emissioni di gas serra» può attuarsi attraverso due principali soluzioni: [s11]

- «l'utilizzo del gas naturale e del biogas al posto del carbone e del petrolio»
- «l'utilizzo di fonti rinnovabili per produrre energia green»

Il progetto più efficace e proficuo in termini di sostenibilità è determinato dall'utilizzo di fonti rinnovabili, il termine stesso indica la capacità di tali sistemi di autogenerarsi e di non essere soggetti quindi ad esaurimento, definiscono uno «sfruttamento sostenibile», senza condizionare in modo negativo sulla vita delle generazioni future. [s11]

Le principali forme di energia che rispettano le risorse che derivano dalla natura, non si esauriscono e hanno un impatto ambientale minimo sono le seguenti: l'energia solare, l'energia eolica, l'energia geotermica, l'energia delle biomasse, l'energia idroelettrica e marina. [s12]

Il nostro Paese si posiziona al terzo posto a livello europeo per la produzione di energia rinnovabile. [s13]

Secondo gli ultimi report il campo dell'energia idroelettrica ha un'incidenza pari al 42% del totale della quota di FER⁸, seguito dall'energia solare applicata ai dispositivi

⁸ Fonti di energia rinnovabili

fotovoltaici che definiscono il 20% sul complessivo. Le bioenergie, che occupano una quota del 17%, sono seguite dal sistema eolico che mostra una prospettiva di crescita più solida con un'incidenza pari al 16%, infine la componente geotermica determina il 5%. [s13]

In Italia un ruolo fondamentale è definito dal settore termico, all'interno di quest'ultimo la quota rinnovabile è pari al 19,2% mentre il 64% è rappresentato dalle bioenergie alle quali si aggiunge il prodotto derivato dalle pompe di calore. [s13]

Questi dati rendono l'Italia un paese all'avanguardia a livello europeo: il nostro Paese genera «poco più del 10% del totale di rinnovabili a livello continentale». [s13]

Le fonti di energia rinnovabile rappresentano il futuro in termini di sostenibilità e transizione ecologica: nel 2009 l'UE ha stabilito come obiettivo una quota pari al 20% del consumo energetico derivante da fonti rinnovabili entro il 2020, nel 2018 tale percentuale è stata imposta pari al 32% entro il 2030 e infine nel luglio 2021 l'obiettivo è stato alzato nuovamente definendo il 40% entro il 2030. [19]

«Dopo l'invasione russa dell'Ucraina e la conseguente crisi energetica, l'UE ha deciso di ridurre rapidamente la sua dipendenza dai combustibili fossili russi prima del 2030 accelerando la transizione verso l'energia pulita». [19]

Sostenibilità, transizione energetica, decarbonizzazione, energie rinnovabili e impatto ambientale sono le parole chiave che caratterizzano il dibattito relativo alla crisi climatica in ogni ambito: dall'industria ai trasporti, dall'agricoltura al settore energetico, anche il mondo delle costruzioni ha un'importante e decisiva influenza rispetto all'emergenza climatica.

Il settore delle costruzioni, rispetto alla crisi climatica in atto, ha sviluppato e continua a sviluppare sistemi sostenibili e soluzioni che uniscono l'aspetto ambientale e sostenibile con la qualità compositiva e l'innovazione.

Il progetto architettonico deve svilupparsi in modo coordinato e integrato al progetto sostenibile.

Rispetto allo studio e all'analisi dei trends relativi all'utilizzo di energia rinnovabile il grafico in figura 2.4 riporta l'attuale obiettivo 2030 adottato dalla direttiva sulle energie rinnovabili (2018/2001/UE), la quale prevede che questo sia pari al 32% del consumo finale lordo di energia (FER). L'obiettivo proposto dal pacchetto «Fit for 55» risulta più ambizioso in quanto definisce la quota RES⁹ pari al 40% entro il 2030, infine il piano REPowerEU propone un obiettivo di una quota di FER del 45% entro il 2030 (EC, 2022c). [16]

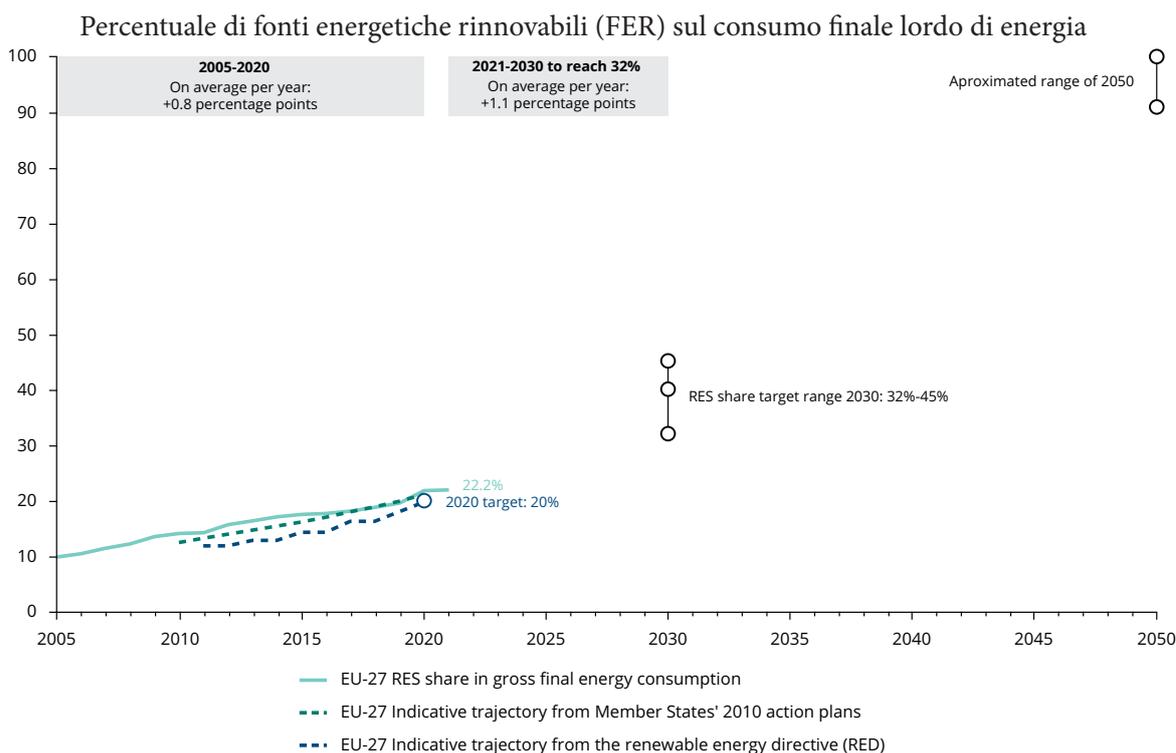


Figura 2.4 - Historical trends and outlook for renewable energy shares

fonte: EEA Report, «Trends and projections in Europe 2022», European Environment Agency, 2022.

⁹ Renewable energy source

2.4 / Adattamento al cambiamento climatico: la responsabilità dello spazio costruito

Il settore delle costruzioni, come analizzato dal report EEA, si trova al quarto posto all'interno delle tendenze settoriali con un'incidenza stimata pari al 15% nell'anno 2021.

In parallelo ai temi e alle emergenze relative alla problematica climatica, ogni settore ha esposto e continua a esporre soluzioni per limitare le emissioni e per definire linee guida sostenibili coerenti con le normative e gli accordi dell'UE.

L'ambito delle costruzioni ricopre un ruolo fondamentale e cruciale all'interno del dibattito climatico, le ultime disposizioni riguardano il ruolo chiave degli edifici nella transizione energetica.

Il tema delle ristrutturazioni del patrimonio edilizio rappresenta una delle soluzioni cardine: «Renovation Wave» è la strategia europea per favorire la riqualificazione energetica degli edifici esistenti». [20]

Tale manovra risulta fondamentale rispetto alle normative UE con disposizioni e parametri aggiornati relativi al rendimento energetico e alla decarbonizzazione degli edifici entro il 2050.

I dati riportano che nel nostro Paese, ma in generale in Europa, la percentuale di edifici inefficienti ed altamente energivori è elevata perché costruiti decenni fa, periodo storico durante il quale il tema dell'energia e della sostenibilità non qualificava la politica delle costruzioni. [20]

«Secondo i dati dell'Unione Europea, infatti, più del 75% degli edifici europei è inefficiente e, quindi, responsabile di circa dei due terzi delle emissioni di CO₂ prodotte nel continente, ma nonostante ciò, quelli sottoposti a interventi di riqualificazione energetica sono solo l'1% del totale che andrebbe ristrutturato». [20]

Nell'ottobre del 2020 la Commissione europea ha pubblicato la «Renovation Wave Strategy»: si pongono come obiettivi, oltre all'incremento del rendimento energetico, la riduzione di emissioni di gas a effetto serra, la promozione del riutilizzo e del riciclaggio di materiali e il miglioramento della qualità di vita. [s14]

L'UE per promuovere il cambiamento favorisce l'accesso a forme di finanziamento, come «Renovate» e «Power Up», che sostengono il «mercato dei materiali per l'edilizia sostenibile». [20]

Questi interventi, come sottolineato, prevedono ristrutturazioni di edifici esistenti non efficienti, intervenendo sull'involucro edilizio e sul sistema degli impianti, favorendo l'uso di fonti energetiche rinnovabili. [20]

«Si parla di 35 milioni di edifici che potrebbero essere riqualificati entro il 2030 [...] Alcuni passi importanti sono già stati fatti considerando che oggi i nuovi edifici consumano la metà dell'energia di quelli realizzati più di 20 anni fa; l'85 % degli edifici dell'UE ha però più di 20 anni e quindi necessita di interventi di ristrutturazione». [20]

Per favorire e sostenere il tema della riqualificazione energetica, insieme a «Renovation Wave Strategy», la Commissione europea ha adottato un pacchetto di riforme e di regolamenti economici definito «Fit for 55». [21]

«Pronti per il 55%» definisce linee guida coerenti con gli obiettivi climatici imposti e definisce i seguenti obiettivi: [21]

- assicurare e promuovere una transizione giusta e socialmente equa
- preservare e potenziare l'innovazione e la competitività dell'industria dell'UE, con la garanzia delle condizioni di parità per gli operatori economici dei paesi terzi
- confermare la leadership dell'UE nella lotta globale contro i cambiamenti climatici

Lo schema in figura 2.5 riassume le principali azioni incluse nel pacchetto «Fit for 55».

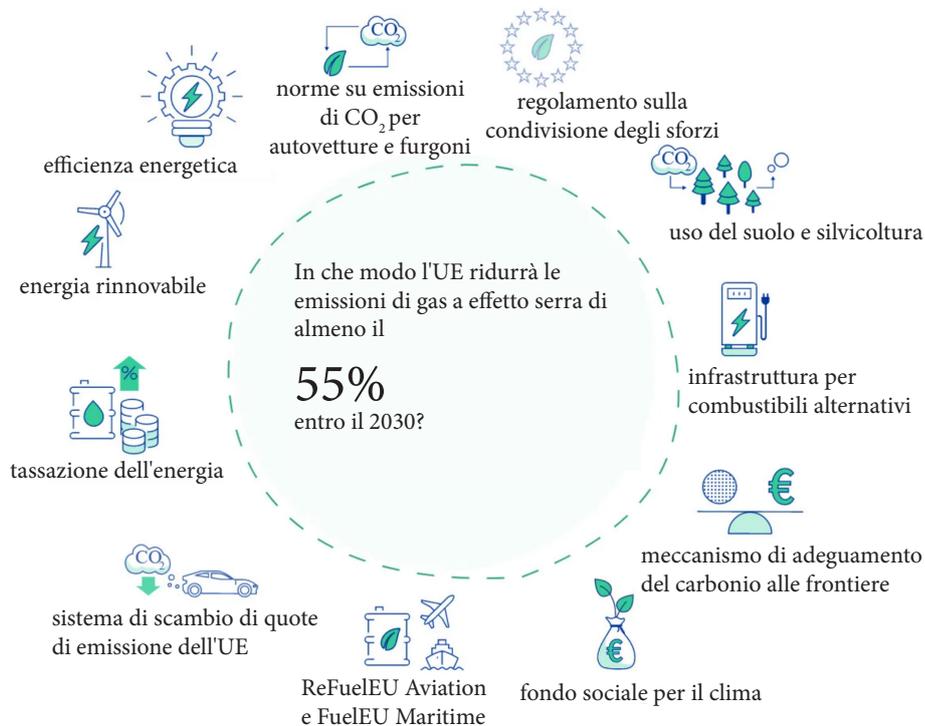


Figura 2.5 - Fit for 55

fonte: consilium.europa.eu

La direttiva EPBD, «Energy Performance of Building Directive», introduce il concetto di «edificio a emissioni zero», il quale è applicabile a tutti gli edifici di nuova costruzione dal 2027 e a tutti gli edifici ristrutturati dal 2030. [22]

Con l'approvazione da parte del Parlamento europeo della direttiva «Case Green», «si conferma quanto già approvato dalla Commissione per l'Industria, la Ricerca e l'Energia del Parlamento Europeo», vengono seguite le seguenti disposizioni: [23]

- «[...] dal 2026 i nuovi edifici di proprietà pubblica dovranno essere a emissioni 0; la scadenza per tutti gli altri edifici è al 2028»
- «entro il 2028 tutti gli edifici in cui sia possibile, da un punto di vista economico e tecnologico, dovranno dotarsi di tecnologie solari. La scadenza per gli edifici residenziali sottoposti a ristrutturazioni importanti è il 2032»

- «entro il 2030 gli edifici residenziali dovranno raggiungere la classe E (2027 per quelli pubblici) ed entro il 2033 la D (2030 per quelli pubblici)»
- «sono esclusi da questi obblighi i monumenti e i singoli paesi potranno presentare gli edifici dal significativo valore storico o architettonico [...] Sono previste deroghe anche per particolari categorie di edifici residenziali»
- «vietati i sistemi di riscaldamento a combustibili fossili dal 2035»

Un'altra importante e decisiva direttiva è rappresentata dall'iniziativa urbana europea, la quale propone 50 milioni di euro per sostenere l'innovazione urbana e uno sviluppo urbano sostenibile: questo piano è stato nominato «nuovo Bauhaus europeo». [24]

Il piano è rivolto a progetti che riguardano la trasformazione nelle città e, attraverso questo strumento, la generazione di nuovi investimenti. I progetti proposti inoltre devono seguire i seguenti temi: [24]

- promuovere la costruzione e la ristrutturazione di edifici con una prospettiva circolare e l'obiettivo di raggiungere la neutralità in termini di emissioni di carbonio
- conservare e valorizzare il patrimonio culturale
- adattare e modificare edifici per renderli economicamente accessibili
- riqualificare gli spazi urbani

Dall'analisi delle diverse strategie e direttive a livello europeo è evidente come «la riqualificazione energetica degli edifici esistenti rappresenti un ruolo chiave nella transizione energetica». [23]

Il tema della riqualificazione a 360° è esso stesso uno strumento sostenibile, unito a innovazioni tecnologiche che limitino l'impatto ambientale ed in particolare all'uso di sistemi che sfruttano energie rinnovabili.

A livello nazionale il decreto legislativo 199/2021 determina l'entrata in vigore delle nuove disposizioni per la promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. [22]

Il provvedimento in esame determina l'obbligo di progettazione attraverso l'uso di impianti alimentati da fonti rinnovabili per i consumi relativi alla produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale ed estiva. Un aspetto chiave è determinato dalla quota di FER: «per gli edifici di nuova costruzione e oggetto di ristrutturazioni rilevanti» è obbligatorio che la quota di fonti rinnovabili sia almeno il 60% dei consumi previsti per la produzione di acqua calda sanitaria e anche la somma dei consumi per la climatizzazione invernale ed estiva e la produzione di acqua calda sanitaria sia anche essa almeno del 60%. [25]

In questa casistica non rientrano gli edifici collegati ad una rete di teleriscaldamento e/o teleraffrescamento. Per gli edifici pubblici l'obbligo FER è del 65%. [25]

Le soluzioni per produrre energia rinnovabile e per coprire la corretta quota FER sono diverse: per la produzione di ACS, per il riscaldamento e il raffrescamento l'approccio migliore è determinato da soluzioni tra loro integrate. [26]

In sostituzione alla caldaia tradizionale a gas, è possibile installare una pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria e per la climatizzazione dell'edificio, la quale deve essere scelta rispetto alle caratteristiche ed esigenze specifiche della struttura. Tale impianto può essere integrato con un sistema fotovoltaico oppure con pannelli solari termici: nella prima soluzione citata l'energia prodotta dai pannelli solari compensa quella richiesta dalla pompa di calore, nella seconda soluzione invece la quota di energia richiesta all'impianto installato si riduce. Sistemi alternativi sono rappresentati da caldaie a biomassa o l'allacciamento a una rete di teleriscaldamento. [26]

L'obiettivo del decreto legislativo 199/2021 è di raggiungere celermente la crescita sostenibile del nostro Paese, la percentuale di uso di fonti energetiche rinnovabili è aumentata nel corso degli anni.

I dati riportati in figura 2.6 descrivono le diverse percentuali di copertura dei consumi con fonti rinnovabili nel tempo: [26]

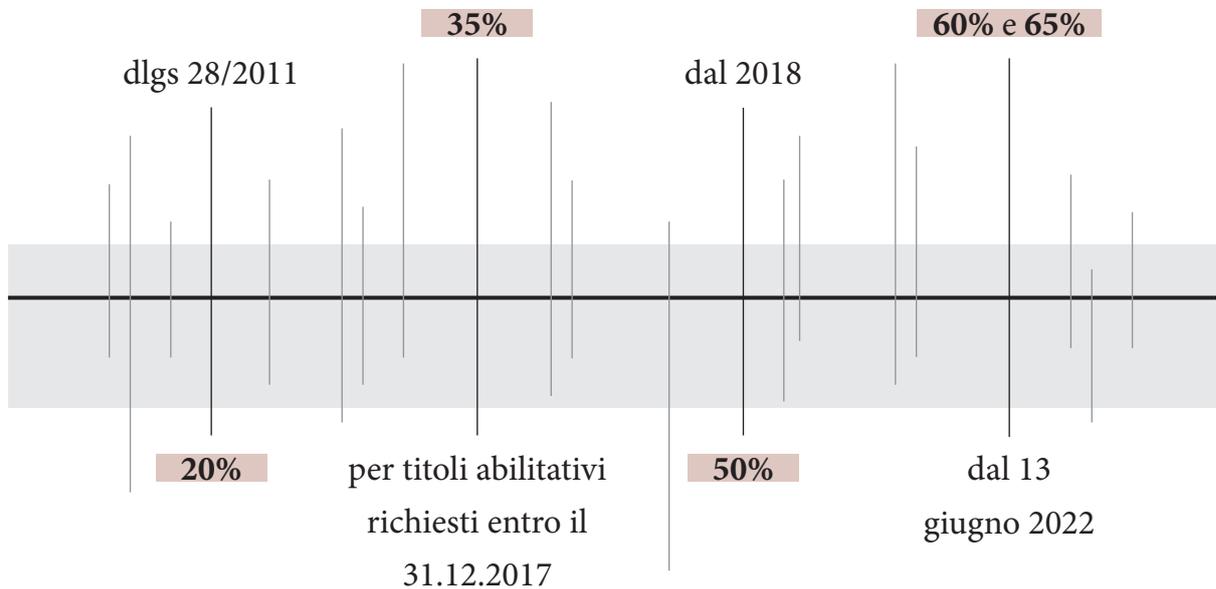


Figura 2.6 - Percentuale di copertura dei consumi con fonti rinnovabili nel tempo

fonte: biblus.acca.it/decreto-fonti-rinnovabili

Questo studio vuole porre eguale importanza, rispetto agli edifici con riqualificazione energetica, per gli edifici che nascono e si sviluppano in modo sostenibile.

Si pone come obiettivo principale l'analisi di edifici che, già nella fase embrionale di progetto, tengono conto delle risorse disponibili senza arrecare danno al contesto, integrano il programma nel tessuto urbano sostenendo una progettazione orientata all'efficienza energetica unendo materiali e tecniche sostenibili, promuovendo il risparmio energetico e la riduzione dei consumi.

La figura dell'architetto deve saper far interagire le caratteristiche prestazionali con le qualità compositive ed estetiche che descrivono il carattere di un edificio.

Rispetto alle diverse soluzioni citate, la tecnologia fotovoltaica rappresenta una tra le più valide soluzioni per definire progetti efficienti e sostenibili in linea con le norme nazionali e le linee guida a livello europeo: il sistema fotovoltaico può essere considerato come un concreto elemento di progetto.

3 / IL SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 / Etimologia del termine

L'osservazione del fenomeno inerente alla conversione della luce in elettricità risale al 1839 quando il fisico Alexandre Edmond Becquerel, durante alcune prove in laboratorio su elettrodi immersi in una soluzione conduttrice, nota che, se esposti alla luce solare, erano in grado di generare un minimo flusso di corrente. [27]

Il fenomeno osservato dal fisico francese prende il nome di «effetto fotovoltaico», il termine deriva dal greco photos, cioè luce e dall'aggettivo voltaico, utilizzato per indicare l'energia elettrica e coniato in onore di Alessandro Volta. [27]

3.2 / Grandezze e unità di misura

Irradianza o radianza - I [W/m^2]

Energia radiante che nell'unità di tempo raggiunge l'unità di superficie. [28]

La densità di flusso termico ricevuta dalla superficie terrestre, al di fuori dell'atmosfera, è pari a $1368 W/m^2$, valore chiamato costante solare. [28]

Della quota totale dell'energia raggiante emessa dal Sole, solo una percentuale raggiunge il suolo ed è possibile stimarla in $7,5 \times 10^{11}$ TJ all'anno. [28]

Radiazione solare globale [W/m^2]

L'irradianza solare totale I_t incidente su una superficie è data alla somma della radiazione solare indiretta I_D , della radiazione solare diffusa dalla volta celeste I_d e della radiazione solare riflessa dalle superfici circostanti I_r . [28]

$$I_t = I_D + I_d + I_r$$

L'irradianza diretta generica superficie I_D è il prodotto dell'irradianza diretta normale I_{DN} e del coseno dell'angolo di incidenza θ tra la direzione dei raggi solari e la normale (perpendicolare) alla superficie: [28]

$$I_t = I_{DN} \cos\theta + I_d + I_r$$

Irraggiamento - H [kWh/m²] [MJ/m²]

Energia radiante che in un determinato tempo raggiunge l'unità di superficie.

Il valore di irraggiamento medio di 1390 kWh/m² all'anno deriva da una distribuzione diversa a seconda delle zone geografiche. [28]

Potenza di picco [kWp]

Un modulo fotovoltaico si definisce rispetto alla sua potenza di picco, cioè la potenza elettrica in grado di sviluppare nelle seguenti condizioni: [28]

- irradianza solare pari a 1 kW/m²
- massa d'aria pari a 1,5
- temperatura dell'aria pari a 25°C

Per sviluppare 1 kWp sono necessari dai 5 ai 12 m² di superficie fotovoltaica.

Rendimento [%]

Riporta la quantità di energia solare che il pannello PV converte in energia elettrica per unità di superficie, considerato sempre come massimo rendimento alle condizioni STC (Standard test condition: l'irradianza solare pari a 1 kW/m², la massa d'aria pari a 1,5 e la temperatura dell'aria pari a 25°C). [29]

Il rendimento si calcola sapendo la potenza di picco e le dimensioni del pannello PV: [2]

$$\eta = P_{\max} / 1000 \times A$$

I termini riportati sono i seguenti:

- P_{\max} è la potenza di picco espressa in W
- 1000 è l'irraggiamento di 1000 W/m²
- A è la superficie del pannello in m²

Temperatura [°C]

La voce del vocabolario Treccani riporta: «grandezza fisica che determina gli scambi spontanei di calore tra corpi diversi, il calore spontaneamente fluendo sempre dal corpo a temperatura superiore a quello a temperatura inferiore». [30]

Esiste una dipendenza tra rendimento e temperatura: ad un aumento di temperatura delle celle rispetto alle condizioni standard si ha un incremento di temperatura di circa $0,4\%/^{\circ}\text{C}$ per celle in silicio mono/poli cristallino. Altri fattori influenti sono la velocità del vento, l'irraggiamento e le caratteristiche di installazione, in quanto agiscono sulla temperatura di equilibrio. [28]

Autoconsumo

Descrive la percentuale di energia prodotta da pannelli PV ed effettivamente utilizzata dalla rete elettrica dell'edificio. [31]

Angolo di tilt - angolo di inclinazione

E' l'angolo che il dispositivo fotovoltaico forma rispetto al piano orizzontale, questo è riportato nella normativa IEC/TS 61836. [32]

L'angolo di tilt ottimale alle latitudini del centro Europa, per massimizzare la produzione energetica, è pari a circa 30° - 35° rispetto al piano orizzontale.

La figura 3.1 riporta α come angolo di tilt.

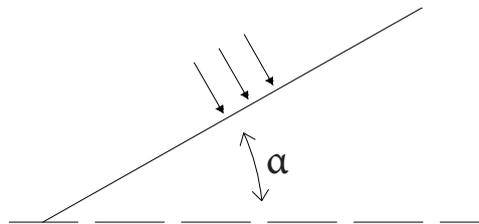


Figura 3.1 - Rappresentazione angolo di tilt (α)

fonte: biblus.acca.it

Angolo azimutale (orientamento)

Definisce l'angolo di orientamento del piano del dispositivo fotovoltaico rispetto al meridiano corrispondente. [32]

«Esso misura lo scostamento del piano rispetto all' orientazione verso Sud (per i siti nell'emisfero terrestre settentrionale) o verso Nord (per i siti nell'emisfero meridionale). Valori positivi dell'angolo di azimut indicano un orientamento verso ovest e valori negativi indicano un orientamento verso est (CEI EN 61194)». [32]

Al crescere della rotazione in senso orario il valore dell'angolo aumenta: [32]

- l'azimut 0° indica il pannello rivolto verso sud
- l'azimut 90° indica il pannello rivolto verso ovest
- l'azimut 180° indica il pannello rivolto verso nord

Definizione e descrizione unità di misura:

Watt [W]

Il watt è l'unità di misura nel Sistema Internazionale, esprime la quantità di energia in Joule (J) consumata o generata in un secondo. [33]

«In termini elettrici, 1 Watt corrisponde alla potenza generata da 1 Ampere di corrente che scorre sotto l'influsso di un potenziale di 1 Volt (V)». [34]

$$W = J/s = A \times V$$

Chilowattora [kWh]

Il chilowattora in fisica definisce l'unità di misura dell'energia elettrica: 1 kWh equivale al lavoro compiuto da una macchina che produce una potenza costante di 1 kW (1000 W) in un'ora. [s15]

E' importante sottolineare la differenza tra kW e kWh: il kW è l'unità di misura della potenza mentre il kWh è l'unità di misura dell'energia.

Riportando un esempio pratico, se un impianto fotovoltaico è da 3 kW significa che i pannelli in esame producono al massimo 3 kW di potenza istantanea: «il kW indica la potenza istantanea generata dal pannello fotovoltaico in un determinato momento, mentre il kWh indica l'energia prodotta dai pannelli». [s15]

Generalmente quando si definisce l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico si fa riferimento a kilowattora all'anno (kWh/anno), ovvero quanti kWh di potenza genera l'impianto in un anno. [s15]

$$\text{kWh} = \text{kW} \times \text{h}$$

Watt di picco [Wp]

«La potenza di picco o potenza nominale di un impianto fotovoltaico è la potenza elettrica massima che l'impianto PV è in grado di produrre nelle condizioni standard», in condizioni STC. [s16]

In condizioni pratiche per definire la potenza di picco di un intero impianto è necessario sommare tutte le singole potenze di picco di ogni modulo che compone il sistema.

$$\text{Wp} / \text{m}^2$$

3.3 / Il principio di funzionamento

La tecnologia fotovoltaica permette di trasformare direttamente l'energia associata alla radiazione solare in energia elettrica. Essa sfrutta l'effetto fotovoltaico che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori, come il silicio che, se opportunamente trattati ed interfacciati, se sottoposti alla radiazione solare, sono in grado di generare elettricità.

Alla base della trasformazione dell'energia solare in energia elettrica si pone «l'effetto fotovoltaico»: il componente fondamentale risulta essere la cella fotovoltaica che, quando viene colpita dai raggi solari, converte parte dell'energia che costituisce la radiazione e la trasforma in elettricità. [28]

«Il principio fisico alla base della produzione di energia in un impianto solare è sempre lo stesso: la luce del sole colpisce la cella solare, attivando gli elettroni del silicio, che iniziano a scorrere nel circuito producendo così una corrente elettrica». [s17]

Il parametro efficienza dipende dai trattamenti chimico-fisici subiti dal silicio e dal tipo di fabbricazione, rispetto a ciò è possibile ottenere valori sempre più elevati di conversione, cioè aumenta la percentuale di luce solare convertita in modo effettivo in elettricità dall'impianto. [s17]

La figura 3.2 evidenzia come fotoni dotati di sufficiente energia inducono il movimento di elettroni, quest'ultimo si traduce in flusso di cariche nel circuito.

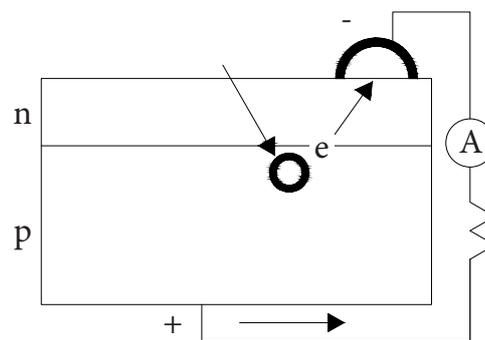


Figura 3.2 - Schema di funzionamento della cella solare

fonte: Enrico Fabrizio, «L'energia solare», Corso di L.M. in ACC, Politecnico di Torino, 2022.

3.4 / I componenti dell'impianto

Cella

La cella è l'elemento base del sistema fotovoltaico per la produzione di energia in modo green: essa, dispositivo semiconduttore, è in grado di convertire l'energia solare in elettricità grazie all'effetto fotovoltaico. [35]

Il silicio è il materiale più utilizzato per la realizzazione delle celle fotovoltaiche, tuttavia il progresso ha condotto all'utilizzo di sistemi e tecnologie differenti. [35]

3Sun Gigafactory, conosciuta come la «fabbrica del sole», nasce nel 2010 a Catania e in poco tempo diventa «la più grande fabbrica europea per la produzione di moduli fotovoltaici bifacciali ad elevate prestazioni». [s18]

Nel 2011 3Sun Gigafactory produce moduli monofacciali in grado di catturare la luce solare solo da un lato, tecnologia a film sottile con efficienza pari a circa il 10%. [s19]

Il 2017 segna un'importante svolta a livello tecnologico con l'avvio della produzione di moduli bifacciali: le celle solari hanno la capacità di catturare la luce solare da entrambi i lati e inoltre la presenza di un doppio vetro aumenta la resistenza rispetto a fattori esterni. L'efficienza grazie a questa nuova tecnologia aumenta del 15% rispetto al sistema monofacciale e la durata di vita da 25 è incrementata a 30 anni. [s19]

Due anni dopo la tecnologia a eterogiunzione (HJT), associata al sistema bifacciale e al modulo thin film, permette di ottenere prestazioni notevolmente più elevate con un valore dell'efficienza che supera il 20%.

Tra gli obiettivi posti, insieme agli sforzi di innovazione, si definisce l'avanzamento della roadmap tecnologica, il progresso in termini di sostenibilità con azioni mirate a ridurre le emissioni di CO₂, la tracciabilità dei materiali, l'aumento dell'efficienza del processo produttivo fino alla riduzione degli scarti e al riciclaggio dei moduli a fine vita. [s19]

Lo sviluppo della tecnologia Tandem rappresenta il futuro: una cella bottom basata sempre sulla tecnologia HJT su wafer di silicio è unita a una cella top costituita da perovskite. [s19]

La perovskite è un materiale ibrido organico-inorganico che, se aggiunto alla cella di silicio, permette di trasformare una quantità maggiore di luce solare in corrente: nello specifico questo materiale consente di convertire anche la luce blu che il silicio invece non converte essendo fuori dalla sua portata. [s19]

«L'uso della tecnologia Tandem, che dovrebbe entrare a regime nella 3Sun Gigafactory nel 2025, promette di aumentare l'efficienza del pannello fotovoltaico oltre il 30%, con l'obiettivo di garantire una durata di vita di almeno 35 anni». [s19]

Di seguito si definisce una classificazione dell' elemento cella rispetto al parametro materiale analizzando la struttura di celle solari in vetro fotovoltaico e in perovskite.

Il vetro fotovoltaico

Il vetro è il componente principale dei moduli fotovoltaici convenzionali, è il materiale che regola la progettazione e la costruzione.

L' uso del vetro nelle applicazioni fotovoltaiche presuppone la conoscenza delle proprietà di questo materiale. Il vetro è un materiale molto fragile che reagisce ai picchi di stress locali, se la microstruttura del vetro è intatta e la sua superficie non danneggiata, il vetro ha una resistenza meccanica molto elevata. [36]

Per il parametro vetro fotovoltaico si segue come riferimento l' azienda italiana Energy Glass™, la quale si occupa di integrare e fondere «la competenza del settore fotovoltaico a quella del vetro strutturale di sicurezza per le costruzioni». [36]

Per ottenere tale risultato l'azienda adotta per la produzione di moduli fotovoltaici uno speciale tipo di PVB, Poly Vinyl Butyral, studiato attraverso un elaborato percorso di ricerca e sviluppo opportunamente per il sistema fotovoltaico. [36]

L' obiettivo cardine consiste nell' impiegare il potenziale dei sistemi BIPV utilizzando la tecnologia PVB: «[...] il PVB ha registrato un notevole successo nella laminazione dei vetri di sicurezza grazie alle sue proprietà in termini di adesione, trasparenza, resistenza e superiore stabilità alla temperatura e ai raggi UV». [36]

Come riportato all'interno della scheda tecnica, la tecnologia PVB, oltre a una elevata resistenza, fornisce una maggiore sicurezza postrottura.

La stratigrafia riportata nella figura 3.3 rappresenta la composizione di una cella in vetro fotovoltaico, tale materiale rappresenta il componente primario.

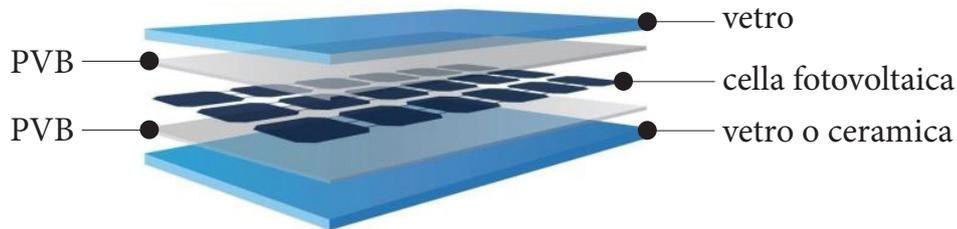


Figura 3.3 - Composizione vetro fotovoltaico

fonte: EnergyGlass™, Solar & Glass Architecture

La tecnologia PVB consente l'utilizzo di vetri di minore spessore riducendo il peso e fornendo una soluzione unica e compatta. [36]

I vetri fotovoltaici EnergyGlass™ vengono realizzati con diverse tipologie di celle in silicio mono/ policristallino o in film sottile, di diverse potenze e trasparenze. [36]

Celle solari in perovskite

La perovskite è un minerale definito da una struttura cristallina cubica costituito da titanato di calcio (CaTiO_3): gli elementi che formano il composto chimico sono ottimi assorbenti di luce ed efficienti conduttori di energia. [37]

Le celle in perovskite risultano più efficienti delle celle in silicio in quanto, grazie alla propria composizione chimica, l'energia generata dalla radiazione solare è trattenuta per un periodo maggiore all'interno del pannello, rispetto alla cella in silicio, comportando un maggiore accumulo di energia e una maggiore efficienza energetica. [37]

Di seguito si riportano 3 principali vantaggi delle celle solari in perovskite: [37]

- minerale facilmente estraibile in natura
- elemento semplice da processare
- è necessario poco composto chimico per la produzione di celle fotovoltaiche
- risultano poco costose
- sono circa 500 volte più sottili rispetto ai pannelli in silicio e presentano elevate capacità di flessibilità

«Per fare un [...] esempio possiamo paragonarli ai pannelli solari in silicio che vengono attualmente usati. Mentre questi sono spessi circa 180 micrometri, le celle in perovskite non arrivano nemmeno a un micrometro e le prestazioni sono identiche, ossia catturano la stessa quantità di luce solare». [37]

L'immagine in figura 3.4 descrive la stratigrafia tipo di una cella solare in perovskite.

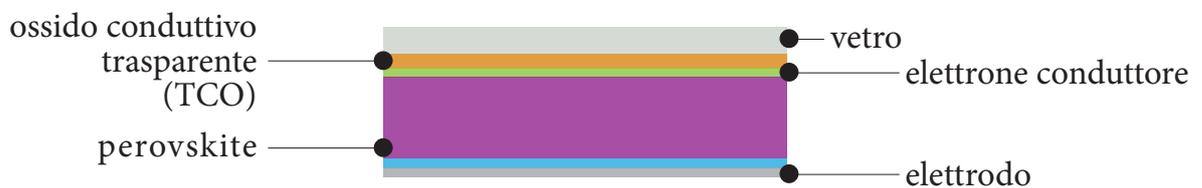


Figura 3.4 - Cella solare in perovskite

fonte: energy.gov

E' necessario sottolineare che gli studiosi evidenziano alcuni aspetti negativi legati a problemi di degrado: le celle solari in perovskite non sono particolarmente durevoli se sono esposte alle condizioni esterne. [37]

La ricerca e lo sviluppo tecnologico sono in continuo progresso a livello internazionale per risolvere a livello ingegneristico tale punto critico legato al degrado della cella.

In Italia gli studi condotti dai ricercatori ENEA dall'università di Roma hanno definito la cella solare tandem: questa tecnologia unisce due celle solari in modo meccanico, la cella frontale (perovskite con grafene) converte la luce blu e verde e consente alla luce rossa di raggiungere la cella posteriore (silicio a eterogiunzione con film amorfi). Tale tecnologia oggi offre un'efficienza energetica del 26,3%, con la prospettiva di raggiungere il 30%, la struttura della cella solare tandem è riportata in figura 3.5. [37]

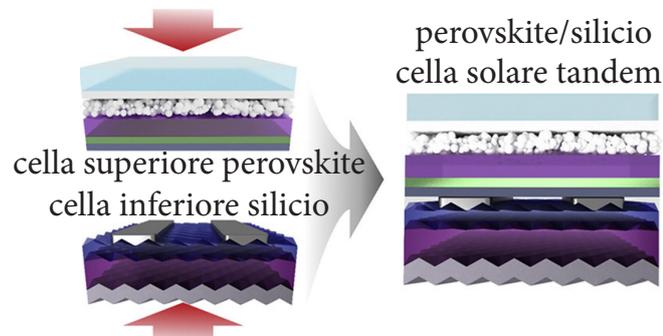


Figura 3.5 - Perovskite/silicio cella solare tandem

fonte: solarbusinesshub.com

La cella PV è uno dei nuclei dei pannelli solari fotovoltaici: ogni cella è collegata con elementi metallici, creando circuiti in parallelo o in serie.

Dall'unione delle celle si definisce il modulo fotovoltaico. [35]

Modulo

Come evidenziato, il modulo è definito dall'unione di più celle fotovoltaiche.

Pannello

Un pannello si compone dall'insieme di moduli fotovoltaici.

I componenti e materiali che costituiscono un pannello sono descritti di seguito e riportati in figura 3.6: [38]

- base di appoggio: costituisce la base del pannello fotovoltaico, è in materiale plastico e la funzione è di supporto meccanico
- Etilen Vinil Acetato (EVA): materiale polimerico, costituisce uno strato sottile con la funzione di collante grazie alla sua malleabilità
- cella fotovoltaica: componente principale, costituita da silicio.

Grazie ad un filamento che scorre per tutta la lunghezza della cella, l'insieme delle celle risulta collegato elettricamente in serie. Successivamente è presente un altro strato di EVA che consente la perfetta aderenza fotovoltaica con il vetro temprato

- vetro temprato: detto Backsheet, presenta uno spessore minimo di 3,2mm
- cornice di alluminio: tutti i componenti sono inclusi all'interno di una cornice
- scatola di ingiunzione: esternamente alla stratigrafia riportata di seguito, è presente questo componente che consente il monitoraggio, il controllo della sicurezza e l'ottimizzazione delle celle installate

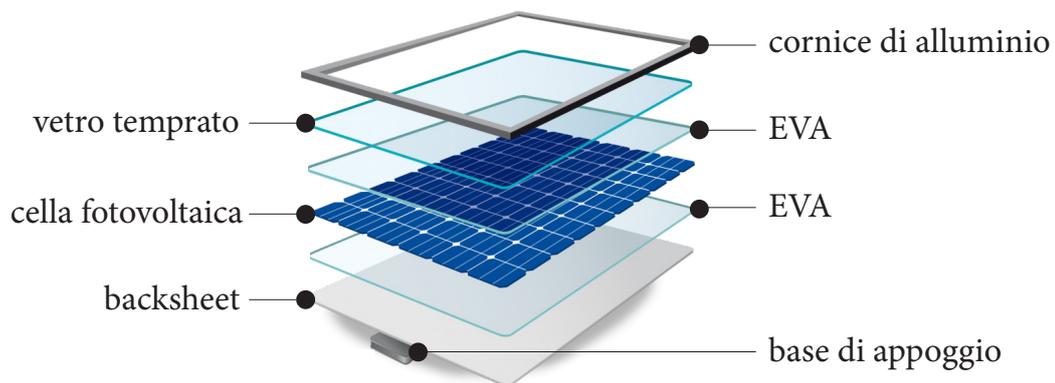


Figura 3.6 - I componenti e i materiali dei pannelli fotovoltaici

fonte: sunkonnnect.co

In sintesi la figura 3.7 definisce in modo chiaro la gerarchia e il rapporto che lega il sistema cella - modulo - pannello.

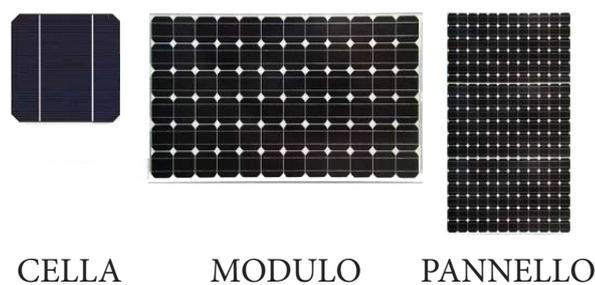


Figura 3.7 - Gerarchia sistema cella - modulo - pannello

fonte: sunkonnnect.co

Campo fotovoltaico

Per campo fotovoltaico si intende l'insieme di moduli che costituiscono l'impianto, essi sono composti dalla ripetizione dell'elemento base cella. [s17]

La tecnologia solare nel corso degli anni si è modificata in termini di prestazioni e affidabilità.

L'elemento fondamentale dei pannelli solari è il silicio, materiale semiconduttore con una presenza elevata in natura.

Stringhe

La stringa fotovoltaica definisce l'insieme di pannelli solari collegati in serie. [39]

Il quadro di stringa ha 3 funzioni fondamentali: [40]

- consente il collegamento tra moduli ed inverter
- protegge da eventuali fulminazioni dirette attraverso lo scaricatore di sovratensione
- protegge le stringhe dei moduli PV grazie al sezionatore a fusibile

La stringa deve essere collegata a un sezionatore prima di connettersi all'inverter per la commutazione da corrente continua ad alternata (norma CEI 64-8).

Il sezionatore permette di scollegare il sistema fotovoltaico in caso di interventi sulla rete o sull'impianto stesso. [s17]

Cablaggi

Definiscono i cavi di collegamento per i pannelli che trasportano la corrente continua, è fondamentale posizionare i conduttori in appositi sistemi di protezione dei cavi. [40]

«I cavi in corrente continua che collegano i moduli devono essere appositi cavi solari.

Le sollecitazioni alle quali sono sottoposti i cavi per impianti fotovoltaici sono [...] più elevate rispetto ai normali cavi per i comuni collegamenti in corrente alternata».

[41]

Regolatore di carica

Regola la tensione del pannello adattandola al valore richiesto per la ricarica della batteria, evitando che si possa sovraccaricare: questo elemento risulta fondamentale in quanto la tensione in uscita dai pannelli solari non è regolare e costante. [42]

Inverter

Questo apparecchio permette la trasformazione della corrente continua prodotta dal pannello solare in corrente alternata e porta la tensione al livello richiesto corretto per essere immessa in rete. Questo elemento deve essere dimensionato in modo tale da poter immettere in rete la massima potenza possibile, è dotato di dispositivi di monitoraggio e protezione. [41]

Batteria o accumulatore solare

Questi dispositivi consentono di immagazzinare l'energia solare prodotta dall'impianto fotovoltaico: è possibile consumare in modo gratuito l'energia accumulata nel momento del bisogno e in questo modo si raggiunge l'«indipendenza energetica». [43]

Le batterie fotovoltaiche sono di diversi tipi rispetto all'impianto, alla potenza richiesta e a seconda della tecnologia utilizzata dai produttori. [43]

Contatore di elettricità

Questo apparecchio consente di misurare tutta l'energia prodotta dall'impianto. [s20]

L'energia prodotta può essere diretta verso l'utenza dell'edificio o può essere diretta verso la rete elettrica esterna, in quest'ultimo caso l'energia attraversa il contatore di scambio il quale esegue due misurazioni: viene calcolata l'energia immessa in rete e tutti i kWh prelevati dalla rete. [s20]

Si definiscono quindi due tipi di contatori: il contatore di produzione, misura l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici ed è posizionato tra inverter e impianto dell'edificio, e il contatore di scambio, collocato tra l'impianto e la rete elettrica di fornitura, misura quanta energia viene immessa e quanta ne viene prelevata dalla rete. [s20]

3.5 / Progresso e sviluppo: dal passato alle prospettive future

La prima acuta intuizione relativa al concetto di «effetto fotovoltaico» è da attribuire al Alexandre Edmond Becquerel, scienziato francese che, nel 1839 a soli 19 anni, presenta all'Accademia delle Scienze di Parigi uno studio riguardante l'effetto elettrico derivante dall'irraggiamento solare. [44]

La relazione riporta i risultati degli esperimenti condotti: due elettrodi di platino sono immersi in una soluzione elettrica e si osserva come aumenta l'intensità di corrente con l'esposizione ai raggi solari, «l'effetto di conversione risulta strettamente legato alla quantità di luce incidente». [45]

Domenico Coiante, fisico e ricercatore presso l'istituto ENEA, afferma che, il fenomeno studiato da Becquerel, è il risultato della «variazione della conduttività elettrica di un materiale quando esso era sottoposto ad irraggiamento con la luce solare o artificiale». [44]

Le prime intuizioni di Becquerel segnano nel campo fisico l'inizio di una fase durante la quale gli studi e il progresso porteranno a definire il sistema fotovoltaico nel suo massimo sviluppo: lo scienziato francese ha inventato la prima cella fotovoltaica. [45]

Effetti simili al fenomeno studiato e analizzato da Becquerel vengono approfonditi nel 1867 da Willoughby Smith il quale osserva la fotoconduttività anche in un materiale solido come il selenio. Smith, ingegnere elettrico di origini inglesi, mette in evidenza tramite esperimenti la dipendenza diretta della conduttività del selenio dall'intensità dell'illuminazione. [44]

Le prospettive rispetto all'utilizzo del selenio nelle celle fotovoltaiche risultano molto basse in quanto il rendimento di questa tecnologia è intorno al 2%, gli studi scientifici, nel corso degli anni però, dimostrano che tale elemento chimico ha una fotosensibilità molto più alta di tutte le altre opzioni allora possibili. [44]

Successivamente, nel 1876, gli studi di Smith vengono ripresi da due scienziati inglesi, William Grylls Adams e Richard Evans Day, i quali dimostrano in modo sperimentale come fosse possibile la generazione di corrente in una barra di selenio unicamente con l'azione della luce: i due studiosi definiscono per la prima volta il concetto di corrente «fotoelettrica». [44]

Adams e Day sono i primi ad intuire ed approfondire le potenzialità energetiche delle celle al selenio ma, solo grazie al contributo scientifico di Charles Fritts, nel 1883, si dimostra la capacità di conversione della luce solare in elettricità nel primo dispositivo a stato solido. [44]

L'inventore americano alla fine del XIX secolo realizza veri e propri moduli al selenio da utilizzare come generatori di corrente. I tentativi eseguiti per accreditare la validità scientifica del fenomeno della fotoconduttività sono stati nulli, in quanto in quegli anni l'effetto fotoelettrico è riconosciuto nei termini della fisica classica. [44]

L'intero Ottocento e i primi anni del Novecento hanno rappresentato il periodo durante il quale si sono approfondite le principali applicazioni sperimentali che hanno posto basi fondamentali per gli studi del XX secolo.

Nel 1902 Philipp von Lenard, fisico tedesco, esegue una serie di esperimenti molto accurati per testare e certificare l'effettiva dipendenza dell'effetto fotoelettrico dalla intensità della luce. Pochi anni dopo, nel 1905, Albert Einstein definisce la formulazione fisica del fenomeno attraverso la nota equazione che porta il suo nome: [44]

$$[E = h\nu - P]$$

E = energia degli elettroni emessi

h = costante universale di Planck

v = frequenza della luce incidente

P = potenziale di estrazione degli elettroni dal metallo

Successivamente alla spiegazione di Einstein, nell'intervallo temporale che va dal 1905 al 1953 si attua la fase pionieristica dello sviluppo del fotovoltaico. [44]

L'invenzione della cella fotovoltaica al silicio monocristallino da parte di Chapin, Fuller e Pearson nel 1954 segna concluso il periodo di studi legati all'effetto fotovoltaico: le indagini teoriche e di laboratorio, nello specifico durante il 1948 e il 1953, hanno portato all'invenzione della «cella fotovoltaica a giunzione in silicio». [44]

In un primo momento i costi della nuova tecnologia erano notevoli e questo fattore ha ristretto il campo di applicazione a particolari casi, come l'alimentazione elettrica dei satelliti artificiali, e verso la metà degli anni Settanta si inizia a utilizzare questo strumento per usi terrestri.

Nel 1973, a causa dell'embargo dei paesi dell'OPEC¹⁰ e al conseguente aumento del prezzo del petrolio, i paesi occidentali prendono atto della grave e pericolosa dipendenza della propria economia dal petrolio e si inizia a porre l'attenzione verso fonti energetiche alternative. [44]

Dopo la crisi petrolifera, i fondi per lo sviluppo e la ricerca nel campo delle tecnologie solari subiscono nei paesi occidentali un importante incremento. [44]

«Indagare la [...] consistenza delle [...] fonti rinnovabili, sia sotto il profilo dell'adeguatezza tecnologica, sia sotto quello della competitività economica, veniva considerato come una necessità propedeutica per articolare una risposta credibile, atta a fronteggiare nel medio-lungo periodo la dipendenza dai combustibili fossili». [44]

Si sottolinea come il ruolo degli USA sia stato fondamentale in quanto sempre molto attento ai problemi energetici, ha influenzato in modo decisivo i programmi di ricerca e lo sviluppo sul sistema fotovoltaico anche in altri paesi e in particolare in Italia.

¹⁰ Organizzazione dei paesi esportatori di petrolio

Il workshop di Cherry Hill nel 1973 è considerato come l'evento decisivo che ha permesso la nascita del fotovoltaico terrestre: nel 1974 la NSF¹¹ presenta un programma con le seguenti attività di intervento: [44]

- ricerca e sviluppo sui materiali, sulle celle fotovoltaiche e sui moduli
- sviluppo e dimostrazione delle applicazioni

L'evento cardine che ha generato il riconoscimento pubblico del sistema fotovoltaico come nuova fonte di energia rinnovabile è stato scaturito dalla seconda crisi petrolifera internazionale, successiva al blocco della produzione petrolifera in Iran a causa della guerra nel paese stesso. [44]

«Il brusco aumento dei prezzi petroliferi del 1979 dimostrò in modo evidente la necessità di imprimere alla tecnologia fotovoltaica [...] una maggiore connotazione energetica ed un'accelerazione sia sul piano qualitativo, sia su quello quantitativo.

I programmi di ricerca sul fotovoltaico negli USA, ed anche nei paesi occidentali, furono revisionati aggiungendo altri ben più importanti obiettivi a quelli già focalizzati sulle applicazioni nei piccoli sistemi ausiliari di energia elettrica. [...] Il fotovoltaico cominciò ad essere considerato da allora come una vera e propria opzione energetica». [44]

Nei primi anni Novanta il fotovoltaico ha una situazione di stallo, la quale coinvolge tutte le fonti rinnovabili. [44]

«Dunque oggi noi dobbiamo chiedere [...] perché le energie rinnovabili, nonostante i loro vantaggi [...] nel lungo termine, non sono state ancora pienamente introdotte. Ci dobbiamo chiedere dove risiedono le mancanze che hanno impedito alla nostra società di accettare le energie rinnovabili e quali errori sono stati commessi perfino da coloro che sono impegnati senza successo nella causa delle energie rinnovabili». [44]

¹¹ National Sanitation Foundation

Il grafico riportato in figura 3.8 descrive l'andamento dei prezzi e del mercato delle vendite di moduli fotovoltaici dal 1975 al 1995.

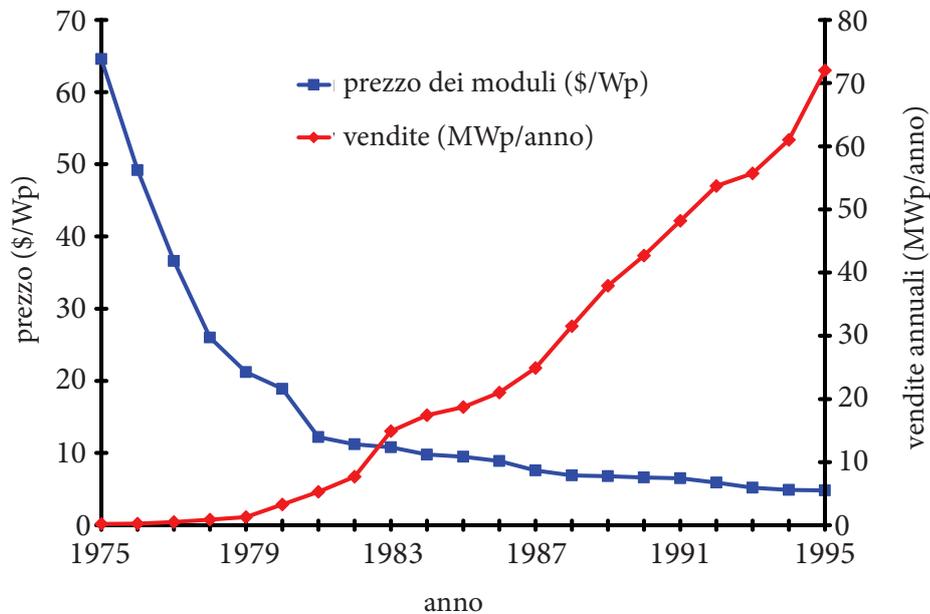


Figura 3.8 - Andamento mercato dei moduli fotovoltaici dal 1975 al 1995

fonte: Domenico Coiante, «Fotovoltaico - Il processo evolutivo e le nuove frontiere», Enea, 2008.

Il grafico riportato descrive la situazione aggiornata al 1995: lo sviluppo del sistema PV è chiaro, nonostante ciò i prezzi risultano lontani dal valore richiesto per conseguire una competitività nel settore energetico. [44]

La situazione a metà degli anni Novanta si può riassumere nei seguenti punti: [42]

- la tecnologia delle celle al silicio cristallino, dei moduli e dei sistemi, ha ampiamente dimostrato la sua idoneità tecnica e affidabilità
- il guadagno di energia netta è stato ampiamente dimostrato
- il bilancio relativo alle emissioni di CO₂ è nettamente positivo
- il processo di ulteriore miglioramento dell'efficienza di conversione, soprattutto nel settore dei nuovi materiali e tecnologie PV è in rapido sviluppo

- il mercato delle applicazioni dei piccoli sistemi è in crescita
- il mercato delle applicazioni per la produzione di energia elettrica in rete è pressoché fermo a causa del costo ancora troppo alto dei sistemi in rapporto alla situazione esistente di bassi prezzi del petrolio
- l'abbassamento dei costi di produzione dei sistemi al silicio cristallino richiede un volume delle vendite almeno due ordini di grandezza superiori al livello del mercato esistente

Con la conferenza di Kyoto del 1997 si è tenuta la terza Conferenza delle Parti, tra i paesi che hanno firmato la Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici dell'ONU: sulla base del report scientifico redatto dal gruppo IPCC, si riconosce «la causa antropogenica della crescita anomala della concentrazione atmosferica, sia dell' anidride carbonica, sia di altri gas responsabili del cosiddetto effetto serra». [44]

Il Protocollo di Kyoto diventa esecutivo nel 2005: l'accordo internazionale impone a tutti i paesi dell'ONU l'obbligo di intervenire con provvedimenti per la riduzione delle emissioni di gas serra. Si delineano due principali linee d'azione: «il risparmio energetico attraverso l'uso più efficiente dell'energia e un ricorso sempre più significativo alle fonti alternative al petrolio ed in particolare alle fonti di energia rinnovabile». [44]

Tutti i paesi aderenti al Protocollo hanno iniziato a operare per ridurre le emissioni con programmi di risparmio energetico e attraverso impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili.

Il potenziale delle energie rinnovabili e dei relativi sistemi di produzione di energia sostenibile permette di definire una importante e drastica riduzione delle emissioni inquinanti nei prossimi anni.

Un recente studio condotto dall'Agenzia Internazionale dell'Energia analizza il ruolo futuro del fotovoltaico: lo scenario globale relativo alla «trasformazione energetica», descritto nel grafico riportato di seguito, riporta come dato chiave la riduzione del 70% circa delle emissioni di CO₂ nel 2050. [44]

L'immagine riportata in figura 3.9 delinea il progresso storico relativo alle installazioni fotovoltaiche e le proiezioni future: l'analisi dimostra una crescita costante e continua dell'impiego dell'energia solare.

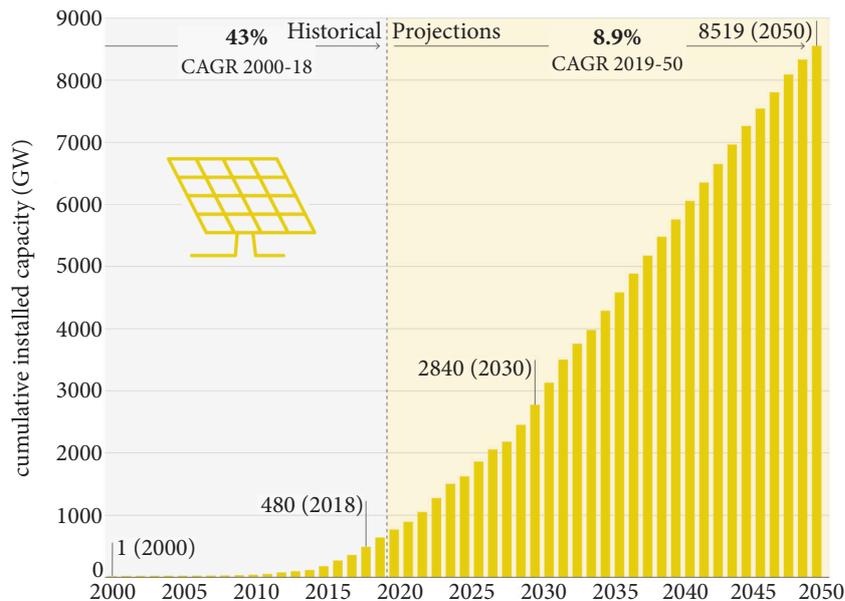


Figura 3.9 - Andamento storico e proiezioni future rispetto alle energie rinnovabili

fonte: IRENA's (2019a)

I principali programmi che permettono di registrare percentuali elevate di riduzione di emissioni, come riportato nel report IEA, sono i seguenti: [44]

- incremento dell'utilizzo di energie rinnovabili
- messa in atto di politiche di efficienza
- incremento dell'elettrificazione dei consumi in settori chiave quali il campo dei trasporti e il settore legato all'efficientamento energetico degli edifici

Secondo l'International Renewable Energy Agency, nei prossimi anni si registrerà il maggiore incremento del fotovoltaico principalmente in Asia, in particolare in Cina.

[46]

«Entro il 2050, l'Asia avrà una quota superiore al 50% del mercato globale, il Nord America il 20% e l'Europa il 10%». [46]

L'immagine in figura 3.10 specifica i dati analizzati dallo studio condotto da IRENA: la crescita maggiore si registrerà in Asia, seguita da Nord America e Europa, il quarto posto sarà occupato dal Medio Oriente e Africa e infine con percentuali nettamente inferiori l'America del Sud e l'Oceania.

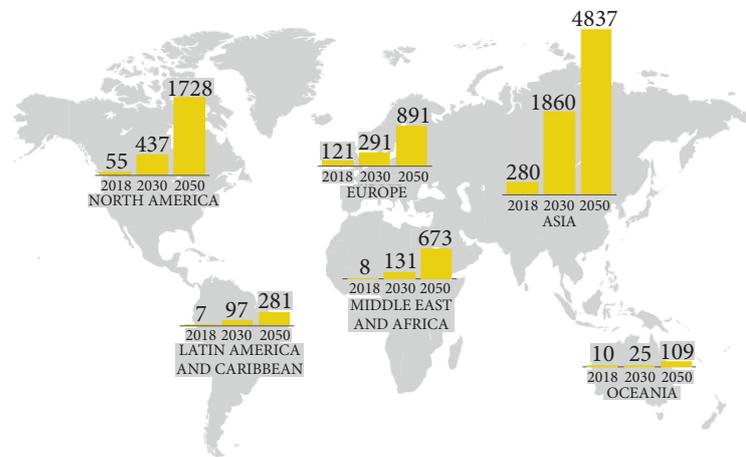


Figura 3.10 - Solar PV installed capacities (GW)

fonte: IRENA's (2019a)

Dal punto di vista tecnologico la relazione descritta da IRENA sostiene che i sistemi e le tecnologie fotovoltaiche tradizionali rimangono, ad oggi, il motore del mercato mentre le tecnologie tandem e perovskite sono ancora in fase di sviluppo. [46]

4 / LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA COME RISPOSTA SOSTENIBILE

4.1 / Il ruolo dell'energia solare nel campo della progettazione

L'energia solare rappresenta la principale fonte di energia di tipo rinnovabile presente sul pianeta, è inesauribile, pulita al 100% e non determina emissioni di CO₂ o polveri sottili. [47]

«La quantità di energia radiante che arriva sulla Terra dal Sole per unità di tempo e superficie è pari a 1,4 kW/m²». [47]

I benefici che si possono trarre dall'energia solare sono molteplici attraverso diversi sistemi: il solare fotovoltaico, il solare termico e il solare termodinamico.

Il sistema del solare fotovoltaico è composto da pannelli fotovoltaici che trasformano la radiazione solare in energia elettrica mediante un materiale semiconduttore, il silicio.

Il solare termico utilizza l'energia solare per produrre energia termica: il componente principale di questo sistema è il collettore termico, il quale ha la funzione di riscaldare il liquido fluido termovettore che, muovendosi all'interno dell'impianto, distribuisce calore nelle zone richieste. Il solare termodinamico integra il solare termico a una pompa di calore, questa tecnologia garantisce un utilizzo del sistema durante tutto l'anno perché la pompa di calore entra in funzione quando l'energia solare non è disponibile. [47]

Il report annuale pubblicato da SolarPower Europe afferma che l'UE durante il 2022 ha installato 41,4 GW di energia fotovoltaica, l'aumento è stato pari al 47% rispetto ai 28,1 GW installati nel 2021. A livello europeo la Germania è al primo posto per installazioni fotovoltaiche, seguono Spagna e Polonia. [48]

Relativamente alla crisi climatica ed energetica in atto, «senza precedenti e di crescenti preoccupazioni per la sicurezza energetica», all'interno dell'UE la capacità di energia

solare è aumentata del 25% in un anno, da 167,5 GW nel 2021 a 208,9 GW nel 2022. [48]

«Il mercato solare dell'UE è destinato a più che raddoppiare entro 4 anni e a raggiungere 484 GW entro il 2026». [48]

Nel nostro Paese durante l'anno 2022 sono stati installati 205.806 impianti fotovoltaici rispetto i 79.878 del 2021: l'aumento registrato è pari al 158%. Il numero totale in Italia di impianti fotovoltaici è di 1.221.045. [49]

Il grafico in figura 4.1 dimostra in modo chiaro ed evidente la forte crescita del solare come fonte energetica.

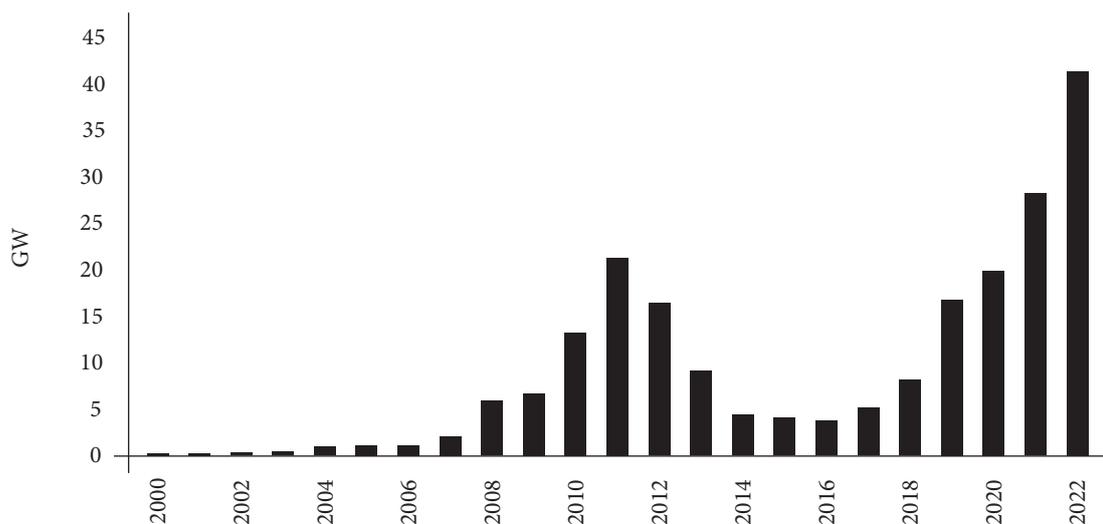


Figura 4.1 - EU27 annual solar PV installed capacity 2000-2022

fonte: solarpowereurope.org

Walburga Hemetsberger, CEO di SolarPower Europe, evidenzia:

«I numeri sono chiari.

Il solare sta offrendo all' Europa un' ancora di salvezza in una situazione di crisi energetica e climatica. Nessun' altra fonte energetica sta crescendo in modo così rapido e affidabile come il fotovoltaico». [48]

E' importante evidenziare l'andamento del grafico: il calo dell'installazione fotovoltaica registrata in particolare nel 2016 in UE è stato influenzato da diversi fattori tra cui la riduzione o l'eliminazione degli incentivi, la concorrenza dei mercati emergenti come Cina e India e le difficoltà tecniche e normative per integrare il sistema nella rete. [48] Tuttavia il mercato fotovoltaico in Europa ha registrato una crescita negli ultimi anni, come evidenziato precedentemente dai dati riportati, grazie all'aumento dell'efficienza e alla maggiore consapevolezza ambientale legata agli obiettivi di decarbonizzazione definiti dall'UE. [48]

L'integrazione della tecnologia fotovoltaica oggi rappresenta un fondamento cardine per l'innovazione della progettazione architettonica, il progetto dei sistemi di energia solare definisce un elemento imprescindibile ed essenziale.

All'interno della nuova revisione EPBD, l'emendamento relativo all'articolo 9 bis definito «Energia solare negli edifici» (A9-0033/2023) riporta:

«Entro...[48 mesi dalla data di entrata in vigore del presente regolamento] gli Stati membri provvedono affinché tutti i nuovi edifici siano progettati in modo da ottimizzare il loro potenziale di produzione di energia solare sulla base dell'irraggiamento solare del sito, consentendo la successiva installazione di tecnologie solari efficienti sotto il profilo dei costi». [50]

Lo studio sostiene l'importanza del tema della progettazione fotovoltaica sia per edifici di nuova costruzione sia per interventi retrofit.

Il sistema PV oggi non rappresenta un'opzione progettuale bensì uno strumento chiave per raggiungere come obiettivo la progettazione che integra composizione e tecnologia per realizzare concretamente a 360° l'«energia solare negli edifici».

4.2 / BAPV e BIPV

Il ruolo dell'energia solare nel campo della progettazione è determinante: il progetto architettonico deve integrarsi e svilupparsi rispetto al settore delle risorse rinnovabili, il sistema fotovoltaico risulta una soluzione in forte crescita e sviluppo con evidenti e notevoli risultati in termini di sostenibilità applicati allo spazio costruito.

Quando si parla di sistema fotovoltaico rispetto agli edifici le soluzioni sono molteplici, è importante sottolineare una differenza sostanziale rispetto al metodo di installazione e costruzione nell'edificio: le sigle BAPV e BIPV descrivono due diversi metodi relativi al progetto PV.

L'acronimo BAPV indica «Building Applied Photovoltaics», cioè fotovoltaico applicato agli edifici, in questa soluzione la tecnologia PV è fissata all'immobile senza determinare nessun effetto diretto sulla struttura e sul funzionamento di essa. [51]

Con la metodologia BAPV l'impianto solare risulta collegato all'edificio attraverso una struttura di montaggio aggiuntiva e binari mobili, il sistema fotovoltaico non fornisce capacità di impermeabilizzazione o protezione dal vento e aumenta il carico dell'edificio stesso. [52]

Intervenendo su edifici esistenti è fondamentale, oltre al controllo e alle verifiche di ancoraggio dei moduli, la progettazione e l'inserimento dei pannelli esclusivamente su superfici con la migliore esposizione solare senza compromettere la qualità estetica e compositiva dell'edificio.

L'acronimo BIPV definisce invece «Building Integrated Photovoltaics», ossia il sistema fotovoltaico è integrato agli edifici.

Con il metodo BIPV il sistema solare rappresenta una parte indispensabile dell'edificio: i moduli fotovoltaici, oltre al compito di generare energia solare, hanno la funzione di componente essenziale della costruzione, sostituendo materiali ed elementi tradizionali come vetro e coppi ad esempio, risultando quindi un elemento di completa integrazione architettonica. [51]

Negli interventi su edifici ex novo la procedura di progettazione del sistema fotovoltaico non presenta vincoli, rispetto all'immobile, il progetto architettonico e il disegno a livello compositivo si sviluppano seguendo il progetto impiantistico ed energetico e viceversa.

Si analizzano 2 esempi di edifici esistenti BAPV e BIPV a confronto, l'obiettivo è mettere in evidenza le differenze dei diversi metodi applicati per edifici esistenti e per interventi ex novo, nonché riconoscere la qualità del progetto che integra il disegno compositivo al progetto energetico.



Aula Paolo VI, Città del Vaticano - BAPV

fonte: archilovers.com



MUSE, Museo delle Scienze di Trento - BIPV

fonte: muse.it

Figura 4.2 - BAPV e BIPV a confronto

Per quanto riguarda l'inserimento della tecnologia fotovoltaica su un edificio esistente, la copertura dell'Aula Paolo VI (figura 4.2 sn) rappresenta un evidente caso di impianto PV ma senza l'integrazione di esso nel progetto architettonico e privo di effetti sulla struttura stessa.

Il progetto per l'auditorium a servizio della città del Vaticano ha previsto l'installazione di 5000 m² di pannelli solari, dei quali 2500 m² sono attivi e 2500 m² sono passivi. [53]

Questo esempio è noto per l'estensione e l'incidenza che determina relativamente alla produzione di energia, nonostante questo fattore, si sottolinea che il progetto del sistema fotovoltaico non è stato sviluppato per comunicare con l'edificio esistente.

Il Museo delle Scienze di Trento (figura 4.2 ds) definisce uno straordinario esempio di come composizione architettonica e tecnologia possano collaborare per realizzare un progetto di forte identità e carattere.

Il programma segue la linea della sostenibilità: il profilo raffinato dell'edificio, omaggio alle vette circostanti, è caratterizzato da celle fotovoltaiche e pannelli solari progettati e sviluppati per integrarsi in modo efficace al corpo vetrato.

L'approccio dell'architetto rispetto al tema della progettazione deve seguire una linea chiara e definita: la fase di progetto deve includere tecnologie e impianti che permettano di rendere efficiente il sistema dal punto di vista energetico, seguendo la normativa, e, parallelamente a questo, garantire la qualità compositiva che caratterizza un progetto di architettura.

L'importanza di una pianificazione che sia in grado di coniugare il disegno compositivo con il progetto tecnologico è oggi fondamentale e imprescindibile.

L'obiettivo del seguente studio è l'analisi della «progettazione integrata» che coniuga architettura ed energia con l'impiego del sistema PV a integrazione totale, BIPV, tale approccio implica l'insieme di diverse esigenze da rispettare tra cui la produzione di energia rinnovabile e le funzioni degli elementi architettonici sostituiti, conciliando le esigenze dell'uomo e dell'ambiente in cui vive.

Il progresso tecnologico in campo fotovoltaico permette di coniugare creatività e qualità compositiva in armonia con funzionalità, sostenibilità e produzione di energia.

Si evidenziano 6 edifici BIPV comparati in coppia rispetto alla destinazione d'uso: edifici residenziali (fig. 4.3 - fig.4.4), amministrativi e commerciali (fig. 4.5 - fig.4.6) e industriali (fig. 4.7 - fig.4.8), questi sono riportati all'interno del sito solarchitecture.

Edifici residenziali BIPV



Maison Climat

Svizzera, 2022

L'edificio residenziale in legno è certificato Minergie-A, l'impianto PV è integrato in facciata e in copertura. Questo esempio rappresenta una perfetta combinazione di requisiti energetici e di design.

Figura 4.3 - Maison Climat

available: world-architects.com

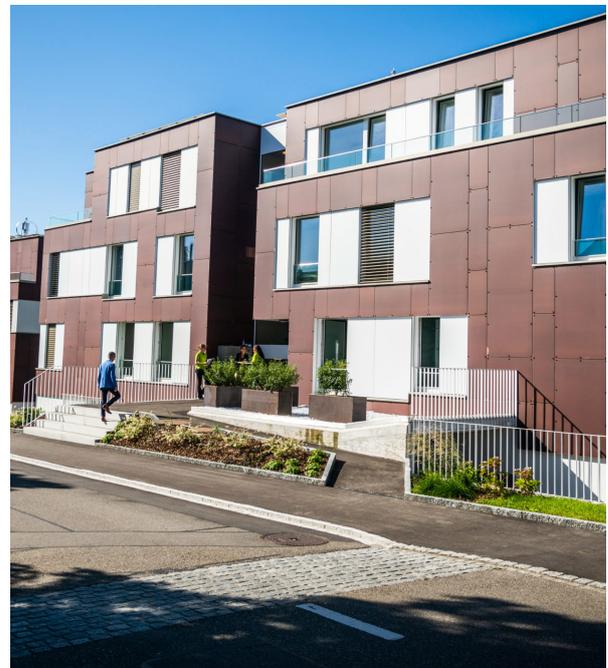
René Schmid Architekten AG, progetto a Männedorf

Svizzera, 2020

Il complesso residenziale è neutrale dal punto di vista delle emissioni di CO₂: il progetto ha previsto l'integrazione totale di moduli fotovoltaici in facciata, con la funzione di rivestimento di colore rosso e bianco, e in copertura.

Figura 4.4 - Progetto a Männedorf

available: world-architects.com



Edifici amministrativi e commerciali BIPV



Solar Silo

Svizzera, 2014

Il progetto di recupero della vecchia area industriale segue lo stile e il colore del sito.

In copertura e in facciata sono installati pannelli PV colorati: ogni modulo viene monitorato per studiare l'efficienza dei colori sul rendimento.

Figura 4.5 - Solar Silo

available: Report IEA-PVPS T15-07: 2019

Torre di Grosspeter

Svizzera, 2017

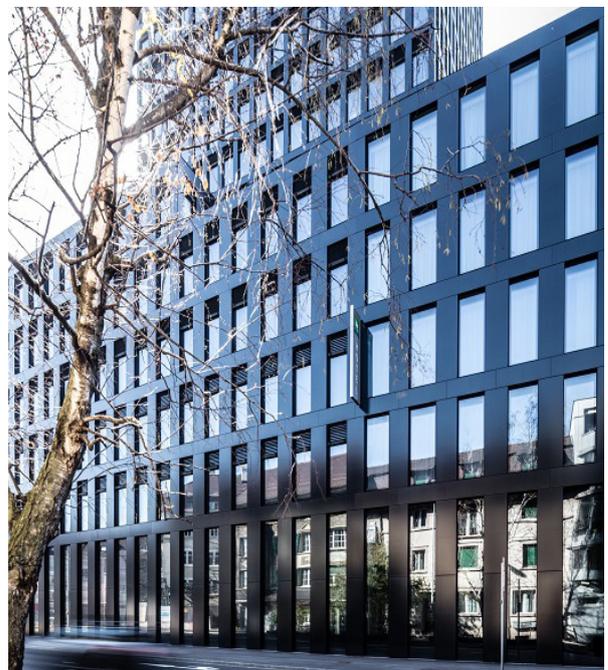
Il disegno compositivo si sviluppa da due volumi ad incastro.

Il progetto prevede l'integrazione totale fotovoltaica in facciata e in copertura.

«Esempio [...] della riuscita simbiosi tra tecniche solari e architettura»

Figura 4.6 - Torre di Grosspeter

available: archdaily.com



Edifici industriali BIPV



Uffici e Data Center WWZ AG

Svizzera, 2021

Il progetto offre funzionalità ed efficienza attraverso lo studio e la personalizzazione del modulo PV integrato in facciata, si tratta di 142 moduli per oltre 260 m².

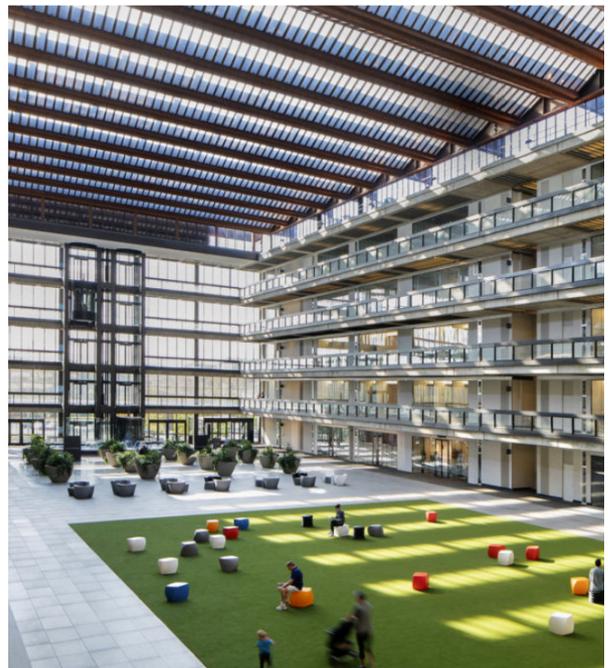
Figura 4.7 - Uffici e Data Center WWZ AG
available: archdaily.com

Bell Works

USA, 2019

Il progetto originario è del 1958. Nel 2019 l'intervento di riqualifica ha previsto la realizzazione del più grande lucernaio fotovoltaico degli Stati Uniti con 5.500 m² di moduli solari in silicio amorfo.

Figura 4.8 - Bell Works
available: archdaily.com



La «Task 15» dell' IEA è un' iniziativa internazionale che ha l'obiettivo di favorire attraverso un quadro abilitante l'applicazione dei prodotti BIPV nel mercato globale. [54]

Il BIPV è legato sia alla tecnologia elettrica che alla tecnologia delle costruzioni, per tale motivo il report «Task 15» non correla il BIPV al solo sistema fotovoltaico ma anche all'edificio nel suo complesso e all'industria dell'edilizia. Il settore fotovoltaico investe gli aspetti energetici e ambientali, l'industria dell'edilizia copre fattori quali l'estetica, le prestazioni energetiche degli edifici, e multifunzionalità dell'involucro. [54]

La prima fase dell'attività «Task 15» è stata eseguita dal 2016 al 2019, la seconda fase è attualmente in corso ed è iniziata nel 2020 fino al 2023. [54]

Il lavoro è suddiviso in sottoattività, da «Sottotask A» a «Sottotask E», nello specifico «Sottotask C: Linee guida BIPV» ha il seguente obiettivo:

«[...] il supporto e l'implementazione delle migliori pratiche BIPV e guidare il processo decisionale che potrebbe portare a una progettazione BIPV efficace e a un'installazione BIPV resiliente e robusta, mantenendo al contempo una buona architettura». [54]

Lo scopo di «Sottotask C» è di consolidare le conoscenze già acquisite in materia BIPV e di comporre una guida tecnica per architetti, ingegneri e consulenti. [54]

Si evidenzia inoltre l'importanza dei seguenti aspetti:

- in «Sottotask D: Digitalizzazione per BIPV», l'importanza della digitalizzazione per migliorare l'affidabilità e le prestazioni
- in «Sottotask E: Ricerca internazionale prenormativa sui metodi di caratterizzazione BIPV», l'importanza della ricerca internazionale pre-normativa sui temi definiti nella prima parte del «Task 15 IEA-PVPS», l'obiettivo è di unire tutti i requisiti del BIPV a livello globale

Notevole è stato lo studio di approfondimento definito dai rapporti relativi a «Task 15» elaborati a IEA che analizzano la tecnologia BIPV. [s21]

IEA ha elaborato 16 report in materia BIPV inseriti in «Rapporti sull'attività 15».

Il programma ha l'obiettivo di approfondire e sviluppare le tematiche relative al metodo BIPV: dalla guida all'innovazione tecnologica alla digitalizzazione, dalla raccolta di progetti internazionali all'analisi dei requisiti e delle specifiche regolamentazioni.

All'interno del report «Categorization of BIPV applications 2021» si evidenzia: [s21]

«Il trasferimento del fotovoltaico negli edifici è una "causa" tangibile dell'innovazione. Oggi è molto più di una soluzione di conversione dell'energia: rappresenta un nuovo aspetto fondamentale dell'estetica e della tecnologia architettonica»

Si considera il sistema BIPV in rapporto sia alla tecnologia elettrica che alla tecnologia delle costruzioni.

E' fondamentale associare il tema dell'integrazione fotovoltaica al fattore energetico e ambientale e, in parallelo, al campo architettonico, soddisfacendo i requisiti compositivi, estetici e funzionali.

Il report «Successful Building Integration of Photovoltaics» è una raccolta di casi di studio BIPV molto eterogenei e di grande successo: l'analisi IEA descrive informazioni relative allo sviluppo del progetto, analizzando le modalità di integrazione rispetto al fattore formale, energetico e tecnologico. [s21]

Il seguente studio di tesi nel capitolo successivo propone una metodologia di analisi e sviluppo della «progettazione integrata» studiata a partire proprio dai diversi fattori di integrazione.

La presente trattazione si sviluppa dalla considerazione di valutare il sistema PV come uno strumento di progetto completo che permette un'integrazione multifunzionale.

4.3 / Requisiti e standard della tecnologia fotovoltaica integrata

Il metodo BIPV è definito all'interno della normativa BS EN 50583:2016.

La norma si specifica in due parti:

- BS EN 50583-1:2016 «Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules»
- BS EN 50583-2:2016 «Photovoltaics in buildings - Part 2: BIPV systems»

Entrambi i documenti sono stati redatti da CLC/TC 82¹², il comitato tecnico europeo di normazione elettrotecnica che si occupa di elaborare norme per i sistemi e i componenti utilizzati per la conversione fotovoltaica dell'energia solare in energia elettrica. [s22]

BS EN 50583-1:2016 è il documento che si applica ai moduli fotovoltaici utilizzati come prodotti da costruzione seguendo il regolamento CPR 305/2011, definisce i requisiti elettrotecnici che i moduli devono rispettare. [55]

«I moduli PV sono considerati integrati nell'edificio se i moduli [...] costituiscono un prodotto da costruzione [...].

Il modulo BIPV è un prerequisito per l'integrità della funzionalità dell'edificio». [55]

BS EN 50583-2:2016 è il documento che si applica agli impianti fotovoltaici integrati negli edifici utilizzando i moduli come prodotti da costruzione. [56]

Si definiscono le proprietà dei sistemi PV specificate nel regolamento europeo relativo ai prodotti da costruzione CPR 89/106/CEE e i requisiti elettrotecnici indicato nella direttiva 2006/95/CE/CENELEC standard. [56]

Si evidenzia all'interno della norma che il documento è indirizzato alle seguenti figure: produttori, progettisti, progettisti di sistemi, installatori, istituti di prova e autorità edili.

¹² CLC/TC 82 - Impianti solari fotovoltaici

Con il metodo BIPV il sistema solare rappresenta una parte indispensabile dell'edificio: i moduli fotovoltaici, oltre al compito di generare energia solare, hanno la funzione di componente essenziale della costruzione, sostituendo materiali ed elementi tradizionali risultando quindi un elemento di completa integrazione architettonica. [51]

Come componenti elettriche i moduli BIPV sono soggetti ai requisiti indicati nella «Direttiva Bassa Tensione 2006/95/EC / o CENELEC». [55]

La direttiva 2006/95/CE definisce i seguenti requisiti essenziali:

- protezione contro i pericoli derivanti dal materiale elettrico
- protezione contro i rischi che possono derivare da influenze esterne sul materiale elettrico

Come prodotti da costruzione (50583-1:2016 e 50583-2:2016) i moduli BIPV sono soggetti ai requisiti specificati nel «Regolamento europeo sui prodotti da costruzione CPR 305/2011». [55]

I requisiti essenziali definiti nel CPR 305/2011 sono: [55]

- resistenza meccanica e stabilità
- sicurezza in caso di incendio
- igiene, salute e ambiente
- sicurezza e accessibilità in uso
- protezione contro il rumore
- risparmio energetico e ritenzione di calore
- utilizzo sostenibile delle risorse naturali

Come sistemi elettrici (50583-2:2016) i sistemi BIPV devono garantire il rispetto dei requisiti elettrotecnici indicati in «Direttiva sulla compatibilità elettromagnetica ECD 2004/108/CE / o norme CENELEC». [56]

I requisiti essenziali definiti nella direttiva 2004/108/CE sono:

- requisiti di protezione
- requisiti specifici per gli impianti fissi

La normativa, sia per i moduli che per i sistemi fotovoltaici BIPV, definisce le categorie di montaggio. [55]

In figura 4.9 si riportano le categorie di montaggio A-E. [55]

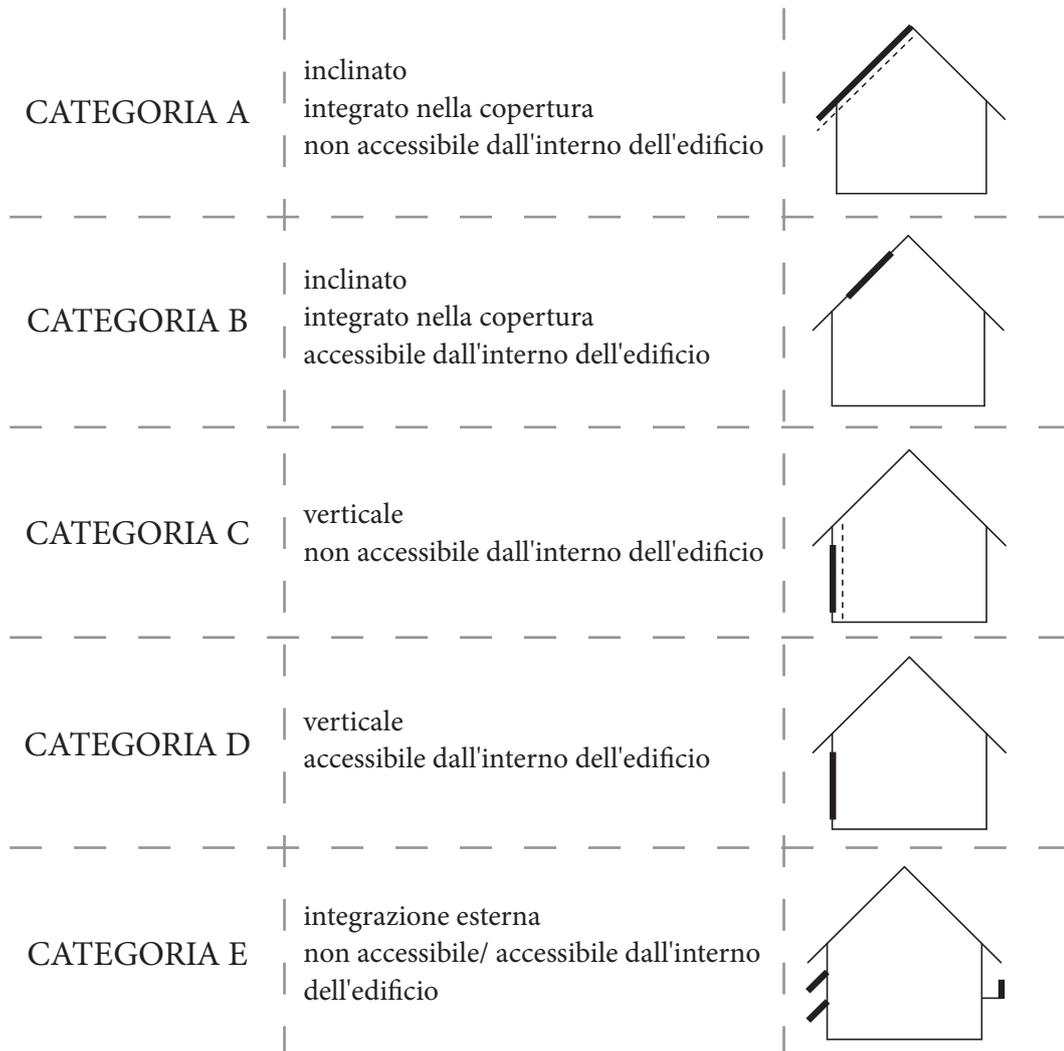


Figura 4.9 - Mounting categories A - E

fonte: BS EN 50583-1:2016 Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules

« Alla parola progresso
riconosco il solo valore di risparmiare energia »

Erri De Luca, scrittore e giornalista italiano

5 / I DISPOSITIVI COME STRUMENTO DI PROGETTO

5.1 / La tecnologia fotovoltaica integrata alla composizione architettonica

La programmazione e la definizione di un metodo nella fase embrionale di progetto risultano essenziali per poter definire una «pianificazione integrata»: il progetto architettonico deve svilupparsi rispetto a parametri di sostenibilità per ridurre l'impatto ambientale, al sistema energetico e impiantistico devono unirsi in maniera intrinseca qualità, funzionalità e prestazione.

In sintesi, come evidenziato in figura 5.1, i componenti chiave per la progettazione di un edificio derivano dalla simbiosi tra architettura, esigenze legate alla costruzione e l'applicazione dei parametri energetici.

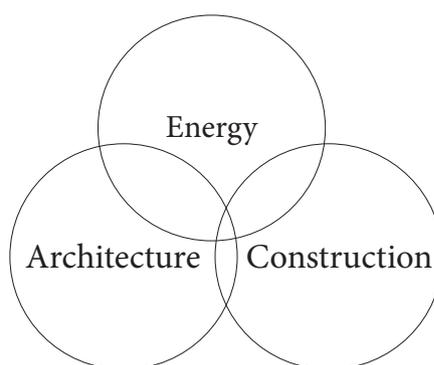


Figura 5.1 - Design strategies

fonte: B. Weller, C. Hemmerle, S. Jakubetz, S. Unnewehr, «Photovoltaics», Edition Detail, 2010.

Lo studio pone come obiettivo la definizione e l'analisi del tema dell'integrazione del sistema fotovoltaico in campo architettonico.

E' importante evidenziare che integrazione costruttiva e architettonica sono due componenti diverse che, se associate in modo utile e vantaggioso, completano il concetto di energia: il sistema fotovoltaico è integrato dal punto di vista costruttivo quando la tecnologia ricopre prestazioni analoghe ai componenti che sostituisce. [57]

Alla voce integrazione la rivista «Photovoltaics», Edition Detail pubblicata nel 2010, riporta:

«Un impianto fotovoltaico integrato è in armonia con il suo edificio; la tecnologia solare e la struttura sono componenti collaboranti in un sistema simbiotico». [57]

Si evidenzia inoltre che, esaminando casi di studio in cui il sistema fotovoltaico oltre alla funzione energetica soddisfa anche funzioni architettoniche, i due componenti edificio e tecnologia solare risultano un'unità inseparabile. [57]

Un buon progetto, sia in termini compositivi che tecnologici, è in grado di coniugare in modo equilibrato e armonioso l'installazione fotovoltaica non solo con l'edificio stesso ma anche con il contesto in cui si inserisce.

Un valido e corretto approccio progettuale garantisce l'integrazione della tecnologia solare ponendo in primo piano le esigenze di funzionalità e fruibilità e garantendo la piena compatibilità tra edificio e sistema. [58]

Una corretta installazione deve seguire linee guida chiave: [58]

- ottimizzazione dell'energia ottenibile
- componenti solari progettati per integrarsi il più possibile all'organismo architettonico, in termini energetici e dal punto di vista tecnologico - edilizio
- il risultato progettuale finale, determinato da architettura e tecnologia, deve presentare una buona qualità estetica
- massimo vantaggio possibile dal punto di vista economico

Per garantire la massima ottimizzazione dal punto di vista energetico, i moduli devono essere posizionati in modo tale da poter intercettare la massima porzione di radiazione solare, devono essere in grado di lavorare nelle condizioni più favorevoli, ad esempio senza surriscaldarsi o essere ombreggiati, e inoltre hanno il compito di assicurare la maggiore efficienza e qualità dal punto di vista della produzione energetica per soddisfare il fabbisogno dell'utenza. [58]

Dal punto di vista progettuale del sistema edilizio è necessario valutare in modo accurato le superfici che possono prevedere l'installazione fotovoltaica rispetto ai parametri legati alla radiazione solare incidente su di esse e alla presenza di eventuali elementi di ostruzione dovuti al contesto. Oltre a valutazioni e analisi tecniche legate alla progettazione dell'edificio, è necessario verificare le caratteristiche climatiche del sito per garantire l'adeguatezza della scelta rispetto alle differenti opzioni possibili di impianti fotovoltaici. [58]

Per garantire un valido approccio verso la «progettazione integrata» le linee guida devono tener conto e sviluppare diversi criteri.

In questa sezione si definisce un metodo di sviluppo del progetto rispetto al sistema fotovoltaico, evidenziando 5 dispositivi, ovvero aspetti e parametri, fondamentali durante la fase di progettazione.

Lo studio definisce tali parametri come «dispositivi di integrazione», la messa in pratica di essi compone un disegno progettuale a 360° con l'obiettivo centrale di integrare la tecnologia fotovoltaica nell'edificio.

Lo schema in figura 5.2 sintetizza in modo chiaro l'obiettivo chiave da raggiungere, gli elementi a disposizione e, in connessione a questi, gli strumenti di progetto su cui è necessario lavorare per raggiungere una progettazione che tiene conto dei 3 parametri definiti precedentemente: architettura - energia - costruzione.



Figura 5.2 - I dispositivi come strumento di progetto

5.2 / Identificazione dei dispositivi progettuali

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

La tecnologia fotovoltaica oggi diventa un vero e proprio elemento concreto di progetto, caratterizzando in modo significativo l'architettura stessa.

Come evidenziato in precedenza (4.2) l'approccio BIPV rappresenta uno dei nuovi fondamenti per l'innovazione dello spazio costruito.

In questa sezione si analizza il grado di integrazione del sistema solare in relazione al progetto compositivo, è fondamentale che disegno architettonico e fotovoltaico si sviluppino in comunicazione tra loro generando un progetto di carattere dal punto di vista visivo ed efficiente in termini energetici.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

Con l'approccio alla metodologia BIPV i moduli PV, oltre alla funzione di generare energia solare, hanno la funzione di componente essenziale della costruzione. [51]

L'architetto può sviluppare il progetto fotovoltaico lavorando su elementi compositivi quali la copertura, la facciata ed elementi esterni di integrazione. [59]

Lo schema in figura 5.3 riporta la classificazione elaborata da IEA per i sistemi BIPV, i quali vengono rappresentati graficamente nella figura 5.4.

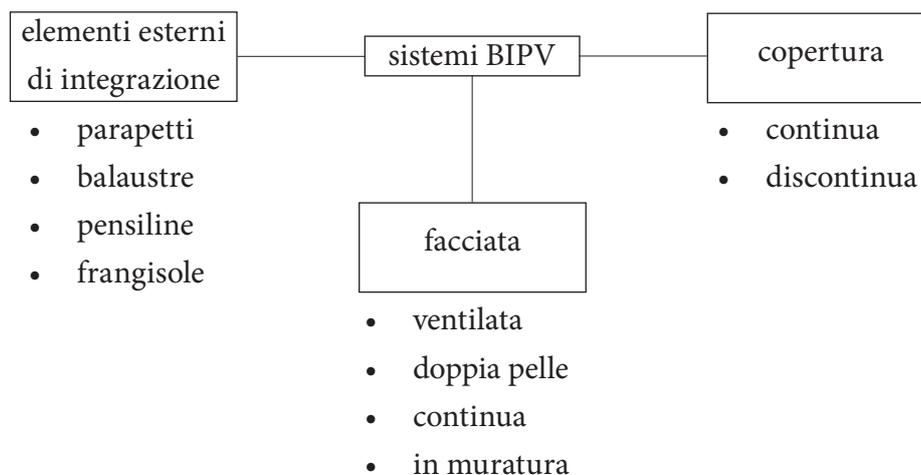


Figura 5.3 - BIPV system classification

fonte: Report IEA, «Categorization of BIPV applications 2021», International Energy Agency, 2021.

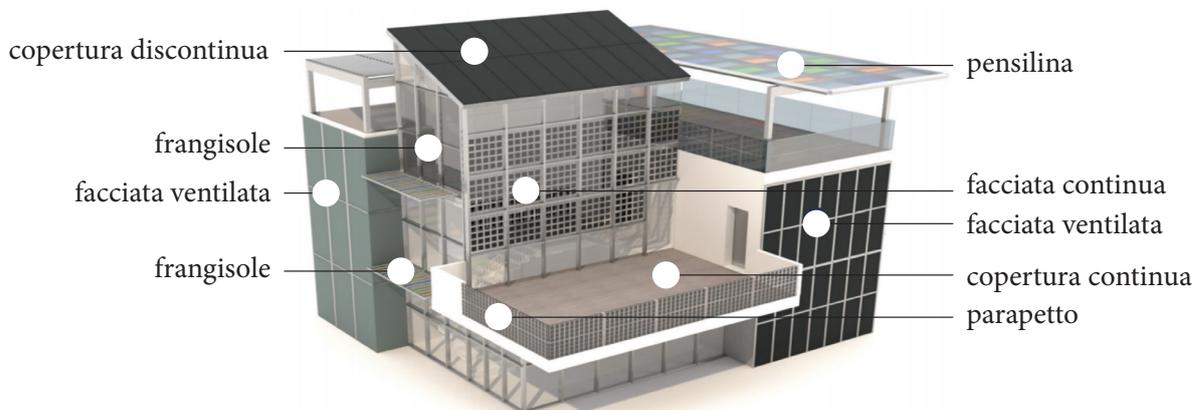


Figura 5.4 - Some examples of BIPV systems in a real building case

fonte: Report IEA, «Categorization of BIPV applications 2021», International Energy Agency, 2021.

L'integrazione di sistemi di energia solare permette di sostituire elementi tradizionali compositivi e materiali con l'obiettivo di modificare il concetto di spazio costruito che, da sistema passivo, risulta un organismo attivo energeticamente.

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Questo dispositivo valuta il connubio architettura e paesaggio circostante: un progetto integrato valuta e studia in che modo l'edificio si inserisce e comunica con il contesto.

La cultura del paesaggio deve essere considerata come un fattore innovativo in relazione alla gestione del territorio e al progetto architettonico. [60]

La convenzione europea del paesaggio, siglata a Firenze nel 2000, riporta la seguente definizione di paesaggio:

«Il paesaggio è una determinata parte di territorio [...] il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni»

I 3 livelli di tutela del paesaggio sono i seguenti:

- in Italia: Codice dei Beni culturali e del Paesaggio
- in Europa: Convenzione europea del paesaggio
- nel Mondo: l'UNESCO e World Heritage Convention

Il ruolo dell'architetto risulta fondamentale per definire una relazione tra spazio costruito e ambiente naturale, per tutelare e valorizzare le valenze del paesaggio: [60]

- valore estetico: vista panoramica
- valore ambientale: qualità ecologica
- valore sociale: identità dei luoghi per le popolazioni residenti
- valore economico: potenzialità turistiche e insediative
- valore storico-culturale: patrimonio di beni ereditato dal passato

Il progettista ha a disposizione diversi elementi: lo studio compositivo, i materiali e i colori sono alcuni strumenti di progetto che permettono di realizzare l'architettura in equilibrio, creando una stabilità dell'insieme con l'ambiente circostante.

In Italia la produzione di energia è materia di competenza tra Stato e Regioni.

Allo Stato compete l'enunciazione dei principi fondamentali mentre le regioni possono definire leggi di dettaglio, sempre nel rispetto dei principi stabiliti con leggi statali. [61]

«Le norme di settore che disciplinano le procedure autorizzative per la realizzazione di impianti da fonti rinnovabili rinviano o comunque vanno interpretate in combinato disposto con le norme generali sul procedimento amministrativo di cui alla legge 7 agosto 1999, n.241». [61]

In particolare rilievo sono le norme in materia ambientale e paesaggistica che regolano i principali atti di assenso ai quali talvolta è subordinato il rilascio dell'autorizzazione, si fa quindi riferimento alle seguenti disposizioni:

- il decreto legislativo 3 aprile 2006 n.152 regola le procedure per la valutazione di impatto ambientale
- il codice dei beni culturali e del paesaggio, decreto legislativo 22 gennaio 2004 n.42

Si evidenzia che ai sensi del D.lgs. n.199/2021 per energia da fonti rinnovabili o di energia rinnovabile si intende l'energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili quindi è compresa l'energia solare, termica e fotovoltaica.

L'articolo 4, comma 2 del D.Lgs. n.199/2021, elenca «i regimi di autorizzazione per la costruzione e l'esercizio degli impianti a fonti rinnovabili»: [61]

- comunicazione attività in edilizia libera
- dichiarazione di inizio lavori asseverata
- procedura abilitativa semplificata
- autorizzazione unica

La valutazione di impatto ambientale riportata nel D.Lgs. n.152/2006 è di particolare importanza in quanto, molti progetti, superando gli impianti o le opere connesse, sono sottoposti a verifica di assoggettabilità VIA¹³. [61]

Se il progetto è sottoposto a Valutazione di Impatto Ambientale perchè supera le soglie definite dalla normativa, il proponente predispone uno studio di impatto ambientale secondo il D.Lgs. n. 152/2006 e successivamente l'autorità competente valuta e verifica la completezza della documentazione presentata, possono essere richieste integrazioni, le quali devono essere fornite entro i termini stabiliti dalla norma. [61]

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Per percezione visiva si intende il processo fisico grazie al quale l'essere umano estrae informazioni dall'ambiente circostante attraverso il fattore luce. Tale percezione è influenzata da 3 fattori: luce, oggetto e soggetto percipiente. [s23]

«La percezione visiva è un processo complesso che coinvolge l'occhio e il cervello.

I colori, i volumi e le forme sono elementi fondamentali che contribuiscono alla percezione visiva». [62]

¹³ Valutazione impatto ambientale

Il colore è considerato un fattore che influenza la percezione di un oggetto e l'umore dell'osservatore stesso, i volumi e le forme sono elementi chiave per la percezione della profondità e della tridimensionalità. [62]

Quando osserviamo un oggetto entrano in gioco due fattori: l'aspetto fisiologico, cioè essenzialmente l'occhio, e l'aspetto psicologico, ovvero la mente che definisce un senso alle immagini. Un oggetto può essere interpretato in diversi modi dalla mente umana, risulta quindi fondamentale considerare il contesto in cui è inserito per definire la più corretta interpretazione. [63]

Analizzando lo spazio costruito il principio della semplicità è fondamentale: ordine, regolarità e simmetria sono parametri che permettono di comprendere con più facilità lo spazio progettato.

«L'ambiguità, se è lieve, tende ad essere semplificata, eliminata o amplificata». [63]

Il disegno progettuale di elementi che seguono il principio di simmetria e geometria tra le parti, aiuta a riconoscere una gerarchia degli elementi, definendo armonia e equilibrio dello spazio di progetto.

Questo dispositivo analizza e valuta l'aspetto più intrinseco del rapporto tra architettura e percezione sensoriale: l'architetto finlandese J. Pallasmaa ritiene che l'architettura si sia trasformata in arte visiva, ed esclusivamente quest'ultima prevede un'esperienza multisensoriale significativa. [64]

Lo spazio costruito si può misurare attraverso il tatto, gli odori e la vista: i colori, i volumi progettati e le diverse materialità degli elementi, realizzano una compresenza di sensazioni che mettono in relazione la percezione dell'uomo con lo spazio costruito. [64]

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

In questa sezione si analizzano i dati energetici dei casi di studio in esame:

- **S** - superficie solare attiva
- **P_{pv}** - potenza di picco
- **E_{pv}** - produzione di energia

La valutazione delle prestazioni è definita dai seguenti calcoli:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2$

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H$

H = irraggiamento solare totale calcolato sulla superficie in esame tramite PVGIS

L'obiettivo del seguente dispositivo è la valutazione del progetto dal punto di vista del fattore energetico.

È importante evidenziare, dopo aver esplicitato la descrizione dei 5 dispositivi, lo scopo iniziale posto da essi: composizione di un disegno progettuale a 360° con l'applicazione di tutti i «dispositivi di integrazione» utilizzati come un vero e proprio strumento.

5.3 / Analisi casi di studio

L'elaborato propone la descrizione e l'analisi di casi di studio che presentano in modo differente l'integrazione della tecnologia fotovoltaica all'edificio, evidenziando in modo concreto le potenzialità della metodologia BIPV.

Si analizzano 10 casi di studio presenti in Europa:

- dal caso di studio n.1 al caso di studio n.6 sono progetti localizzati sul territorio svizzero (figura 5.5)
- dal caso di studio n.7 al caso di studio n.10 sono progetti presenti nel resto d'Europa (figura 5.6)

Le fonti dalle quali sono state estratte le informazioni di progetto sono le seguenti:

- solarchitecture.ch
Piattaforma che promuove l'energia solare in architettura, fornisce informazioni su progetti esistenti, tecnologie solari utilizzate e dettagli costruttivi.
Il sito è stato creato da ETH Zürich, SUPSI e Swissolar.
- IEA-PVPS Task 15
Report redatti da IEA in relazione al tema BIPV e inseriti all'interno di «Task 15».
- whitearkitekter.com
Studio di architettura con sede a Göteborg, in Svezia. È la più grande azienda della Scandinavia.
- group.intesasanpaolo
Istituto bancario italiano con sede legale e amministrativa nella città di Torino.
Intesa Sanpaolo S.p.A ha finanziato il progetto per il grattacielo Intesa Sanpaolo nel capoluogo piemontese.



Figura 5.5 - Individuazione casi di studio in Svizzera



Destinazione d'uso:

● residenziale ● amministrativo ● istruzione

Figura 5.6 - Individuazione casi di studio nel resto d'Europa

I casi di studio sono presentati e analizzati nel seguente modo:

- INFORMAZIONI GENERALI DI INQUADRAMENTO
 1. Nome del progetto
 2. Ubicazione
 3. Studio/architetto
 4. Anno
 5. Tipo di edificio
 6. Tipo di costruzione
 7. Tipo di integrazione fotovoltaica
 8. Fonte

- ANALISI DEI DISPOSITIVI DI INTEGRAZIONE

DISPOSITIVI	STRUMENTI DI ANALISI
1. INTEGRAZIONE EDILIZIA	Dettaglio costruttivo e/o zoom fotografici
2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE	zoom fotografici
3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA	Immagini del contesto
4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA	Immagini dei prospetti
5. INTEGRAZIONE ENERGETICA	Calcoli relativi ai parametri energetici

Caso studio 1 - Sol'CH

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Nadia Vontobel
- Anno: 2021
- Tipo di edificio: residenziale
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in copertura e in facciata



fonte: solararchitecture.ch

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

L'intero involucro dell'edificio è costituito da moduli fotovoltaici integrati in copertura e in facciata.

Il carattere di questo progetto è determinato dalla modularità e dalla ripetizione del pannello solare su tutta la superficie dell'abitazione: la tecnologia fotovoltaica descrive l'elemento chiave della composizione architettonica.

Si percepisce in modo evidente come spazio costruito e tecnologia fotovoltaica siano stati progettati e sviluppati insieme, definendo coerenza e linearità del progetto dal punto di vista visivo, compositivo ed energetico.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I pannelli in copertura e in facciata assumono la funzione di generatore di energia e di rivestimento.

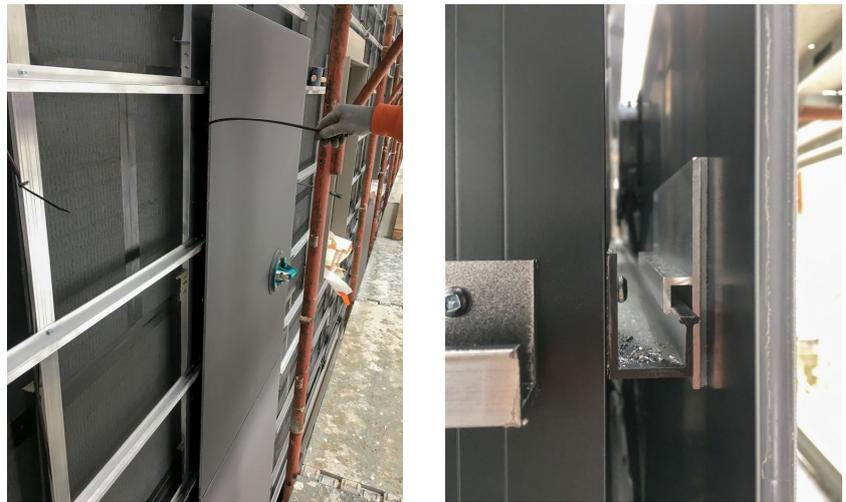
L'applicazione di tegole solari integrate in un tetto a falde avviene grazie a un sistema di fissaggio con l'utilizzo di ganci di supporto avvitati ai listelli del tetto come mostrato in figura 5.7.

Il rivestimento fotovoltaico integrato in facciata fredda si realizza tramite un sistema di fissaggio continuo su binari in alluminio rappresentato in figura 5.8.



I moduli fotovoltaici sono posati sopra i listelli del tetto in legno

Figura 5.7 - Applicazione tegole solari



I moduli Sunage BIPV sono fissati alla facciata tramite binari orizzontali in alluminio

Figura 5.8 - Sistemi di fissaggio rivestimento fotovoltaico integrato in facciata

fonte: solarchitecture.ch

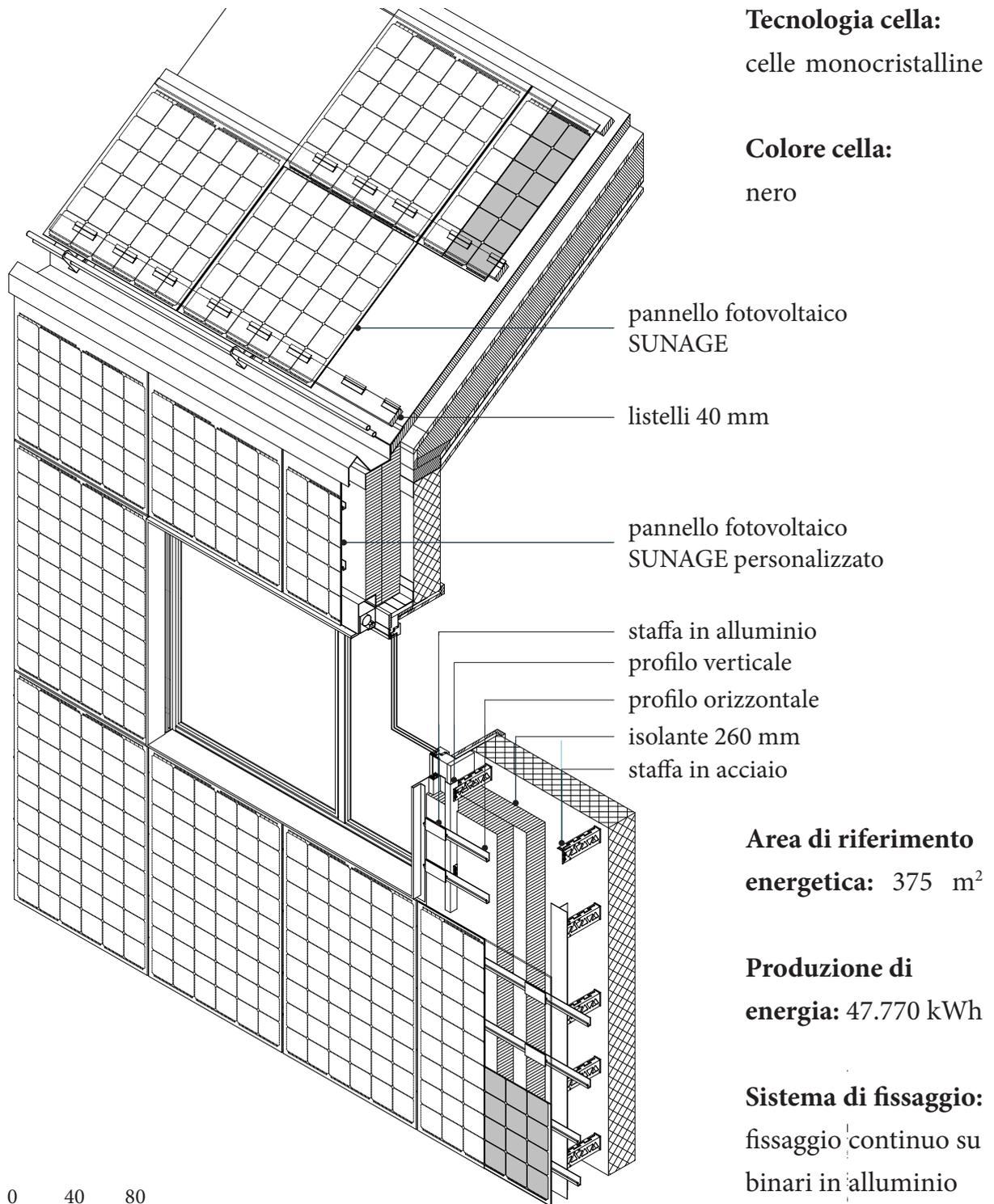


Figura 5.9 - Dettaglio costruttivo Sol'CH

fonte: solarchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto pone come obiettivo l'uso ottimale dell'energia solare, ottenendo allo stesso tempo un'architettura di qualità con elementi che si fondono con l'ambiente circostante in modo equilibrato.

La sagoma e il profilo dell'edificio rimandano alle vette che caratterizzano il paesaggio, mentre la superficie opaca e scura della facciata e della copertura fotovoltaica con i suoi toni antracite e marrone si integra in modo armonioso nel contesto svizzero.

E' importante evidenziare che Sol'CH, a livello di qualità compositiva e tecnologica, spicca nel contesto montano in cui si inserisce.



Figura 5.10 - Il progetto Sol'CH si fonde con il villaggio di Poschiavo e il paesaggio circostante

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Il progetto dei volumi, la scelta dei materiali e dei colori rende l'involucro edilizio di Sol'CH un'architettura estremamente particolare ed interessante: la scelta di mantenere lo stesso materiale e lo stesso colore per tutto l'edificio conferisce a questo un carattere notevole, come mostrato in figura 05.11.

L'idea progettuale di utilizzare in totale continuità il modulo solare sia in copertura che in facciata sicuramente è un fattore che contraddistingue l'edificio.

La ripetizione del modulo fotovoltaico definisce un senso di regolarità e, allo stesso tempo, di rigidità determinato da uno schema a griglia definito in figura 05.12.



Figura 5.11 - Copertura e facciata fotovoltaica con toni antracite e marrone



Figura 5.12 - Prospetto SUD

Definizione griglia con ripetizione modulo fotovoltaico

fonte: solarchitecture.ch

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 187 m² copertura, 284 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 34 kWp copertura, 30 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 47.770 kWh (produzione impianti 06.2021 - 03.2022)

fonte: solararchitecture.ch

Valutazione prestazioni:

1. **EP_{pv}** - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 47.770 \text{ kWh} : (34 + 30) \text{ kWp} = \mathbf{746,41 \text{ kWh/kWp}}$

2. **ES_{pv}** - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 47.770 \text{ kWh} : 415 \text{ m}^2 = \mathbf{115,11 \text{ kWh/m}^2}$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante e sezioni non quotate.

3.a **E'_{pv}** - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{54.618,75 \text{ kWh}}$

3.b **EP'_{pv}** - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 54.618,75 \text{ kWh} : (34 + 30) \text{ kWp} = \mathbf{853,42 \text{ kWh/kWp}}$

3.c **ES'_{pv}** - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 54.618,75 \text{ kWh} : 415 \text{ m}^2 = \mathbf{131,61 \text{ kWh/m}^2}$

4. **η** = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 54.618,75 \text{ kWh} : 582.617,61 \text{ kWh} = 0,0937 = \mathbf{9,37\%}$

Valutazione esposizione

COPERTURA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
C1	nord - 180°	110	20
C2	sud - 0°	77	14
	TOT	187 m²	34 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

C1	12.063,54 kWh
C2	16.844,40 kWh

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	100	12
F2	sud - 0°	77	8
F3	ovest - +90°	53,50	5
F4	est - -90	53,50	5
	TOT	284 m²	30 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	7.238,12 kWh	
F2	9.625,37 kWh	
F3	4.198,70 kWh	
F4	4.648,62 kWh	
	TOT	54.618,75 kWh

Caso studio 2 - Höngg

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Beat Kämpfen
- Anno: 2019
- Tipo di edificio: residenziale
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in copertura e in facciata



fonte: solararchitecture.ch

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

L'intero involucro dell'edificio è costituito da moduli fotovoltaici integrati in copertura e in facciata.

L'elemento chiave del progetto è rappresentato dall'utilizzo dei moduli fotovoltaici come rivestimento in facciata, questi risultano indistinguibili da un rivestimento standard.

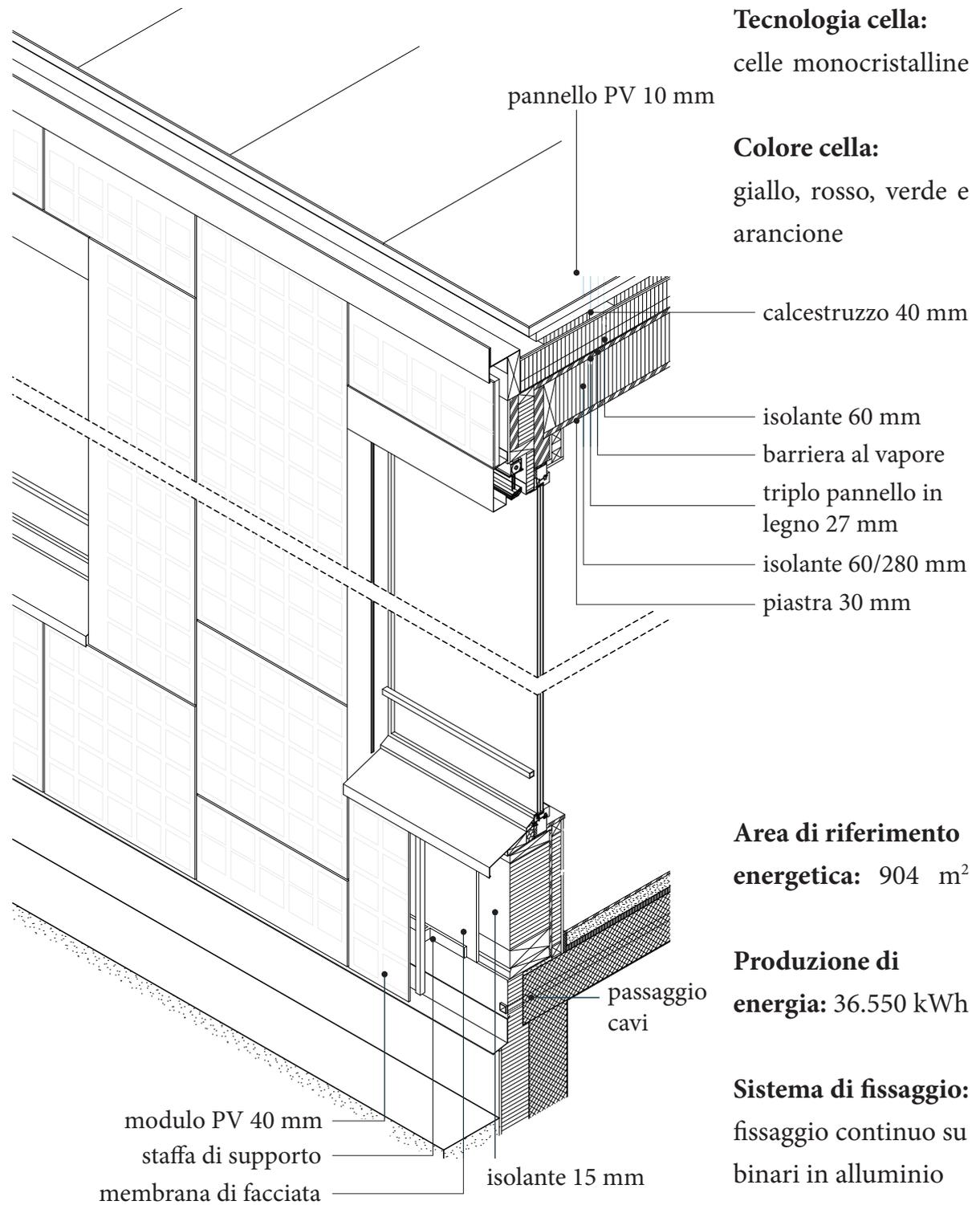
Il «disegno fotovoltaico» dalla facciata si estende alla copertura piana definendo una linearità dal punto di vista estetico e materico.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

Il sistema fotovoltaico integrato sia in copertura che in facciata assume la funzione di generatore di energia e di rivestimento.

Sia in copertura che in facciata i moduli sono posati su un sistema di supporto metallico attraverso un sistema di fissaggio continuo su binari in alluminio.

La possibilità di stampare moduli fotovoltaici di dimensioni diverse permette di definire composizioni completamente nuove, coniugando la funzionalità e l'estetica relative alla tecnologia.



0 5 10 20

Figura 5.13 - Dettaglio costruttivo Høngg

fonte: solarchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il condominio è progettato e sviluppato come una centrale solare, questo è un carattere, dal punto di vista tecnologico, che caratterizza l'edificio rispetto all'edilizia tradizionale presente.

L'alternarsi di pieni/vuoti in prospetto e l'utilizzo di colori con sfumature che rimandano al paesaggio naturale, definiscono un effetto compositivo equilibrato senza interrompere l'armonia di un contesto residenziale tradizionale immerso nel verde.

Su entrambi i fronti principali l'architetto ha pensato di aprire lo sguardo dell'edificio attraverso grandi spazi terrazzati, essi permettono la vista verso sud sulla cittadina di Zurigo e a nord su aree verdi che caratterizzano l'area più soleggiata della città.



Figura 5.14 - Il condominio Höngg e il contesto limitrofo

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

La ripetizione del modulo fotovoltaico su tutta la superficie in facciata definisce un forte senso di regolarità interrotto però dalle aperture che conferiscono movimento al prospetto stesso, come mostrato in figura 5.15.

In fase di progettazione è stata definita una griglia basata su un multiplo della lunghezza dell'edificio senza aree di scarto. I moduli in facciata sono disposti in senso verticale in una griglia di 1 m, sono stati utilizzati 4 tipi di moduli che derivano dalle altezze tra tetto, finestra e base dell'edificio.

Nel parapetto del balcone gli stessi moduli sono stati ruotati di 90°.

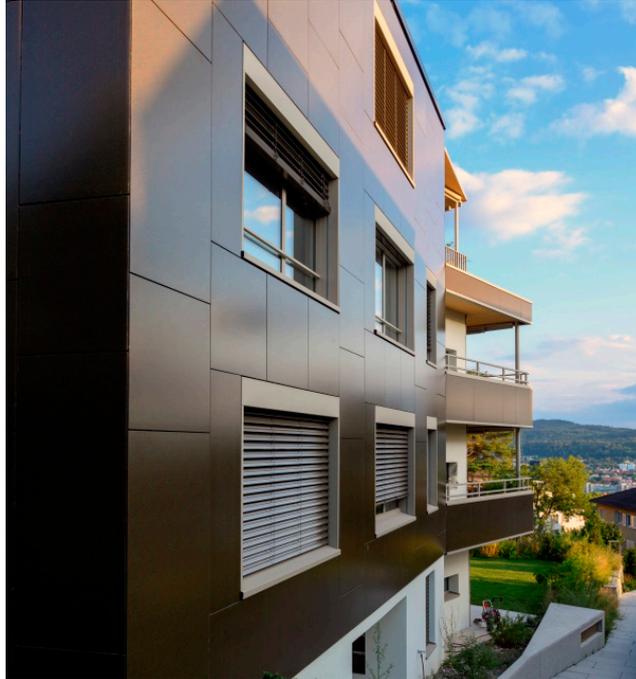


Figura 5.15 - Prospetto EST

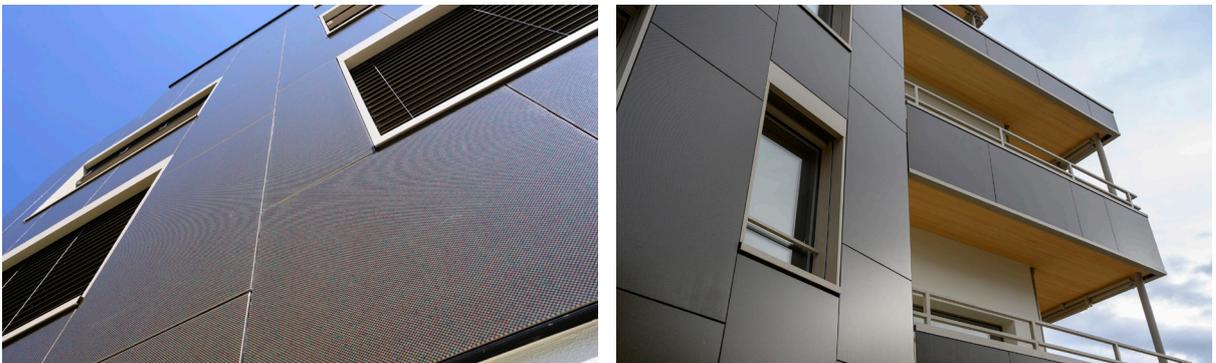


Figura 5.16 - Definizione griglia modulo fotovoltaico

fonte: solarchitecture.ch

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 141 m² copertura, 339 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 25,1 kWp copertura, 42,3 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 36.550 kWh

fonte: solarchitecture.ch

Valutazione prestazioni:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 36.550 \text{ kWh} : (25,1 + 42,3) \text{ kWp} = 542,28 \text{ kWh/kWp}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 36.550 \text{ kWh} : 630 \text{ m}^2 = 58,02 \text{ kWh/m}^2$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante e sezioni non quotate.

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = 62.440,32 \text{ kWh}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 62.440,32 \text{ kWh} : (25,1 + 42,3) \text{ kWp} = 926,41 \text{ kWh/kWp}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 62.440,32 \text{ kWh} : 630 \text{ m}^2 = 99,11 \text{ kWh/m}^2$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 62.440,32 \text{ kWh} : 581.153 \text{ kWh} = 0,1074 = 10,74\%$

Valutazione esposizione

COPERTURA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
C1	sud - 0°	141	25,1
	TOT	141 m²	25,1 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

C1 **27.047,43 kWh**

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	80	9
F2	sud - 0°	59	7,3
F3	ovest - +90°	100	13
F4	est - -90	100	13
	TOT	339 m²	42,3 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1 **5.196,35 kWh**

F2 **7.866,38 kWh**

F3 **11.318,48 Wh**

F4 **11.011,68 kWh**

TOT 62.440,32 kWh

Caso studio 3 - Solaris 416

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Erika Fries
- Anno: 2017
- Tipo di edificio: residenziale
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in copertura e in facciata



fonte: solararchitecture.ch

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

L'edificio residenziale in esame presenta un aspetto omogeneo grazie a elementi in vetro utilizzati come rivestimento. I pannelli fotovoltaici a integrazione totale in copertura e in facciata presentano lo strato superiore in vetro marrone stampato a laser.

Solaris rappresenta un modello tipo di «progettazione integrata»: il progetto relativo ai moduli è stato sviluppato appositamente per questo edificio, conferendo un carattere interessante e particolare alla facciata.

Dal punto di vista compositivo e visivo è notevole la giunzione tra l'elemento copertura e la facciata.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I moduli solari utilizzati per la produzione di energia e come rivestimento, consentono di ridurre di circa il 39% la produzione di elettricità.

Le giunzioni aperte tra gli elementi non presentano la cornice e risultano invisibili dall'esterno come evidenziato in figura 5.17.

Rispetto al sistema di fissaggio in copertura e in facciata del modulo, questo è realizzato su binari in alluminio come mostrato in figura 5.18.



Focus raccordo tra elemento di copertura e facciata

Figura 5.17 - Le giunzioni tra gli elementi non presentano la cornice



Installazione dei moduli fotovoltaici su binari in alluminio

Figura 5.18 - Sistemi di fissaggio Solaris 416

fonte: solarchitecture.ch

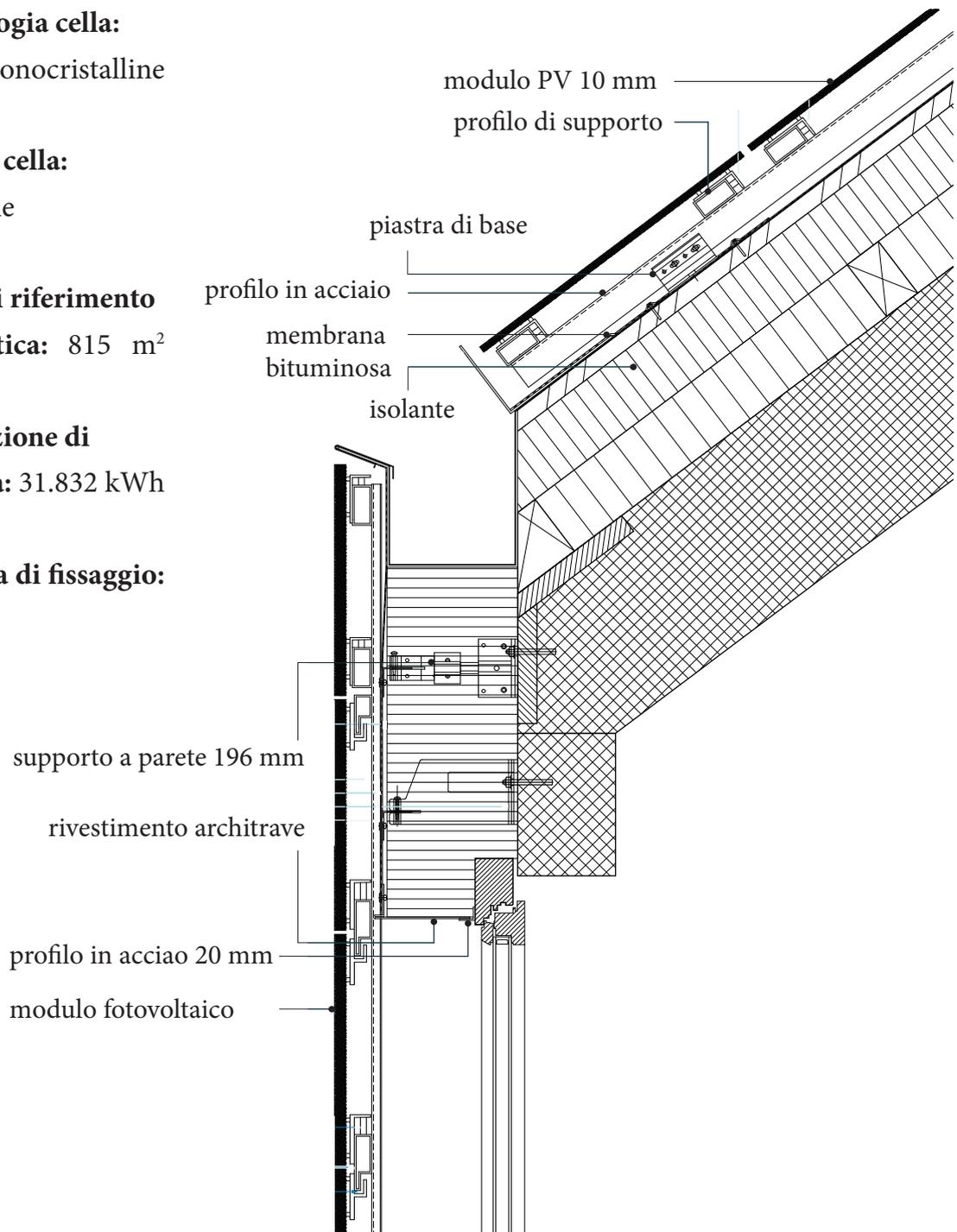
Tecnologia cella:
celle monocristalline

Colore cella:
marrone

**Area di riferimento
energetica:** 815 m²

**Produzione di
energia:** 31.832 kWh

Sistema di fissaggio:



0 5 20

Figura 5.19 - Dettaglio costruttivo Solaris 416

fonte: solarchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

L'architetto ha deciso di riproporre, attraverso un gioco particolare di geometrie, la copertura a falde che caratterizza gli edifici tradizionali presenti.

L'edificio ha dei caratteri compositivi importanti da evidenziare che contraddistinguono il progetto dalle abitazioni circostanti:

- il piano terra è caratterizzato da uno spazio aperto su pilotis che si interseca con la strada pubblica adiacente
- la presenza di spazi finestrati ad angolo crea dall'interno un'entrata maggiore di luce naturale e dall'esterno un elemento compositivo interessante
- la continuità del rivestimento conferisce notevole carattere al sistema, sia per lo studio dei pannelli progettati appositamente per questo progetto, sia per la scelta di un colore che cattura l'attenzione dell'osservatore



Figura 5.20 - Il condominio Solaris 416 e il contesto limitrofo

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Dal punto di vista dell'osservatore i due elementi che colpiscono e catturano l'attenzione sono indubbiamente l'utilizzo in totale continuità del modulo solare sia in copertura che in facciata e l'uso di un colore molto scuro come il marrone. Questi due fattori sono caratteri comuni con il primo caso di studio analizzato, Sol'CH, qui però il modulo solare non è riportato secondo una griglia e questo è evidente osservando i prospetti: il modulo presenta la stessa dimensione per la maggior parte dell'area di facciata però viene replicato in maniera sfalsata come mostrato in figura 5.21.



Figura 5.21 - Modulo solare in prospetto

fonte: solarchitecture.ch

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 200 m² copertura, 400 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 25 kWp copertura, 46 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 31.832 kWh

fonte: solarchitecture.ch

Valutazione prestazioni:

1. **EP_{pv}** - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 31.832 \text{ kWh} : (25 + 46) \text{ kWp} = \mathbf{448,34 \text{ kWh/kWp}}$

2. **ES_{pv}** - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 31.832 \text{ kWh} : 960 \text{ m}^2 = \mathbf{33,16 \text{ kWh/m}^2}$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante e sezioni non quotate.

3.a **E'_{pv}** - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{58.035,52 \text{ kWh}}$

3.b **EP'_{pv}** - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 58.035,52 \text{ kWh} : (25 + 46) \text{ kWp} = \mathbf{817,40 \text{ kWh/kWp}}$

3.c **ES'_{pv}** - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 58.035,52 \text{ kWh} : 960 \text{ m}^2 = \mathbf{60,45 \text{ kWh/m}^2}$

4. **η** = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 58.035,52 \text{ kWh} : 663.389,25 \text{ kWh} = 0,0874 = \mathbf{8,74\%}$

Valutazione esposizione

COPERTURA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
C1	nord - 180°	100	12,5
C2	sud - 0°	100	12,5
	TOT	200 m²	25 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

C1	7.126,33 kWh
C2	13.168,66 kWh

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	135	16
F2	sud - 0°	135	16
F3	ovest - +90°	60	6
F4	est - -90	70	8
	TOT	400 m²	46 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	9.121,70 kWh	
F2	16.855,88 kWh	
F3	5.039,61 kWh	
F4	6.723,34 kWh	
	TOT	58.035,52 kWh

Caso studio 4 - Silo Bleu

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Epure Architecture et Urbanisme SA
- Anno: 2018
- Tipo di edificio: residenziale e amministrativo
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: solarchitecture.ch

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

L'involucro dell'edificio è costituito da moduli fotovoltaici integrati in facciata.

L'elemento che conferisce una forte identità all'edificio è la rete metallica regolare che definisce il ritmo delle aperture e dei moduli fotovoltaici disposti in modo alternato su tutto il prospetto.

Composizione e tecnologia si uniscono per dar luogo ad una nuova definizione formale con il fine di realizzare un edificio di carattere.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I moduli solari sono utilizzati per la produzione di energia e come rivestimento: i quattro prospetti sono ricoperti con 1.335 m² di moduli fotovoltaici.

Il progetto prevede l'installazione di 427 moduli BIPV, di 21 diverse dimensioni, questi sono integrati grazie ad un sistema di montaggio sviluppato appositamente per le vetrate strutturali.

E' possibile inoltre regolare la posizione e l'inclinazione dei moduli in quanto risultano sospesi nella parte superiore e mantenuti in posizione nella parte inferiore.

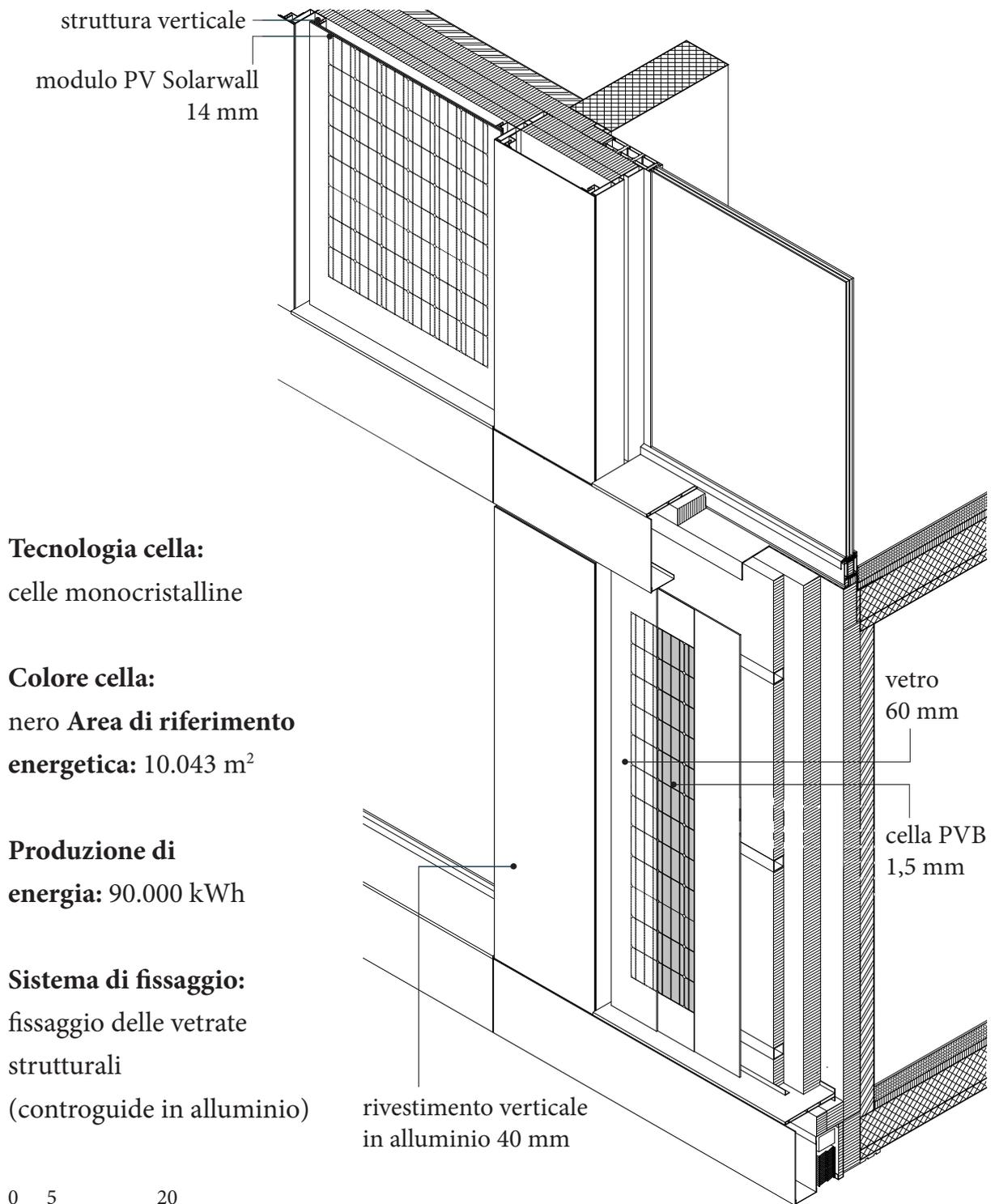


Figura 5.22 - Dettaglio costruttivo Silo Bleu

fonte: solararchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

L'area di intervento è regolata da un piano che definisce i modelli spaziali relativi ad un progetto: i paramenti riguardano l'altezza, la larghezza e la profondità di un edificio.

L'aspetto compositivo e i volumi, nonché i pieni e i vuoti sono stati studiati per conferire una forma slanciata alla struttura: l'edificio si inserisce in un contesto bivalente collocato da un lato tra i binari ferroviari e dall'altro verso la zona residenziale.

Il forte slancio e la verticalità sono caratteri che contraddistinguono l'edificio, in modo particolare nell'area residenziale, allo stesso tempo il progetto si relaziona con il contesto limitrofo attraverso le numerose aperture verso il paesaggio.



Figura 5.23 - Silo Bleu e il contesto circostante

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Analizzando i prospetti è possibile evidenziare come gli spostamenti nei piani di facciata e i tagli nel volume complessivo conferiscono una forma slanciata e definiscono una composizione «d'insieme», questi elementi sono visibili nelle immagini riportate in figura 5.23 e 5.24.

La rete metallica che compone il ritmo di pieni e vuoti conferisce un'identità specifica all'involucro edilizio: la facciata, definita da un griglia molto rigida e lineare, attraverso l'alternanza di colori chiaro e scuro e dei pieni e vuoti, conferisce una percezione di «movimento» dell'insieme compositivo.

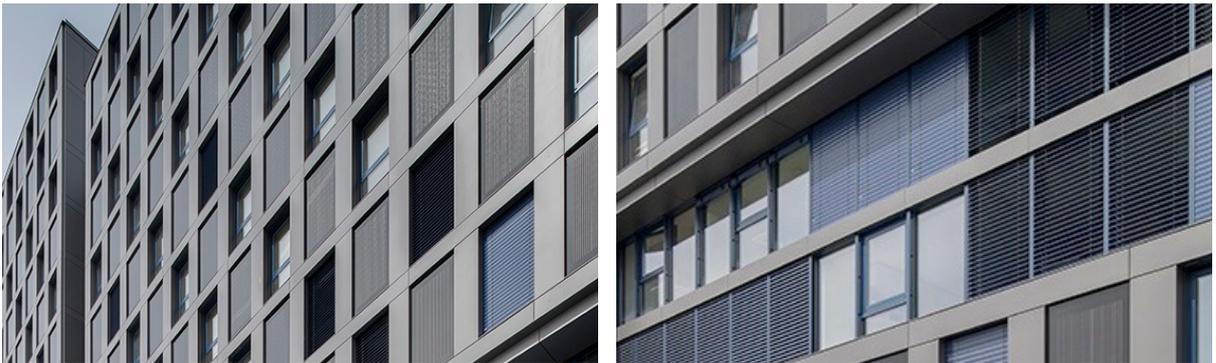
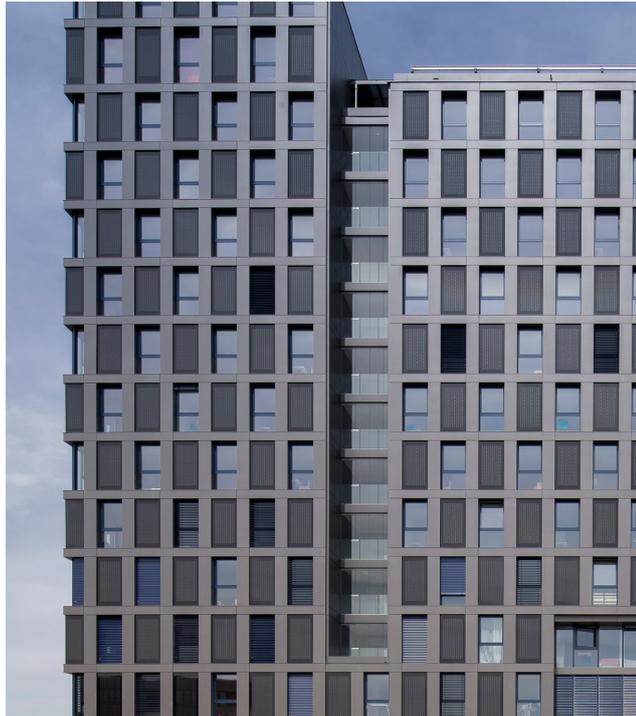


Figura 5.24 - Dettagli facciata

fonte: solarchitecture.ch

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 926 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 131,6 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 90.000 kWh

fonte: solarchitecture.ch

Valutazione prestazioni:

1. **EP_{pv}** - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 90.000 \text{ kWh} : 131,6 \text{ kWp} = \mathbf{683,89 \text{ kWh/kWp}}$

2. **ES_{pv}** - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 90.000 \text{ kWh} : 6.615 \text{ m}^2 = \mathbf{13,60 \text{ kWh/m}^2}$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante e sezioni non quotate.

3.a **E'_{pv}** - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{117.424,31 \text{ kWh}}$

3.b **EP'_{pv}** - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 117.424,31 \text{ kWh} : 131,6 \text{ kWp} = \mathbf{892,28 \text{ kWh/kWp}}$

3.c **ES'_{pv}** - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 117.424,31 \text{ kWh} : 6.615 \text{ m}^2 = \mathbf{17,75 \text{ kWh/m}^2}$

4. **η** = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 117.424,31 \text{ kWh} : 1.120.169,62 \text{ kWh} = 0,1048 = \mathbf{10,48\%}$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	320	48
F2	sud - 0°	320	48
F3	ovest - +90°	126	11,6
F4	est - -90	160	24
	TOT	926 m²	131,6 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	28.869,33 kWh
F2	55.934,12 kWh
F3	10.691,08 kWh
F4	21.929,78 kWh
	TOT 117.424,31 kWh

Caso studio 5 - AUE

Amt für Umwelt und Energie

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Sven Kowalewsky
- Anno: 2021
- Tipo di edificio: amministrativo
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: solararchitecture.ch

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

Il progetto per l'Ufficio per l'ambiente e l'energia del Cantone di Basilea Città pone come obiettivo centrale il concetto energetico complessivo: le facciate fotovoltaiche generano energia su tutti i lati dell'edificio, anche nelle zone meno esposte al sole, è previsto il teleriscaldamento, l'utilizzo di acqua piovana, la ventilazione è controllata con il recupero di calore e inoltre l'involucro è altamente isolato termicamente.

Questo insieme di fattori rende il sistema a energia zero, un importante esempio di edilizia efficiente che coniuga tecnologia, materiali e composizione.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

La facciata in vetro è ventilata e produce energia elettrica grazie ai moduli fotovoltaici a integrazione totale.

I moduli variano per dimensione e presentano una plasticità conferita dal vetro colato, inoltre i bordi sono trasparenti lasciando così intravedere la sottostruttura presente.

Il sistema di fissaggio in facciata è continuo realizzato su binari in alluminio.

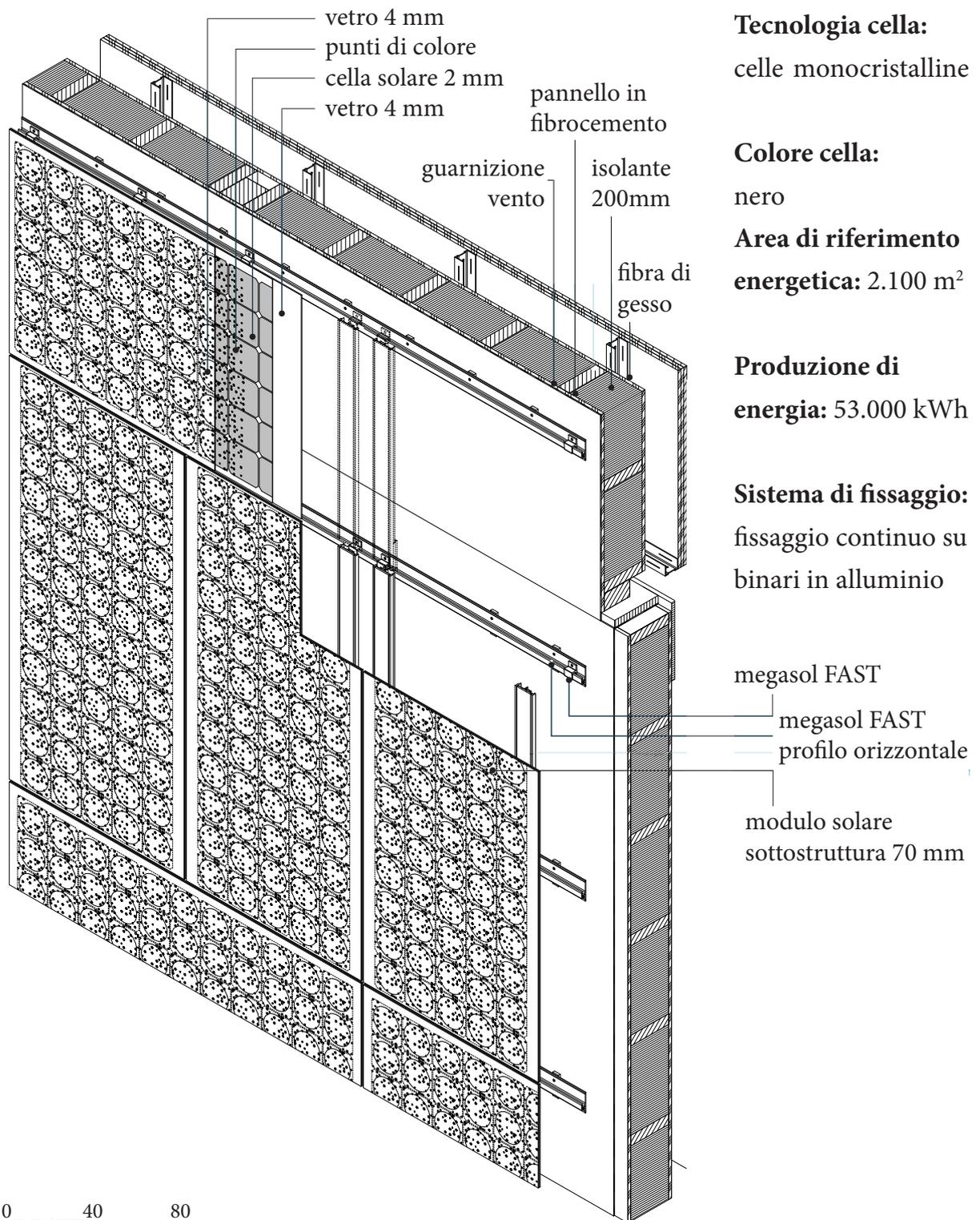


Figura 5.25 - Dettaglio costruttivo AUE

fonte: solararchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto, oltre agli obiettivi legati alla sostenibilità, vuole integrare in modo ottimale ed efficace l'edificio nel contesto urbano: per soddisfare tale fattore è stato progettato esclusivamente per AUE Amt für Umwelt und Energie un vetro speciale con la capacità di mostrare una «vivacità tridimensionale» che cambia rispetto alla luce.

«Grazie ai punti colorati e a una superficie strutturata in vetro fuso temperato, i giochi di luce sui moduli cambiano a seconda dell'angolo di visione e della luce solare».

Il rivestimento cambia rispetto al punto di vista e all'incidenza della luce.

Il progetto dei volumi, il disegno compositivo e lo studio dei materiali consentono alla struttura di integrarsi in maniera efficace nell'area centrale della città.

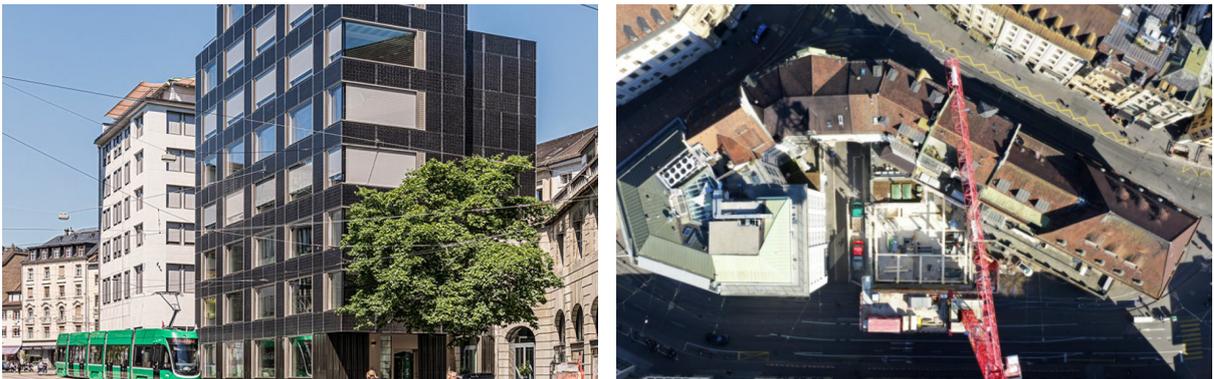


Figura 5.26 - AUE e il contesto limitrofo

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Osservando l'edificio dall'esterno è chiaro ed evidente l'approfondito studio e sviluppo del disegno compositivo e in parallelo l'approfondimento dal punto di vista tecnologico legato al sistema fotovoltaico in facciata. Questi fattori contribuiscono a trasmettere la struttura come un volume «d'insieme», dove composizione e tecnologia si incontrano per definire un edificio di forte e chiara identità: lo schema delle aperture definisce il ritmo regolare di facciata come evidenziano i prospetti in figura 5.27.



Figura 5.27 - Modulo solare in prospettiva

fonte: solarchitecture.ch

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- S - superficie solare attiva: 1.132 m² facciata
- P_{pv} - potenza di picco: 163 kWp facciata
- E_{pv} - produzione di energia: 53.000 kWh

fonte: solarchitecture.ch

Valutazione prestazioni:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 53.000 \text{ kWh} : 163 \text{ kWp} = 325,15 \text{ kWh/kWp}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 53.000 \text{ kWh} : 1.680 \text{ m}^2 = 31,55 \text{ kWh/m}^2$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante e sezioni non quotate.

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = 138.282,94 \text{ kWh}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 138.282,94 \text{ kWh} : 163 \text{ kWp} = 848,36 \text{ kWh/kWp}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 138.282,94 \text{ kWh} : 1.680 \text{ m}^2 = 82,31 \text{ kWh/m}^2$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 138.282,94 \text{ kWh} : 1.292.569,04 \text{ kWh} = 0,1069 = 10,69\%$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	400	60
F2	sud - 0°	400	60
F3	ovest - +90°	132	13
F4	est - -90	200	30
	TOT	1.132 m²	163 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	34.448,77 kWh
F2	66.475,16 kWh
F3	11.215,23 kWh
F4	26.143,78 kWh
	TOT 138.282,94 kWh

Caso studio 6 - Silo Solare

- Ubicazione: Svizzera
- Studio/architetto: Baübüro In situ AG
- Anno: 2014
- Tipo di edificio: amministrativo
- Intervento retrofit
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in copertura e in facciata



fonte: solararchitecture.ch

IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

Il progetto di ristrutturazione dell'edificio Silo Solare in Basilea pone come obiettivo centrale il tema dell'energia: la copertura e la facciata presentano moduli fotovoltaici colorati a totale integrazione.

Ogni modulo è monitorato singolarmente per ottimizzare l'efficienza dell'impianto e per registrare e studiare il rendimento energetico relativamente ai diversi colori.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I moduli BIPV sono utilizzati come elemento di rivestimento in copertura e in facciata. Il sistema di fissaggio in prospetto avviene mediante guide posteriori in metallo fissate da piccoli morsetti lungo i bordi dei moduli.

In modo analogo in copertura i moduli sono stati utilizzati come «grandi ardesie» per realizzare un tetto ventilato, progettato con una struttura in legno.

Sia in copertura che in facciata il passaggio dell'aria posteriore ai moduli conferisce un vantaggio dal punto di vista del comportamento termoisolante e per le prestazioni energetiche.

Tecnologia cella:
celle monocristalline

Colore cella:
nero

**Area di riferimento
energetica:** 673 m²

**Produzione di
energia:** 16.400 kWh

Sistema di fissaggio:
-

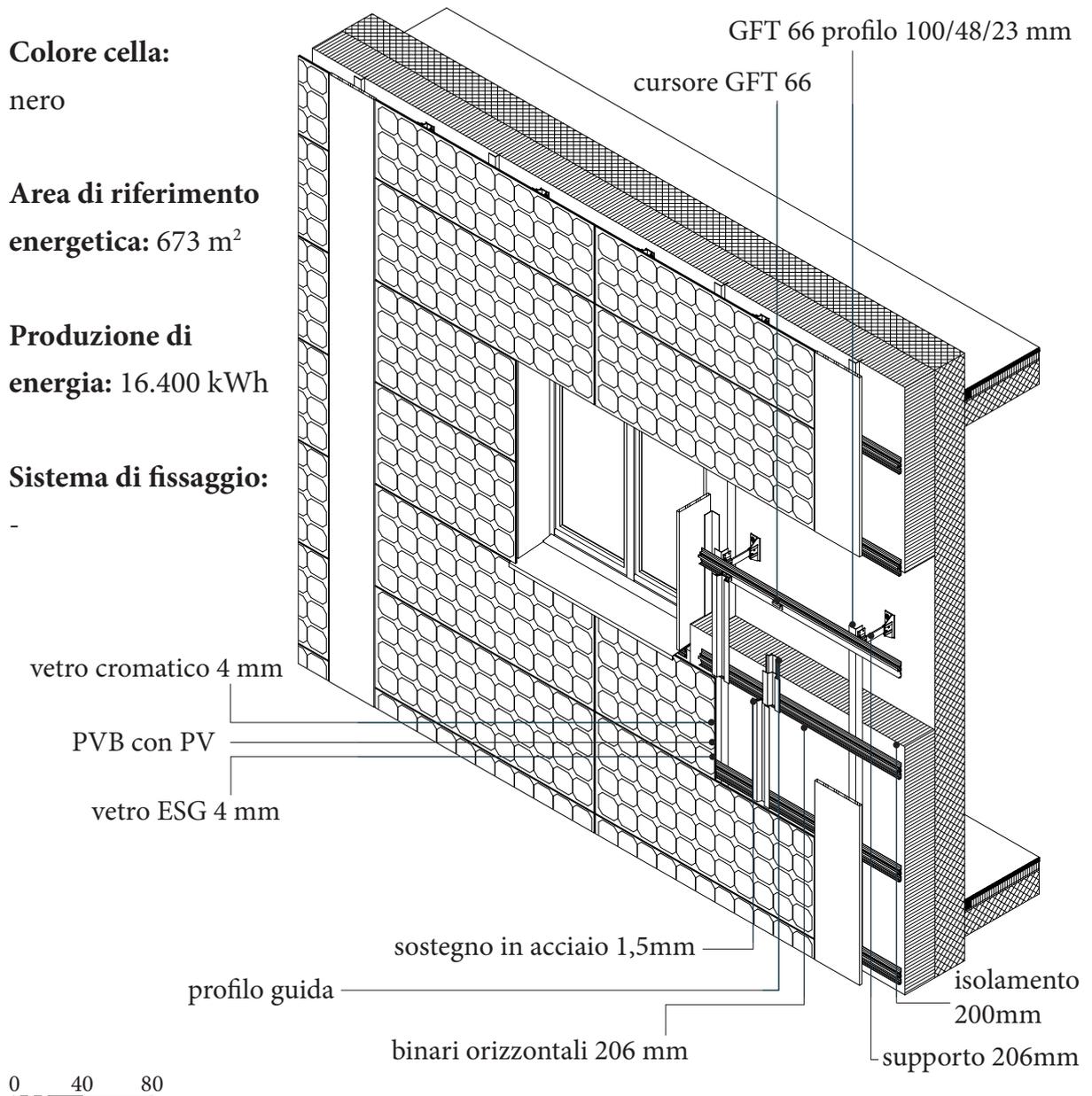


Figura 5.28 - Dettaglio costruttivo Silo Solare

fonte: solarchitecture.ch

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

L'edificio in esame si trova nell'area dell'ex sito «Gundeldinger Feld», un tempo spazio della città industriale, oggi è sorto un distretto culturale.

L'area è tutelata a livello di patrimonio paesaggistico e i lavori di ristrutturazione devono adattarsi e seguire linee guida precise legate allo stile e alla combinazione dei colori del sito.

Il nuovo sistema rappresenta un elemento di innovazione dal punto di vista tecnologico e compositivo: il carattere del progetto è evidenziato dal disegno dei moduli fotovoltaici colorati che contraddistinguono l'edificio all'interno dell'ex area produttiva.

E' importante evidenziare che il progetto di ristrutturazione è stato sviluppato, proprio in relazione alle linee guida a livello paesaggistico, per integrarsi nel contesto senza interrompere gli equilibri presenti.



Figura 5.29 - Silo Solare e il contesto limitrofo

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Analizzando il prospetto principale sud è possibile evidenziare un senso di regolarità dettato dalla ripetizione del modulo fotovoltaico, le aperture si inseriscono all'interno della griglia in modo proporzionale e simmetrico.

Il disegno del prospetto, definito da un sistema rigido e lineare, acquisisce un'identità specifica grazie all'alternanza di colori e dei pieni e vuoti, i quali creano una percezione di «movimento» dell'insieme compositivo.

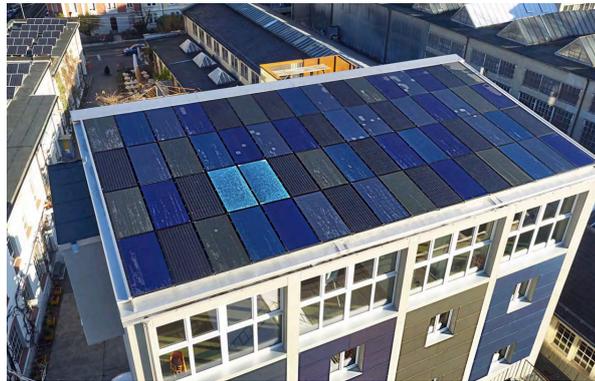


Figura 5.30 - Prospetto SUD

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», International Energy Agency, 2021.

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 82 m² copertura, 77 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 12,8 kWp copertura, 11,2 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 16.400 kWh

fonte: solarchitecture.ch

IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

Valutazione prestazioni:

1. **EP_{pv}** - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 16.400 \text{ kWh} : (12,8 + 11,2) \text{ kWp} = \mathbf{683,33 \text{ kWh/kWp}}$

2. **ES_{pv}** - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 16.400 \text{ kWh} : 606 \text{ m}^2 = \mathbf{27,06 \text{ kWh/m}^2}$

Il dato relativo ai m² è stato estratto dal sito hiberatlas.com

3.a **E'_{pv}** - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{24.736,55 \text{ kWh}}$

3.b **EP'_{pv}** - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 24.736,55 \text{ kWh} : (12,8 + 11,2) \text{ kWp} = \mathbf{1.030,69 \text{ kWh/kWp}}$

3.c **ES'_{pv}** - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 24.736,55 \text{ kWh} : 606 \text{ m}^2 = \mathbf{40,82 \text{ kWh/m}^2}$

4. **η** = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 24.736,55 \text{ kWh} : 215.564,28 \text{ kWh} = 0,1147 = \mathbf{11,48\%}$

Valutazione esposizione

COPERTURA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
C1	sud - 0°	82	12,8
	TOT	82 m²	12,8 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

C1 **13.848,51 kWh**

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	nord - 180°	20	2,4
F2	sud - 0°	57	8,8
	TOT	77 m²	11,2 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1 **1.367,19 kWh**

F2 **9.520,85 kWh**

TOT 24.736,55 kWh

Caso studio 7 - Copenhagen International School

- Ubicazione: Danimarca
- Studio/architetto: C. F. Møller Architects
- Anno: 2017
- Tipo di edificio: istruzione
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

L'intero edificio è costituito da moduli fotovoltaici integrati in facciata.

Il carattere di questo progetto è determinato dalla ripetizione del modulo fotovoltaico su tutta la superficie della scuola: è possibile affermare che la tecnologia PV rappresenta l'elemento chiave della composizione architettonica.

Il parallelismo tra sviluppo architettonico e sviluppo tecnologico definiscono coerenza e linearità del progetto dal punto di vista compositivo ed energetico.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I pannelli in facciata assumono la funzione di generatore di energia e di rivestimento.

I 12.000 moduli fotovoltaici sono fissati alle pareti attraverso un sistema di montaggio progettato in modo apposito per l'edificio.

I moduli PV installati a nord non sono collegati e hanno la funzione di riserva nel caso in cui un modulo delle altre facciate attive non funzioni elettricamente.

La produzione di energia relativa al sistema BIPV è stimata intorno al 50% del totale annuo del consumo di elettricità della scuola.

Tecnologia cella:

celle monocristalline
con vetro cromatico

Colore cella:

verde mare

Area di riferimento

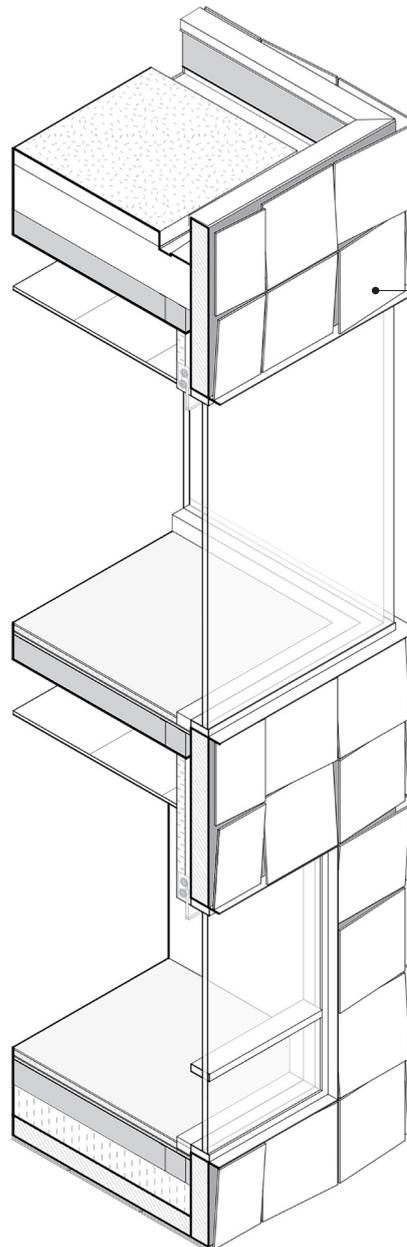
energetica: 6.000 m²

Produzione di

energia: 300.000 kWh

Sistema di fissaggio:

fissaggio su parete
studiato per il progetto



modulo PV:

sono realizzati in un unico
formato
(3x6 m e spessore 4 mm),
vengono tagliati in base
alle esigenze

Figura 5.31 - Particolare facciata con moduli solari

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», International Energy Agency, 2021.

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto, in parallelo agli obiettivi legati alla sostenibilità, pone notevole importanza all'integrazione dell'edificio nel contesto in cui si inserisce.

Il particolare effetto ricreato dal colore delle celle fotovoltaiche consente alla scuola di «mimetizzarsi» rispetto al paesaggio portuale caratteristico della città di Copenhagen.

Il connubio tra disegno compositivo e studio dei materiali ha concretizzato un edificio di forte identità dal punto di vista architettonico ed energetico: il progetto si integra in modo efficace senza interrompere gli equilibri del contesto ma al contrario conferendo ad esso valore.



Figura 5.32 - Copenhagen International School e il contesto limitrofo

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

I 12.000 pannelli fotovoltaici che ricoprono l'edificio rappresentano un vero e proprio elemento architettonico. La tecnologia dei moduli, studiata a Losanna presso la Scuola Politecnica Federale, conferisce alle facciate un effetto davvero peculiare: il colore verde mare è il risultato dello sviluppo di un processo di interferenza della luce in relazione alla riproduzione dei colori.

L'effetto delle piastrelle fotovoltaiche è ottenuto grazie all'effetto di iridescenza, il colore che si percepisce dipende dall'angolo di riflessione della luce solare creando un effetto davvero caratteristico.

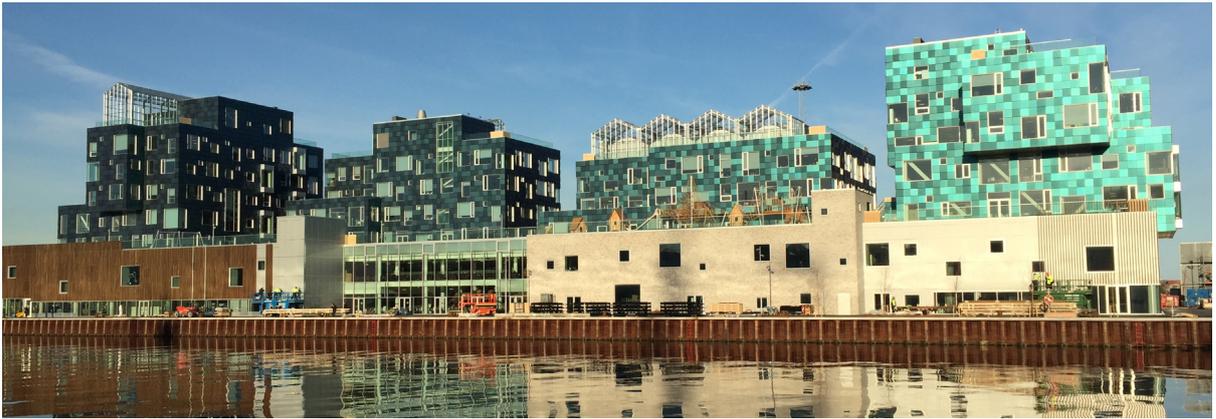


Figura 5.33 - I diversi effetti di colore rispetto alla luce solare riflessa



Figura 5.34 - Dettaglio della facciata BIPV

fonte: byggfaktadocu.se

IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», International Energy Agency, 2021.

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- S - superficie solare attiva: 3.600 m² facciata
- P_{pv} - potenza di picco: 410 kWp facciata
- E_{pv} - produzione di energia: 300.000 kWh

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

Valutazione prestazioni:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 300.000 \text{ kWh} : 410 \text{ kWp} = 731,71 \text{ kWh/kWp}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 300.000 \text{ kWh} : 26.000 \text{ m}^2 = 11,54 \text{ kWh/m}^2$

Il dato relativo ai m² è stato estratto dal sito cfmoller.com

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = 372.003,99 \text{ kWh}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 372.003,99 \text{ kWh} : 410 \text{ kWp} = 907,33 \text{ kWh/kWp}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 372.003,99 \text{ kWh} : 26.000 \text{ m}^2 = 14,31 \text{ kWh/m}^2$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 372.003,99 \text{ kWh} : 4.136.706 \text{ kWh} = 0,0899 = 9\%$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE		ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1		sud - 0°	2400	290
F2		ovest - +90°	600	60
F	3	est - -90	600	60
		TOT	3.600 m²	410 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	280.771,58 kWh
F2	45.670,23 kWh
F3	45.562,18 kWh
TOT	372.003,99 kWh

Caso studio 8 - Frodeparken

- Ubicazione: Svezia
- Studio/architetto: White arkitekter
- Anno: 2014
- Tipo di edificio: residenziale
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

Il progetto per l'edificio residenziale Frodeparken prevede l'installazione di moduli PV a totale integrazione in facciata.

La sfida maggiore è rappresentata dal progetto di una facciata curva fotovoltaica: sono stati scelti moduli a film sottile per le loro dimensioni più ridotte rispetto ai moduli standard in silicio.

Osservando l'edificio è chiaro come tecnologia e composizione architettonica siano stati sviluppati in parallelo realizzando un sistema di forte identità.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I pannelli installati nel prospetto principale orientato a sud assumono la funzione di generatore di energia e di rivestimento.

I 1.181 moduli BIPV integrati sulla facciata curva si collegano all'edificio attraverso un telaio verticale. La connessione tra modulo PV e struttura portante avviene con ganci metallici fissati al modulo stesso.

L'energia prodotta dal sistema fotovoltaico integrato viene utilizzata per le funzioni comuni legate all'edificio e non dalle singole famiglie.

Tecnologia cella:

film sottile

Colore cella:

blu

**Area di riferimento
energetica:** 900 m²

**Produzione di
energia:** 70.000 kWh

Sistema di fissaggio:

telaio verticale fissato
alla struttura portante
dell'edificio



Figura 5.35 - Focus modulo fotovoltaico a totale integrazione in facciata

Prospetto SUD

fonte: uxberlin.com - whitearkitekter.com

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto Frodeparken si inserisce all'ingresso della città di Uppsala e si trova vicino alla stazione ferroviaria.

La volontà dell'architetto ha portato alla realizzazione di un sistema alternativo.

Il carattere dell'edificio in esame è sicuramente rappresentato dalla facciata curva BIPV.

Il prospetto principale orientato a sud rappresenta la porzione di edificio che comunica con il resto della città: la forte identità del sistema compositivo ed energetico definiscono caratteri che contraddistinguono l'edificio in relazione al contesto residenziale presente.



Figura 5.36 - Frodeparken e il contesto in cui si inserisce

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Osservando il prospetto principale è chiaro come il disegno compositivo e l'integrazione fotovoltaica rappresentino il carattere del progetto.

Lo schema delle aperture definisce il ritmo di facciata: le parti vetrate sono inserite in una griglia regolare che si contrappone alla forma curva del prospetto.

Lo sviluppo orizzontale del prospetto sud contraddistinto dalla geometria curva della facciata conferiscono una percezione di «movimento» dell'insieme compositivo.

Frodeparken è un concreto esempio di come composizione ed energia possano essere sviluppati insieme per realizzare progetti innovativi dal punto di vista architettonico e energeticamente produttivi.



Figura 5.37 - Facciata BIPV
Prospetto SUD

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», International Energy Agency, 2021.

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- S - superficie solare attiva: 900 m² facciata
- P_{pv} - potenza di picco: 100 kWp facciata
- E_{pv} - produzione di energia: 70.000 kWh

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

Valutazione prestazioni:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 70.000 \text{ kWh} : 100 \text{ kWp} = \mathbf{700 \text{ kWh/kWp}}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 70.000 \text{ kWh} : 5.700 \text{ m}^2 = \mathbf{12,28 \text{ kWh/m}^2}$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante non quotate estratte dal sito whitearkitekter.com

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{90.783,97 \text{ kWh}}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 90.783,97 \text{ kWh} : 100 \text{ kWp} = \mathbf{907,84 \text{ kWh/kWp}}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 90.783,97 \text{ kWh} : 5.700 \text{ m}^2 = \mathbf{15,93 \text{ kWh/m}^2}$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 90.783,97 \text{ kWh} : 1.065.834 \text{ kWh} = 0,0852 = \mathbf{8,52\%}$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	sud - 0°	900	100
	TOT	900 m²	100 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	90.783,97 kWh
	TOT 90.783,97 kWh

Caso studio 9 - ENERGYbase office

- Ubicazione: Austria
- Studio/architetto: Ursula Schneider, pos architekten ZT gmbh
- Anno: 2008
- Tipo di edificio: amministrativo
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», International Energy Agency, 2021.

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

Il progetto per gli uffici dedicati a Energybase pone come obiettivo centrale il concetto di energia: lo scopo principale è di rendere visibile il fotovoltaico in facciata. I moduli fotovoltaici sono orientati e ventilati in modo ottimale per garantire la massima resa solare.

La particolare geometria realizzata dal disegno dei moduli permette di realizzare una ombreggiatura esterna in modo ottimale senza l'utilizzo di ulteriori sistemi meccanici.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I moduli PV sono installati come elementi di facciata ventilata lungo sei strisce, come mostrato in figura 5.38.

L'integrazione della tecnologia fotovoltaica nel disegno compositivo gioca un ruolo significativo, i pannelli assumono la funzione di generatore di energia e di elemento di integrazione esterna garantendo l'ombreggiatura.

Energybase è un chiaro esempio di come il sistema PV sia un concreto elemento di progetto che consente di soddisfare esigenze compositive e funzionali.

Tecnologia cella:
celle monocristalline

Colore cella:
nero

**Area di riferimento
energetica:** 400 m²

**Produzione di
energia:** 37.000 kWh

Sistema di fissaggio:
-



Figura 5.38 - Focus modulo fotovoltaico a totale integrazione in facciata
Prospetto SUD

fonte: uxberlin.com - whitearkitekter.com

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto per gli uffici Energybase si inserisce nell'area industriale della città di Vienna, questa è caratterizzata dalla presenza di edifici che non presentano caratteri significativi dal punto di vista architettonico.

Lo studio compositivo e l'approfondimento energetico sono fattori che consentono alla struttura di Energybase di distinguersi in modo positivo in relazione agli edifici presenti nell'area industriale.



Figura 5.39 - ENERGYbase office e il contesto circostante

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Osservando il prospetto principale orientato a sud è chiaro come il disegno compositivo e l'integrazione fotovoltaica rappresentino il carattere del progetto.

L'utilizzo del materiale vetro lungo tutta l'estensione della facciata principale conferisce alla struttura una forte e chiara identità.

Si percepisce, osservando dall'esterno, che il prospetto è il risultato di elementi proposti che seguono il principio di proporzionalità, linearità e modularità.

Geometria e composizione si uniscono al fattore energia e allo studio dei materiali, in particolare il vetro, per realizzare un edificio di notevole impatto visivo.

Lo studio a 360° che comprende composizione, materiali e l'integrazione del sistema PV, contribuiscono a trasmettere la struttura come un volume «d'insieme».



Figura 5.40 - Facciata BIPV
Prospetto SUD

fonte: ait.ac.at/loesungen/digital-building-technologies

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- **S** - superficie solare attiva: 400 m² facciata
- **P_{pv}** - potenza di picco: 48,2 kWp facciata
- **E_{pv}** - produzione di energia: 37.000 kWh

fonte: IEA, «Successful Building Integration of Photovoltaics», Intl. Energy Agency, 2021.

Valutazione prestazioni:

1. **EP_{pv}** - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 37.000 \text{ kWh} : 48,2 \text{ kWp} = \mathbf{767,63 \text{ kWh/kWp}}$

2. **ES_{pv}** - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 37.000 \text{ kWh} : 9.200 \text{ m}^2 = \mathbf{4,02 \text{ kWh/m}^2}$

I m² (area climatizzata) sono stati calcolati in modo approssimativo attraverso piante non quotate estratte dal sito whitearkitekter.com

3.a **E'_{pv}** - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = \mathbf{53.931,56 \text{ kWh}}$

3.b **EP'_{pv}** - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 53.931,56 \text{ kWh} : 48,2 \text{ kWp} = \mathbf{1.118,91 \text{ kWh/kWp}}$

3.c **ES'_{pv}** - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 53.931,56 \text{ kWh} : 9.200 \text{ m}^2 = \mathbf{5,86 \text{ kWh/m}^2}$

4. **η** = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 53.931,56 \text{ kWh} : 588.800 \text{ kWh} = 0,0916 = \mathbf{9,16\%}$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	sud - 0°	400	48,2
	TOT	400 m²	48,2 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	53.931,56 kWh	
	TOT	53.931,56 kWh

Caso studio 10 - Grattacielo Intesa Sanpaolo

- Ubicazione: Italia
- Studio/architetto: Renzo Piano Building Workshop
- Anno: 2015
- Tipo di edificio: amministrativo, servizi
- Nuovo tipo di costruzione
- Pannelli fotovoltaici a integrazione totale in facciata



fonte: R.Piano e A. Rolando, «Il grattacielo Intesa Sanpaolo, Torino», Intesa Sanpaolo, 2017.

1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

Il progetto per il Grattacielo Intesa Sanpaolo si sviluppa tra innovazione e sostenibilità: è stata prevista l'installazione di un sistema fotovoltaico e solare termico, è presente una serra bioclimatica in copertura con la funzione di «tetto verde» ed è stato inoltre collocato un sistema geotermico.

La facciata esposta a sud, dal 7° al 33° piano, è rivestita da 1.600 m² di pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

Durante la fase di progettazione sono state studiate e analizzate le strategie energetiche più sofisticate, lo spazio costruito e l'insieme di tecnologie sostenibili sono stati progettati e sviluppati insieme, definendo coerenza e linearità del progetto dal punto di vista visivo, compositivo ed energetico.

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

Il progetto prevede l'installazione di pannelli fotovoltaici a totale integrazione in facciata: i 1.600 m² di celle fotovoltaiche, esposte a sud, presentano dimensioni di base 1.500 mm e 3.740 mm di altezza.

Tecnologia cella:

celle in silicio
policristallino

Colore cella:

grigio

**Area di riferimento
energetica:** 1.600 m²

**Produzione di
energia:** 120.000 kWh

Sistema di fissaggio:

-

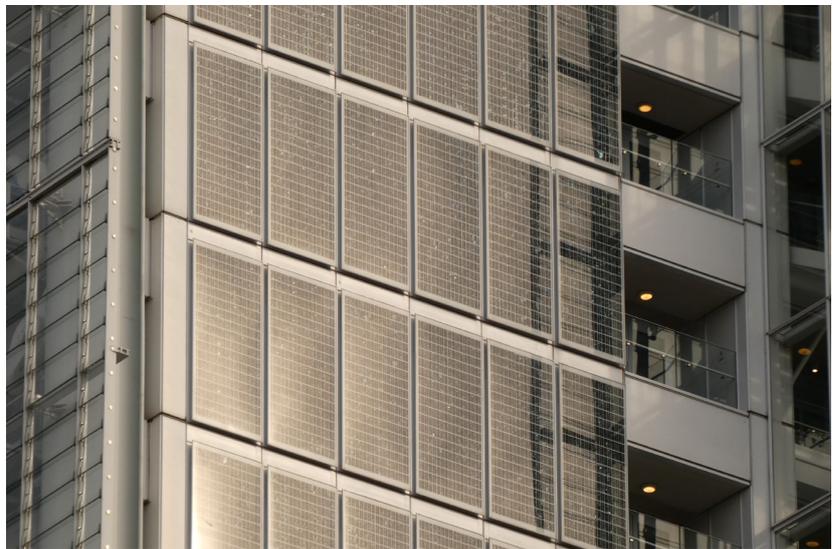


Figura 5.41 - Focus modulo fotovoltaico
Prospetto SUD

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

Il progetto, oltre agli obiettivi legati alla sostenibilità e all'innovazione, vuole integrare in modo ottimale ed efficace l'edificio nel contesto urbano: sulla terrazza del grattacielo Intesa San-Paolo a 166 metri di altezza, nello specifico al 38° piano, è possibile ammirare il capoluogo piemontese dall'alto, la collina, il Po nonché il profilo delle Alpi.

La presenza di grandi aree vetrate permette di soddisfare i criteri in tema di luminosità, trasparenza e permeabilità: si può affermare che l'edificio è stato pensato e sviluppato per avere un continuo contatto diretto con l'esterno, la città di Torino.

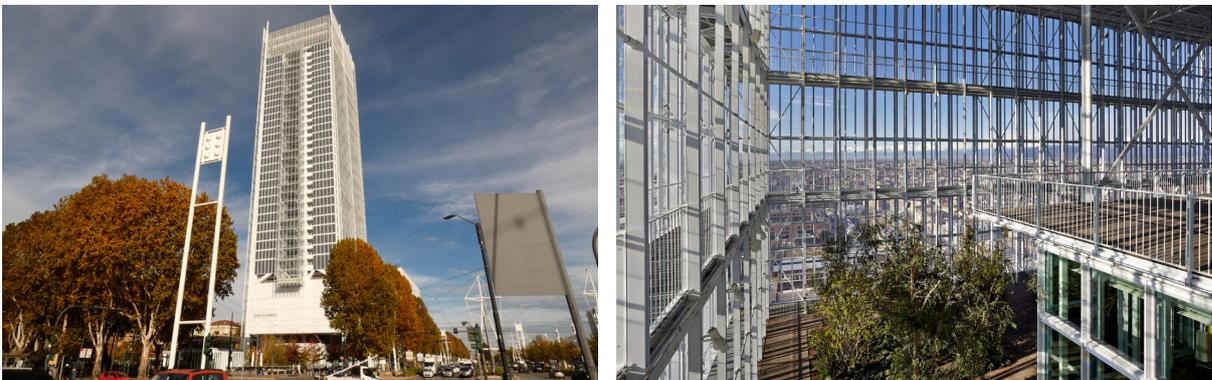


Figura 5.42 - Il Grattacielo comunica con lo spazio circostante

fonte: floornature.it

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

Osservando l'edificio dall'esterno è possibile affermare che si tratti di un architettura complessa dal punto di vista strutturale e compositivo: il grattacielo è il risultato di innovazione architettonica, materiali e tecnologie all'avanguardia. Il connubio di questi elementi contribuisce a trasmettere la struttura come un volume «d'insieme», dove architettura, innovazione e sostenibilità si incontrano.

«Un concept pionieristico abita lo spazio urbano. Una struttura che sposa bellezza e modernità, attenzione all'ambiente e socialità. Un esempio di edilizia verticale e un centro trasversale di attività». [s24]



Figura 5.43 - Il «concept pionieristico» del Grattacielo

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

Dati energetici:

- S - superficie solare attiva: 1600 m^2
- P_{pv} - potenza di picco: 163 kWp facciata
- E_{pv} - produzione di energia: 120.000 kWh

fonte: group.intesasanpaolo.com

Valutazione prestazioni:

1. EP_{pv} - Produzione specifica

- $EP_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 120.000 \text{ kWh} : 163 \text{ kWp} = 736,20 \text{ kWh/kWp}$

2. ES_{pv} - Produzione per superficie utile

- $ES_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 120.000 \text{ kWh} : 73.898 \text{ m}^2 = 1,62 \text{ kWh/m}^2$

Il dato relativo ai m^2 è stato estratto dal testo riportato di seguito:

R.Piano e A. Rolando, «Il grattacielo Intesa Sanpaolo, Torino», Intesa Sanpaolo, 2017.

3.a E'_{pv} - Stima della produzione di energia annua PVGIS

- $E'_{pv} = \text{kWh} = 188.230,80 \text{ kWh}$

3.b EP'_{pv} - Produzione specifica PVGIS

- $EP'_{pv} = \text{kWh} : \text{kWp} = 188.230,8 \text{ kWh} : 163 \text{ kWp} = 1.154,78 \text{ kWh/kWp}$

3.c ES'_{pv} - Produzione per superficie utile PVGIS

- $ES'_{pv} = \text{kWh} : \text{m}^2 = 188.230,8 \text{ kWh} : 73.898 \text{ m}^2 = 2,55 \text{ kWh/m}^2$

4. η = Valutazione rendimento

- $\eta = E'_{pv} : H = 188.230,8 \text{ kWh/m}^2 : 2.464.768 \text{ kWh/m}^2 = 0,0764 = 7,64 \%$

Valutazione esposizione

FACCIATA

SUPERFICIE	ORIENTAMENTO	AREA ATTIVA (m ²)	kWp
F1	sud - 0°	1600	163
	TOT	1.600 m²	163 kWp

RISULTATI PVGIS - PRODUZIONE ANNUA ENERGIA PV

F1	188.230,80 kWh	
	TOT	188.230,80 kWh

« Il grattacielo respira,
e ha intenzione di consumare pochissima energia,
perché l'elemento d'ispirazione più importante,
oggi,
per gli architetti,
è la fragilità della terra.
È un segno di dinamismo, un modo di guardare al domani senza esserne terrorizzati.
D'altronde il futuro è l'unico posto dove possiamo andare »

Renzo Piano, architetto

6 / CONSIDERAZIONI FINALI

6.1 / I dispositivi come obiettivo di progetto

L'analisi dei 10 casi di studio ha permesso di valutare diverse modalità di integrazione della tecnologia fotovoltaica rispetto all'architettura.

Dopo aver analizzato edifici BIPV è chiaro che, per ottenere un progetto che coniughi architettura - energia - costruzione, l'applicazione dei 5 dispositivi risulta significativa.



1. INTEGRAZIONE EDILIZIA

perchè è importante che progetto compositivo e progetto energetico siano sviluppati in parallelo?

2. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

perchè l'integrazione funzionale gioca un ruolo chiave sia a livello compositivo che energetico?

3. INTEGRAZIONE PAESAGGISTICA

perchè è importante durante la fase di progetto valutare il contesto?

4. INTEGRAZIONE PERCETTIVA

perchè geometrie, forme e colori condizionano l'idea dell'osservatore?

5. INTEGRAZIONE ENERGETICA

perchè è importante valutare, insieme all'aspetto compositivo, i risultati relativi alla produzione?

L'edificio residenziale Frodeparken (figura 6.1), in Svezia, è l'esempio equilibrato del connubio tra progetto compositivo e progetto energetico: la sfida maggiore è definita dal disegno di una facciata curva fotovoltaica.

Osservando l'edificio dall'esterno è evidente come spazio costruito e tecnologia PV siano stati progettati in parallelo, definendo coerenza e linearità del progetto dal punto di vista visivo, compositivo ed energetico.

La tipologia e le modalità di integrazione del sistema fotovoltaico a livello funzionale e tecnologico assumono un ruolo chiave in termini compositivi ed energetici.

L'edificio residenziale Höngg (figura 6.2) presenta la tecnologia PV integrata in copertura e in facciata assumendo la funzione di generatore di energia e di rivestimento.

I moduli sono ancorati ad un sistema di supporto metallico con un sistema di fissaggio continuo su binari in alluminio. Il risultato che si ottiene attraverso questo sistema di integrazione è una perfetta linearità e continuità a livello estetico unite alla funzionalità del sistema solare.

Tra gli aspetti rilevanti di un progetto di architettura, assume un ruolo fondamentale il modo in cui l'edificio si inserisce e comunica con il contesto circostante.

L'edificio Silo Bleu (figura 6.3), in Svizzera, segue le linee guida che regolano l'area di intervento: il sito aderisce al piano territoriale che definisce i modelli spaziali.

Il progetto compositivo è il risultato dell'applicazione dei parametri relativi ad altezza, larghezza e profondità di un edificio.

Nonostante le linee guida imposte a livello normativo, il disegno architettonico e i volumi, come i pieni e i vuoti, sono stati studiati per conferire una forma slanciata alla struttura.

Il forte slancio e la verticalità sono caratteri che contraddistinguono l'edificio.

Il progetto deve quindi saper coniugare l'aspetto più tecnico legato alla normativa, con lo studio compositivo, ponendo come obiettivo l'integrazione dell'edificio nel contesto esistente senza interromperne gli equilibri.

In modo forse inconscio geometrie, forme e colori influiscono in maniera positiva o al contrario negativa rispetto alla percezione che si acquisisce osservando un'architettura. Analizzando il prospetto principale dell'edificio Silo Solare (figura 6.4) è possibile evidenziare un senso di regolarità dettato dalla ripetizione del modulo fotovoltaico .

La regolarità, la simmetria e la proporzione degli elementi compositivi sono fattori che permettono di comprendere più facilmente il prospetto e, conseguentemente a ciò, di connotare ad esso una percezione positiva.

E' importante evidenziare che il progetto acquisisce un carattere e una identità specifica grazie all'alternanza di colori e dei pieni e vuoti, questi fattori contribuiscono a creare una percezione di «movimento» dell'insieme compositivo.

Il caso di studio Sol'CH (figura 6.5) è un ottimo esempio dell'unione tra composizione ed energia.

In termini compositivi il progetto ha un forte carattere estetico: il sistema fotovoltaico a integrazione totale descrive l'elemento chiave in copertura e in facciata.

In parallelo i risultati in termini energetici sono notevoli, sia in termini di produzione specifica che in rapporto alla superficie utile.

Sol'CH rappresenta un esempio di totale integrazione fotovoltaica con una significativa rilevanza estetica e architettonica e, in egual modo, si ottengono importanti risultati in termini energetici.

I casi di studio selezionati descrivono in modo concreto come i 3 elementi chiave, ossia architettura - energia - costruzione, possano coniugarsi e svilupparsi in parallelo per definire un edificio caratterizzato da qualità compositiva e attivo energeticamente.

L'analisi attraverso i «dispositivi di integrazione» dimostra come questi possano essere considerati come uno strumento di progetto per raggiungere l'obiettivo di realizzare un edificio a energia positiva.



Figura 6.1 - Integrazione edilizia - Frodeparken



Figura 6.2 - Integrazione funzionale - Høngg



Figura 6.3 - Integrazione paesaggistica - Silo Bleu



Figura 6.4 - Integrazione percettiva - Silo Solare



Figura 6.5 - Integrazione energetica - Sol'CH

6.2 / Analisi e confronto dei risultati energetici

In questa sezione si comparano i risultati ottenuti dall'analisi del dispositivo numero 5 relativo all'integrazione energetica attraverso l'utilizzo di grafici.

- Sol'CH
- Höngg
- Solaris 416
- Silo Bleu
- AUE
- Silo Solare
- C. Intl. School
- Frodeparken
- ENERGYbase
- G. Intesa Sanpaolo

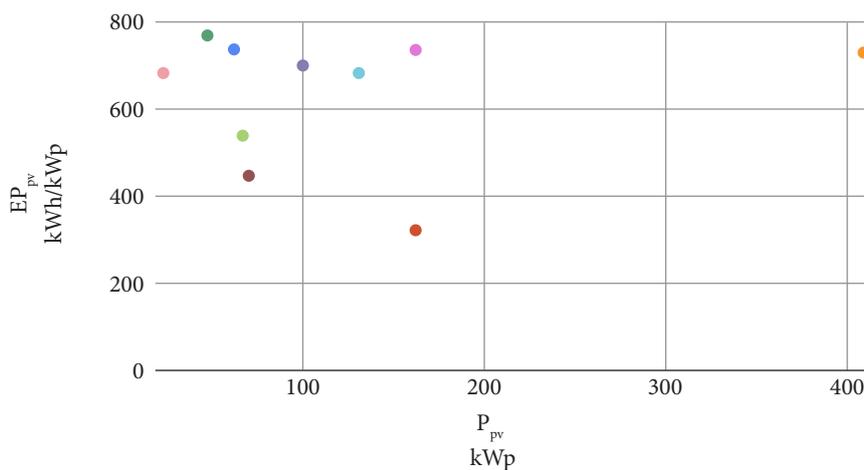


Figura 6.6 - EP_{pv} : P_{pv}

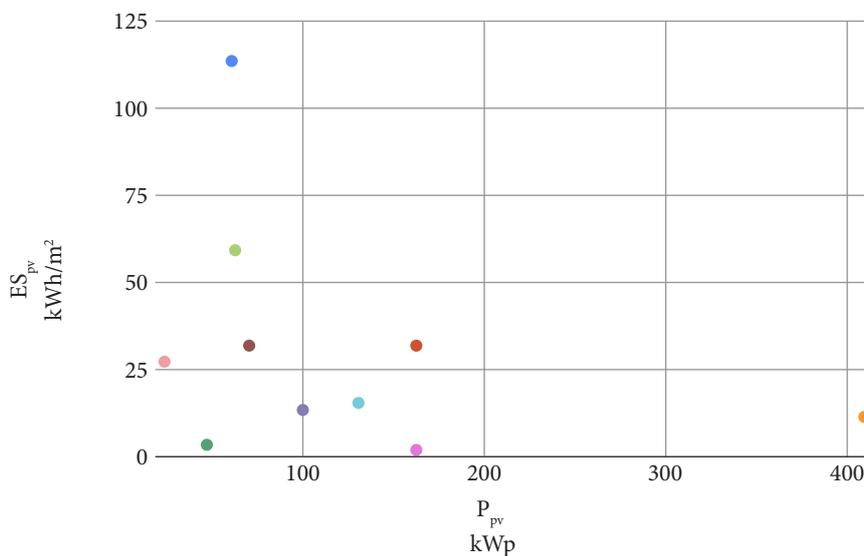
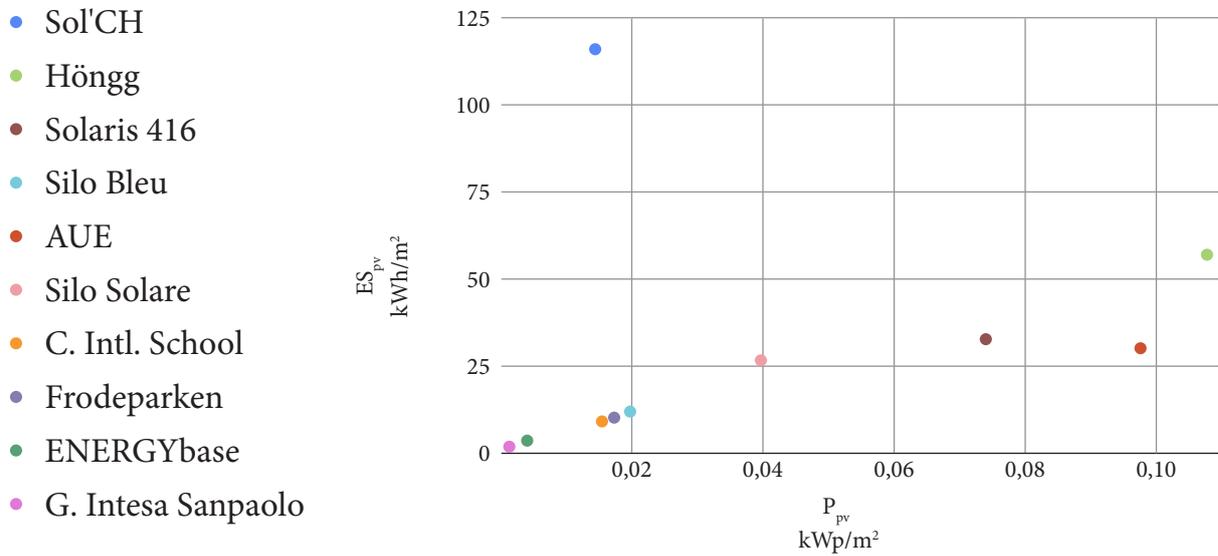
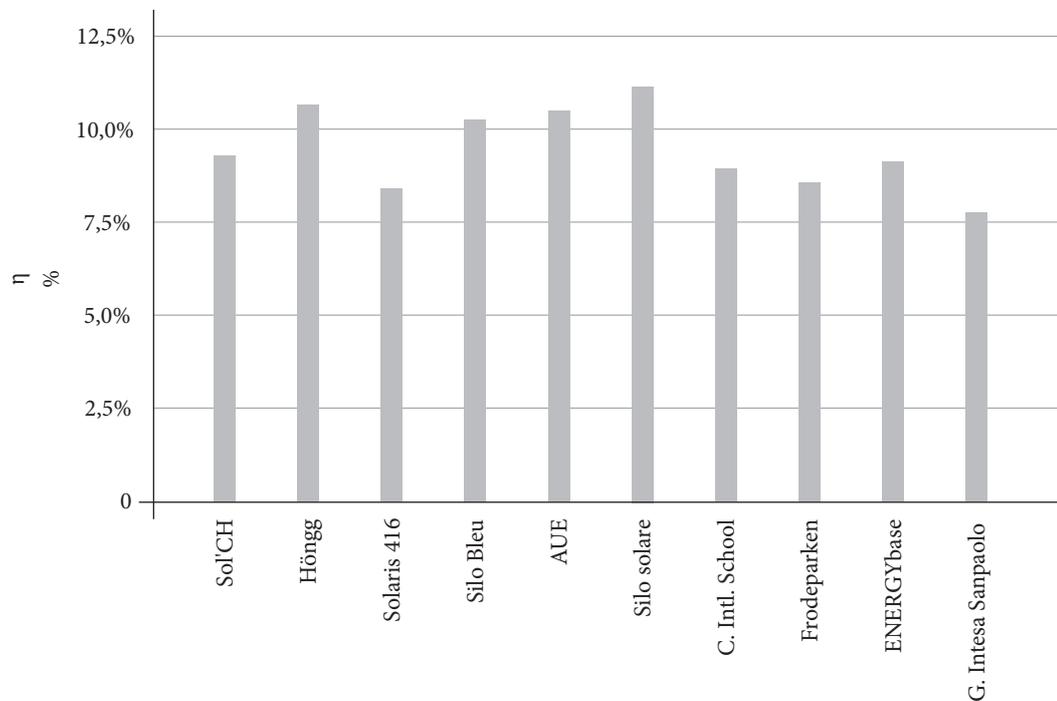


Figura 6.7 - ES_{pv} : P_{pv}

Figura 6.8 - $ES_{pv} : P_{pv}$

Osservando l'andamento del grafico riportato in figura 6.8 è possibile evidenziare che i casi di studio che presentano la produzione per superficie utile più elevata risultano gli edifici che hanno maggiore P_{pv} (kWp/m²) per m² climatizzati.

Figura 6.9 - Andamento η casi di studio

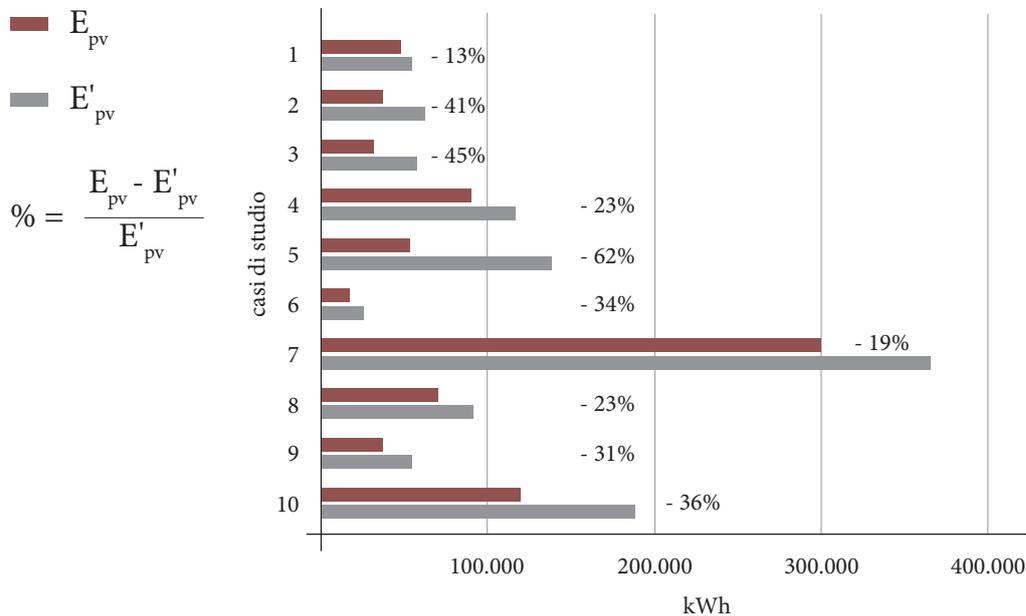


Figura 6.10 - Comparazione E_{pv} e E'_{pv}

Il grafico riportato in figura 6.10 evidenzia la differenza tra E_{pv} (produzione di energia effettiva) e E'_{pv} (produzione di energia calcolata con PVGIS) degli edifici in esame.

A lato di ogni caso di studio è riportato un valore numerico che indica la differenza tra i due parametri di energia considerati: la media dei valori espressi in % è pari al -32%.

Questo valore sottolinea una differenza (-%) tra i valori di progetto e i valori effettivi di esercizio, è importante considerare la presenza di fattori di riduzione che incidono sulla produzione effettiva e non valutati in PVGIS:

- effetto di schermatura, causato dalla presenza di elementi come edifici e vegetazione presenti nel contesto, contribuisce a ridurre il valore E_{pv}
- periodo considerato, nella maggior parte dei casi di studio E_{pv} è definita rispetto a un 1 anno, in alcuni esempi però questo valore è inferiore; i dati su PVGIS vengono elaborati sempre considerando un periodo standard pari a 12 mesi
- clima effettivo, il valore E_{pv} è definito considerando il clima reale nel luogo in esame, PVGIS considera invece un clima teorico non valutando in modo effettivo eventuali variazioni

L'aspetto fondamentale evidenziato dall'analisi di questo grafico è considerare e valutare la presenza di una differenza tra i valori che si determinano nella fase di progetto con PVGIS e i valori effettivi di esercizio, questi risultano sempre inferiori.

/ CONCLUSIONI

L'introduzione del presente lavoro di tesi pone nelle prime righe una domanda:

«Qual è il ruolo e il contributo dell'architettura rispetto alla crisi climatica in atto?»

E' possibile affermare che il ruolo dell'architettura e il contributo di essa per contrastare la crisi climatica in atto risultino significativi.

L'obiettivo cardine della trattazione, esplicitato fin dall'inizio, è dimostrare in che modo architettura ed energia possano comunicare con l'impiego del sistema fotovoltaico a integrazione totale. Lo studio e l'approfondimento dei 10 casi di studio BIPV attraverso i «dispositivi di integrazione» ha permesso di analizzare, mediante progetti esistenti, in che modo il progresso tecnologico in campo fotovoltaico permetta di coniugare qualità compositiva in armonia con funzionalità, sostenibilità e produzione di energia.

Lo studio di tesi nasce dalla volontà di dimostrare come composizione ed energia possono e devono unirsi in maniera intrinseca nel progetto di architettura.

Le architetture proposte presentano in modo differente l'integrazione della tecnologia fotovoltaica all'edificio e definiscono delle soluzioni efficienti dal punto di vista sia compositivo che relativamente ai risultati in termini energetici, evidenziando in modo concreto le potenzialità della metodologia BIPV.

Come evidenziato all'interno dello studio di tesi, la figura dell'architetto deve saper far interagire le caratteristiche prestazionali con le qualità compositive che descrivono il carattere di un architettura: il BIPV deve rappresentare il futuro degli edifici in quanto la tecnologia PV rappresenta un componente indispensabile del progetto, risultando un elemento di completa integrazione architettonica.

Oggi, come riporta l'architetto Renzo Piano, l'«elemento d'ispirazione più importante» per gli architetti è rappresentata dalla «fragilità della terra». [s24]

Lo strumento di cui gli architetti dispongono per sostenere e incrementare la produzione di energia da fonti rinnovabili è l'architettura.

/ BIBLIOGRAFIA

[1] Chiara Munafò, «Clima: Onu, sprecato un anno su emissioni, è l'ultima chance», ANSA, 2022.

[2] Agenzia per la Coesione Territoriale, «Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile», Repubblica Italiana.

[3] 10 Rete Clima, «Cop 27: confermati gli obiettivi climatici, scarsa attenzione alla mitigazione», reteclima, Como, 2022.

[4] Pictet Asset Management, «Dizionario della decarbonizzazione: cosa significa e cosa prevede», pp. 7, Gruppo Pictet, Milano, 2021.

[5] Nicola Andreatta, «Perché il limite è 1,5 gradi? Ce lo spiega Johan Rockström», pag. 1, Green-it, Milano, 2020.

[6] Organizzazione meteorologica mondiale, «Gli ultimi otto anni si sono confermati gli otto più caldi mai registrati», OMM, Ginevra, 2023.

[7] Mauro Spagnolo, «Riscaldamento globale 2022, l'Omm: siamo a +1,15°C», rinnovabili.it, 2023.

[8] 10 Rete Clima, «Rapporto IPCC sulla mitigazione: occorre agire “ora o mai più”», reteclima, Como, 2022.

[9] Valentina Neri, «Come funziona il meccanismo di loss and damage istituito alla Cop27, il fondo per risarcire i paesi poveri per perdite e danni dovuti alla crisi climatica» LifeGate.it, Milano, 2022.

- [10] 10 Rete Clima, «Report IPCC (AR6) sull'adattamento climatico: non è più tempo per le mezze misure», reteclima, Como, 2022.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change, «AR6 - Summary for Policymakers», pp.37, ipcc.ch, 2022.
- [12] Enciclopedia Treccani, «impatto ambientale», Treccani, Bologna.
- [13] Elisa Terenghi, «Il rischio di disastri naturali: il ruolo della scienza e dei dati», Icona Clima, Milano, 2021.
- [14] Zeke Hausfather, «Esplorare i futuri cambiamenti climatici attraverso il percorso socioeconomico comune (SSP)», Carbon Brief, Regno Unito, 2021.
- [15] ICT Foot Print EU, «Cosa sono i Greenhouse Gases (GHG), ovvero i Gas ad effetto serra?», European Commission's Horizon, 2020.
- [16] European Environment Agency, «EEA Report n. 10/2022 - Trends and projections in Europe 2022», pp. 44, ISBN 978-92-948, EEA, Danimarca, 2022.
- [17] European Environment Agency EEA Report, «Emissioni e consumo di energia nei grandi impianti di combustione in Europa», EEA, Danimarca, 2023.
- [18] Consiglio Europeo, «Cos'è il Green Deal europeo», Consiglio dell'UE, Bruxelles, 2023.
- [19] Parlamento Europeo, «Energie rinnovabili», Note tematiche sull'UE, Strasburgo, 2023.

- [20] Redazione Info Build Energia, «Renovation Wave: efficienza energetica e sostenibilità dell'edilizia», Infobuildenergia, Milano, 2021.
- [21] Consiglio Europeo, «Pronti per il 55%», Consiglio dell'UE, Bruxelles, 2023.
- [22] Parlamento Europeo, «Revisione della direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia: pacchetto "Fit for 55"», Think Tank Parlamento europeo, Strasburgo, 2023.
- [23] Redazione Info Build Energia, «Il Parlamento europeo approva la direttiva "Case green"», Infobuildenergia, Milano, 2023.
- [24] Commissione europea, «Nuovo Bauhaus europeo nell'ambito della politica di coesione», Commissione europea, 2022.
- [25] BibLus-net, «Dal 13 giugno l'obbligo di impianti a fonti rinnovabili», ACCA, 2022.
- [26] Gaia Mussi, «Rinnovabili obbligatorie per le ristrutturazioni: regole, obiettivi e soluzioni», Elettrico Magazine, Milano, 2022.
- [27] Sonnen, «Il fotovoltaico dal 1839 a oggi: la storia di un'importante innovazione», Content Team, Milano, 2022.
- [28] Enrico Fabrizio, «L'energia solare», Corso di laurea magistrale in ACC, Politecnico di Torino, Torino, 2022.
- [29] BibLus-net, «Rendimento dei pannelli fotovoltaici: i fattori da valutare», ACCA, 2022.
- [30] Enciclopedia Treccani, «temperatura», Treccani, Bologna.

- [31] Innovasol, «Autoconsumo fotovoltaico nel 2023: guida completa», Innovasol Energy Solutions, Catania, 2022.
- [32] BibLus-net, «Orientamento dei pannelli fotovoltaici: come definirlo correttamente», ACCA, 2022.
- [33] Nausicaa Tecchio, «Watt: guida pratica alla comprensione dell'unità di misura», Unic, 2022.
- [34] Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, «Grandezze e unità di misura», SUPSI, 2022.
- [35] Camilla Antonioni, «Le celle fotovoltaiche: tutto quello che devi sapere», OTOVO, Milano, 2023.
- [36] EnergyGlass, «Vetri fotovoltaici a totale integrazione architettonica», Solar & Glass Architecture.
- [37] Kati Irrente, «Fotovoltaico in perovskite: come funzionano le celle solari del futuro», Ecoo DMM Company, 2020.
- [38] Camilla Antonioni, «Le componenti e i materiali dei pannelli fotovoltaici», OTOVO, Milano, 2023.
- [39] Camilla Antonioni, «Lo schema di un impianto fotovoltaico: una guida», OTOVO, Milano, 2023.
- [40] Soladria, «Quali sono i componenti essenziali per un impianto fotovoltaico a norma?», Soladria s.r.l., Rovigo, 2016.

- [41] Demarco Ingegneria, «Impianto fotovoltaico, i componenti dell'impianto», demarcoingegneria, Varese, 2018.
- [42] Energia Solare 100, «A cosa serve un regolatore di carica?», Energiasolare100, Bari, 2017.
- [43] Roberta Nicora, «Le batterie per fotovoltaico: come funzionano», OTOVO, Milano, 2023.
- [44] Domenico Coiante, «Fotovoltaico- Il processo evolutivo e le nuove frontiere», pp. 200, ISBN 88-8286- 174-0, Enea, Roma, 2008.
- [45] Lucia Ceccherini Nelli, «Schermature fotovoltaiche», pp.80, Alinea Editrice, Firenze, 2007.
- [46] Sandra Enkhardt, «IRENA erwartet bis 2050 eine installierte Photovoltaik-Leistung von 200 Gigawatt in Deutschland», IRENA, 2019.
- [47] Sorgenia, «ENERGIA SOLARE», Sorgenia S.p.A, Milano, 2022.
- [48] Redazione Info Build Energia, « SolarPower Europe: +47% per l'energia fotovoltaica in UE nel 2022», Infobuildenergia, Milano, 2022.
- [49] Redazione Electrica Rogeno, «Il fotovoltaico in Italia nel 2022: nuovi impianti, potenza e produzione», Elettrica Rogeno srl, Como, 2023.
- [50] Ciarán Cuffe, «Articolo 9 bis - Energia solare negli edifici», gruppo ID, A9-0033/2023.

- [51] Olivia Bolt, «BIPV vs BAPV», Energy theory, 2023.
- [52] SRNE Blog, «The Differences Between BIPV and BAPV», SRNE, 2021.
- [53] Maria Elena Ribezzo, «Vaticano sempre più sostenibile con pannelli solari, colonnine e led», Green Economy Agency, 2022.
- [54] International Energy Agency, «Task 15 Quadro favorevole per lo sviluppo del BIPV», IEA Photovoltaic power system, 2023.
- [55] CENELEC, «BS EN 50583-1:2016 Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules», CEN-CENELEC, 2016.
- [56] CENELEC, «BS EN 50583-2:2016 Photovoltaics in buildings - Part 2: BIPV systems», CEN-CENELEC, 2016.
- [57] B. Weller, C. Hemmerle, S. Jakubetz, S. Unnewehr, «Photovoltaics», pp. 112, ISBN 978-3-0346-0369-0, Edition Detail, 2010.
- [58] Niccolò Aste, «Il fotovoltaico in architettura», pp. 450, III edizione, Sistemi Editoriali, 2008.
- [59] International Energy Agency, «Categorization of BIPV applications 2021», IEA, 2021.
- [60] Carlo Tosco, «Il paesaggio come storia», pp. 136, Il Mulino, Bologna, 2007.
- [61] Camera dei deputati, «La normativa statale per la realizzazione di impianti da fonti elettriche rinnovabili», pp.73 - n. vol.47, Camera dei deputati, 2023.

[62] Sara Toma, «Percezione visiva: cos'è e come avviene», doctolib, 2020.

[63] Stefano Damico, «La percezione visiva», unimc, 2016.

[64] Claudio Catalano, «Architettura, scienza e percezione», pp. 116, codice ISBN-13: 9788854830868, Aracne, Roma, 2010.

/ SITOGRAFIA

[s1] COP27 Sharm El-Sheikh, «Welcome Messages», Egypt 2022.

Disponibile: cop27.eg/#/speeches/president-speech

[s2] International Science Council, «Johan Rockström», council.science.

Disponibile: council.science/it/profile/johan-rockstrom/

[s3] IPCC, «Loss and Damage», Focal Point IPCC, 2022.

Disponibile: ipccitalia.cmcc.it/loss-and-damage-perdite-e-danni/

[s4] Centro Regionale di Informazione delle Nazioni Unite, «Effetti del cambiamento climatico», Nazioni Unite, 2023.

Disponibile: unric.org/it/effetti-del-cambiamento-climatico

[s5] IPCC, «SSP, gli scenari dell'IPCC», Focal Point IPCC, 2022.

Disponibile: ipccitalia.cmcc.it/ssp-gli-scenari-dellipcc/

[s6] IPCC, «L'IPCC aggiorna la metodologia per gli inventari dei gas serra», Habitat Seven, 2023.

Disponibile: www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/

[s7] Commissione europea, «Un Green Deal europeo - Per diventare il primo continente a impatto climatico zero», Direzione generale della Comunicazione, 2023.

Disponibile: commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it

[s8] Commissione europea, «I negoziati sul cambiamento climatico», europa.eu.

Disponibile: www.europarl.europa.eu/infographic/climate-negotiations-timeline

[s9] Commissione europea, «Realizzare il Green Deal europeo», Direzione generale della Comunicazione.

Disponibile: commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_it

[s10] Enel Green Power, «La decarbonizzazione, come si passa dalle fonti fossili alle rinnovabili», Enel Spa.

Disponibile: enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica

[s11] vivipedia, «Cos'è la decarbonizzazione», viviennergia.

Disponibile: vivienergia.it/casa/vivipedia/guida-energia/decarbonizzazione

[s12] vivipedia, «Energie rinnovabili: cosa sono e come funzionano», viviennergia.

Disponibile: vivienergia.it/casa/vivipedia/consigli-di-risparmio/energie-rinnovabili-cosa-sono-e-come-funzionano

[s13] Enel Green Power, «Quali sono le energie rinnovabili in Italia, qual è la più diffusa e quanta energia producono », Enel Spa.

Disponibile: enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/italia

[s14] Cortexa, «Renovation Wave EU», Consorzio Cortexa.

Disponibile: cortexa.it/norma/renovation-wave/

[s15] Incentivi Fotovoltaico, «Kilowattora», incentivifotovoltaico.name

Disponibile: incentivifotovoltaico.name/kilowattora

[s16] Energie, «Il fotovoltaico: potenza nominale o di picco», [energiesas](https://energiesas.it).

Disponibile: energiesas.it/kwp-fotovoltaico-potenza-nominale-o-di-picco

[s17] Fotovoltaico norditalia, «Schema di un impianto fotovoltaico», Fotovoltaico-nord-italia.it

Disponibile: www.fotovoltaiconorditalia.it/idee/schema-impianto-fotovoltaico

[s18] Enel Green Power, «3Sun Gigafactory - Un altro fotovoltaico è possibile», Enel Spa.

Disponibile: www.enelgreenpower.com/it/chi-siamo/innovazione/3SUN-factory

[s19] Enel Green Power, «3Sun Gigafactory: un decennio di progressi nelle tecnologie solari», Enel Spa.

Disponibile: www.enelgreenpower.com/it/media/news/2022/09/3sun-gigafactory

[s20] Fotovoltaico norditalia, «Contatore fotovoltaico, come leggerlo correttamente», Fotovoltaico-nord-italia.it

Disponibile: www.fotovoltaiconorditalia.it/idee/contatore-fotovoltaico-come-leggerlo

[s21] IEA, «Task 15 - Rapporti sull'attività 15», IEA Photovoltaic power system.

Disponibile: iea-pvps.org/research-tasks/

[s22] CENELEC, «A proposito di CENELEC», CEN-CENELEC 2022.

Disponibile: standards.cencenelec.eu/

[s23] ERCO, «Percezione visiva: come vediamo e percepiamo gli oggetti», Erco, 2023.

Disponibile: www.erco.com

[s24] Intesa Sanpaolo, «Progetto Renzo Piano», Gruppo Intesa Sanpaolo.

Disponibile: group.intesasanpaolo.com

/ RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro di tesi segna il termine di un percorso universitario complesso ma gratificante, in merito a questo ci tengo a ringraziare le persone che hanno permesso il conseguimento di questo importante traguardo.

In primo luogo ringrazio il Professore Enrico Fabrizio che mi ha permesso di sviluppare lo studio proposto, guidandomi durante tutto il percorso di tesi.

Ringrazio la mia famiglia per sostenermi in ogni momento e per aver reso possibile il raggiungimento di questo traguardo.

Infine, ringrazio le mie compagne Alice e Sara che rappresentano una parte importante del mio percorso.