



L'integrazione del fotovoltaico nel progetto di architettura

Analisi del processo di innovazione nel contesto svizzero

Laura Gallinati

Politecnico di Torino
Dipartimento di Architettura e Design

Laurea magistrale in
Architettura per il progetto sostenibile

a.a. 2021/2022



**Politecnico
di Torino**

Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana

SUPSI

L'integrazione del fotovoltaico nel progetto di architettura

Analisi del processo di innovazione nel contesto svizzero

relatore

Prof. Guido Callegari
Politecnico di Torino

candidata

Laura Gallinati

correlatore

Prof. Pierluigi Bonomo
SUPSI

/ INDICE

/ ABSTRACT	06
/ INTRODUZIONE	08
01 / L'URGENZA DELLA DECARBONIZZAZIONE	12
01.1 / La crisi climatica	18
01.2 / Gli accordi internazionali sul clima	26
01.3 / Le potenzialità dell'energia solare	42
02 / CENNI SULLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	46
02.1 / BAPV - BIPV	50
02.2 / Le grandezze del fotovoltaico	54
02.3 / I componenti del sistema fotovoltaico	58
02.4 / L'evoluzione del fotovoltaico	60
02.5 / Le nuove tecnologie FV	70
03 / APPROCCIO DEL PROGETTO AL BIPV	76
03.1 / Il processo di analisi	78
03.2 / Indicatori di innovazione	80
03.3 / Contesti di innovazione	88
03.4 / I casi di studio	100
03.5 / I risultati delle analisi	106
04 / IL PROCESSO PROGETTUALE A PREGASSONA	124
04.1 / Il progetto	126
04.2 / L'analisi del progetto	132
04.3 / Il processo di costruzione e le interviste	148
/ CONCLUSIONI	158
/ RINGRAZIAMENTI	160
/ BIBLIOGRAFIA	162
/ SITOGRAFIA	166

/ ABSTRACT

Il tema della sostenibilità ambientale è il motore di cambiamento che in modo sempre crescente impatta i comportamenti dei singoli e le scelte di consumo dell'intera società. La velocità con la quale i cambiamenti climatici stanno trasformando i territori e la qualità delle città che abitiamo, impone l'introduzione di modelli di sviluppo sostenibili ed egualitari che necessitano di perdere la posizione elitaria e quindi di scelta facoltativa che avevano in passato, e sono oggi un fattore imprescindibile alla base di qualsiasi valutazione di fattibilità.

I governi mondiali si stanno impegnando in questa sfida con nuove strategie di crescita come l'European Green Deal, che rende disponibili le risorse per ripensare, tra le altre cose, il modo in cui intendiamo l'edificio. Il settore edilizio, infatti, è responsabile di più di un terzo dell'energia globalmente consumata [1] e una ridefinizione di esso è oggi necessaria.

Il progetto di architettura gioca il delicato ruolo di favorire la trasformazione del concetto di edificio: da unità puramente architettonica a soggetto energeticamente attivo. Questo cambiamento implica un cambiamento non solo dal punto di vista processuale, ma anche delle figure professionali che ne fanno parte e della loro interrelazione.

Il BIPV (Building Integrated Photovoltaics System) è un modello da analizzare per comprendere i passaggi della trasformazione del concetto di edificio: da uno tradizionale ad uno Smart Building. L'obiettivo di questo lavoro prende in esame le modalità con le quali l'aspetto tecnologico si sta fondendo con gli aspetti formali dell'architettura e quale sia la percezione del materiale fotoattivo da parte dei professionisti e dell'utenza.

L'indagine nasce dal lavoro portato avanti insieme ai ricercatori del team Involucro Innovativo di SUPSI¹, con i quali ho lavorato nell'ambito della borsa di studio del Politecnico "Tesi su proposta di candidato" e poi di tirocinio curriculare. Nei mesi trascorsi in Svizzera, avendo accesso ad ampi database, sono stati raccolti molti dati utili su progetti esistenti.

La Svizzera è un territorio fertile per l'integrazione del fotovoltaico grazie alle politiche federali e ai fondi pubblici e privati disponibili; infatti, ad oggi molti edifici BIPV sono stati realizzati ed osservabili.

¹: SUPSI: Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, con sede a Mendrisio, Svizzera.

²: Periodo durante il quale ho lavorato con i ricercatori grazie alla borsa di studio: inizio marzo 2021, fine luglio 2021.

Durante il mio periodo² di borsa e tirocinio, ho avuto l'opportunità di seguire nella fase di progetto finale la costruzione della più grande facciata BIPV presente in Ticino ad oggi. Nell'ambito di questo lavoro sono stati intervistati i principali professionisti che hanno preso parte alla progettazione della facciata, le risposte delle interviste sono state riportate in questo lavoro.

/ INTRODUZIONE

La decarbonizzazione del nostro patrimonio edilizio è condizione necessaria per raggiungere gli obiettivi posti dalla COP21 di limitare l'aumento della temperatura media globale a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali [2].

A questo scopo l'integrazione di sistemi di produzione energetica nell'edificio sta trasformando il concetto di involucro, che da barriera passiva diventa un'interfaccia sensibile ed energeticamente attiva. Lo sfruttamento di tutte le superfici rappresenta un grande potenziale ai fini della produzione di energia da fonti rinnovabili; inoltre, permette di salvaguardare terra e paesaggi, migliorando la qualità del patrimonio edilizio.

Attualmente il fotovoltaico integrato ha raggiunto alti livelli di maturità tecnica e le prospettive di mercato sembrano ottimistiche. La sfida attuale è affermare materiali e tecniche BIPV come elementi di uso comune nel mercato delle costruzioni e tra i professionisti. Al momento i prodotti BIPV esistenti offrono agli architetti, ai proprietari, ai costruttori di facciate e agli investitori una

gamma diversificata di soluzioni che possono essere personalizzate in modo analogo ai materiali convenzionali per l'involucro esterno [3]. Nuove tecnologie in via di sviluppo, come le tecnologie stratificate a secco, la costruzione off-site e la digitalizzazione del processo di costruzione, promettono di ampliare ulteriormente le possibilità di applicazione del fotovoltaico integrato.

Ad oggi, nonostante le molteplici opportunità che il BIPV può offrire, esso occupa ancora una piccola fetta del mercato del fotovoltaico, attestandosi generalmente tra l'1 e il 2% [4]. Le ragioni di queste percentuali sono riconducibili ad una serie di ragioni:

- Poca esperienza degli attori nella progettazione di soluzioni di facciate integrate che generano problematiche nel processo di progettazione e assemblaggio dei pannelli;
- L'interdisciplinarietà richiesta nella progettazione BIPV per la quale diversi professionisti sono portati a collaborare;
- L'incerto quadro normativo e le politiche non particolarmente incentivanti che scoraggiano gli investitori, i progettisti e le industrie.

In effetti, attualmente il BIPV è un'innovazione per il settore edilizio. "Innovare" implica la creazione ex novo ed un cambiamento di oggetti, metodi e comportamenti rispetto alla consuetudine [5]. Per queste ragioni, si può affermare che ci troviamo in una fase di transizione, di acquisizione di nuove tecnologie, di competenze, di metodi e comportamenti in ambito architettonico, così come è già avvenuto nella storia dell'architettura con l'introduzione di nuovi materiali, come il vetro o l'acciaio.

In questo lavoro di tesi si analizza l'integrazione tra aspetto tecnologico e formale al progetto di architettura. Il fine dello studio è comprendere quale sia l'identità che il BIPV sta assumendo nelle soluzioni formali dell'involucro edilizio e quale ne sia la percezione da parte dei professionisti e dell'utenza. Questa analisi nasce grazie all'esperienza della borsa di studio del Politecnico "Tesi su proposta di candidato" e dal tirocinio curriculare svolti presso la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana - SUPSI (a Mendrisio, Svizzera) insieme ai ricercatori del Dipartimento "Involucro Innovativo". La Svizzera è da anni uno dei paesi capofila a livello internazionale sul tema del fotovoltaico integrato. Diversi progetti pilota hanno affrontato il tema con

una crescente attenzione tesa a superare la considerazione del fotovoltaico come un materiale innovativo, utilizzando un effetto di dissimulazione delle celle solari per una rappresentazione estetica paragonabile a materiali edilizi tradizionali.

Durante il periodo di collaborazione iniziato a marzo 2021 e concluso il 31 luglio dello stesso anno, si è avuto accesso a molte informazioni sulla tecnologia. In particolare, è stato analizzato un database di 139 progetti di fotovoltaico integrato sul territorio elvetico. Il metodo di analisi considera l'approccio proposto da SUPSI, e presentato in un articolo scientifico di Pierluigi Bonomo di futura pubblicazione.

A destra: Logo della SUPSI;

In basso: Sede SUPSI di Mendrisio, presso la quale ho svolto le attività di ricerca. nell'ambito della borsa di studio e del tirocinio.

Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana

SUPSI



Oltre al vasto database, durante periodo di borsa e tirocinio a Mendrisio, è stata seguita la fase finale del progetto che oggi vanta la più grande facciata solare costruita in Ticino, a Pregassona (Lugano, CH). Durante questo lavoro sono stati studiati e ridisegnati alcuni dettagli tecnologici della facciata BIPV, sono state effettuate visite in cantiere, è stato visionato il progetto di layout dei pannelli e intervistati i principali professionisti che hanno preso parte alla progettazione della facciata solare.

Tutte le informazioni riportate nel presente elaborato si basano sulla raccolta di dati da relazioni, da studi recenti e da un ricco database di casi di studio reali. L'elaborazione di essi è stata orientata ad indagare la relazione tra innovazione tecnologica ed architettura.

Nel capitolo 1 si spiega quale sia la ragione che ha portato ad interessarsi ad un tema rivolto alla ridefinizione del sistema di approvvigionamento energetico dei nostri edifici: la crisi climatica. L'urgenza della decarbonizzazione è un tema centrale degli anni che stiamo vivendo, le nuove generazioni di architetti hanno il compito di rinnovare il settore edilizio e ad interessarsi alle tecnologie che possono migliorare la qualità di vita futura. Con la stessa finalità è stato redatto il capitolo 2, in cui si definiscono e differenziano i sistemi fotovoltaici applicati da quelli integrati (oggetto della tesi). Lo stesso capitolo inquadra il tema della tecnologia fotovoltaica, sia per quanto riguarda grandezze che la definiscono, sia per quanto riguarda storia ed evoluzione di esso, fino a fare una panoramica delle presenti tecnologie studiate per l'integrazione edilizia. Il terzo capitolo è il cuore della tesi di ricerca, in quanto è riportata l'analisi dell'innovazione tecnologica in architettura, introducendo la metodologia di ricerca utilizzata. I parametri individuati sono frutto di una visione critica delle forme che il fotovoltaico integrato assume rispetto agli archetipi architettonici. Nella sezione successiva del capitolo 3 sono riportati i risultati della ricerca, inquadrando quale sia la situazione attuale di assorbimento del BIPV nelle forme architettoniche. L'ultimo capitolo, il 4, riporta l'analisi di un caso studio reale e approfondito: il progetto di Pregassona, a Lugano. La scelta di analizzare un edificio reale è stata condotta per riportare nella realtà la situazione e le pratiche BIPV, confrontandole con i risultati della ricerca.

³: *Responsabile del team
Involúcro Innovativo di
SUPSI.*

L'URGENZA DELLA DECARBONIZZAZIONE

01

ONE

Il cambiamento climatico è un fenomeno in atto innegabile, le conseguenze sono già visibili ed è compito della nostra generazione arginarne il più possibile le cause e le conseguenze. La temperatura media globale è in continuo aumento a causa delle emissioni di gas serra prodotte dall'azione antropica e le ripercussioni di questo fenomeno sugli ecosistemi del nostro pianeta saranno presto irreversibili. Gli ultimi quattro decenni sono stati i più caldi dal 1850 e le concentrazioni di gas serra (GHG) dal 1750 circa sono inequivocabilmente causati dall'attività umana [6]. La decarbonizzazione degli edifici e del settore delle costruzioni è uno dei punti fondamentali per raggiungere gli obiettivi posti dalla comunità scientifica in collaborazione con i governi per contrastare il cambiamento climatico. Il settore delle costruzioni è responsabile di quasi il 40% delle emissioni legate all'energia e ai processi, modificare i processi nell'edilizia è tra azioni le più efficaci e fattibili in termini di costi [7].

Nonostante i recenti sforzi dei governi per contrastare la produzione di gas dannosi per il nostro pianeta, secondo il "World Energy Outlook 2019" di IEA, il tasso di miglioramento dell'andamento energetico è rallentato, ed è necessario un'azione decisa e urgente da parte dei responsabili politici e degli investitori [8] per soddisfare gli SDGs (Sustainable Development Goals) e lo scenario di sviluppo sostenibile. Per fare ciò è necessario invertire la tendenza e fare uno sforzo concentrato per decarbonizzare e migliorare l'efficienza energetica degli edifici.

Questo capitolo si propone di fare un inquadramento sulla situazione del cambiamento climatico, sulle sue conseguenze e sulle azioni e misure che i governi, in particolare l'UE, stanno attuando per decarbonizzare le nostre città e i nostri edifici.



“Sinking ship” di Musa Talasli. Mostra come i livelli dell’acqua del lago più grande della Turchia, il lago di Van, siano diminuiti in tempi record. La foto è stata scattata a Edremit, nell’estate 2021.

Source: Photo contest, Climate Change PIX/EEA

“Il previsto aumento delle temperature globali è destinato a influenzare la vita sul nostro pianeta in modo drammatico. Da incendi e inondazioni catastrofici, allo scolorimento delle barriere coralline e alla perdita di biodiversità, l’impatto del cambiamento climatico è già fin troppo evidente.”

*Mario Dragi, Presidente del
Consiglio italiano. Intervento
del 1/11/2021 a Glasgow*

Source: COP26



*“Disappearing green future”
di Zvonimir Zvonar. Cattura
due bambini che hanno
smesso di giocare per
guardare gli incendi boschivi a
Rogoznica, in Croazia, l'estate
2021.*

Source: Photo contest,
Climate Change PIX/EEA



“Hightide Enters Home” di SL Shanth Kumar. 2019

Source: CIWEM
Environmental Photographer
of the Year

01.1 La crisi climatica

La crisi climatica è uno dei più grandi problemi del nostro tempo. L'IPCC⁴ definisce il cambiamento climatico come

“cambiamento nello stato del clima che può essere identificato (per esempio usando test statistici) da cambiamenti nella media e/o nella variabilità delle sue proprietà, e che persiste per un periodo esteso, tipicamente decenni o più. Si riferisce a qualsiasi cambiamento del clima nel tempo, sia a causa della variabilità naturale, che come risultato dell'attività umana” [9].

Inoltre, l'ultimo rapporto pubblicato dall'IPCC, dichiara che l'influenza umana sull'aumento delle temperature è inequivocabile. I cambiamenti climatici possono essere naturali, ma dal 1800, le attività umane sono state il principale motore della modificazione degli equilibri del nostro pianeta [10].

Le conseguenze del cambiamento climatico sono già in corso e sono misurabili. L'IPCC descrive il cambiamento climatico avvenuto negli ultimi anni con un lungo rapporto, il quale racchiude tutti i dati registrati sulla variazione del clima: le precipitazioni meteorologiche, l'aumento della temperatura superficiale globale, lo scioglimento dei ghiacciai e dell'Antartico, il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani, e molti altri disastri ambientali [10]. In particolare, in Europa centro-meridionale ad oggi si registrano ondate di calore, incendi forestali e siccità sempre più frequenti: il Mediterraneo si sta trasformando in una regione arida e quindi sempre più vulnerabile dal punto di vista della siccità e degli incendi boschivi. L'Europa settentrionale sta diventando più umida e le alluvioni invernali potrebbero diventare un fenomeno ricorrente. Le zone urbane nelle quali vivono 4 europei su 5, sono esposte a ondate di calore, alluvioni e all'innalzamento del livello dei mari, ma spesso non sono preparate per adattarsi ai cambiamenti climatici. Infatti, in alcune regioni si registra un aumento dei decessi dovuti al calore mentre in altre se ne registrano per l'eccessivo freddo. Inoltre, si osservano già alcuni cambiamenti

⁴: IPCC: Intergovernmental panel on climate change, in italiano è il Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici. È formato dagli scienziati di 195 paesi, tra cui quelli italiani del Cnr-Isaac e del Cmcc, rispettivamente l'Istituto di scienze dell'atmosfera e il Centro euro-mediterraneo sui cambiamenti climatici.

nella distribuzione di alcune infezioni patogene trasmesse dall'acqua e dai vettori di malattie.

Anche dal punto di vista economico le conseguenze sono già registrabili e preoccupanti: i danni delle alluvioni e degli incendi impongono elevati costi alla società e all'economia. Si calcola che dal 1980 ad oggi le alluvioni hanno colpito più di 5,5 milioni di persone e provocato perdite economiche dirette per oltre 90 miliardi di euro. I settori che dipendono di più dalle temperature e dai livelli di precipitazione sono l'agricoltura, la selvicoltura, l'energia e il turismo, infatti, ad oggi sono i settori più colpiti [11].

ULTIMO
DATO DELLA
TEMPERATURA
ANOMALA
DELLA TERRA
(2020) :

+1.02 °C

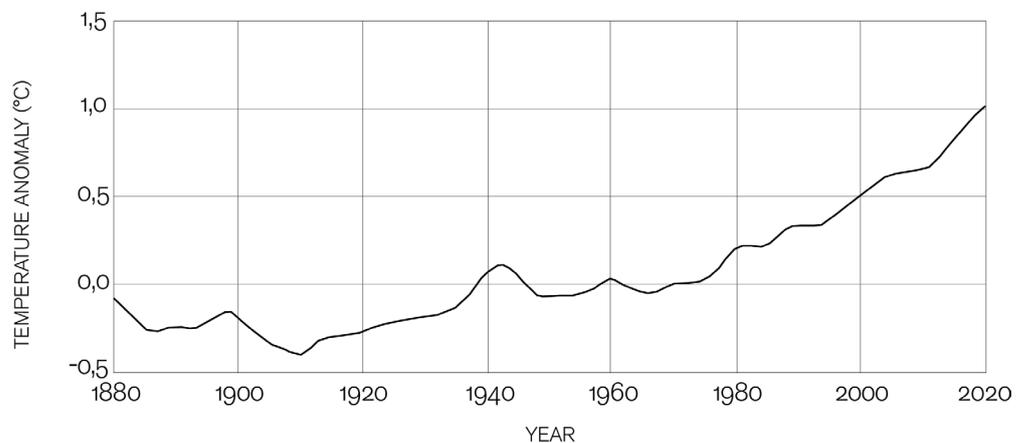
Fonte "Ultimo dato della temperatura anomala della terra(2020)":

NASA GISS
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Fonte grafico a destra
"Variazione della temperatura superficiale globale":

NASA GISS;
rielaborazione grafica

<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>



Le cause

La causa principale del cambiamento climatico riconosciuta dall'IPCC è l'emissione di gas chiamati GHG⁵, i quali producono il cosiddetto "Effetto serra". Alcuni gas presenti nell'atmosfera terrestre agiscono come il vetro di una serra, trattenendo una parte del calore del Sole nell'atmosfera terrestre, impedendogli di tornare nello spazio, e provocando così il riscaldamento globale. L'Effetto Serra è uno dei principi per il quale esiste la vita che conosciamo oggi sul pianeta.

L'attività dell'uomo, però, sta alterando i delicati equilibri di questo processo, aumentando le concentrazioni di questi gas nell'atmosfera, i seguenti gas sono emessi in quantità anomale [12]:

- L'anidride carbonica;
- Il metano;
- L'ossido di azoto;
- I gas fluorurati.

L'anidride carbonica prodotta è il principale fattore del riscaldamento globale. Nel 2020 la concentrazione del gas nell'atmosfera superava del 48% il livello preindustriale (prima del 1750) [6]. Solo nel 2020, con la pandemia di COVID19 la concentrazione di CO₂ in atmosfera ha visto un drastico calo. L'abbassamento della domanda energetica di circa il 5% ha avuto come conseguenza un taglio delle emissioni dell'8% [13]. Tale riduzione, tuttavia, non evita un nuovo rialzo delle emissioni che annullerebbe questo drastico abbassamento dei livelli di CO₂.

Secondo i dati dell'International Energy Agency (IEA) il settore che produce più CO₂ è il settore della produzione energetica, ovvero il settore che trasforma l'energia primaria ottenuta da risorse energetiche fossili e combustibili nucleari in energia finale. La domanda di energia finale è determinata dai settori che ne consumano maggiormente, come il settore industriale, il settore dei trasporti

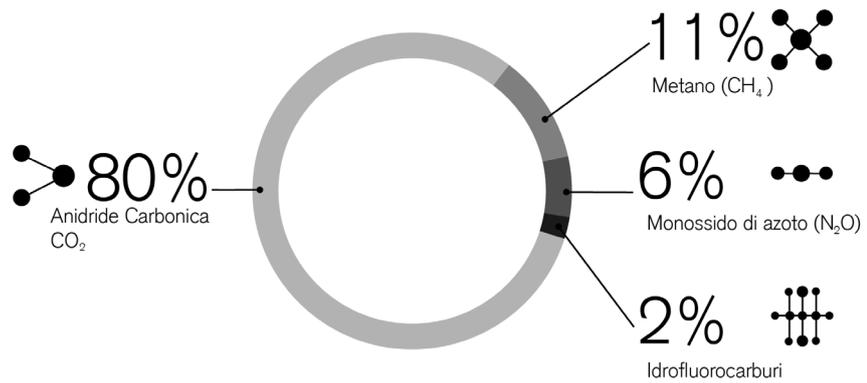
⁵: GHG è la sigla per identificare i Greenhouse Gases, ovvero i gas che causano l'effetto serra.

Emissioni di gas serra nell'UE nel 2019, suddivisi per inquinante. Totale emissioni di gas serra esclusi uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e selvicoltura.

< 0,2% di perfluorocarburi (PFC), miz non specificato di perfluorocarburi e idrofluorocarburi, esafluoro di zolfo (SF6) e trifluorocarburi (NF3). La percentuale è diversa da 100% a causa dell'arrotondamento delle cifre.

Fonte: Parlamento europeo.

<https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/>

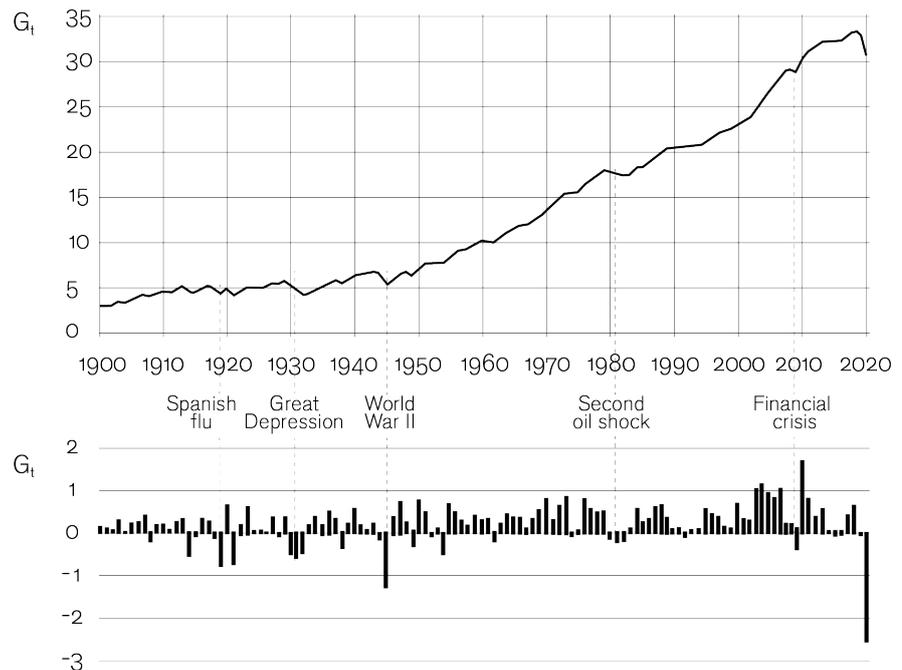


Emissioni di CO₂ a livello mondiale legate alla produzione energetica, dal 1900 al 2020.

Il grafico sopra rappresenta l'andamento delle emissioni lungo gli anni. Nel grafico in basso il discostamento rispetto al valore medio.

Fonte: IEA data&statistics; rielaborazione grafica.

www.iea.org



e anche il settore delle costruzioni. Monitorare i settori che più richiedono energia è fondamentale per riuscire a controllare e ridurre le emissioni dannose per il clima terrestre.

Restare sotto la soglia degli +1,5 °C di surriscaldamento globale -come stabilito dall'Accordo di Parigi⁵ nel 2015- è fondamentale. Oggi l'aumento è già stimato a +1,02 °C [14], e per centrare l'obiettivo è necessario dimezzare le emissioni globali entro il 2030, mentre nel 2050 dovremmo arrivare a zero emissioni. Rimanere sotto la soglia dell'1,5 °C non significa solo contenere il riscaldamento del pianeta, ma significa preservare tutti gli equilibri che permettono la vita sulla Terra. Aumentando la temperatura aumenta il rischio di destabilizzare questi sistemi interconnessi, anche solo 0,5 °C può fare davvero la differenza [15].

Per questo motivo è fondamentale agire ora per contenere l'aumento della temperatura media globale. Per fare ciò, secondo l'IPCC è necessario un piano d'azione trasversale che riesca a convertire le fonti della produzione di energia: dall'utilizzo di combustili fossili alle risorse energetiche rinnovabili, oltre che aumentare l'efficienza energetica diminuendo le dispersioni e gli sprechi di energia.

⁵: *Accordo di Parigi è un accordo tra gli Stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, riguardo alla riduzione di emissione di gas serra, e alla finanza, a partire dall'anno 2020. L'argomento sarà affrontato nelle prossime pagine di questo elaborato.*

+ 1.5 °C

● **Ogni estate, 3% di probabilità di un Artico senza ghiaccio**

● **4% di mammiferi perdono metà del loro habitat**

● **2 mesi in media di siccità**

+ 2 °C

Ogni estate, 16% di probabilità di un Artico senza ghiaccio

8% di mammiferi perdono metà del loro habitat

4 mesi in media di siccità

+ 3 °C

Ogni estate, 63% di probabilità di un Artico senza ghiaccio

41% di mammiferi perdono metà del loro habitat

10 mesi in media di siccità

Differenti scenari con l'aumento della temperatura sulla Terra.

Fonte: UN climate change.

Il settore edilizio

In una panoramica globale, l'ambiente costruito rientra tra i principali target per le azioni di riduzione dei GHG a causa delle elevate emissioni di CO₂ associate ai processi di costruzioni ed alla produzione di energia usata negli edifici. Nel 2018 gli edifici hanno rappresentato complessivamente il settore più rilevante per consumo di energia. Il Global Status Report documenta lo stato del settore dell'edilizia per quanto riguarda l'uso dell'energia e le emissioni date dal settore delle costruzioni. Secondo questo Report, la costruzione di edifici ha rappresentato il 36% dell'uso globale di energia finale e quasi il 40% delle emissioni di anidride carbonica legate all'energia, giocando un ruolo dominante nella transizione dell'energia pulita. Il continuo aumento della popolazione è e continuerà ad essere uno dei principali motivi legati all'aumento della domanda di energia degli edifici [1].

L'impatto rilevante che gli edifici hanno sul riscaldamento globale e sulla quantità di gas nocivi li rende oggetto di nuove e costanti valutazioni sulle prestazioni energetiche di essi. Nel 2020 i paesi sono stati tenuti a comunicare i loro nuovi e aggiornati NDC (National Determined Contribution) che stabiliscono gli sforzi di ogni singola nazione per ridurre le emissioni e adattarsi agli impatti del cambiamento climatico. Oltre agli NDC, le politiche di certificazione rispetto alla sostenibilità dei singoli materiali e le prestazioni energetiche degli edifici hanno continuato ad espandersi e semplificarsi nei processi. Queste certificazioni aiutano a ridurre la domanda di energia di questo settore, soprattutto per quanto riguarda i sistemi di raffreddamento e riscaldamento, rendendo gli edifici più sostenibili.

Oltre alle certificazioni energetiche, altri calcoli sono stati certificati e validati per calcolare la sostenibilità ambientale degli edifici. Lo standard europeo EN 15978 introdotto nel 2011 specifica un metodo di calcolo basato sulla valutazione dell'intero ciclo di vita di un edificio definendo tutte le sue fasi, dalla costruzione alla dismissione. Sulla base di tale norma è possibile associare a ciascuno stadio di vita dell'edificio le rispettive emissioni di CO₂

prodotte, distinguendo quelle emesse dai processi di costruzione da quelle legate all'approvvigionamento energetico degli edifici.

Seguendo le definizioni presenti nel documento *Bringing embodied carbon upfront* [16] del WorldGBC⁶: l'embodied carbon (tradotto letteralmente in italiano "carbono incorporato") si riferisce alle emissioni di carbonio prodotte durante tutti il ciclo di vita di un edificio: dal processo di costruzione, comprendendo le fasi di estrazione dei materiali, trasporto e lavorazione, fino al termine della vita utile dell'edificio [17]. La facilità del calcolo di questo dato permette a tutti i professionisti di valutare l'impatto del progetto a cui si sta lavorando, dando la possibilità di migliorare il futuro patrimonio edilizio.

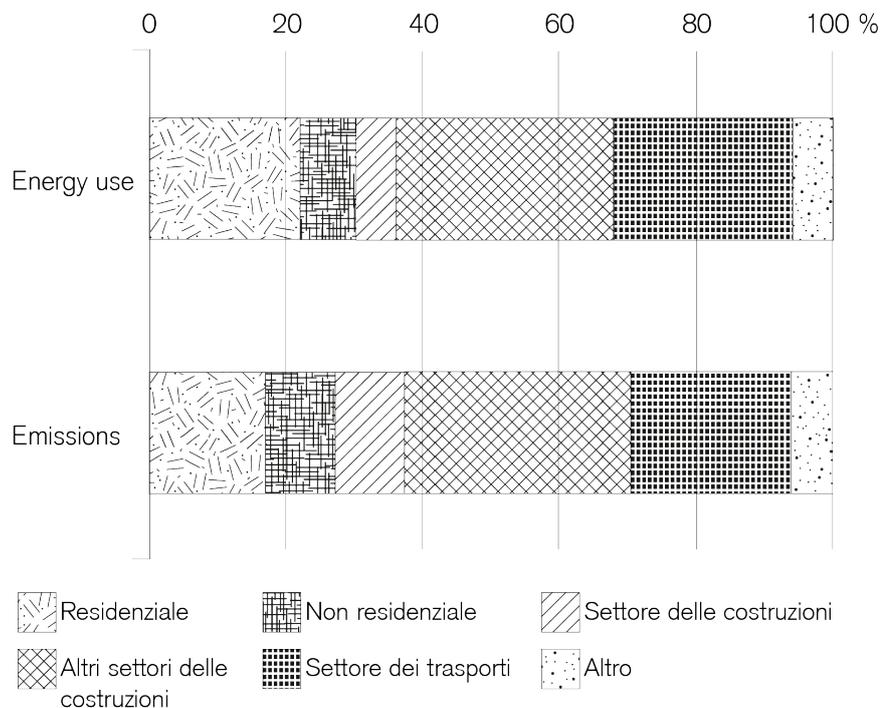
⁶: World Green Building Council: è un'organizzazione internazionale che riunisce i Green Building Council (GBC), associazioni nazionali indipendenti che operano nel settore dell'edilizia sostenibile.

Energia globale utilizzata e emissioni legate alla produzione di energia per settori. Ultimo aggiornamento: 10 novembre 2021.

Nota: "Settore delle costruzioni rappresenta il dato dedicato alla produzione di materiali da costruzione per il settore edilizio. "Altri settori delle costruzioni" di riferisce all'industria che produce materiali utilizzati per la costruzione di altre infrastrutture.

Source: IEA data&statistics; rielaborazione grafica.

www.iea.org



01.2 Gli accordi internazionali sul clima

L'interesse per le energie rinnovabili può essere fatto iniziare all'inizio del 1970, periodo in cui iniziarono a diffondersi i movimenti ambientalisti nelle culture occidentali. L'evento scatenante fu la crisi energetica del 1973, durante questo periodo, che durò un anno, i paesi occidentali dovettero far fronte ad una grave mancanza di fonti energetiche causata da una crisi politica che sfociò in una guerra tra i paesi esportatori di carbone e petrolio. Siria ed Egitto dichiararono guerra allo Stato di Israele, iniziando la guerra del Kippur. I paesi dell'OPEC (Organizzazione dei Paesi Produttori di Petrolio) decisero di sostenere il fronte siriano ed egiziano, e per farlo aumentarono in maniera significativa il prezzo del barile, decretando l'embargo⁷ nei confronti dei paesi maggiormente filoisraeliani (i paesi occidentali). La conseguenza fu un'impennata dei prezzi mondiali, ed una repentina interruzione del flusso di approvvigionamento del petrolio verso le nazioni importatrici. I paesi industrializzati ebbero grosse difficoltà energetiche, entrando in una crisi che dimostrò quanto il modello di sviluppo occidentale fosse dipendente dall'importazione, all'epoca totalmente riconducibile al petrolio [18].

⁷Embargo: nel diritto internazionale è una sanzione in base alla quale viene imposto ad una nave di non salpare o di non effettuare attracco presso un porto dello Stato in cui si trova.

Fu dopo questa crisi che la Commissione Europea, ed in generale i paesi in occidente, iniziarono a cercare nuove soluzioni per la produzione di energia nei paesi membri, ed iniziando la ricerca sulle fonti rinnovabili e il nucleare [19], vedendo nascere organismi come l'IEA (International Energy Agency) nel novembre 1974, creata per garantire la sicurezza energetica e la cooperazione in materia di politica energetica. Nel corso degli anni la IEA ha evoluto la sua missione, ampliando il proprio impegno per approfondire le principali economie emergenti e fornire una maggiore attenzione alla tecnologia dell'energia pulita, compresa l'efficienza energetica. L'IEA ancora oggi si trova al centro del dibattito energetico globale e commissiona, sostenuta da moltissime nazioni, ricerca e analisi nell'ambito energetico [20].



Un venditore in una stazione di distribuzione di benzina segnala al pubblico la mancanza di carburante.

Source: <https://www.startingfinance.com/approfondimentilla-crisi-energetica-del-1973/>

Se nel 1970 si iniziò a finanziare la ricerca per le risorse rinnovabili, il concetto di “sviluppo sostenibile” fu introdotto nel 1987, anno in cui venne scritto un documento conosciuto come “Rapporto Brundtland” (o come “Our Common Future”). Il nome del rapporto deriva dalla coordinatrice Gro Harlem Brundtland, che in quell’anno fu presidente del WCED (World Commission on Environment and Development) e che commissionò il rapporto, destinato a passare alla storia e che definì il concetto di sviluppo sostenibile:

“lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri” [21].

Questa definizione mette in luce un principio soprattutto etico: la responsabilità delle generazioni presenti nei confronti delle generazioni future.

Nel 1988 viene creato il Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC), che riunisce migliaia di scienziati da tutto il mondo per valutare su prove scientifiche l’impatto del cambiamento climatico sull’ecosistema del nostro pianeta. Nel 1992 quasi tutti i paesi del mondo aderiscono alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC: Nation Framework Convention on Climate Change), il principale trattato internazionale per combattere il cambiamento climatico. È in questi anni che si può ricondurre l’inizio dell’impegno da parte dei governi per combattere il cambiamento climatico. Infatti, l’obiettivo del quadro a cui presero parte le nazioni firmatarie (che ad oggi sono 197), includeva la possibilità che le parti facenti parte adottassero in apposite conferenze atti ulteriori, denominati “protocolli”, che avrebbero posto i limiti obbligatori o legalmente vincolanti per le emissioni di gas serra alle singole nazioni [22].

Il più famoso trattato firmato da 192 parti della UNFCCC è il Protocollo di Kyoto del 1997: l’unico strumento legalmente vincolante fino al 2020 per ridurre le emissioni di gas a effetto serra. Tuttavia, dato che molti dei

principali soggetti responsabili delle emissioni non ne sono parte, il protocollo di Kyoto interessa solo il 12% circa delle emissioni globali. Il principale organo decisionale dell'UNFCCC è la Conferenza della Parti (COP), che si svolge annualmente e tutte le parti della convenzione possono parteciparvi [23].

Tappa dell'UNFCCC successiva e fondamentale al Protocollo di Kyoto è l'”Accordo di Parigi”, un accordo vincolante a livello legale. Nel 2015 è stato adottato da tutte le parti durante la COP21, interessando i produttori del 55% delle emissioni globali [24].

L'obiettivo di questo Accordo è limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2 °C e punta a rafforzare la capacità dei paesi di affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici. I governi durante la COP21 hanno concordato di [25]:

- mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale sotto ai 2 °C rispetto ai livelli preindustriali;
- puntare a limitare l'aumento a 1,5°C, dato che ciò ridurrebbe in misura significativa i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici
- fare in modo che le emissioni globali raggiungano il livello massimo al più presto possibile, pur riconoscendo che per i paesi in via di sviluppo occorrerà più tempo
- conseguire rapide riduzioni successivamente secondo le migliori conoscenze scientifiche disponibili, in modo da raggiungere un equilibrio tra emissioni e assorbimenti nella seconda metà del secolo.

Inoltre, i governi hanno concordato di riunirsi ogni cinque anni per valutare i progressi collettivi verso gli obiettivi a lungo termine. L'incontro più recente, che prendere il nome di COP26 si è tenuto a Glasgow nel novembre del 2021 [25].

La COP26

La ventiseiesima conferenza sul clima si è conclusa il 12 novembre 2021 a Glasgow. Si conclude come un accordo globale per accelerare l'azione sul clima in questo decennio. Per la prima volta la Conferenza delle Parti concorda una posizione comune sull'eliminazione graduale dell'energia da fonti non rinnovabili. Duecento paesi hanno concordato il Patto per il Clima di Glasgow per mantenere 1,5 °C e finalizzare gli elementi in sospeso dell'Accordo di Parigi [26]. Ogni paese ha accettato di rivedere e rafforzare gli attuali obiettivi di emissioni fino al 2030, noti come contributi nazionali determinati (NDC) nel 2022. La finalizzazione dell'accordo di Parigi consiste nel completare le linee guida dopo sei anni di discussioni. Questo permetterà la piena realizzazione dell'accordo di riferimento, dopo l'accordo su un processo di trasparenza che terrà conto dei paesi mentre raggiungono i loro obiettivi.

Inoltre, durante questa Conferenza, sono stati ascoltati e riconosciuti gli appelli della società civile e dei paesi più vulnerabili agli impatti climatici, concordando che un'azione sulla riduzione graduale dei combustibili fossili. Il sostegno finanziario a queste nazioni è stato riconosciuto attraverso il "Fondo per l'adattamento", in quanto i paesi sviluppati sono stati sollecitati a raddoppiare il loro sostegno ai paesi in via di sviluppo entro il 2050.

Rispetto alla COP21 di Parigi, la leadership britannica ha ottenuto moltissime adesioni a Glasgow: due anni fa solo il 30% del mondo era coperto da obiettivi zero, questa cifra ora è intorno al 90%. Nello stesso periodo 154 parti hanno presentato nuovi obiettivi nazionali, che rappresentano l'80% delle emissioni globali. Un nuovo impegno è stato mostrato verso la protezione di preziosi habitat naturali con il 90% delle foreste del mondo coperte da un impegno di 130 paesi a porre fine alla deforestazione entro il 2030. Anche per quanto riguarda la transizione a fonti di energia rinnovabili molte nazioni hanno aderito alla causa [25].

In generali gli obiettivi della COP26 possono essere riassunti in 4 punti fondamentali [27]:

1. mitigazione dei danni: per questo punto la COP ha individuato alcuni settori in cui sono necessari dei provvedimenti dai governi. In particolare la diminuzione dell'utilizzo del carbone come fonte di energia; lo stop alla deforestazione; il passaggio alle auto elettriche; la riduzione della produzione di metano.
2. adattamento ai danni: accelerare gli sforzi per riuscire a competere con l'impatto climatico. Molte persone nel mondo stanno già affrontando alcuni delle conseguenze del cambiamento climatico: l'obiettivo in questo caso è di investire finanze e trovare soluzioni per riuscire a controllare gli effetti della crisi sulle popolazioni nel mondo.
3. finanziamenti: ciò che è noto è che il costo delle azioni per ridurre l'impatto del cambiamento climatico è molto minore rispetto al costo per gestire gli effetti. Ci troviamo in un momento storico con molte opportunità per cambiare le fonti di energia: produrre energia solare non è mai costato così poco, e presto costerà sempre meno; così come i veicoli e i macchinari elettrici. Investire su nuove tecnologie significa investire sulle comunità creando nuovi posti di lavoro e nuova ricchezza.
4. collaborazione: tutti i paesi hanno obiettivi differenti i quali si possono raggiungere solamente con una collaborazione internazionale in quanto le responsabilità sono condivise, e spesso i paesi più colpiti sono quelli meno responsabili degli effetti del cambiamento climatico.



Greta Thunberg, simbolo della lotta contro il cambiamento climatico delle nuove generazioni. Ha dato vita al Friday for future manifestazione a cui aderiscono soprattutto i più giovani, per sensibilizzare i governi al tema della sostenibilità.

Source: time.com, Jonathan Nackstrand

“La scienza non mente. Se vogliamo rimanere al di sotto degli obiettivi fissati nell’accordo di Parigi del 2015 - e quindi minimizzare i rischi di innescare reazioni a catena irreversibili al di fuori del controllo umano - abbiamo bisogno di riduzioni di emissioni immediate, drastiche, annuali, come mai si era visto al mondo.”

Greta Thunberg, attivista per il clima. Intervento alla COP26 di Glasgow. 21/10/2021

Source: globalcitizen.org

Azioni europee per il clima

L'Unione Europea è dai primi anni 2000 che tenta di rendersi climaticamente neutra, per quanto riguarda il settore delle costruzioni, le prime direttive per limitare il consumo di energia da fonti non rinnovabili risalgono al 2002 e prendono il nome di EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) e le altre direttive dei consumi energetici nel settore delle costruzioni, tra cui:

- La prima versione dell'EPBD con la Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico degli edifici, che ha introdotto la certificazione energetica degli edifici e la relativa metodologia di calcolo; (2002/91/CE)
- L'EPBD è stata modificata nel 2010 con Direttiva 2010/31/CE sul rendimento energetico nell'edilizia. Entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione devono essere edifici ad energia “quasi” zero, mentre entro il 31 dicembre 2018 lo dovevano essere tutti quelli occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi. (2010/31/UE)

“edificio a energia quasi zero: edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze. [...] Gli stati membri provvedono affinché: a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici ad energia quasi zero; b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero.”

- Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che imponeva il 20% di efficienza energetica presente nel piano europeo 20-20-20 (2012/27/UE)
- Nell'ambito del pacchetto Energia pulita per tutti gli europei, L'EPBD del

2010 è stata rivisitata nella Direttiva 2018/844/UE (EPBD) che modifica la Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia 2010/31/UE e la direttiva sull'efficienza energetica 2012/27/UE (2018/844/UE)

Nonostante le direttive sopracitate, il settore delle costruzioni si muove con grande ritardo in questa corsa alla transizione energetica con un 75% di patrimonio edilizio europeo ancora inefficiente dal punto di vista energetico; per tale motivo ogni Stato membro ha dovuto presentare nei propri piani nazionali integrati per l'energia e il clima (NECP) le rispettive strategie in ambito di efficienza energetica degli edifici.

Uno dei provvedimenti più famosi e importanti degli ultimi anni per la decarbonizzazione dei Paesi membri, è sicuramente il Green Deal.

Il Green Deal è una tabella di marcia vincolante per tutti gli stati membri, il fine è raggiungere gli obiettivi preposti dalle Conferenze per il Clima e trasformare le problematiche climatiche e le sfide ambientali in opportunità per tutti i settori, rendendo la transizione equa ed inclusiva per tutti [28]. Il piano di azione è volto a promuovere l'uso efficiente delle risorse passando ad un'economia pulita e circolare, ripristinando la biodiversità e riducendo l'inquinamento. L'obiettivo dettato dall'accordo di Parigi e ribadito durante la COP26 a Glasgow è raggiungere la neutralità climatica nel 2050, proponendo una legge europea che trasforma l'impegno politico in un obbligo giuridico [29].

Il Green Deal è un piano trasversale che tocca tutti i settori della nostra economia e del nostro stile di vita. Per trasformare la nostra economia e le nostre società ci sono alcuni obiettivi che sono stati individuati [30].

- Rendere i trasporti sostenibili per tutti;
- Realizzare un sistema energetico più pulito;
- Ristrutturare gli edifici per uno stile di vita più ecologico;
- Lavorare in sintonia con la natura per proteggere il nostro pianeta e la nostra salute.

Di questi punti, si osserva che tutti toccano tematiche legate all'urbanistica, all'architettura, alle fonti di energia pulita e alla scelta dei materiali .

In particolare, per quanto riguarda la realizzazione di un sistema energetico più pulito. La Commissione ha proposto di portare al 40% l'obiettivo vincolante delle energie rinnovabili nel mix energetico dell'UE. Le proposte promuovono la diffusione dei combustibili rinnovabili, come l'idrogeno nell'industria e nei trasporti, e prevedono nuovi obiettivi. Inoltre, la riduzione del consumo energetico è essenziale per far diminuire sia le emissioni che i costi dell'energia per i consumatori e per l'industria.

OBIETTIVO
IN MATERIA
DI ENERGIA
RINNOVABILE
PER IL 2030 :

40%

*Obiettivi per il Green Deal
entro il 2030.*

Source: ec.europa.eu

Per quanto riguarda la **ristrutturazione del patrimonio edilizio**, è una delle azioni cardine del Green Deal. Infatti, se nelle economie emergenti la domanda energetica degli edifici è fortemente vincolata dall'aumento della popolazione, il patrimonio edilizio europeo ha un tasso di crescita annuale del settore edilizio europeo dell'1% circa, e la maggior parte dei paesi membri ha registrato una diminuzione del tasso di nuove costruzioni negli ultimi anni [21]. Questo implica che ad oggi il settore edilizio dominante in Europa è quello della riqualificazione, con una certa percentuale che secondo il report OpenEXP dal 2005 al 2015 è aumentata dal 46% al 57%, superando il mercato della nuova costruzione [22].

Per sostenere il mercato delle ristrutturazioni l'UE ha varato una strategia per la riqualificazione del patrimonio edilizio europeo: la *Renovation Wave*. La Commissione con questo piano mira a raddoppiare i tassi di ristrutturazione nei prossimi dieci anni assicurandosi che i lavori di ristrutturazione portino ad una maggiore efficienza energetica e delle risorse. L'obiettivo, oltre alla decarbonizzazione e alla riduzione della domanda energetica è alzare la qualità dei luoghi di vita e di lavoro. Il vicepresidente esecutivo per l'European Green Deal, Frans Timmermans, ha dichiarato:

“Vogliamo che tutti in Europa abbiano una casa illuminare, riscaldare o rinfrescare senza spendere una fortuna o distruggere il pianeta. The Renovation Wave migliorerà i luoghi in cui lavoriamo, viviamo e studiamo, riducendo il nostro impatto sull'ambiente e fornendo lavoro a migliaia di europei. Abbiamo bisogno di edifici migliori se vogliamo ricostruire meglio”⁸.

⁸: Source: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_1835

Per raggiungere l'obiettivo di ottenere edifici più efficienti sotto il profilo energetico, la Commissione propone di:

- imporre agli Stati membri di ristrutturare ogni anno almeno il 3% della superficie coperta totale di tutti gli edifici pubblici;
- fissare un parametro di riferimento del 49% di energie rinnovabili negli edifici entro il 2030;
- imporre agli stati membri di aumentare l'1,1% all'anno, fino al 2030, l'uso di energie rinnovabili per il riscaldamento e raffrescamento.

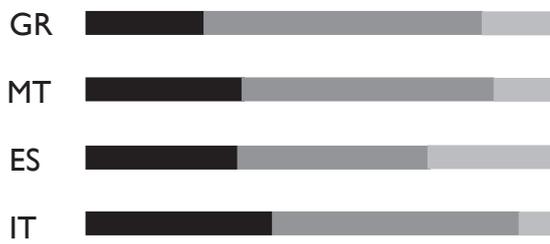
Si può affermare quindi che il rinnovamento del patrimonio edilizio offre molteplici opportunità: migliorare la qualità di vita dei cittadini europei, decarbonizzare la produzione energetica delle case e migliorare l'efficienza energetica del settore residenziale sono gli obiettivi principali della strategia europea. Oltre a ciò, gli interventi sull'esistente possono innescare una trasformazione su larga scala delle città e dell'ambiente costruito. Può essere un'opportunità per avviare un processo lungimirante per abbinare sostenibilità allo stile. Infatti, oltre alla Renovation Wave, l'Unione Europea ha lanciato il New European Bauhaus per coltivare una nuova estetica europea che combini prestazioni e inventiva.

La “nuova estetica” dell'architettura sostenibile, incrocia sensibilmente anche il concetto di fotovoltaico integrato nell'edificio. Nell'analisi riportata nel capitolo 4 si fa un'approfondita indagine sul modo di progettare l'architettura rispetto all'archetipo e quindi verso la forma di una nuova architettura.

Si calcola, che per raggiungere l'obiettivo di riduzione delle emissioni di almeno il 55% per il 2030 come proposto dalla Commissione Europea, l'UE deve ridurre le emissioni di gas serra degli edifici per il 60%, il loro consumo energetico del 14% e il consumo energetico per il riscaldamento e per il raffreddamento del 18%.

La politica e i finanziamenti europei hanno già avuto un impatto positivo sull'efficienza energetica dei nuovi edifici, che ora consumano solo la metà dell'energia di quelli costruiti oltre 20 anni fa. Tuttavia l'85% degli edifici nell'UE è stato costruito più di 20 anni fa, si prevede inoltre che l'85-95% di questa parte di patrimonio sarà ancora in piedi nel 2050. La ristrutturazione degli edifici sia pubblici che privati è quindi una misura essenziale nel contesto di rinnovamento e perseguimento dell'ambizione di guadagno energetico e crescita economica [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_it#ristrutturare-gli-edifici-per-uno-stile-di-vita-pi-ecologico].

South

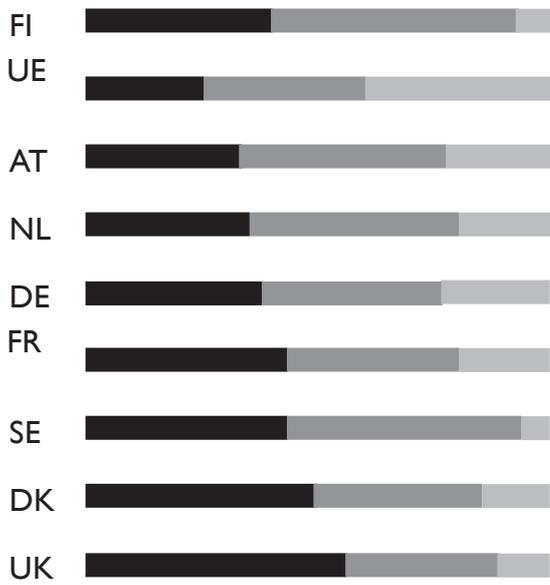


Quota della superficie residenziale europea per periodi storici.

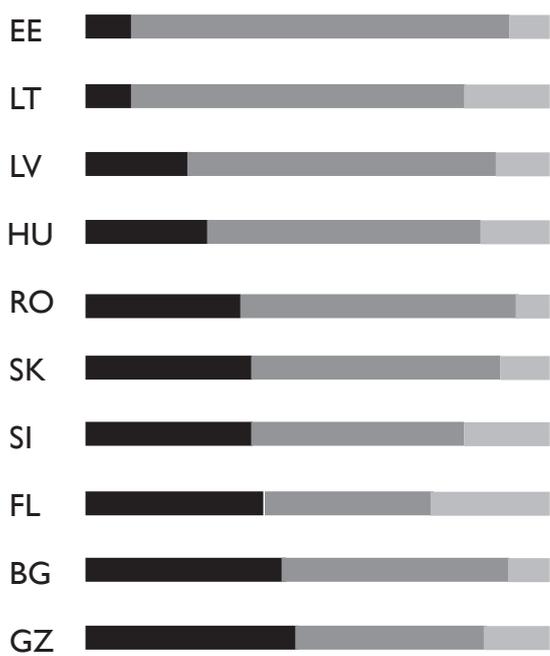
Rielaborazione grafica di Eleonora Merolla.

Source: BPIE 2011

North & West



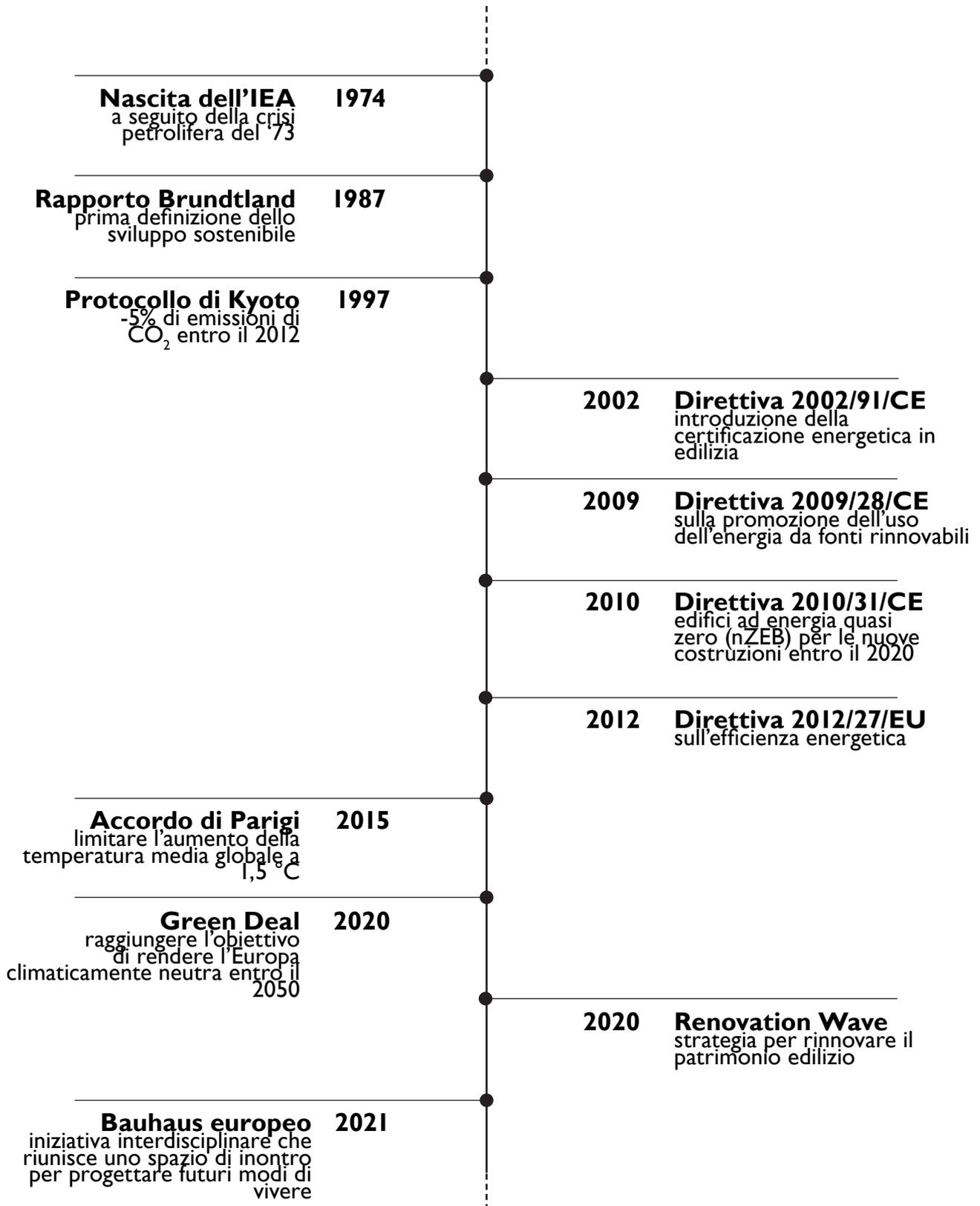
Central & East



Pre 1960
 Pre 1961- 1990
 Pre 1991- 2010

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

Azioni europee per il clima - linea del tempo



“I governi hanno un’opportunità unica nella vita di riavviare le loro economie e portare un’ondata di nuove opportunità di lavoro, accelerando il passaggio a un futuro energetico più resiliente e pulito”

Dr Fatih Birol, IEA Executive Director.

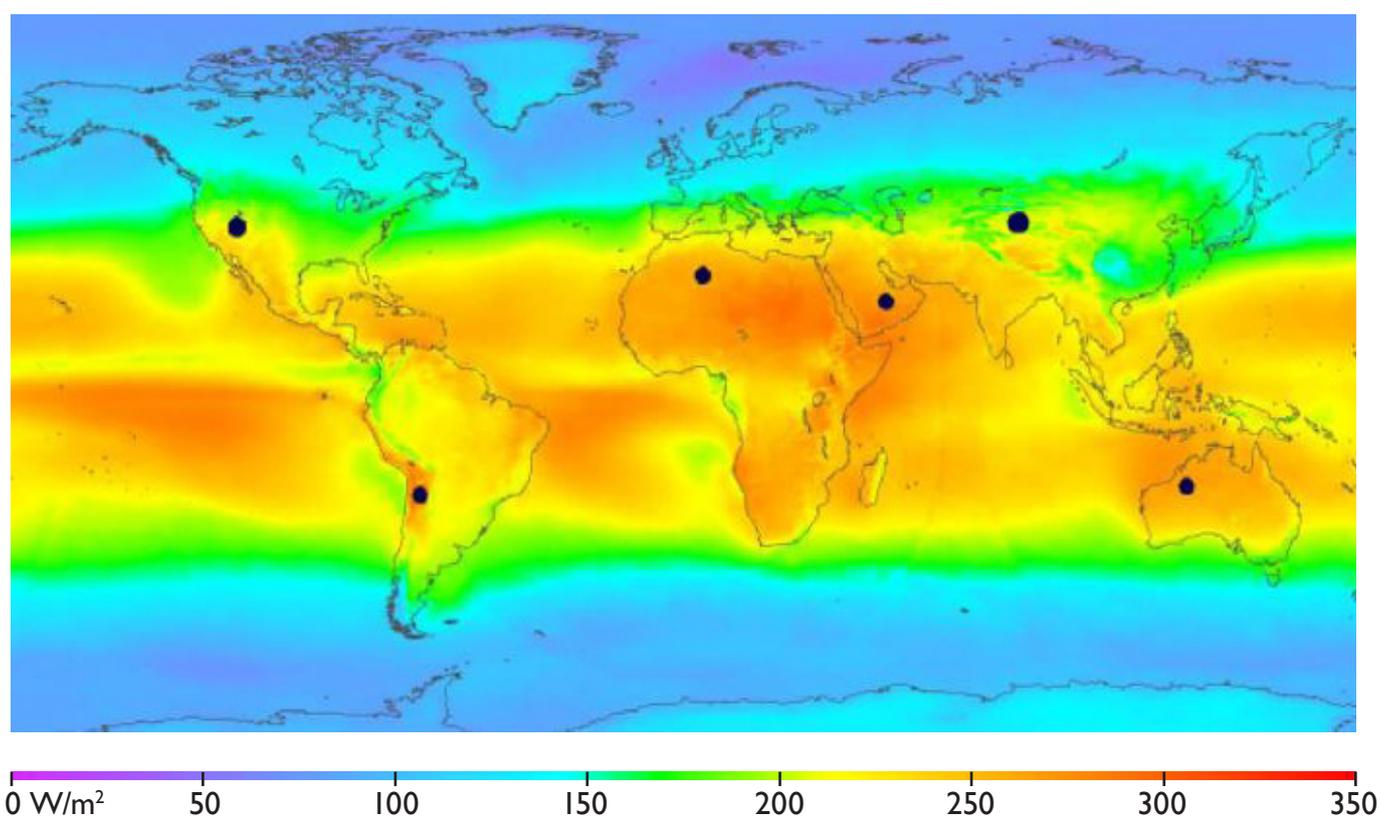
Source: Press release IEA “IEA offers world governments a Sustainable Recovery Plan to boost economic growth, create millions of jobs and put emissions into structural decline” - giugno 2020

01.3 Le potenzialità dell'energia solare

I molteplici vantaggi dell'energia solare sono ormai noti ai più. L'energia solare non è solo una risorsa sostenibile, è anche una fonte rinnovabile: non è necessario, infatti, considerare l'idea che la fonte solare possa esaurirsi. Come è stato ampiamente mostrato precedentemente le centrali elettriche a carbone hanno e stanno avendo un potenziale catastrofico che fa presagire un impatto dannoso sul clima, sull'ambiente e sulla salute umana. Le emissioni di gas serra associate all'energia solare (compresa la produzione, l'installazione, il funzionamento e la manutenzione) sono minime. Questo dato riconferma la superiorità dell'energia solare rispetto alle altre fonti, diventando ad oggi una delle soluzioni più fattibili per l'attuale crisi climatica di riscaldamento globale [35].

Mitigare il riscaldamento globale sostituendo le fonti energia basate sul carbone e sul gas con l'energia solare è vantaggioso dal punto di vista ambientale, economico e sociale, raggiungendo uno sviluppo sostenibile. La tecnologia solare ad oggi rimane una delle fonti più promettenti per soddisfare la futura domanda di energia globale. Infatti, solo tre fonti di energia rinnovabili (biomassa geotermica e solare) possono essere utilizzate per produrre energia sufficiente da soddisfare il bisogno energetico. Di queste tre, l'energia solare mostra il più alto potenziale di energia globale poiché le fonti geotermiche sono limitate a poche località e la fornitura di biomassa non è onnipresente in natura. Un certo numero di fattori (come latitudine, variazione diurna, clima e variazione geografica) sono in gran parte responsabili di determinare l'intensità dell'afflusso solare che passa attraverso l'atmosfera terrestre. Secondo alcune ricerche si crede che alcune aree chiamate "black dots" (tradotto in italiano: punti neri) potrebbero fornire più dell'intera domanda mondiale di energia primaria, supponendo che si raggiunga un'efficienza di conversione dell'8% [36]. È da sottolineare che la disponibilità della maggior parte delle fonti di energia rinnovabile tende a variare nel corso di un giorno, stagione, anno. Nonostante ciò, l'energia solare è disponibile in tutte le superfici del pianeta seppure con intensità differenti, come è mostrato nella figura riportata nella pagina successiva.

In molti paesi, l'uso dell'energia rinnovabile è stato perseguito in modo competitivo insieme alle fonti di energia convenzionali, dando così un contributo significativo alla produzione nazionale di energia e negli ultimi anni con i nuovi accordi internazionali o europei come il Green Deal, le istituzioni si stanno impegnando sempre più ad incentivare anche dal punto di vista economico la transizione energetica.

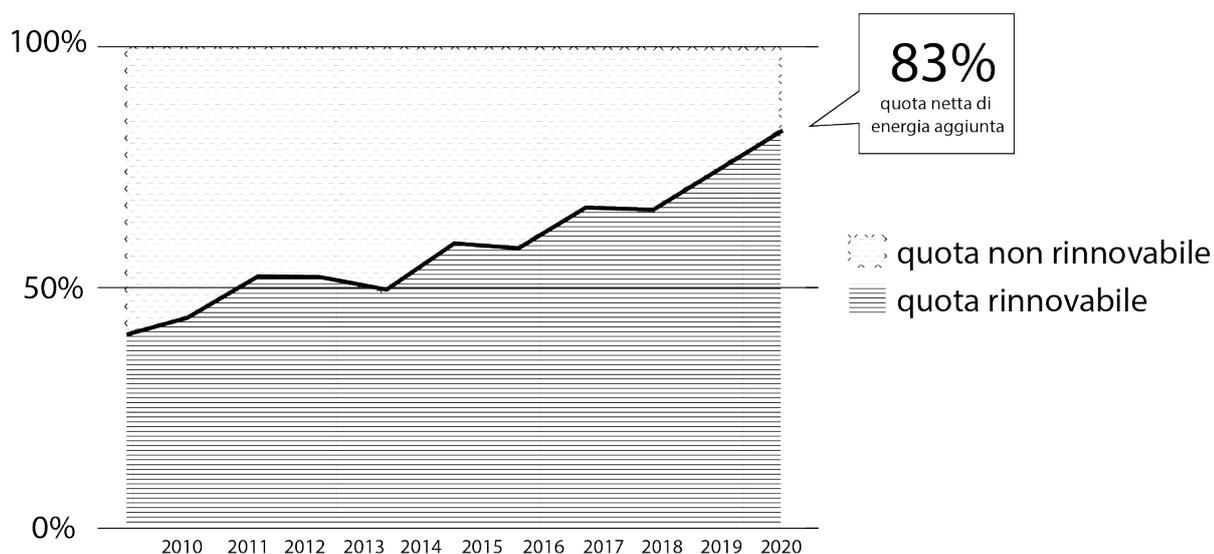


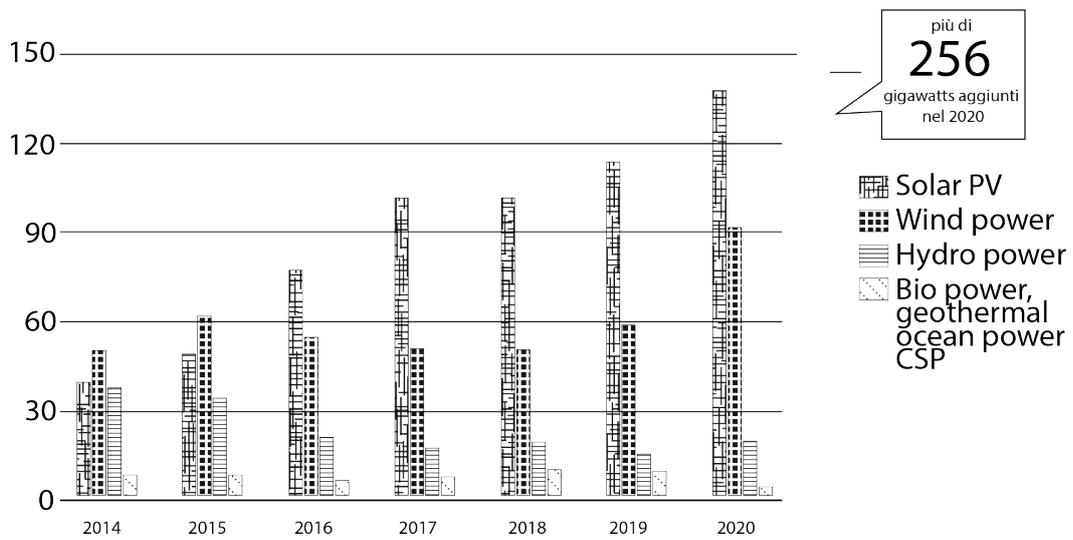
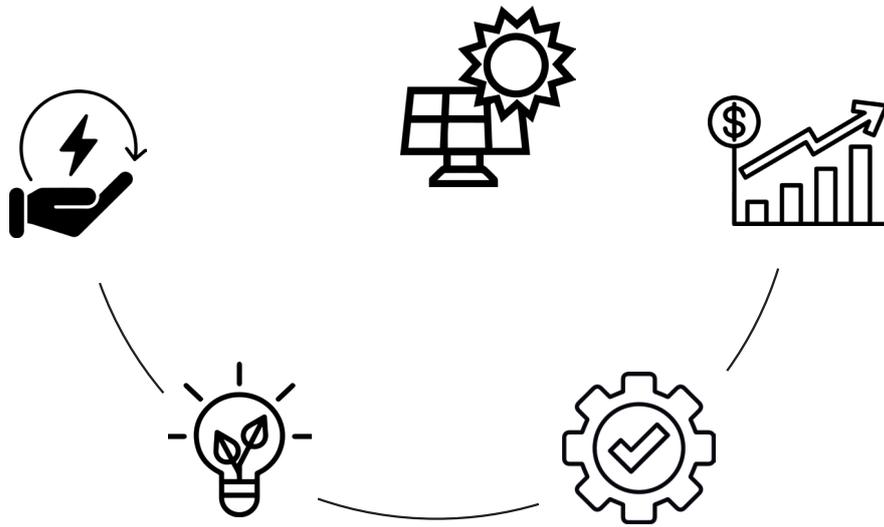
Distribuzione media dell'irradianza solare sulla superficie della Terra.

Source: CERES data product, 2021

Quindi, l'energia solare è: *sostenibile*, in quanto la produzione dei moduli ha un impatto ambientale basso rispetto alla produzione di energia da fonti quali gas e petrolio; *rinnovabile*, poiché il Sole è una fonte inesauribile di energia per il pianeta Terra; *disponibile su tutte le superfici abitate del pianeta*; *facilmente installabile* al giorno d'oggi grazie alla ricerca che ha fatto notevoli passi avanti. In molti paesi, l'uso dell'energia rinnovabile è stato perseguito in modo competitivo insieme alle fonti di energia convenzionali, dando così un contributo significativo alla produzione nazionale di energia e negli ultimi anni con i nuovi accordi internazionali o europei come il Green Deal, le istituzioni si stanno impegnando sempre più ad incentivare anche dal punto di vista economico la transizione energetica.

I vantaggi dell'installazione del solare fotovoltaico e l'aumento del know-how dei professionisti sono evidenti anche rispetto alle tendenze di installazione di potenza. Nel 2020 l'energia fotovoltaica ed eolica ha costituito la maggior parte delle nuove aggiunte di energia rinnovabile. Circa 139 GW di solare fotovoltaico sono stati aggiunti, comprendendo più della metà delle aggiunte rinnovabili. I dati elencati sono rappresentati nel grafico a lato, il grafico inoltre evidenzia come il fotovoltaico sia l'energia rinnovabile più utilizzata nel mondo a oggi. Rispetto al consumo globale di energia, le fonti rinnovabili hanno prodotto nel 2020 il 29% dell'energia consumata [37]. Questi dati che sono in continua crescita anno per anno, dimostrano come la tendenza sia positiva in termini di produzione di energia da fonti rinnovabili e come il fotovoltaico sarà sempre più parte integrante dei paesaggi delle nostre città e dell'involucro delle abitazioni in tutti il mondo.





CENNI SULLA TECNOLOGIA FOTO

02

FOTVOLTAICA

L'ambiente costruito è un settore strategico di ricerca e innovazione per raggiungere la decarbonizzazione della nostra economia. Così come è stabilito nel Green Deal europeo, uno dei pilastri della transizione energetica è la produzione di elettricità attraverso tecnologie sostenibile e fonti rinnovabili, coprendo il fabbisogno energetico degli edifici. Sfruttare le superfici degli involucri edilizi per produrre energia dal Sole rappresenta un enorme potenziale per trasformare il settore edilizio in un settore rinnovato ed avanzato, a impatto climatico zero ed energeticamente autarchico [3].

⁸Tasso Composto di Crescita Annuale: misura il tasso di rendimento di un investimento, ad esempio un fondo comune o un'obbligazione, in un periodo di investimento, ad esempio 5 o 10 anni.

Il fotovoltaico è un mercato che sta crescendo velocemente, diventando un elemento irrinunciabile in ogni progetto di nuova costruzione e di rinnovamento. Il Tasso Composto di Crescita Annuale (CAGR: Compound Annual Growth Rate) delle installazioni cumulative di fotovoltaico includendo

anche le installazioni fuori dalla rete elettrica, è del 34% tra il 2010 e il 2020 [38]. Questo dato rappresenta il metodo più accurato per calcolare e determinare la valutazione del ritorno economico individuale o un ritorno su qualsiasi portfolio d'investimento, confermando l'affidabilità dell'investimento sul fotovoltaico anche da un punto di vista economico [39]. Inoltre, ci informa della continua crescita dell'utilizzo del fotovoltaico, che nel settore delle costruzioni sta diventando un elemento irrinunciabile per edifici all'altezza delle nuove sfide cui il riscaldamento climatico ci porta ad affrontare.

Come ogni nuova tecnica introdotta nel settore edilizio, il fotovoltaico comporta una trasformazione del progetto di architettura. Negli ultimi trent'anni gli sforzi della ricerca tecnologica rispetto a questo sistema si sono concentrati per permetterne un utilizzo sempre più integrato al progetto di architettura. Gli architetti oggi sono chiamati a regolare i propri progetti tenendo in considerazione il consumo di energia dei propri progetti [40]. Il compito e la sfida dei progettisti è essere all'altezza dei mutamenti che oggi il mondo e la crisi climatica ci domandano di affrontare nel rispetto delle generazioni future, inglobando nuovi sistemi innovativi nel progetto di architettura e trovando forme espressive nuove per un involucro che non è più solo una barriera passiva tra interno ed esterno, ma diventa un elemento attivo che produce energia.

Questo lavoro di tesi si concentra sull'analisi dell'integrazione del fotovoltaico nell'involucro edilizio, nel seguente capitolo si inquadra il tema del fotovoltaico distinguendo e definendo i sistemi di fotovoltaico applicato sull'involucro (BAPV) rispetto al fotovoltaico integrato nell'involucro (BIPV). Inoltre, si chiariscono i temi più tecnici legati alle grandezze che definiscono il funzionamento di un impianto, così come i componenti e le nuove tecnologie di questo settore.

“Come ogni tecnica nuova, anche il fotovoltaico comporta una trasformazione dell’architettura. (...) Gli architetti sono pertanto invitati a regolarsi ancora a seconda del sole, evitando però le vie che possono portare a formule architettoniche vuote (...). Rimane il compito di essere all’altezza di tali mutamenti tecnici e di trovare formule espressive nuove.”

*Estratto della prefazione
“L’ascesa in cielo”, di Theo
Hotz, al libro “Photovoltaik
und Architekten”. 1993*

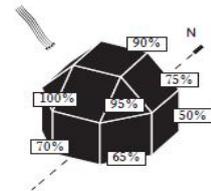
*Source: Photovoltaik und
Architekten, 1993*

02.1 BAPV

La sigla BAPV sta per Building Applied Photovoltaics, che tradotto letteralmente in italiano significa “Fotovoltaici applicata all’edificio”. Ciò include il fatto che il fotovoltaico viene applicato sull’involucro edilizio e la sua unica funzione nel sistema dei componenti dell’edificio è quello di produrre energia. Questo tipo di fotovoltaico che attualmente rappresenta la fetta più grande del mercato fotovoltaico nel mondo, può essere concepito in fase di rinnovamento energetico di un edificio, ma può anche essere progettato in fase di nuova costruzione. Il motivo per cui ad oggi molti progettisti preferiscono utilizzare il fotovoltaico applicato è che in fase progettuale ci sono meno accorgimenti da prendere e i costi ad oggi possono risultare meno elevati. Il sistema applicato non comporta modifiche all’involucro, ma necessita unicamente del sistema di fissaggio all’unità tecnologica [42].

Poiché il fotovoltaico applicato è finalizzato soprattutto alla produzione energetica, ed essendo questa influenzata da orientamento ed inclinazione, la pratica comune è di progettare questo tipo di sistema con un’inclinazione ottimale (che nell’emisfero boreale si aggira tra i 30°-40° rispetto all’asse orizzontale). Essendo l’impianto applicato all’involucro e può quindi occupare la superficie in maniera piuttosto libera, le dimensioni dell’impianto sono spesso modulate in base alla domanda energetica del manufatto edilizio. Ciò contribuisce a non concepire il fotovoltaico come un componente edilizio che deve funzionare anche da pelle dell’edificio, ma lo allontana dalla visione compositiva e dal progetto di architettura.

Chi si occupa di progetto di architettura, ovvero gli architetti, dovrebbero essere sensibilizzati rispetto al tema dell’integrazione fotovoltaica e a quanto oggi più che mai ci sia bisogno di edifici che non separino i sistemi impiantistici, a maggior ragione quelli rinnovabili, dal progetto generale di architettura.



Resa di un impianto fotovoltaico rispetto all’orientamento e all’inclinazione (nell’emisfero boreale)

Source: Tesi magistrale BIPV - Progetto di architettura ed innovazione tecnologica. Prassi, sperimentazioni e scenari futuri. Eleonora Merolla



Un esempio di impianto fotovoltaico applicato alla copertura (BAPV).

Source: eurenergroupp.com

BIPV

Il BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*) è definito dalla normativa EN 50583 del 2016, nel quale viene definito il modulo BIPV in due parti. La prima è definita dalla norma EN50583-1:

“Photovoltaic modules are considered to be building-integrated, if the PV modules form a construction product providing a function as defined in the European Construction Product Regulation CPR 305/2011. Thus the BIPV module is a prerequisite for the integrity of the building’s functionality. If the integrated PV module is dismantled (in the case of structurally bonded modules, dismantling includes the adjacent construction product), the PV module would have to be replaced by an appropriate construction product.” [42]

Quindi i moduli fotovoltaici integrati sono considerati integrati se sostituiscono un componente edilizio, e ciò implica di saper garantire alcune condizioni [42]:

- Rigidezza meccanica ed integrità strutturale;
- Protezione primaria contro gli impatti delle intemperie: pioggia nevem vento, grandine;
- Risparmio energetico, come come l’ombreggiamento, l’illuminazione diurna o l’isolamento termico;
- Protezione antincendio;
- Protezione dal rumore;
- Separazione tra ambienti interni ed esterni;
- Sicurezza, rifugio o protezione.

La seconda definizione è data dalla parte 2 della norma EN50583-2:

BIPV system, photovoltaic systems are considered to be building-integrated, if the PV modules they utilize fulfil the criteria for BIPV modules as defined in EN 50583-1 and thus form a construction product providing a function as defined in the European Construction Product Regulation CPR 305/2011.

Inoltre, la EN 50583-2 classificando i requisiti che i moduli fotovoltaici devono soddisfare, fa un’ulteriore distinzione rispetto ai pannelli: i contenenti e i non contenenti lastre vetrate. Alcune norme di sicurezza, infatti, variano notevolmente rispetto ai due tipi: i moduli con lastre vetrate in caso di incendio possono essere più pericolosi a causa delle colle e degli additivi chimici che compongono il vetro e creano il pacchetto del modulo.

I ricercatori SUPSI, che si occupano di testare i requisiti dei moduli fotovoltaici mediante prove meccaniche e prove al fuoco in laboratorio, sostengono che alcuni requisiti al fuoco sui moduli fotovoltaici con lastre vetrate possono essere migliorati in quanto non calcolano alcuni aspetti fondamentali per la sicurezza dell'impianto. Ciò dimostra che alcuni aspetti normativi del fotovoltaico integrato sono ancora in fase di elaborazione rispetto alla varietà di prodotti già disponibili sul mercato. L'allineamento delle normative a livello nazionale è necessario per rendere la catena del valore BIPV in grado di produrre, progettare e utilizzare moduli testati e sicuri.

Oltre alle normative che si devono allineare ai nuovi prodotti di mercato esistono anche lacune informative tra i professionisti, tra cui gli architetti [43]. Nel prossimo sotto capitolo si illustrano quale siano le grandezze che definiscono il fotovoltaico e i componenti che fanno parte di un sistema fotovoltaico.



Un esempio di impianto fotovoltaico integrato sulla copertura. Casa Schneller Bader, Riva san Vitale (CH)

Source: <https://www.subtilitas.site/>

02.2 Le grandezze del fotovoltaico

Di seguito si elencano e definiscono tutte le grandezze che definiscono la resa e il funzionamento dei moduli fotovoltaici.

Irradianza (W/m^2)

L'irradianza è la potenza per unità di superficie proveniente da Sole, ovvero la densità della radiazione solare. Per calcolare la potenza di picco dei moduli fotovoltaici in condizioni di prova standard, si assume come irradianza il valore pari a 1000 W/m^2 .

Irraggiamento ($\text{kWh/m}^2/\text{giorno}$)

L'irraggiamento rappresenta la quantità di energia solare incidente su una superficie unitaria in un determinato intervallo di tempo, tipicamente un giorno. A differenza dell'irradianza, l'irraggiamento dipende dalla posizione geografica ed in Italia varia da $3,6 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$ in Trentino-Alto Adige a $5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$ in Sicilia.

Standard test condition (STC)

STC rappresenta lo standard adottato nel settore del fotovoltaico per misurare la potenza dei moduli PV e per poterli confrontare. Ciascun modulo è sottoposto a tre condizioni fisse:

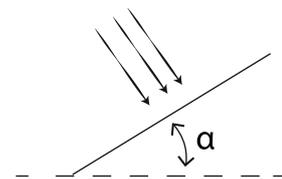
- temperatura delle celle PV pari a 25° ;
- irradianza solare pari a 1000 W/m^2 ;
- massa d'aria pari a 1,5 (quantità di atmosfera che la radiazione solare deve attraversare per colpire la terra)

Autoconsumo

L'autoconsumo consiste nella possibilità di consumare in loco (nella propria abitazione, in un ufficio, in uno stabilimento produttivo, ecc. ...) l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico per far fronte ai propri fabbisogni energetici (la definizione è stata fornita da GSE Gestore Servizi Energetici).

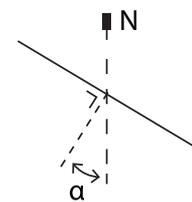
Angolo di tilt (inclinazione)

L'angolo di tilt è quello che il modulo fotovoltaico forma con il piano orizzontale, ovvero la sua inclinazione. Nell'emisfero boreale, alle latitudini del centro Europa, l'angolo di tilt ottimale per massimizzare la produzione energetica varia dai 30° ai 35°.



Angolo azimutale (orientamento)

L'angolo di azimut è quello formato tra la proiezione sul piano dell'orizzonte della perpendicolare al modulo fotovoltaico e la direzione Sud.



Rendimento

Il rendimento è definito come la percentuale della radiazione solare incidente che viene convertita in energia elettrica. Il risultato del rendimento deriva dal calo del rendimento dei pannelli fotovoltaici dovuto al surriscaldamento del materiale, condizione tipica che si verifica in ambiente operativo dove la temperatura del fotovoltaico raggiunge circa gli 80°. Altri fattori esterni come l'angolo di tilt, l'angolo azimutale, l'ombreggiamento, uniti a quelli interni dell'impianto fotovoltaico, possono contribuire al calo del rendimento. Negli anni la percentuale di rendimento del fotovoltaico si è alzata notevolmente, e oggi il record di efficienza in laboratorio è stato del 26,7% per una cella monocristallina, ma nel caso di moduli ad alta concentrazione è arrivato fino al 47,1% [31].

watt (W)

Il watt è l'unità di misura della potenza ed esprime la quantità di energia in J (Joule) che viene consumata (o generata) ogni secondo.

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).

$$\mathbf{W} = J / s = A \times V$$

kilowattora (kWh)

Il kWh esprime la quantità di energia elettrica che viene fornita (o comperata) dall'azienda di distribuzione e si calcola come il prodotto di una potenza (espressa in kilowatt) e un tempo (espresso in ore), durante il quale la potenza viene erogata.

$$\mathbf{kWh} = kw \times h$$

watt di picco (Wp)

Il Wp esprime la potenza nominale di un modulo fotovoltaico misurata in condizioni di prova standard (STC - Standard Test Conditions). Un modulo fotovoltaico con tecnologia monocristallina o policristallina registra sotto condizioni standard una potenza di picco superiore ai 100 Wp/m²

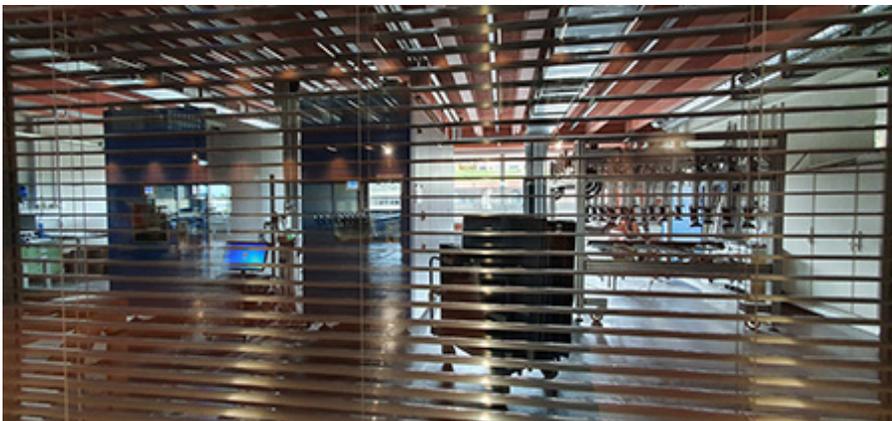
Wp / m²

*Source: Tesi magistrale Politecnico di Torino
BIPV - Progetto di architettura ed innovazione tecnologica. Prassi, sperimentazioni e scenari futuri.
Eleonora Merolla*

In generale gli impianti fotovoltaici sono fatti per durare nel tempo, tuttavia non sempre la potenza di un impianto indicata dal costruttore risulta poi essere quella ottenuta nell'impianto reale. All'origine delle differenze prestazionali ci possono essere difetti di fabbricazione, guasti, errori di progettazione, l'impatto dovuto alle intemperie e alle condizioni climatiche e altri fattori aleatori. Inoltre, spesso gli elementi più delicati e che subiscono un deterioramento nel tempo sono le parti elettroniche e di potenza, nonché gli elementi di protezione contro le sovratensioni dell'impianto.

In SUPSI si trova l'unico laboratorio svizzero accreditato ISO 17025 per le prove sui moduli fotovoltaici: i suoi esperti partecipano attivamente alle attività dei comitati tecnici nazionali ed internazionali. All'interno del laboratorio avvengono i test per determinare [40].:

- la determinazione della produzione specifica (Y_f): Final Yield (kWh/kW)
- la determinazione della resa energetica (PR): Performance Ratio [-]
- l'analisi del comportamento a basso irraggiamento
- le eventuali perdite elettriche dell'impianto.



Fotografia del laboratorio SUPSI di test dei moduli fotovoltaici.

Source: https://www.supsi.ch/isaac_en/eventi-comunicazioni/eventi/2021/2021-11-29.html

02.3 I componenti del sistema fotovoltaico

In un impianto fotovoltaico i moduli sono solo una parte del sistema che permette di trasformare l'energia del Sole in energia elettrica. Progettare un edificio con un impianto fotovoltaico implica dover prevedere degli spazi per i componenti che insieme ai moduli convertono l'energia e permettono ad essa di poter essere utilizzata. Di seguito sono elencati i principali componenti di un generico impianto fotovoltaico.

Generatori di corrente: moduli

I moduli fotovoltaici, il quale funzionamento verrà approfondito nelle pagine successive sono alla base del sistema fotovoltaico in quanto convertono l'energia solare in energia elettrica, attivando il funzionamento del sistema fotovoltaico. I moduli sono costituiti a loro volta da celle fotovoltaiche.

Stringhe

Le stringhe sono composte da una serie di moduli fotovoltaici collegati tra loro. A seconda della tensione necessaria all'alimentazione dell'utenza elettriche, un certo numero di moduli sono collegati per raggiungere il risultato desiderato.

Cablaggi

In cablaggi rientrano tutti i cavi necessari per collegare i diversi componenti dell'impianto fotovoltaico. La tipologia di cablaggi dipende dai diversi impianti solari e sono dimensionati in base alla corrente circolante nel sistema.

Controllore di carica

La funzionalità di questo componente è controllare la carica delle batterie ed evitare che si esse si possano sovraccaricare. Non è sempre presente nel sistema fotovoltaico poiché chiaramente dipende

dalla presenza o meno delle batterie. Esistono diversi tipi di controllori di carica, dipendentemente dalla grandezza dell'impianto, nei casi di impianti sufficientemente piccoli il controllore di carica non è necessario [45].

Inverter

Gli inverter sono dei dispositivi elettronici che trasformano la corrente continua (CC) che deriva dai pannelli solari in corrente alternata (CA). La conversione dell'energia è necessaria per far funzionare la maggior parte dei dispositivi elettrici o per interfacciarsi con la rete elettrica. Gli inverter sono importanti per quasi tutti i sistemi di energia solare e incidono significativamente sui costi dell'impianto. Lo stato dell'arte degli inverter considerando prodotti di marche all'avanguardia è del 98% [38].

Batteria

La batteria o le batterie sono dei componenti del sistema fotovoltaico che assicurano che l'energia prodotta non vada sprecata se non può essere consumata immediatamente. Si calcola che con un sistema munito di batterie gli utenti finali riescono a risparmiare dal 40% all'80% [41]. Anche in questo caso ci sono diverse tipologie di batterie di diverse grandezze e diversi costi. Ad oggi c'è un grande interesse nella ricerca per trovare soluzioni di stoccaggio di energia, poichè si tratta di un componente fondamentale per un utilizzo sempre più efficiente dell'energia pulita.

Contatore di elettricità

Il contatore misura la quantità di energia prodotta, consumata, la quantità di energia comprata dalla rete e la quantità di energia venduta alla rete.

02.4 L'evoluzione del fotovoltaico

La parola fotovoltaico che oggi si riferisce agli impianti, ai pannelli, e agli altri elementi atti a trasformare l'energia solare in energia elettrica, deriva dal greco phos (luce) e "volt" l'unità di forza elettro-motrice che prende il nome da Volta, Alessandro Volta, l'inventore italiano che ha ideato la pila, il primo generatore elettrico dal quale tutto ha inizio [47].

La scoperta dell'effetto fotovoltaico, ovvero il fenomeno grazie al quale oggi riusciamo a convertire l'energia proveniente dal Sole ad energia elettrica, si deve al fisico francese Alexandre Edmond Becquerel che scoprì il generarsi di un lieve flusso di corrente elettrica da alcuni elementi metallici esposti al sole. Gli anni in cui visse Becquerel erano gli anni conosciuti con il nome di "Belle Epoque", l'era della elettricità, caratterizzati dall'avvento di numerose scoperte, tra cui la prima lampadina di Thomas Edison. Erano anni di grandi sperimentazioni, che iniziavano ad inanellarsi insieme a diverse scoperte nel campo dell'energia fotovoltaica. In Inghilterra negli stessi anni è stato scoperto l'effetto della luce sul selenio, che se colpito da energia luminosa emette una leggera scarica di energia. Sulla corrente di queste nuove e rivoluzionarie scoperte, Charles Fritts realizza il primo pannello fotovoltaico costituito da uno strato di selenio ed una pellicola d'oro, anche se questa scoperta fu solo un assemblamento delle scoperte precedenti, possiamo dire che il secondo grande inventore dei pannelli fotovoltaici fu Fritts [48].

Genericamente si può definire l'effetto fotovoltaico come l'emergere di una tensione elettrica tra due elettrodi attaccati ad un sistema solido o liquido nel momento in cui l'energia luminosa colpisce il sistema [49]. Quasi tutti i dispositivi fotovoltaici incorporano una giunzione di un semiconduttore attraverso la quale si sviluppa la foto-tensione. Questi dispositivi sono anche conosciuti come celle solari. Per l'uso pratico le celle solari sono impaccettate in moduli solari che ne contengono un certo numero collegate tutte in serie. Il modulo fotovoltaico ha due scopi principali: proteggere le celle solari dall'ambiente e quindi dal deterioramento del materiale e per fornire una tensione più alta rispetto ad una singola cella, che da sola svilupperebbe una tensione non sufficiente [50].

1839

Alexander E. Becquerel scopre l'effetto fotovoltaico

1879

Alexander E. Becquerel scopre l'effetto fotovoltaico



Ritratto di Charles Fritts nel 1883. Fu pubblicato insieme al suo articolo sull' American Journal of Science nel dicembre del 1883.

Source: Smithsonian Institution; www.si.edu

Nonostante l'invenzione del primo modulo fotovoltaico può essere fatta risalire al XIX secolo, la tecnologia inizia a diffondersi e a trovare applicazioni pratiche solo nel secolo successivo. Nel 1954, nei Bell Laboratories, dalle mani degli scienziati Gerard Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller, nasce la prima cella solare in silicio capace di generare corrente elettrica misurabile, brevettata nel 1955. La “nuova era” dell’energia solare deve però aspettare, a causa degli alti costi dei materiali, e la tecnologia viene utilizzata solo in settori di nicchia come il settore spaziale. Infatti, nel 1958 viene lanciato nello spazio il primo veicolo orbitante alimentato da celle fotovoltaiche, questo primo utilizzo dimostra l’affidabilità e l’efficienza dei pannelli solari. Nei decenni successivi, ovvero negli anni '60 e '70 il fotovoltaico trova le prime applicazioni per ragioni politiche, sociale ed economiche di cui si è parlato nel capitolo I [51].

Il 1973 può essere considerato l’anno in cui viene completata la prima realizzazione di un edificio residenziale che ottiene sia l’elettricità sia il calore per l’uso domestico dal Sole. La casa prende il nome di SOLAR ONE, si trova in Delaware (USA) ed è stata progettata come una struttura sperimentale per raccogliere dati sull’efficienza del sistema di conversione energetica. Il fondatore dell’università Karl Boer è stato uno dei pionieri dell’energia fotovoltaica anche prima della crisi petrolifera, fondando nel 1972 l’“Institute of Energy Conversation” (IEC) [52]. Interessante è il fatto che oltre ad essere il primo edificio in cui i pannelli fotovoltaici vengono utilizzati per convertire la luce solare in energia elettrica, è anche il primo edificio che si può definire BIPV. Infatti, i pannelli fotovoltaici e solari termici sono integrati nell’involucro della struttura, sostituendo di fatto il materiale di rivestimento. Fu considerata “la casa solare tecnologicamente più avanzata esistente” [3] [52].

1955

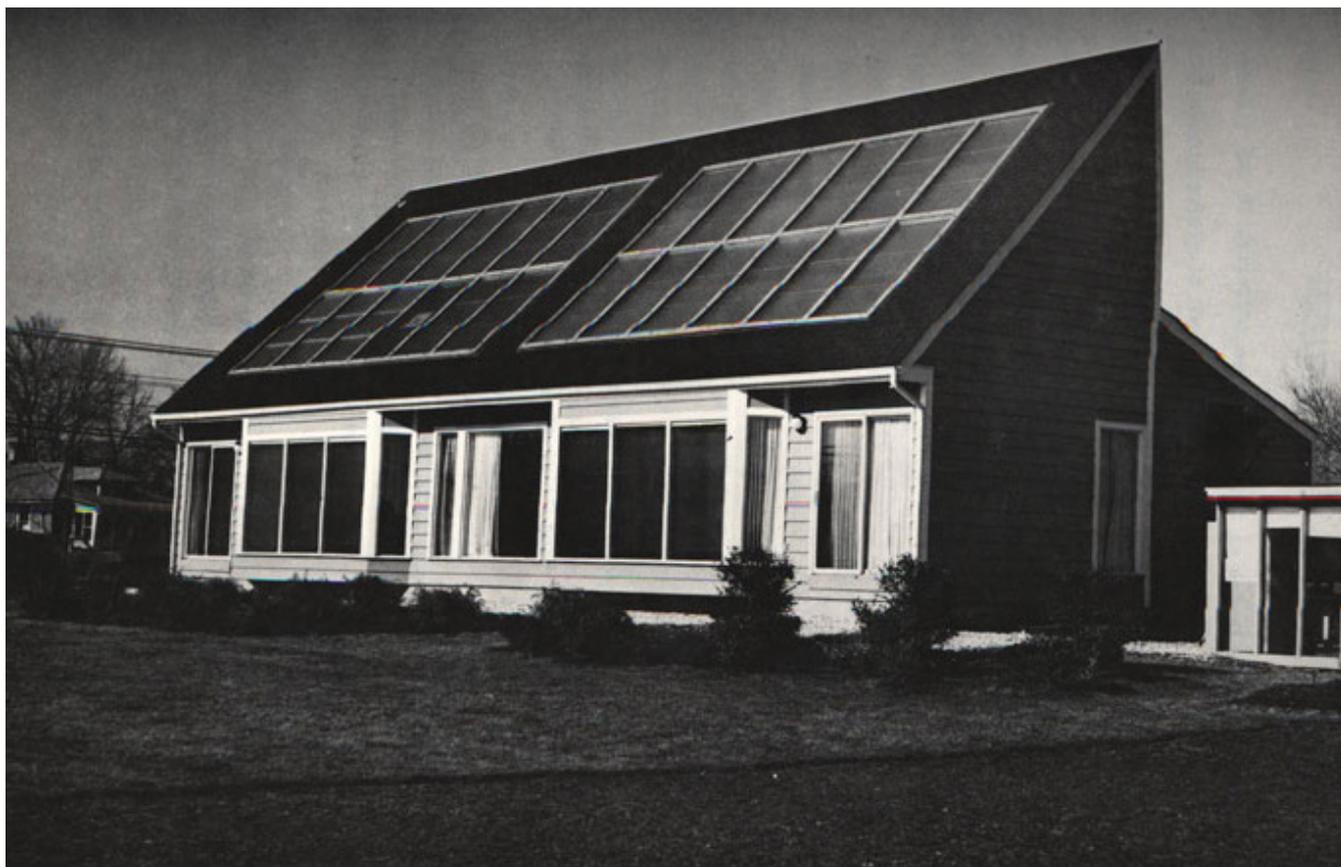
Scoperta la prima cella solare in silicio in New Jersey, USA

1958

Primo veicolo orbitante nello spazio alimentato con pannelli solari

1973

Solar One, primo edificio autonomo grazie all’energia solare. Università del Delaware (USA)



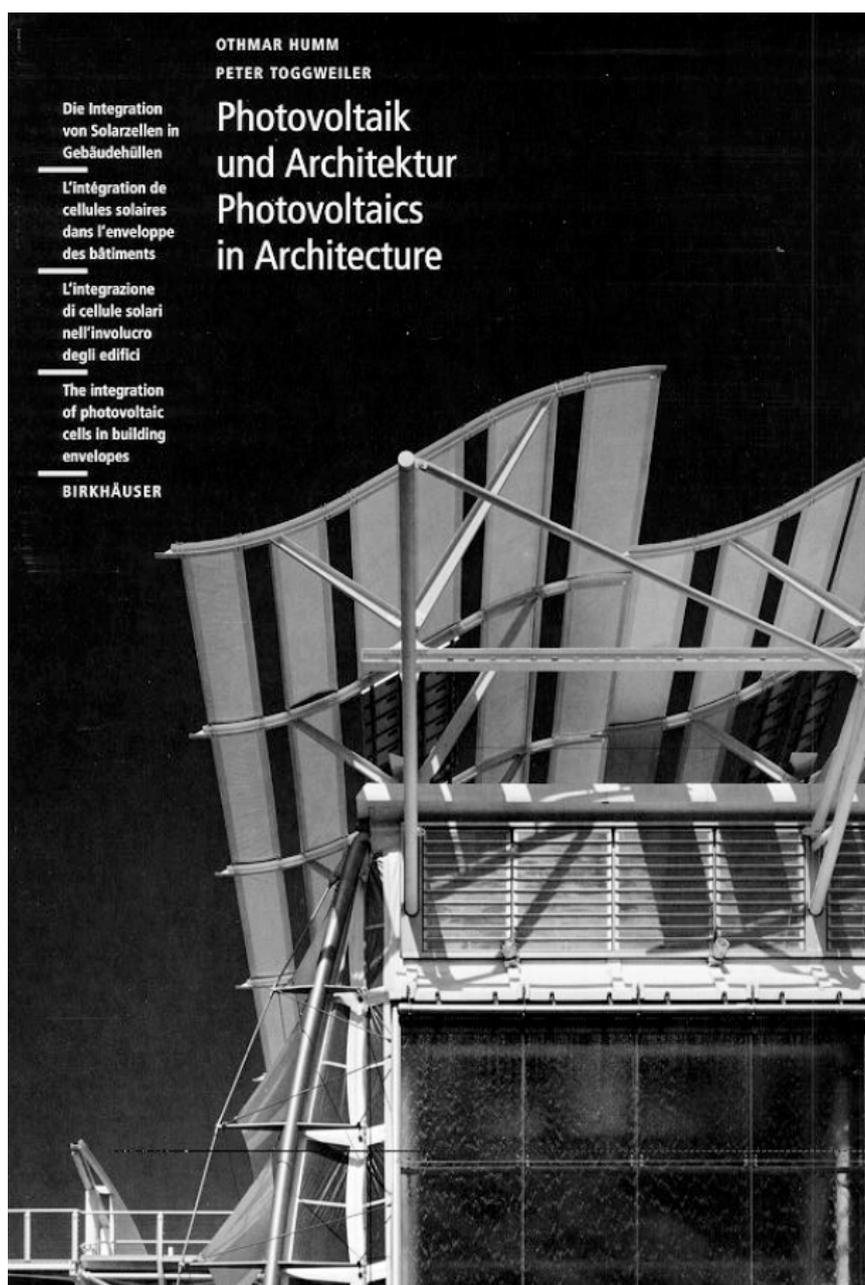
Solar One, la prima casa ad essere stata progettata per essere completamente autonoma dal punto di vista energetico. Sulla copertura sono integrati sia i pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica sia i moduli solari termici per il riscaldamento e l'acqua calda,

Source: iec - Institution of energy conversion.

<https://iec.udel.edu/about/history/>

Se le prime soluzioni fotovoltaiche per gli edifici iniziarono ad apparire negli anni '70, è solo a partire dagli anni '80 che le soluzioni fotovoltaiche aggiunte ai tetti cominciarono ad essere osservate. Pur continuando la sperimentazione con il fotovoltaico, nel 1982 infatti fu sviluppata un'area urbana incentrata sul solare e progettata da Thomas Herzog e Bernard Schilling in un villaggio vicino a Monaco. L'appaltatore affidò agli architetti il progetto di un edificio prototipo che sarebbe dovuto essere vetrato, leggero, trasparente e avrebbe dovuto fornire la possibilità di installare la tecnologia solare. L'edificio stesso è uno scheletro di legno, e all'interno sono allineate le unità abitative. La copertura inclinata a sud costituisce una serra bioclimatica con profili di alluminio e vetro temperato di sicurezza. Il lato interno del vetro è isolante a doppio strato. Nel contesto di progetto di ricerca europeo l'Istituto Fraunhofer, situato a Friburgo, ha installato sulla parte superiore del pendio vetrato circa 60 m² di celle solari sviluppate da diversi produttori tedeschi. Queste superfici foto attive sono considerate le prime installazioni solari con celle solari cristalline su una pelle di edificio vetrata. L'elettricità prodotta dall'impianto è utilizzata nella casa stessa, immagazzinata in batterie, o reimpressa nella rete locale [53].

Altra tappa importante per l'utilizzo del fotovoltaico integrato è l'edificio pubblico di Aquisgrana ad Aachen in Germania, è stato realizzato nel 1991, e rappresenta uno dei primi edifici nei quali il fotovoltaico è stato utilizzato nel rivestimento verticale esterno. Le celle fotovoltaiche si trovano nei vetri isolanti. Nello stesso anno, la Germania fu il primo Paese ad introdurre programmi di incentivazione per l'utilizzo di energia rinnovabile negli edifici. In questo progetto però non ci fu alcun finanziamento dallo Stato, in quanto gli incentivi nazionali erano destinati solamente all'utilizzo del fotovoltaico sulle coperture per massimizzare la resa. Nella visione dei progettisti e degli enti pubblici locali di Aquisgrana però, il valore innovativo dell'integrazione sulle facciate fu ritenuto maggiore rispetto alla fornitura di energia. In effetti questa scelta (che per certi versi si ripresenta anche oggi in tutti i progetti di BIPV) cambiò il modo di vedere il fotovoltaico, aprendo nuove possibilità di progettazione e di integrazione tra tecnologia e architettura [54].



*Immagine estratta
dalla copertina del libro
Photovoltaik und Architektur.
Di Othmar Humm e Peter
Toggweiler, 1993.*

La vera spinta per pensare al fotovoltaico come un materiale da mettere in commercio come un materiale da costruzione multifunzionale arriva nel decennio del 1990. Dai primi anni '90 il fotovoltaico diventa materiale da ricerca per trovare soluzioni BIPV per l'edilizia. Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (US Department of Energy) si impegnò nello sforzo di riunire i produttori di moduli fotovoltaici in uno sforzo coordinato per sviluppare nuovi materiali BIPV, come tegole fotovoltaiche, vetrate di facciate e facciate continue. Il programma di ricerca venne chiamato "PV: BONUS", ovvero "Photovoltaics: Building Opportunities in the United States". Il potenziale della ricerca e del nuovo concetto del fotovoltaico fu riconosciuto in tutto il mondo, ma per un'adozione su larga scala era necessaria un'ulteriore riduzione dei costi [2]. Per ottenere questa riduzione dei costi già nel 1994 Schoen et al. suggerirono di sviluppare nuovi prodotti di costruzione, ottimizzare i concetti di integrazione e sviluppare prodotti standardizzati [44]. Queste sfide ancora oggi rappresentano alcuni dei temi chiave nella ricerca e nell'innovazione del settore BIPV per ottenere una maggiore competitività nel mercato.

Per quanto riguarda progetti innovativi negli anni '90 si distingue la città spagnola di Matarò, che decise di aderire alla carta di Aalborg [56] ed incluse l'edificio della biblioteca pubblica Pompeu Fabra che fu incluso in questo programma. Questo progetto anticipatorio mirava a mostrare il potenziale dell'industria fotovoltaica europea ed a trovare un equilibrio ottimale tra estetica, comfort, bilancio energetico e aspetti economici. L'integrazione del fotovoltaico nell'edificio della biblioteca consisteva nell'installazione di una vetrata semitrasparente a doppia pelle e di un lucernario sul tetto a base di silicio monocristallino e a film sottile. La biblioteca rappresenta uno dei primi casi di sistemi fotovoltaici completamente integrati negli edifici. Come il Nottingham University Jubilee Campus, il Reichstag tedesco e altri edifici fotovoltaici realizzati negli anni '90, il progetto è stato sovvenzionato da programmi pubblici, spesso promossi dalla Commissione Europea o da fondi nazionali. Per esempio, la biblioteca Pompeu Fabra faceva parte del programma Joule II [57].

L'aspetto più impegnativo degli edifici BIPV progettati durante questi anni è stato il requisito di realizzare progetti innovativi ed eccezionali mentre si utilizzavano procedure e materiali sperimentali. Tuttavia, alla fine hanno permesso di dimostrare che i sistemi BIPV non sono solo destinati a produrre energia ma che sono materiali da costruzione multifunzionali che possono costituire la pelle dell'edificio pur essendo unità tecnologiche [3].

La svolta degli anni 2000

Gli anni 2000 segnano una svolta nell'utilizzo dell'energie rinnovabili e del fotovoltaico. L'industria solare ha dimostrato che la tecnologia poteva essere impiegata in modo efficiente su varie scale con diverse installazioni in tutto il mondo. L'interesse verso gli edifici a energia zero è aumentato, dimostrato dalla costituzione del Passive House Institute nel 1996 e dall'Associazione Minergie nel 1994. In Svizzera gli architetti furono premiati con edifici come l'MFH Sunny Woods (vincitore del premio solare svizzero 2002 e del premio solare europeo 2002) e BedZED, dove il potenziale della BIPV fu ampiamente espresso e riconosciuto (vincitore del premio Housing Design Award per la sostenibilità nel 2001).

Dal 2000 ad oggi la tecnologia solare e l'approccio degli architetti all'architettura ha attraversato diverse fasi, che sono andate di pari passo con gli sviluppi e i successi della ricerca in questo ambito. I periodi individuati sono mostrati nella timeline, e di seguito sono spiegati e commentati.

Primi anni 2000: il pionerismo

Nei primi anni 2000 gli impianti integrati di fotovoltaico iniziano ad essere una realtà realizzabile da studi di architettura ambiziosi. Infatti, grazie al mercato del fotovoltaico che iniziava ad essere utilizzabile e appetibile il progetto di fotovoltaico integrato inizia ad essere più frequente. Gli studi che utilizzano questo tipo di sistema però sono ancora pochissimi e considerati dei veri e propri pionieri in questo campo.

2006: l'era degli incentivi

Dal 2006 si assiste ad un boom di installazione fotovoltaiche a causa dei primi incentivi di feed-in-tarif. Ovvero programmi incentivati dai governi a produrre energia pulita e ad immetterla nella rete per avere una piccola retribuzione ogni kW immesso nella rete. Questo tipo di incentivi causano una "corsa" all'installazione di impianti fotovoltaici capaci di produrre una consistente quantità di energia. Impianti fotovoltaici in grandi spazi aperti e installazione BAPV sul tetto sono spesso frutto di questo periodo storico.

Per quanto riguarda il BIPV il discorso è simile: i sistemi integrati risalenti a questi anni massimizzano la resa, e spesso sono costituiti da grandi superfici sulla copertura con inclinazione ottimale e orientamento a sud.

2010 : la sperimentazione sulle facciate

Con l'inizio degli anni '10 i progetti in cui il fotovoltaico appare sull'involucro verticale esterno iniziano ad essere osservabili e analizzabili. Il fotovoltaico inizia ad essere percepito come un vero e proprio materiale dell'edilizia e ad essere integrato nell'involucro non solo in copertura. Le cause sono dovute al prezzo sempre più conveniente del fotovoltaico e alla ricerca che inizia a presentare soluzioni tecnologiche per l'utilizzo del fotovoltaico anche nell'involucro esterno.

2014 : la rivoluzione del colore

Con l'utilizzo del fotovoltaico nell'involucro verticale la domanda di soluzioni fotovoltaiche personalizzabili per dimensioni e colori sono sempre più richieste dai progettisti. La ricerca e i produttori di moduli fotovoltaici nel 2014 iniziano ad offrire soluzioni alla clientela e la sperimentazione con il colore ha inizio. Questa tecnica inizia ad incuriosire soprattutto gli enti pubblici che vedono nei pannelli colorati un'opportunità di immagine di innovazione e nuova accettazione da parte del pubblico dei sistemi BIPV.

2017: i progetti pilota d'integrazione

Con rinnovato interesse verso questo tipo di impianti nel 2017 i sistemi di integrazione vengono commissionati soprattutto da enti pubblici e aziende private con interessi differenti. L'immagine di innovazione e sostenibilità interessa sia aziende private che enti pubblici, ma se per le prime la scelta del BIPV colorato e non in facciata è causata soprattutto dall'immagine, per gli enti pubblici si tratta di dimostrare le opportunità di integrazione al pubblico.

2021: fotovoltaico?

Negli ultimi anni grazie ai grandi passi avanti della ricerca il fotovoltaico inizia a cambiare aspetto e a non essere riconoscibile come tale. Il colore ha preso il sopravvento in molti dei progetti di integrazione del fotovoltaico nel mondo, e ad oggi la tecnologia ha raggiunto un livello di innovazione tale per cui è difficile distinguere il fotovoltaico da qualsiasi altro materiale da costruzione per involucro.

Quali sono le tecnologie più diffuse per la colorazione del fotovoltaico saranno brevemente illustrate nelle pagine seguenti.

02.5 Le nuove tecnologie FV

Il processo di integrazione del fotovoltaico negli edifici spazia tra nuove installazioni e sistemi tradizionali implementanti su edifici esistenti. In architettura, la sostituzione di un materiale esistente con uno nuovo molto spesso è accompagnata dalla permanenza della tradizione per quanto riguarda sia i linguaggi architettonici che i sistemi tecnici. Questo lento processo di innovazione è legato sia a nuove tecnologie che a nuovi modelli di progettazioni che possono essere legati ad aspetti morfologici, all'immagine dell'involucro edilizio o alla costruzione. Per quanto riguarda l'involucro edilizio, ad esempio, la flessibilità fisica e la leggerezza dei film sottili permettono di incorporare il fotovoltaico in pelli o membrane leggere. Tali tendenze innovative portate da nuove tecnologie (ad esempio le celle solari sensibilizzate a coloranti – DSSC il fotovoltaico organico) o i trattamenti speciali di aspetti per il vetro stanno aprendo lo scenario di un nuovo linguaggio delle tecnologie foto attive verso un PV colorato ed “invisibile”.

Il trasferimento tecnologico del fotovoltaico al settore architettonico sta cambiando gli approcci al design e alla pelle degli edifici, aprendo anche nuove sfide per tutti gli attori coinvolti nel processo. L'industria ad oggi offre molti prodotti differenti per l'edilizia considerando aspetti come la multifunzionalità, l'economicità, la personalizzazione e altri paradigmi che stanno permettendo una maggiore permeazione al mercato. Oggi il BIPV è sicuramente uno dei nuovi fondamenti per l'innovazione contemporanea nell'architettura [58].

Nel corso della storia dell'edilizia l'uso di un materiale in architettura si è sempre arricchito di qualcosa di diverso dalla semplice innovazione tecnologica, includendo uno spirito simbolico che esprimesse il proprio calore linguistico, il cambiamento e il potere progettuale. Per esempio, nell'immaginario comune il vetro è il materiale che può esprimere leggerezza costruttiva e percettiva, che si traduce nella smaterializzazione fisica dell'oggetto architettonico e nella trasparenza percettiva e psicologica.

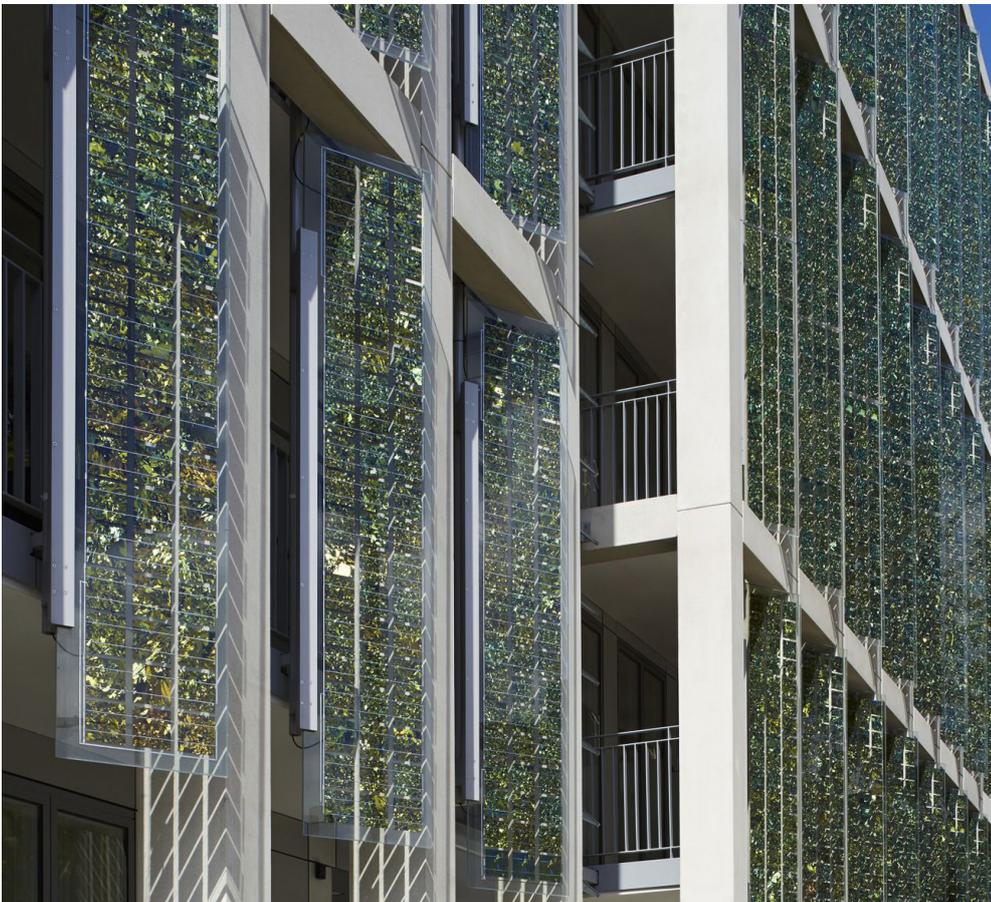
Quando sentiamo parlare di fotovoltaico, invece, l'immagine che viene invocata nella nostra mente è un elemento blu o nero che spesso sembra "sovraccaricare" l'immagine estetica di un edificio [59].

Se nell'ambito tecnologico l'aspetto innovativo del fotovoltaico è la resa della produzione energetica dei pannelli, nell'ambito architettonico l'elemento di innovazione riguarda soprattutto l'ambito estetico. La combinazione di materiale come vetro e fotovoltaico, nonostante la loro trasparenza e materialità abbina bene sia l'estetica che la funzionalità dell'involucro dell'edificio [60].

La richiesta sempre crescente da parte delle committenze e dei progettisti per moduli fotovoltaici personalizzabili ed economicamente accessibili sta stimolando la ricerca tecnologica e i produttori di moduli a trovare soluzioni innovativi per colorare i moduli fotovoltaici. Ad oggi diverse tecniche di personalizzazione possono essere identificate e sono sinteticamente descritte di seguito per fare un inquadramento del livello di innovazione tecnologico esistente ad oggi per la personalizzazione e colorazione dei moduli fotovoltaici [61].

Prodotti con rivestimenti antiriflesso colorati su celle solari (c-Si)

Poiché il silicio cristallino nudo (c-Si) presenta alti valori di riflettanza (circa il 30%), sia le celle fotovoltaiche monocristalline sia quelle multicristalline includono rivestimenti antiriflesso sulle loro superfici, con uno spessore del rivestimento ottimizzato per aumentare l'efficienza di conversione [62]. Il rivestimento ottimizzato dà alla cella il tipico colore blu, che per le celle fotovoltaiche monocristalline si presenta come un blu più scuro a causa della testurizzazione della superficie). Le variazioni dello spessore del rivestimento antiriflesso spostano il blu su altri colori con un impatto anche sull'efficienza [63]. Colori come il blu, il giallo, il verde, l'arancione e il rosa possono essere ottenuti. Questa soluzione ad oggi è difficile da ottenere in piccole quantità poiché si tratta di un'alta personalizzazione del prodotto fotovoltaico e può essere quindi resa disponibile solo per progetti che riescano ad avere una quantità consistente di moduli fotovoltaici.



I pannelli con rivestimento antiriflesso sono utilizzati come schermature solari nel Kingsgate House, Chelsea - Londra, Regno Unito.

Source: www.pinterest.com

Prodotti con strati attivi PV colorati e/o semitrasparenti (film sottile film, OPV)

La semitrasparenza degli strati fotovoltaici può essere ottenuta ad esempio per i moduli fotovoltaici in silicio amorfo (a-Si) grazie al trattamento laser dello strato attivo che viene parzialmente rimosso per aumentare la trasparenza della luce. Rispetto a questa tecnologia, una possibile applicazione può essere vista in edifici completamente vetrati dove la superficie disponibile per implementare il BIPV è molto grande, quindi non c'è bisogno di soluzioni ad alta potenza.

Un'altra opportunità di trasparenza è offerta dai moduli fotovoltaici basati su celle organiche (OPV) o moduli DSSC (dye-sensitized solar). Grazie a questi nuovi materiali utilizzati per convertire la luce solare in elettricità, è possibile ottenere moduli di diversi colori e trasparenze. La tecnologia delle celle solari sensibilizzate con coloranti è spesso definita come fotosintesi artificiale analoga alla clorofilla nelle foglie, dove un colorante sensibilizzato assorbe la luce e genera elettroni eccitati provocando corrente. Negli ultimi due decenni l'efficienza delle celle solari è aumentata progressivamente, e diversi studi hanno evidenziato alcuni vantaggi delle celle solari organiche con pigmenti colorati, che permettono di migliorare l'estetica e la variabilità del design, così come le proprietà ottiche e la loro specifica dipendenza della generazione di energia [64]. Altri aspetti vantaggiosi e migliorati grazie alla ricerca sono il processo di fabbricazione più facile e meno costoso e la loro massa più leggera che permette di utilizzarli su sistemi flessibili con strutture sottili, così come concetti per un prodotto ecologico, per un design e un processo di produzione che facilita il riciclaggio.

Dei moduli DSSC posizionati sulle facciate come schermature solari causano sfumature di colore e di luce negli spazi interni.

Source: <https://egidioraimondi.com/il-fotovoltaico-che-sarà/>



Polimeri con film polimerici colorati

La tecnologia del silicio amorfo può essere combinata con il polivinilbutirrale (PVB) per ottenere vetro colorato PV con vari gradi di trasparenza. Questi tipi di incapsulanti colorati sono utilizzati anche in combinazione con tecnologie a film sottile. Poiché il film sottile viene spruzzato sul vetro frontale durante la produzione, la resa energetica del pannello non è influenzata dall'incapsulante colorante.



*Moduli con coloranti
incapsulanti con strato attivo
CdTe.*

Source: www.soltechenergy.com

Prodotti con vetro frontale rivestito, stampato, rifinito o colorato

Una nuova forte tendenza è quella di utilizzare diversi trattamenti di superficie applicati alla copertura del vetro frontale. Per questo tipo di prodotto esistono diversi metodi di produzione:

- rivestimento spettrale selettivo: questa tecnica utilizza un rivestimento riflettente multistrato sul vetro e rivestimenti spettralmente selettivi che sfruttano una specifica tecnologia di nano-deposizione per il rivestimento colorato del vetro solare per applicazioni di pannelli fotovoltaici e termici.
- vetro colorato smaltato: stampando un motivo a punti sul modulo fotovoltaico, una luce sufficiente può raggiungere le celle [65].
- Sabbiatura: è una tecnica che consiste nello spruzzare sabbia ad alta velocità sul vetro anteriore, creando una superficie bianca e lattiginosa.
- Stampa digitale su vetro: è un processo che permette di stampare un inchiostro speciale sulle superfici di vetro per ottenere un disegno, nell'ultimo periodo è stato testato anche una nuova tecnica di stampa che permette di stampare immagini anche ad alta definizione.
- Finitura satinata e stampa su vetro: una finitura satinata sulle superfici esterna del vetro è talvolta combinata con la serigrafia sul lato interno. Pertanto, c'è una riduzione della trasparenza del vetro.

In generale tutti questi nuovi sviluppi per il BIPV colorato aprono nuovi campi di ricerca tecnologica per l'efficienza energetica, che è diminuita dal colore. È interessante notare un doppio approccio nella ricerca: da un lato lo sviluppo dell'alta tecnologia ha creato nuove tecniche e materiali, e dall'altro, le tecniche già utilizzate nell'industria dell'edilizia sono state adattate per personalizzare la copertura in vetro frontale. È anche rilevante considerare, che in alcuni casi, aspetti come la flessibilità di progettazione/produzione, le prestazioni dell'edificio, la flessibilità di produzione e l'efficacia dei costi rimangono ancora sfide da superare per garantire la penetrazione del mercato. Ciò che è importante sottolineare è che alcuni dei vetri BIPV precedentemente elencati sono già stati largamente utilizzati nei progetti. In alcuni casi in Svizzera si possono osservare anche esempi di edifici privati, a dimostrazione che il mercato nascente per BIPV personalizzabile è conveniente ed economico [66].

L'APPROCCIO DEL AL BIPV

03

PROGETTO

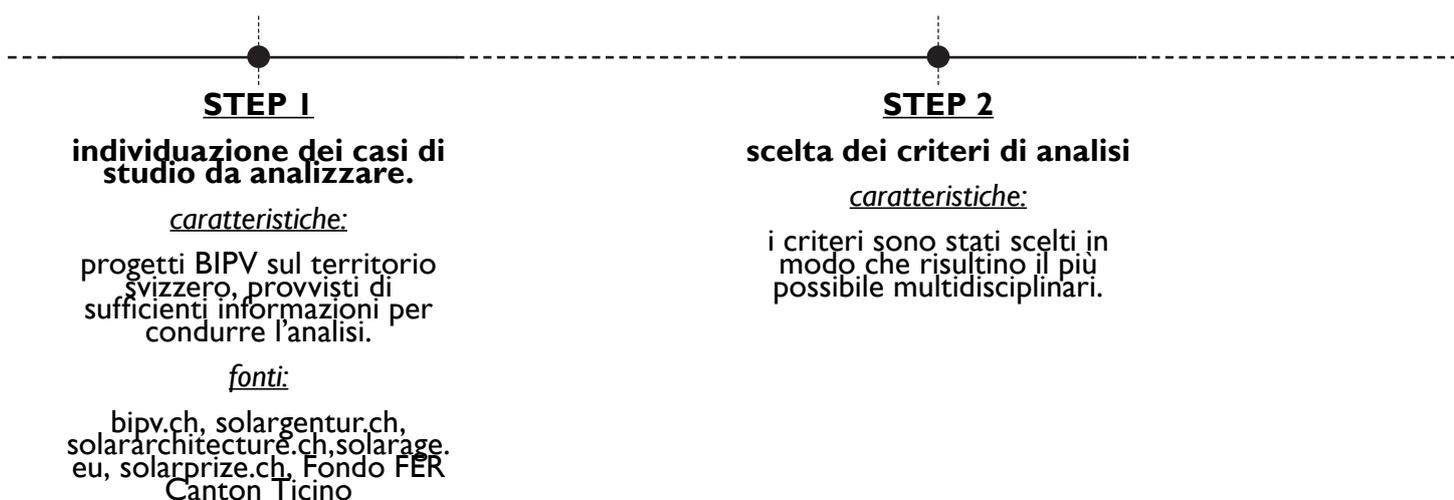
Nel seguente capitolo, cuore di questa tesi di ricerca, si riportano l'analisi e i risultati che ho elaborato insieme a Pierluigi Bonomo e al team di ricerca "Involucro Innovativo" durante il mio periodo di borsa di studio e di tirocinio presso SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana). La ricerca mira a prendere in esame l'approccio del progetto di architettura al sistema fotovoltaico integrato, per comprendere quale sia l'identità che sta assumendo rispetto alla morfologia dell'edificio e quale sia la percezione del BIPV da parte dell'utenza e dei professionisti. La teoria alla base di questa ricerca è studiare le modalità di utilizzo di un sistema innovativo su un numero di casi di studio consistente, ciò può restituire un quadro dell'attuale livello di innovazione (che passa per l'accettazione, per il livello di sviluppo tecnologico-costruttivo, per il costo, ...) misurando l'evoluzione del rapporto tra architettura e tecnologia, per avvicinarsi a capire quale potrà essere un nuovo modello di edificio innovativo.

L'architettura è una disciplina che in ogni epoca è stata lo specchio del proprio tempo: riflette politiche, credenze, socialità e livello di sviluppo tecnico. Attualmente, con le nuove sfide per contrastare il cambiamento climatico conseguenza dell'enorme sviluppo industriale e tecnico dell'ultimo secolo, l'architettura riflette la necessità di cambiare il modello di sviluppo. L'integrazione di sistemi in grado di produrre energia integrati all'involucro innovativo è sintomo dei nostri tempi, ed è una pratica che è destinata a crescere nei decenni futuri se davvero l'umanità prenderà la via verso le risorse rinnovabili.

Il processo di analisi è iniziato selezionando un numero consistente di casi di studio BIPV sul territorio svizzero, scegliendo dei parametri descrittivi dei progetti e svolgendo le analisi sul tempo o combinando i criteri tra di loro.

03.1 Il processo di analisi

Il processo di analisi è iniziato individuando casi di studio con sufficienti informazioni a riguardo (anno di costruzione, committenza, fotografie, tipologia edilizia, ...), essi sono stati selezionati esclusivamente sul territorio svizzero. Le fonti dalle quali sono stati selezionati i casi di studio sono soprattutto siti: bipv.ch, solararchitecture.ch, solargentur.ch, solarage.eu, solarprize.ch. Oltre a queste risorse online il database è stato arricchito dal database del Canton Ticino FER (Fondo Energie Rinnovabili), in cui sono raccolti tutti i progetti per i quali è stata fatta una richiesta di incentivo al Cantone. Questa ultima parte di database arricchisce la collezione di casi di studio poiché si tratta di integrazione di sistema su case residenziali e non solo su progetti pilota o progetti di grandi aziende, dando all'analisi un'impronta molto realistica della situazione di trasferimento di saperi ed utilizzo dei sistemi BIPV. La scelta di selezionari casi di studio esclusivamente nel territorio svizzero segue la logica di studiare l'approccio formale ed estetico ad una tecnologia innovativa, avendo un quadro normativo, una cultura ed un'economia comune di riferimento, ciò è importante per riuscire ad analizzare i casi di studio in modo efficace. Infatti, l'utilizzo della tecnologia può variare di nazione in nazione a causa dei differenti incentivi e normative di cui ogni specifico Paese è provvisto.



La tesi ha avuto l'obiettivo di supportare la validazione dell'approccio applicandolo ad un database di casi reali. Questi parametri sono stati individuati p dei parametri indicativi dell'utilizzo del fotovoltaico integrato in architettura: dalla morfogenesi, fino all'individuazione dei diversi contesti in cui un progetto BIPV nasce e si sviluppa. Il fine della ricerca è di ottenere un quadro completo della tecnologia nell'ambito del progetto edilizio, dal 2000 fino ad oggi. In questo elaborato si riportano le analisi più rilevanti e legate al progetto di architettura, per leggere la ricerca completa si rimanda all'articolo di Pierluigi Bonomo ed in fase di pubblicazione, dal nome: *"Building Integrated PhotovoltaicS (BIPV). Analysis of traits of technological transfer and innovation building sector"*, che riporterà anche una sintesi dei risultati delle analisi elaborate nella tesi.

Individuati i criteri, sono stati divisi in due categorie generali: gli **indicatori di innovazione** e i **contesti di innovazione**. Nella prima famiglia i parametri sono stati scelti per esaminare le scelte architettoniche rispetto l'uso del BIPV: dalla fase di genesi del progetto, alle scelte formali ed estetiche. Nella seconda categoria "contesto di innovazione" invece, sono stati individuati dei parametri il più possibile multidisciplinari. Il fine, come è già stato sottolineato, è riportare un quadro completo del livello di innovazione del BIPV in architettura, i contesti di innovazioni sono utili all'analisi per inquadrare i differenti ambienti nei quali avvengono i progetti di integrazione. La multidisciplinarietà che li caratterizza è utile per restituire un quadro concreto della situazione.



Indicatori di innovazione

Sono stati nominati “*indicatori di innovazione*” i parametri che valutano le modalità con le quali è stato utilizzato e si sta utilizzando il BIPV nei progetti di architettura. In particolare, indagano con quali modalità formali e tecniche-costruttive il fotovoltaico integrato sta entrando nel processo di ideazione e realizzazione del progetto di architettura. Questo tipo di valutazione¹, quindi, analizza il linguaggio architettonico che sta assumendo l'architettura solare, e quanto sia innovativo il metodo di utilizzo della nuova tecnologia. L'innovazione è stata misurata sulla capacità di distaccarsi dalle forme utilizzate per i materiali tradizionali, e sulla nuova identità che sta assumendo.

¹valutazione: in questa analisi il termine è inteso come calcolo approssimativo e non come determinazione di un valore qualitativo dei progetti

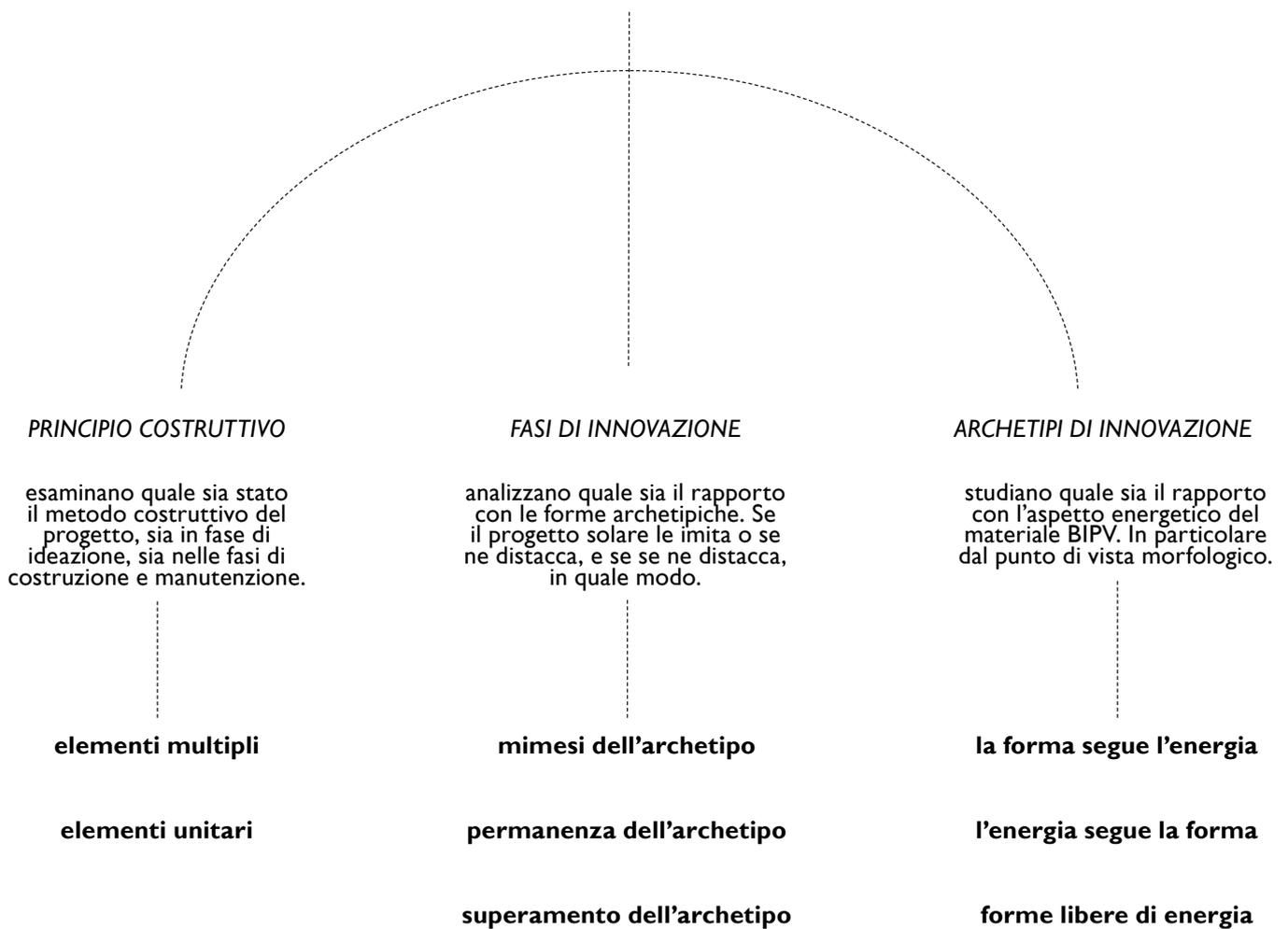
Il parametro che valuta la sperimentazione del BIPV nell'involucro costruttivo nella scala di grandezza del prodotto è stato nominato come “**principio costruttivo**”. Infatti, questo parametro valuta la scelta del prodotto BIPV nel componente edilizio, ovvero se il fotovoltaico viene integrato come elemento multiplo che si ripete o come elemento unico che costituisce il componente edilizio.

Il secondo parametro facente parte degli indicatori di innovazione, e che valuta il sistema BIPV rispetto all'archetipo dell'edificio sono le “**fasi di innovazione**”, osservando la morfologia dell'edificio valutano se l'integrazione è avvenuta imitando materiali tradizionali nei colori e nelle texture, o, infine, se anche le forme sono libere da preconcetti archetipici.

L'ultimo parametro che rientra in questa categoria sono gli “**archetipi di innovazione**”, anche in questo caso, come è intuibile dal nome del criterio, si tratta di esaminare l'estetica dell'edificio rispetto agli archetipi. Ovvero se la forma dell'edificio segue le forme tradizionali del costruito, o se la forma segue il rendimento energetico, oppure se la morfologia dell'edificio non segue nessun tipo di preconcetto morfologico.

INDICATORI DI INNOVAZIONE

analizzano il livello di innovazione dei progetti



Indicatori di innovazione.

Source: Pierluigi Bonomo et al., Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Analysis of technological transfer and innovation dynamics in building sector. In publishing.

I principi costruttivi

I principi costruttivi in questa analisi sono definiti come le modalità con il quale l'integrazione è stata effettuata nell'involucro dell'edificio. Ovvero se il concetto di integrazione è stato ideato come un **unico elemento**, o come **elementi multipli** che costituiscono l'involucro.

Gli elementi multipli hanno un principio costruttivo che più si avvicina agli elementi che compongono una facciata ventilata di materiale tradizionali o una tipica copertura in coppi o laterizi. L'utilizzo frequente di questo tipo di sistema è diventato un driver delle tendenze di mercato del fotovoltaico e nella produzione dei pannelli. Nel tempo hanno stimolato moltissimo la ricerca sui sistemi costruttivi,

Elemento unico

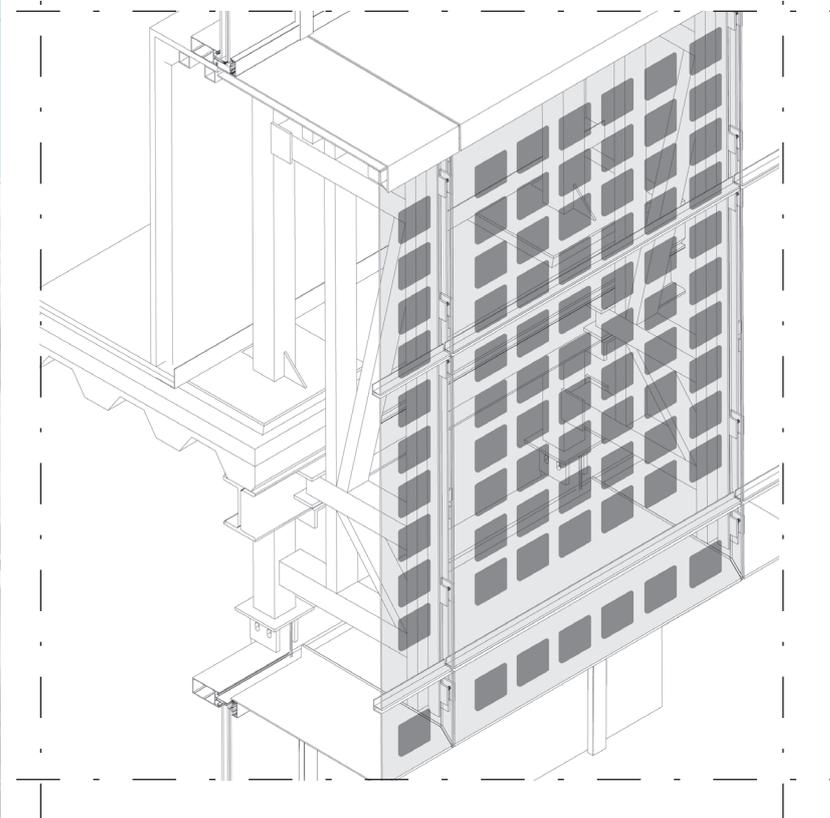


Facciata CSEM, Neuchâtel (CH); Anno di completamento: 2015

Architetto: René Schmid Architekten AG

Source: bipv.ch

Nota: il dettaglio tecnologico del sistema costruttivo è stato ipotizzato in base alle fotografie.



ampliando il database dei prodotti di fotovoltaico integrato, portando alla produzione di nuovi giunti innovativi che risolvono il problema dell'impermeabilità del sistema, i quali riescano ad essere facili e veloci da montare in fase di cantiere.

Nel caso dell'elemento unitario invece, sono nate nuove tendenze in architettura che includono scelte architettoniche formali che riescono a combinare trasparenze e giochi di luce, sfruttando le celle fotovoltaiche. Questo tipo di soluzione è molto utilizzato nei curtain-wall, poichè la schermatura causata dalle celle integrate è utile per non avere un surriscaldamento dell'ambiente e ottenere un migliore comfort luminoso all'interno degli ambienti.

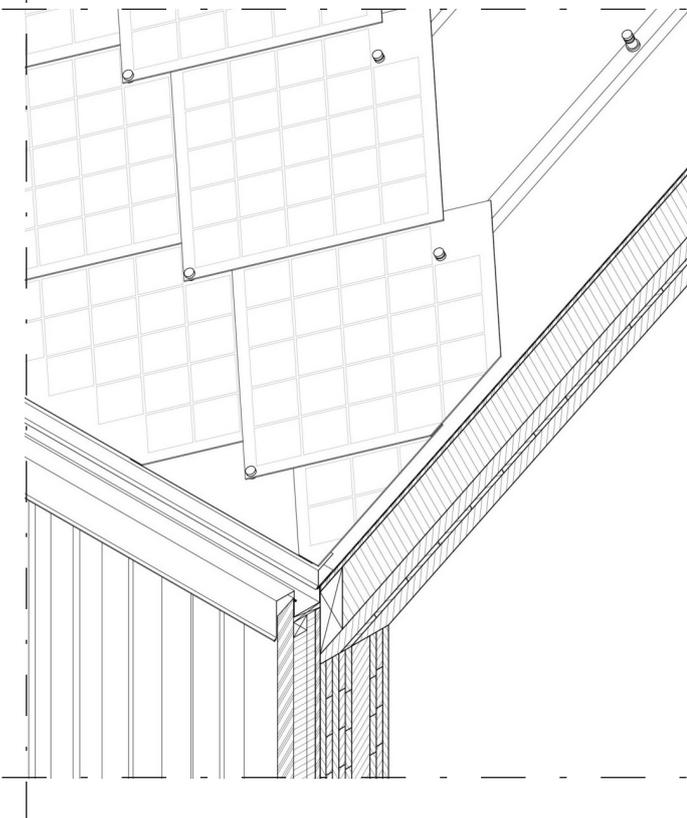
ELEMENTI MULTIPLI

Casa solare passiva, Zweissmmen (CH).

Architetto: NII Arkitekten

Elemento multiplo in copertura.

Source: bipv.ch



Le fasi di innovazione

Questo parametro classifica la morfologia e l'aspetto estetico con il quale il sistema è stato ideato. In particolare, analizza la relazione tra permanenza e mutazione del concetto archetipico del costruito, che è indicativo dello stadio in cui il trasferimento tecnologico è arrivato in architettura, oltre che dell'accettabilità della tecnologia tra il pubblico di non esperti del settore. I parametri definiti sono tre: la **mimesi**, la **permanenza** e il **superamento dell'archetipo** nel progetto BIPV.

MIMESI

I progetti classificati in mimesi sono i progetti in cui la scelta di dissimulare le celle fotovoltaiche è compiuta intenzionalmente per imitare un materiale della tradizione dal punto di vista del colore e del pattern. Per esempio, nel progetto di rinnovamento della casa storica (foto riportate a fianco), il colore rosso non è scelto solo per nascondere le celle fotovoltaiche, ma soprattutto per imitare l'estetica della terracotta nel colore.



PERMANENZA

I progetti sotto permanenza sono i progetti che utilizzano il fotovoltaico come componente dell'involucro mantenendo le forme archetipiche dell'architettura. Inoltre, il prodotto fotovoltaico utilizzato non imita i materiali tradizionali ma mantiene il linguaggio autentico della cella solare.



SUPERAMENTO DELL'ARCHETIPO

Classificati sotto superamento ed evoluzione dell'innovazione sono i progetti in cui il fotovoltaico diventa un'opportunità per concepire l'edificio con un nuovo linguaggio architettonico e sperimentare morfologie e elementi nuovi rispetto al concetto usuale di edificio tipico.



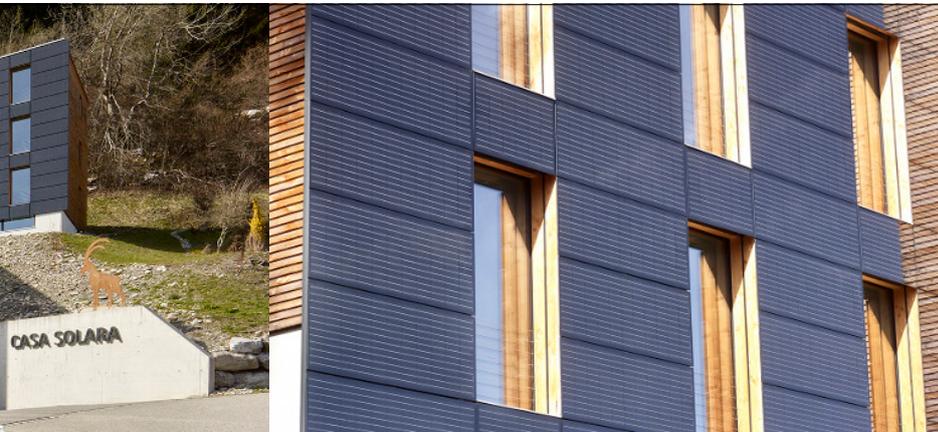


Progetto di rinnovamento di una casa del 1859 completato nel 2017 in zona rurale a Galley (CH).

Architetto: Lutz archtitectes

In questo specifico progetto la mimesi avviene nell'integrazione del fotovoltaico sulla copertura, infatti il colore simula il colore del rivestimento tradizionale.

Source: solararchitecture.ch



L'edificio di nuova costruzione residenziale è situato a Laax (CH), ed è stato completato nel 2012.

Architetto: Giovanni Cerfeda.

In questo caso la permanenza è data dall'integrazione del fotovoltaico nell'involucro verticale, che mantiene le forme esistenti e non nasconde l'estetica del pannello.

Source: bipv.ch



Sede centrale del Comitato Olimpico di Losanna. Completato nel 2018.

In questo progetto le forme non seguono schemi archetipizzati ma sono dinamiche a rispecchiare la dinamicità dello sport.

Source: bipv.ch

Gli archetipi di innovazione

Gli archetipi di innovazione hanno a che fare con la morfogenesi dell'edificio, anche in questo caso si tratta di superamento dell'archetipo, ma nel caso specifico è incentrato sul rapporto tra forma ed efficienza dei pannelli.

Il livello di innovazione è valutato non solo dalla riconoscibilità del materiale fotovoltaico, ma anche dai ragionamenti attraverso i quali l'edificio è stato concepito. La relazione tra energia e forma, quindi, diventa un fattore chiave di

ENERGIA SEGUE LA FORMA

Con “l'energia che segue la forma” si intende un tipo di integrazione che avviene secondo forme indipendenti dall'ottimizzazione della produzione energetica. In questo caso, quindi, il progetto BIPV non varia o altera la morfologia dell'edificio, e si adatta ad una forma già definita.



LA FORMA SEGUE L'ENERGIA

Il secondo criterio “la forma che segue l'energia” indica gli edifici in cui il progetto del fotovoltaico è stato concepito per massimizzare l'efficienza dei moduli, seguendo i criteri per la progettazione solare con inclinazione e orientamento ottimali per la resa energetica.



FORME LIBERE DI ENERGIA

L'ultimo criterio “forme libere di energia”, rappresenta la rottura del legame di forma e energia: la morfologia dell'edificio viene scelta senza dare peso al potenziale miglioramento dei guadagni solari. In questo caso il BIPV è considerato un materiale tradizionale e allo stesso modo viene utilizzato.



innovazione e l'identificazione di esso non passa soltanto dalla riconoscibilità del materiale, ma anche dai ragionamenti attraverso i quali l'edificio è stato concepito. Per chiarire meglio questo tipo di parametro, di seguito sono elencati e chiariti i tre criteri: **l'energia che segue la forma, la forma che segue l'energia e forme libere di energia.**



Complesso di residenze, a Einseiedeln (CH); 2012; Architetto: Sanjo group

Source: bipv.ch

Nel progetto riportato, l'integrazione segue la forma tipica delle balaustré, l'utilizzo del fotovoltaico non è avvenuto seguendo una certa esposizione per ottimizzare il rendimento energetico, ma bensì segue le forme progettate.



Complesso residenziale nella regione di Zurigo. Progetto completato nel 2017.

Architetto: Kampfen fur architektur ag

Source: bipv.ch

In questo caso, invece, le inclinazioni delle coperture sono state ideate per ottimizzare il rendimento energetico. Infatti, la copertura è ad una falda, scelta effettuata per cercare di riuscire ad avere più superficie possibile esposta verso sud. L'inclinazione della copertura, che è intorno ai 30° e infatti esposta verso sud.



Complesso residenziale nella regione di Zurigo. Progetto completato nel 2017.

Architetto: Kampfen fur architektur ag

Source: bipv.ch

Per questo progetto invece il sistema BIPV non segue né forme archetipiche né inclinazioni o orientamenti specifiche per ottimizzare la produzione energetica. Il fotovoltaico viene scelto per concepire nuove forme innovative, che si sposano perfettamente con il fotovoltaico.

03.3 Contesti di innovazione

In “contesti di innovazione” sono stati inclusi i parametri che definiscono il contesto entro il quale è stato utilizzato il fotovoltaico integrato. Il fine è di dare una visione delle diverse realtà in cui è ideato il progetto BIPV per dare un riscontro “realistico” dei livelli di innovazione nei diversi ambienti.

Uno dei primi parametri ideati come contesti di innovazione è il **componente dell'edificio** nel quale è stato utilizzato il fotovoltaico come involucro (per esempio copertura, facciata, o elementi esterni integrati). Dividere per questo criterio può dare un quadro di quale siano state le preferenze di integrazione fino ad oggi.

Un ulteriore criterio è il **tipo di intervento edilizio**, ovvero se si tratta di una nuova costruzione o di un intervento di rinnovamento, poichè lo sviluppo del progetto di un sistema BIPV cambia radicalmente se si tratta di uno o dell'altro.

Infatti, i diversi propositi con i quali si sviluppa un progetto possono modificare profondamente il linguaggio estetico dell'edificio. Su questa logica è stato identificato il criterio della **committenza**, che divide se i commissionari del progetto sono utenti privati, aziende private o enti pubblici. Perciò nell'indagine si è tenuto conto di questo fattore, classificandolo in un parametro.

Sotto i criteri di contesti di innovazione, non poteva mancare una categorizzazione dell'ambiente circostante. La scelta di utilizzare un determinato prodotto BIPV è influenzata dall'**ambiente circostante**: se si tratta di un contesto naturale, urbano o storico il materiale e la morfologia saranno sicuramente differenti.

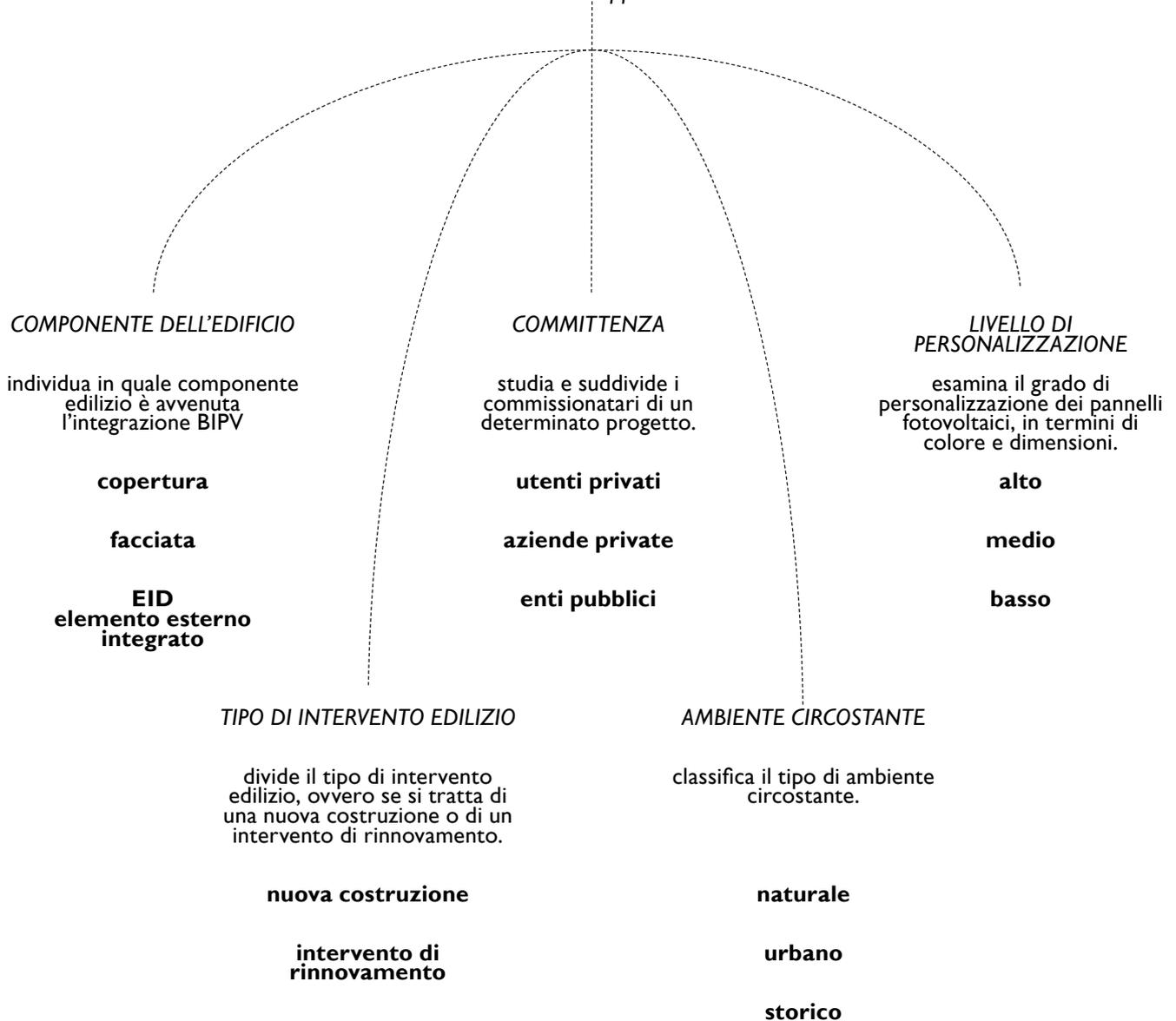
Abbassando la scala della valutazione e entrando nel merito della scelta del materiale, viene classificato il **livello di personalizzazione**, ovvero quanto il pannello viene modificato in termini di dimensioni e estetica. Quest'ultimo parametro riconduce ai livelli di innovazione della tecnologia: l'accessibilità alla personalizzazione del prodotto è un sintomo di una tecnologia ad uno stadio maturo di sviluppo.

Contesti di innovazione.

Source: Pierluigi Bonomo et al., Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Analysis of technological transfer and innovation dynamics in building sector. In publishing.

CONTESTI DI INNOVAZIONE

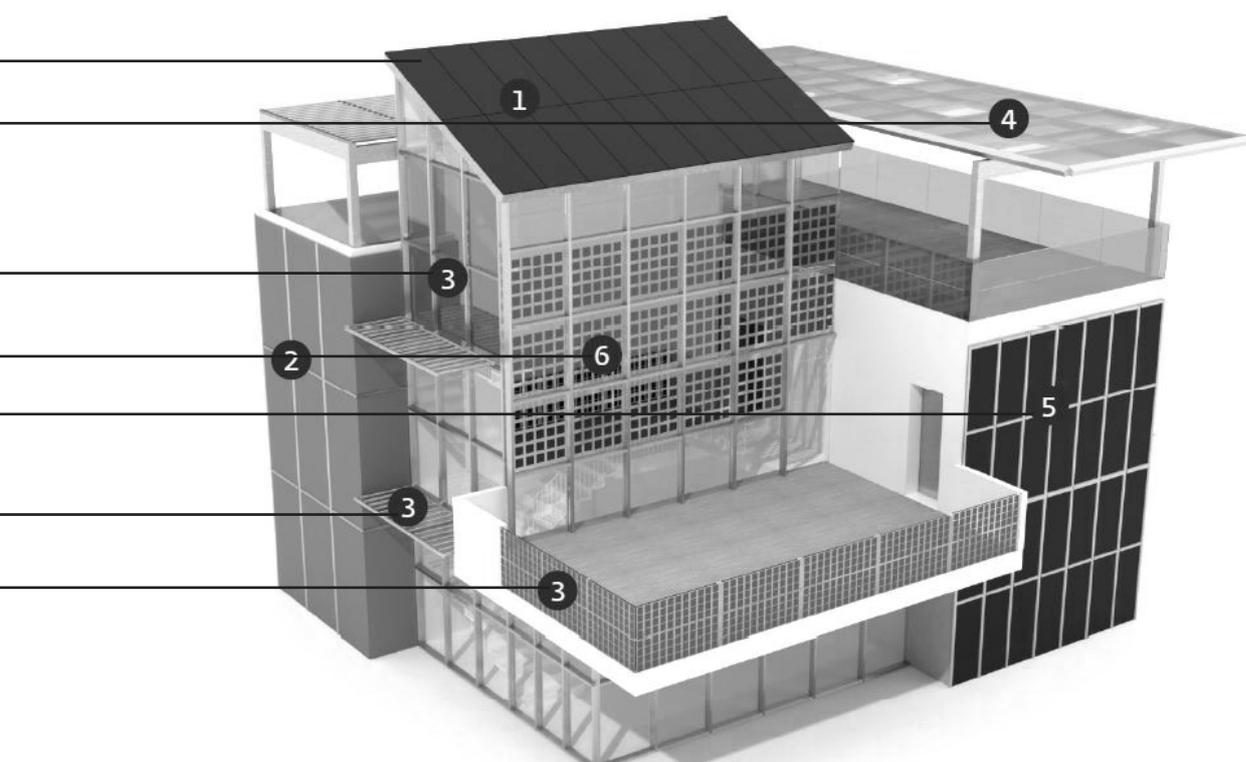
esaminano i contesti entro i quali i progetti BIPV si sviluppano



CATEGORIA DEL COMPONENTE EDILIZIO

La classificazione dei componenti edilizi è definita nella Task 15 di IEA PVPS [35]. Secondo questa categorizzazione i componenti edilizi si dividono in tre grandi gruppi: **coperture**, **facciate** e **componenti esterni integrati** (definiti come quei componenti che non si trovano in ambienti termicamente controllati).

COPERTURA	
FACCIATA	
ELEMENTI ESTERNI INTEGRATI	



Indicatori di innovazione.

Source: Pierluigi Bonomo et al., Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Analysis of technological transfer and innovation dynamics in building sector. In publishing.

NUOVO O RINNOVATO

Questa categorizzazione serve a definire la genesi dell'impianto fotovoltaico integrato. Chiaramente, se si tratta di un intervento di **nuova costruzione** o di **ristrutturazione** i propositi con il quale viene ideato e costruito l'impianto saranno molto diversi.

Nel caso della nuova costruzione il progetto dell'impianto può partire da zero, superare gli archetipi oppure mantenerli, usare forme nuove, non ha vincoli di memoria collettiva o di forma.

NUOVA COSTRUZIONE

*International School, Copenhagen (DE).
Architetto: CF Møller*

Edificio di nuova costruzione, realizzato nel 2017.

Source: archdaily.com

In questo progetto tutto l'involucro è realizzato in pannelli solari colorati. Ciò che c'è di interessante ed innovativo in questa realizzazione di nuova costruzione è la sperimentazione con il colore: i pannelli, pur essendo tutti della stessa colorazione assumono sfumature differenti grazie all'inclinazione di ogni pannello del 5%.



Per le ristrutturazioni, invece, il progetto sarà diverso ed esposto a molti più vincoli geometrici e morfologici, oltre ad avere spazi già definiti per gli impianti, nei quali il BIPV con le sue componenti dovrà trovare il suo spazio. Questo parametro è utile per valutare quanto il sistema BIPV sia diffuso a livello di ristrutturazione o di nuova costruzione.

RISTRUTTURAZIONE

Palazzo positivo, Chiasso (CH)

Edificio residenziale del 1965 rinnovato nel 2013. L'integrazione dei moduli fotovoltaici è avvenuta sulle pareti verticali e sulla copertura.

Source: bipv.ch

Questo intervento è considerato un progetto pilota in quanto è stato realizzato nel 2013, anno in cui erano ancora poco frequenti interventi di questo genere. Il palazzo è stato completamente rinnovato nell'aspetto energetico: nell'involucro è stato integrato il fotovoltaico sia nella facciata sia nelle balaustre. L'edificio dal 2013 è completamente autonomo dal punto di vista energetico.



COMMITTENZA

Il cliente di un progetto è importante per comprendere il livello di innovazione in architettura: questo criterio indaga fino a chi è arrivata la diffusione della tecnologia e in che modo è percepito da ognuno di essi. I committenti del progetto in questa analisi sono stati classificati come: **clienti privati, aziende, o enti pubblici.**

Ciò che divide i committenti in questa categorizzazione è soprattutto il budget di partenza: per clienti privati si intende i singoli che investono su un sistema BIPV la quale disponibilità sarà chiaramente limitata rispetto a delle aziende private o ad un ente pubblico.

CLIENTI PRIVATI

Casa del professor Dieter Dietz, Morges (CH). 2014

Architetto: Dieter Dietz

Source: afasiaarchzine.com

In questa casa residenziale privata, il fotovoltaico è integrato nella copertura in maniera innovativa. In questo particolare caso il progettista ha voluto sperimentare un nuovo metodo costruttivo per la sua casa in campagna.



AZIENDE

Balenciaga, negozio a Miami. 2018.

OnyxSolar.

Source: OnyxSolar.com

La nota casa di moda Balenciaga, ha scelto di integrare il fotovoltaico in una delle sue facciate esterne. La scelta è stata condotta poiché una facciata di questo genere riesce a combinare sostenibilità, innovazione e bellezza. Rinnovando l'immagine dell'azienda stessa.



ENTI PUBBLICI

Centro polifunzionale a Pregassona (CH).

Architetto: Rosario Galgano

Edificio completato nel 2021

Source: bipv.ch

L'edificio di committenza pubblica è stato completato quest'anno. Anche in questo caso il fotovoltaico integrato è stato preferito per questioni di immagine e di esempio verso le scelte dei cittadini.



Inoltre, anche le scelte che portano queste tre tipologie di proprietari a decidere per un impianto BIPV possono essere differenti. Infatti, i proprietari di una casa residenziale probabilmente sono maggiormente interessati ad un basso costo di progettazione ed installazione e ad una massimizzazione della resa dell'impianto. Mentre le aziende e gli enti pubblici spesso optano per un sistema fotovoltaico integrato in facciata anche per questioni di immagine. Queste differenti scelte influenzano il linguaggio finale dell'edificio.

Casa Scheneller Bader, Tamis, 2016.

Architetto: Bearth & Deplazer Arkitekten

Source: Energia solare, adesso e per il futuro. SvizzeraEnergia. Berna, marzo 2019

In questo caso il fotovoltaico è stato integrato rivestendo tutta la copertura. In questo caso la scelta è stata di ottimizzare la produzione energetica aumentando la superficie attiva. Un'attenzione particolare è stata data al linguaggio estetico, che risulta ben integrato nel contesto naturale.



Campus google. Architetto: BIG and Heatherwick Studio's. A Mountain view (USA) - ; Edificio completato nel 2021

Source: archdaily.com

Il progetto del nuovo campus di Google, composto di 90 000 tegole solari. Secondo uno degli ideatori del progetto vuole trasmettere con un linguaggio nuovo e proiettato al futuro lo spirito innovativo che contraddistingue la Silicon Valley.

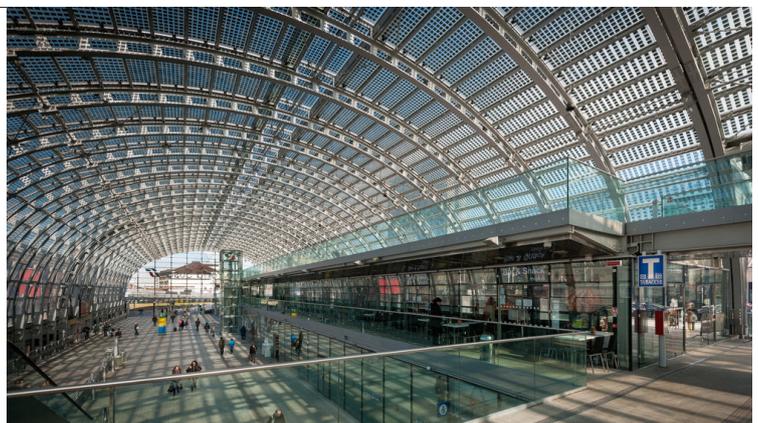


Stazione di Torino Porta Susa, Torino, 2014.

Gruppo di progettazione: Studio ARCHICURA (Torino), Arch. Kisho Kurokawa KKAA (TOKIO), ARUP London

Source: archicura.it

Questo progetto, che vinse il premio solare europeo nel 2012, integra nella copertura dalla forma sinuosa delle celle monocristalline. La produzione delle celle riesce in parte a coprire il fabbisogno energetico della struttura, oltre a schermare il sole dando un comfort luminoso allo spazio interno.



AMBIENTE CIRCOSTANTE

Per ambiente circostante si intende il tipo di contesto nel quale si sviluppa il progetto. Sono stati classificati tre tipi di ambienti: l'**ambiente urbano**, **naturale** o **ambiente storico**.

Nella prima tipologia elencata, ovvero "ambiente urbano" sono classificati quei contesti urbani più o meno densi che non hanno particolari vincoli legati alla memoria storica di una certa comunità.

URBANO

*Istituto di microbiologia medica, UZH
Architetto: Seifert Architekten*

Edificio completato nel 2018.

Source: solarchitecture.ch

Questo progetto si integra benissimo nell'ambiente urbano, passando inosservato, nessuno sospetta che il rivestimento sia energeticamente attivo.



NATURALE

Asilo a Einigen, Svizzera. Edificio completato nel 2018.

Source: solarchitecture.ch

Il progetto tratta due edifici in un ambiente naturale, la forma degli edifici riprende le tipiche forme delle costruzioni rurali. L'integrazione del fotovoltaico è avvenuta nella copertura.



STORICO

Castello di Doragno, Svizzera. Edificio completato nel 2017.

Architetto: DeltaZERO

Source: solarchitecture.ch

L'integrazione del fotovoltaico può avvenire anche negli edifici di interesse storico. Nell'esempio riportato nella foto a destra l'integrazione è avvenuta sulla copertura del Castello di Doragno. L'edificio risale a 1500-1600.



Gli ambienti naturali sono definiti come densità del costruito molto bassa e sono circondati da un contesto paesaggistico di rilevanza e di qualunque tipo (campagna in pianura, collinare, fluviale, montuoso, ...). Questo parametro è stato scelto per valutare se in differenti contesti la sensibilità del progettista e dei committenti cambia, e anche in questo caso, se il livello di innovazione è differente in ambienti diversi.

*Solar Emerald, Norvegia.
Architetto: Seifert Architekten*

Installazione completata nel 2015.

Source: report IEA-PVPS T15-03:2018

Questo edificio commerciale è situato a Drammen, nell'est della Norvegia. Si trova in un ambiente urbano e le celle fotovoltaiche sono state personalizzate per essere colorate.



Rifugio Monterosa, Valais, Svizzera. Edificio completato nel 2013. Architetto: Deplazes Architekten AG

Source: bipvmeetshistory.eu

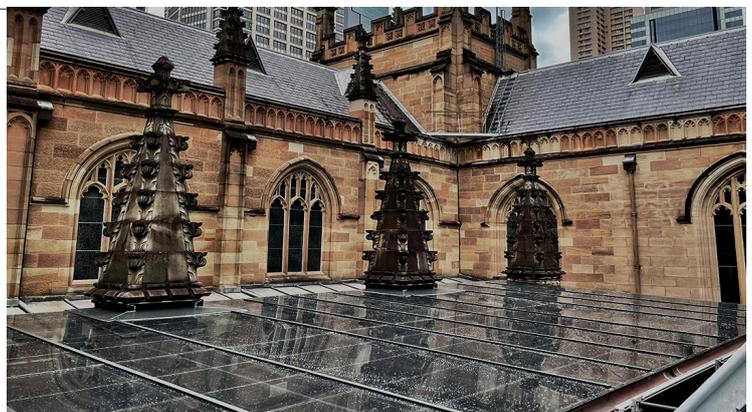
L'edificio sostituisce il vecchio rifugio sul Monte Rosa, che funzionava a gasolio e carbone. La nuova costruzione grazie alla facciata fotovoltaica opaca riesce a raggiungere livelli di autosufficienza energetica al 90%.



Cattedrale di Sant'Andrea, Svizzera. Edificio completato nel 2021. Architetto: -

Source: bipvmeetshistory.eu

La cattedrale di San Andrea è la più antica di Australia: fu fondata nel 1817. Il sistema fotovoltaico è installato sul cortile tra la cattedrale e l'adiacente edificio della sala capitolare. Il lucernaio è stato installato a testimonianza che tradizione e modernità possono fondersi in perfetta armonia, mantenendo un alto livello estetico.



LIVELLO DI PERSONALIZZAZIONE

Questa categoria abbassa la scala della valutazione, arrivando ad osservare nel particolare il prodotto BIPV utilizzato per il progetto.

Ad oggi, infatti, come è stato spiegato nei capitoli precedenti, è possibile personalizzare il prodotto BIPV su diversi parametri: le dimensioni (intese come larghezza e lunghezza), colore o pattern e la trasparenza. Il livello di personalizzazione è stato definito su tre gradi: **alto** (elevata personalizzazione),

ALTO GRADO DI PERSONALIZZAZIONE

Progetto di concorso tra l'Università di Scienze Applicate di Luserna e l'Empa (Laboratorio federale svizzero di Scienze dei Materiali). Il progetto un nuovo design del vetro per implementare l'utilizzo del fotovoltaico. Il progetto installato (vincitore) è di Lynn Balli.

Source: solararchitecture.ch



MEDIO GRADO DI PERSONALIZZAZIONE

Tettoia solare - Sonnenkraft

Edificio completato nel 2021.

Questa tettoia solare utilizza un elemento unico BIPV. Il sistema è un medio grado di personalizzazione poiché gli elementi unici necessitano di un grado di personalizzazione sempre abbastanza alto che deve adattarsi alle necessità del cliente.

Source: solararchitecture.ch



BASSO GRADO DI PERSONALIZZAZIONE

Heizplan Solar Park, Gams (CH)
Architetto: atm3, Werner Vetsch

Edificio completato nel 2010.

In questi caso i pannelli applicati sull'involucro sono standard. Non hanno particolari personalizzazioni a livello di forma o di colore.

Source: bipv.ch



medio, e **basso**; la valutazione dipende da quanto sui tre parametri dappima elencati c'è stato un lavoro di ricerca personalizzato nella produzione dei moduli.

Progetto di integrazione delle celle fotovoltaiche su una balaustra (progetto di mimesi). In questo caso le celle solari non hanno solo una forma particolare e personalizzata per questa specifica integrazione, ma sono anche colorate con una texture che ricorda il legno.

Source: a2-solar.com

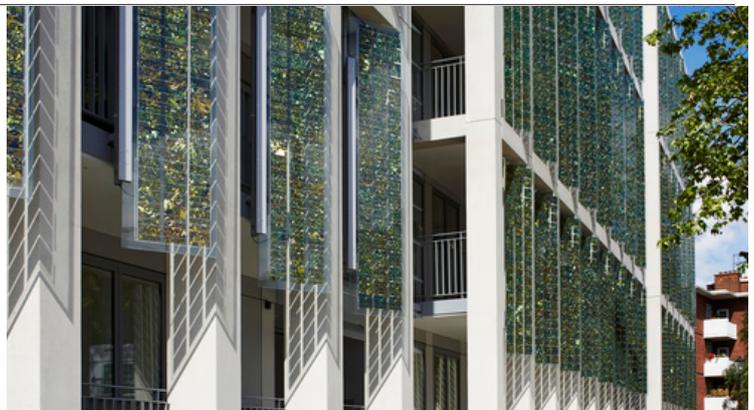


London Kingsgate; Londra.

Edificio completato nel 2014.

In questo progetto è stato creato un modulo che si ripete. Le celle fotovoltaiche sono colorate e la disposizione dei pannelli funziona anche da schermatura solare.

Source: lofsolar.com

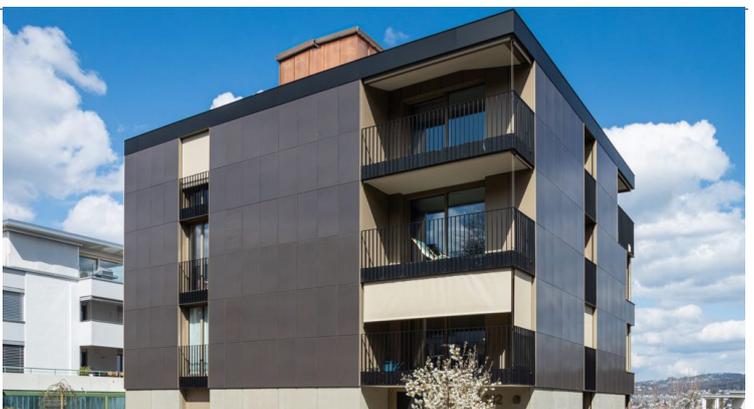


Progetto a Thalwil (CH)
Architetto: Tobler Litscher GmbH

Edificio completato nel 2020.

In questo recente progetto, i moduli fotovoltaici che nascondono le celle, sono di dimensioni standard e si ripetono.

Source: solararchitecture.ch



03.4 I casi di studio

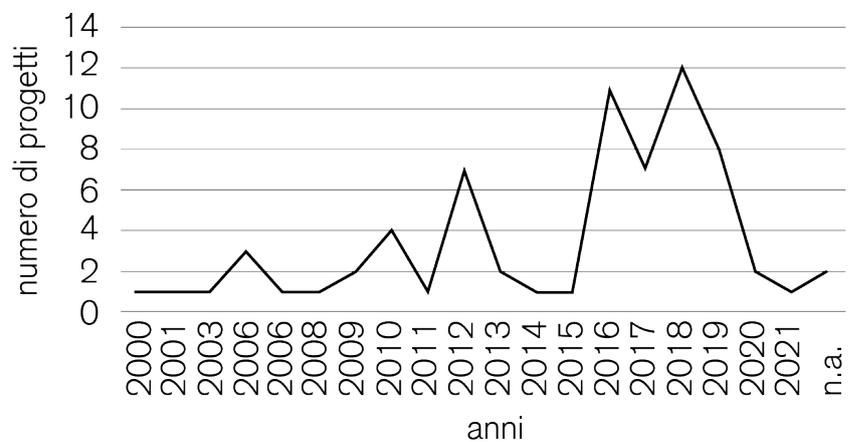
I casi di studio selezionati sono 139 in totale. Sono progetti esclusivamente BIPV, ovvero con un impianto fotovoltaico integrato nell'involucro edilizio che rientra nella definizione della Norma EN50583. Inoltre, come è stato più volte puntualizzato sono progetti ubicati nel territorio svizzero per avere un contesto normativo uniforme.

Le fonti dalle quali sono stati presi i progetti sono:

- **bipv.ch** : è uno degli strumenti di comunicazione del *Centro Svizzero di competenza BIPV* , creato nel 2005 dall'Istituto Sostenibilità applicata all'Ambiente costruito (ISAAC). Il sito attualmente non è attivo e aggiornato, poichè da qualche anno il dipartimento ISAAC lavora al sito solararchitecture.ch. Tuttavia conserva un database di numerosi progetti con molte informazioni. I progetti selezionati da questo database sono in totale 36.
- **solararchitecture.ch**: è il nuovo sito del Centro di competenza svizzera. è gestito dal centro ISAAC di SUPSI, ma lavorano ai contenuti anche l'ETHZ di Zurigo, Swissolar (associazione svizzera per l'energia solare), il Swiss energy (programma federale per l'incentivazione dell'energia solare), e il Sounding Board (organizzazione a cui partecipano diversi attori dell'industria della costruzione). I progetti individuati dalle pubblicazioni del sito e inseriti nel database sono in totale 3.
- **solarage.eu**: è una piattaforma che colleziona casi di studio BIPV con relative informazioni. I progetti presi da questo sito sono in totale 15 casi di studio.
- **solargentur.ch**: racchiude al suo interno i progetti premiati dal Solar Preis, ovvero il premio solare svizzero annuale, che valuta e premia i migliori progetti BIPV. Da questo database sono stati individuati 44 progetti.
- **FER**, fondo energie rinnovabili: è il fondo del Cantone Ticino per le energie rinnovabili. Il che significa che ogni progetto che richiede gli incentivi cantonali viene collezionato in questo database. Da questa fonte sono stati individuati al fine dell'analisi 40 casi di studio.

In ognuno di questo database sono presenti informazioni relative all'estetica dell'edificio e dell'impianto grazie ad immagini e fotografie, oltre ad informazioni più tecniche relative alla potenza dell'impianto, al tipo di tecnologia utilizzata, alla committenza, e altre informazioni relative sia ai parametri sotto "livelli di innovazione" sia a quelli relativi ai "contesti di innovazione".

I progetti partono dal 2000 per arrivare fino ad oggi, nel grafico qui sotto è riportato il numero di progetti relativo all'anno di realizzazione del progetto.



Il grafico riporta il numero di progetti collezionati per ogni anno. Dal 2020 ad oggi. In n.a. sono classificati i progetti per i quali non è stato trovato l'anno di costruzione.

PROGETTI NEL TEMPO



Nei primi anni 2000 le integrazioni del fotovoltaico erano poche e i progetti con il BIPV erano considerati sperimentali e pionieristici. È il caso del progetto rappresentato nella foto sopra, risale al 2000. L'architetto è Beat Kampfen. (Source: bipv.ch)

il pionierismo
2000



la sperimentazione sulle facciate
2010

2006
l'era degli incentivi



In questi anni uscirono moltissimi incentivi per la produzione di energia da risorse rinnovabili. La maggior parte dei progetti di questi anni è ideato per massimizzare la resa dell'impianto, con superfici molto ampie e inclinazioni a sud. Il complesso residenziale riportato qui sotto è a Friburgo progettato da Rolf Disch e mostra l'estetica tipica dell'era degli incentivi".

(Source: bipv.ch)



Affinando le tecniche di colorazione del fotovoltaico in questi ultimi anni sono nati alcuni progetti pilota che mostrano le diverse possibilità di utilizzo del fotovoltaico su tutto l'involucro edilizio, sia sulle pareti verticali sia sulla copertura.

(Source: solarchitecture.ch)

I progetti pilota d'integrazione

2017

2014

la rivoluzione del colore



Verso la fine del primo decennio del 2000 il fotovoltaico colorato inizia ad essere utilizzato più frequentemente. Per esempio nell'esempio riportato sopra l'intervento è di rinnovamento e sperimenta l'utilizzo di pannelli fotovoltaici di diversi colori. L'edificio si trova a Basilea. (Source: solarchitecture.ch)

2021

fotovoltaico?

Il fotovoltaico nel 2021 non sembra fotovoltaico. Le tecniche di personalizzazione del pannello fotovoltaico sono così avanzate che le possibilità sono moltissime e accessibili dalla maggior parte delle persone. L'edificio in figura sorge a Pregassona vicino a Lugano, è un edificio pubblico polifunzione. (Source: solarchitecture.ch)



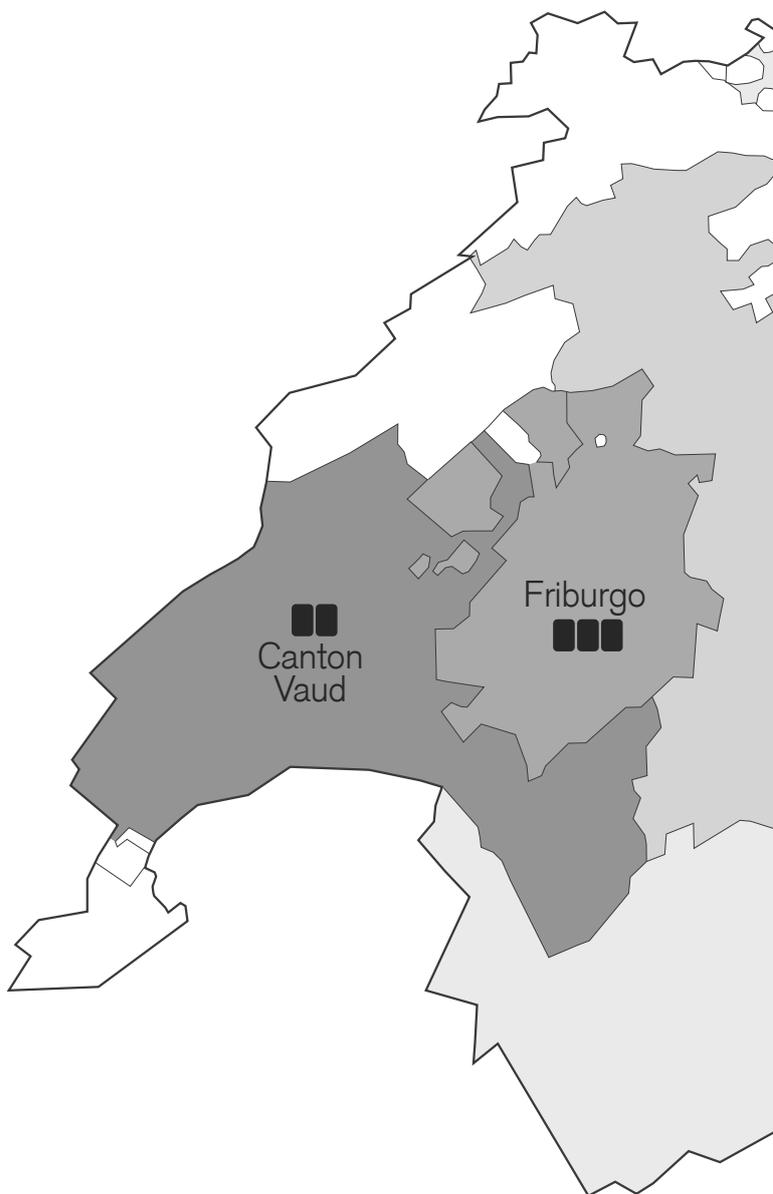
UBICAZIONE DEI PROGETTI NEL TERRITORIO SVIZZERO

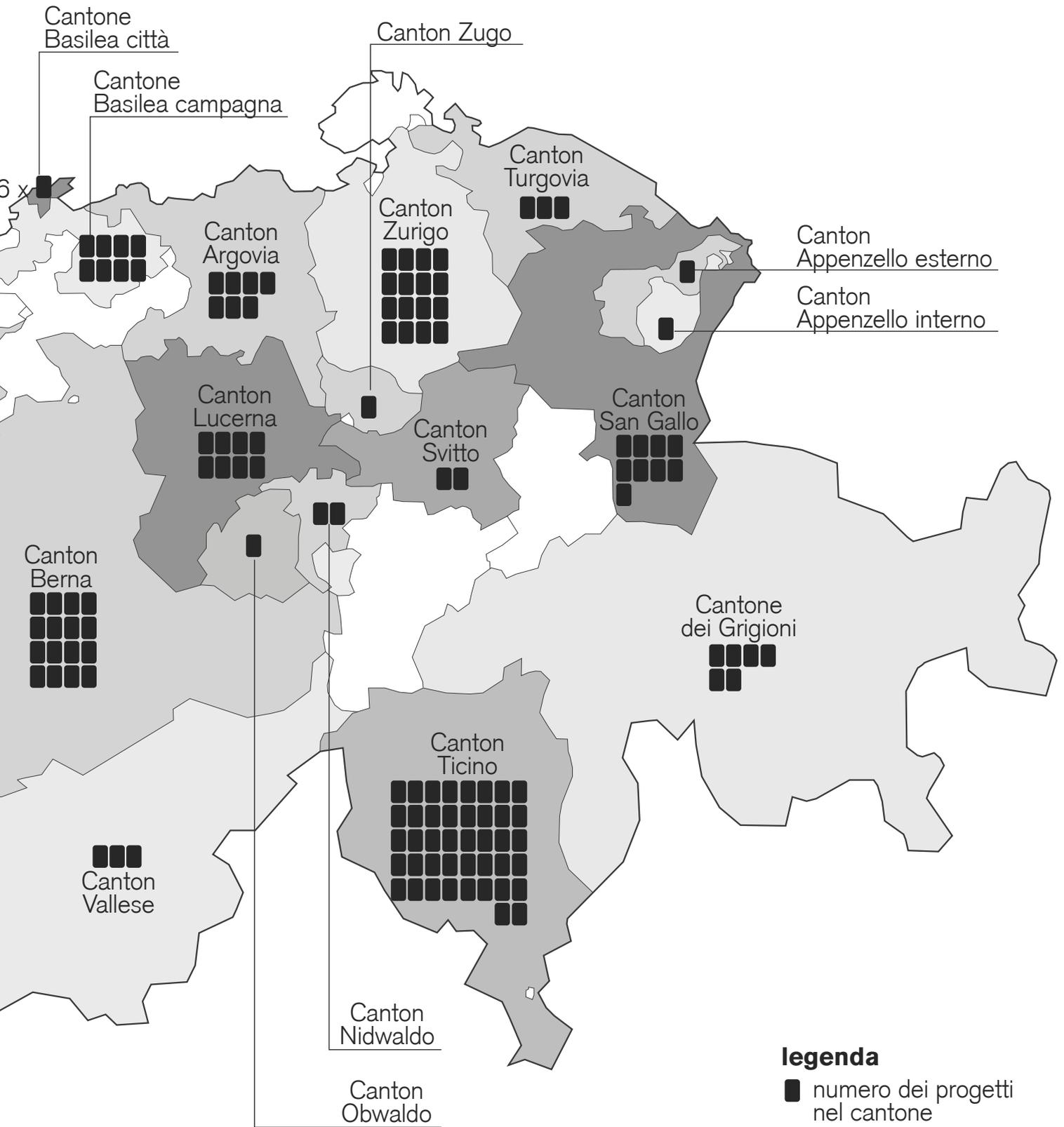
I progetti sono stati suddivisi in base alla posizione. I cantoni in cui sono stati individuati dei progetti BIPV sono 19, in totale i cantoni svizzeri sono 26.

In Canton Ticino i progetti individuati sono numerosi (42), in quanto è stato utilizzato la fonte del FER (Fondo Energie rinnovabili) del Cantone Ticino. Non considerando questo dato, i cantone che risultano più avanti nell'utilizzo del BIPV sono a pari merito il Canton Zurigo e il Canton Berna, in cui sono stati individuati 16 progetti.

Di seguito sono elencati i Cantoni in ordine decrescente rispetto al numero di progetti in cui sono stati individuati i progetti BIPV.

Ticino	
Berna	42
Zurigo	16
San Gallo	16
Basilea campagna	9
Lucerna	8
Argovia	8
Grigioni	7
Basilea città	6
Friburgo	5
Turgovia	3
Vallese	3
Nidwaldo	3
Svitto	2
Vaud	2
Appenzello esterno	2
Appenzello interno	1
Obwaldo	1
Zugo	1
	1





03.5 I risultati delle analisi

In questa sezione sono stati raccolti i risultati dell'analisi condotta sui 139 casi di studio collezionati, studiati secondo i parametri descritti nel capitolo precedente. Ho condotto l'analisi insieme a Pierluigi Bonomo, responsabile del gruppo di ricerca Involucro Innovativo di SUPSI (Scuola Universitaria della Svizzera Italiana), per valutare il livello di innovazione della tecnologia nel campo architettonico. La ricerca completa sarà pubblicata nell'articolo scientifico dal titolo "*Building Integrated Photovoltaics: analysis of traits of technological transfer and innovation building sector*". In questo elaborato si riportano alcuni risultati utili per restituire un quadro del livello di innovazione nell'applicazione dei sistemi integrati negli edifici sul territorio svizzero.

Infatti, tutti i progetti sui quali sono stati applicati i parametri precedentemente spiegati, sono stati individuati in Svizzera. La decisione di individuare progetti in un'unica nazione è stata effettuata per avere un quadro normativo, climatico e finanziario il più omogeneo possibile.

I dati di ogni singolo caso di studio sono stati raccolti sul programma di Excel nel periodo compreso tra inizio giugno e fine luglio 2021, durante il periodo di tirocinio e borsa di studio. Sulla base delle informazioni raccolte sono stati creati dei grafici in modo da restituire i risultati in modalità chiara ed intuitiva. Gli indicatori di innovazione sono stati esaminati lungo il tempo ed insieme i parametri di contesto per riuscire ad avere degli esiti concreti sulle preferenze di utilizzo dei sistemi e dei singoli elementi utilizzati. Di seguito si elenca nel particolare quali sono stati i criteri per studiare i casi di studio, nella pagina a fianco, invece, è stato elaborato un grafico per chiarire i parametri analizzati.

I principi costruttivi sono stati esaminati lungo il tempo poichè la frequenza di utilizzo influenza l'evoluzione della tecnologia: gli elementi multipli, per esempio, sono i più utilizzati e l'utilizzo lungo il tempo ha permesso di evolvere i sistemi costruttivi con nuovi giunti che semplificano la messa in opera e la manutenzione. Oltre all'utilizzo nel tempo, sono stati studiati insieme alla tipologia di intervento: se di nuova costruzione o se di rinnovamento di un fabbricato esistente. Anche sui componenti edilizi è stata analizzata la scelta del tipo di prodotto, ed infine i principi sono stati analizzati sul tipo di committenza.

Le fasi di innovazione sono state studiate lungo il tempo, questo parametro studia il rapporto con i materiali e le forme tradizionali: è interessante studiare come si è evoluto questa relazione durante gli anni. Sono state poi analizzate sui componenti edilizi, per capire se nei diversi tipi di integrazione ci sono approcci differenti.

Anche gli archetipi di innovazione sono stati studiati lungo il tempo, in questo caso valò lo stesso che per gli altri due tipi di indicatori: analizzare ciò lungo gli anni è indicativo dell'evoluzione delle tecniche costruttive e dell'approccio al progetto. Sono stati poi studiati sul tipo di committenza e sulla tipologia edilizia (nuova e rinnovata).

Infine, anche alcuni indicatori sono stati valutati tra di loro per misurare il livello di innovazione: per prima è stata esaminata la personalizzazione dei moduli secondo i diversi componenti edilizi: per secondo è stata analizzata l'integrazione nei diversi componenti edilizi in differenti contesti ambientali.

INDICATORI DI INNOVAZIONE

CONTESTI DI INNOVAZIONE

	PRINCIPI COSTRUTTIVI	FASI DI INNOVAZIONE	ARCHETIPI DI INNOVAZIONE
COMPONENTE DELL'EDIFICIO		●	
TIPO DI INTERVENTO EDILIZIO	●		●
COMMITTENZA	●	●	●

Grafico sopra: schema complessivo dell'analisi tra contesti e indicatori di innovazione

Il pallino ● indica che il risultato dell'analisi è riportata in questo elaborato.

ANALISI TRA CONTESTI DI INNOVAZIONE

COMPONENTE EDILIZIO

analizzato insieme a

AMBIENTE CIRCOSTANTE

COMPONENTE EDILIZIO

analizzato insieme a

PERSONALIZZAZIONE PRODOTTO

Grafico a sinistra: schema dell'analisi tra i contesti di innovazione.

ANALISI DEI PRINCIPI COSTRUTTIVI

Lungo il tempo

Il primo grafico mostra l'andamento generale lungo il tempo (21 anni), dei principi costruttivi adottati per l'integrazione del BIPV.

La tendenza, come è mostrato nel grafico 1, è l'utilizzo di elementi multipli. Questo fatto è riconducibile al motivo per cui utilizzando questo principio costruttivo il processo di progettazione è più semplice. Gli elementi multipli sono facili da mantenere ed in caso di modulo difettoso la sostituzione avviene in maniera semplice. Anche dal punto di vista della progettazione del layout: la personalizzazione delle dimensioni dei molteplici pannelli da installare rende possibile l'applicazione dei moduli anche su superfici di forme non perfettamente piane o rettangolari. L'elemento unitario, invece, richiede una progettazione attenta che deve iniziare nelle fasi iniziali del progetto poiché gli errori in fase di montaggio devono essere minimi. Il principio costruttivo unitario risulta più complesso anche dal punto di vista della produzione, che necessita la creazione di lastre di superficie elevate. Questi fattori incidono sui costi, che nella maggior parte dei casi risultano elevati. In alcuni contesti, però, l'elemento unitario può essere meno costoso e più adatto, per esempio, negli elementi esterni integrati (balaustre, pensiline, ...), che hanno dimensioni standard e si prestano per essere utilizzati insieme all'elemento unitario, che risulta quindi risulta più pratico e funzionale (approfondimento grafico 3).

Elementi multipli

- rappresentano l'88% dei progetti analizzati come casi di studio;
- progetto di integrazione meno complicato;
- manutenzione più facile;
- progettazione meno costosa;
- processo di produzione più semplice;
- facilmente applicabili a qualsiasi tipo di superficie (piana e curva).

Elementi unitari

- rappresentano il 22% dei progetti analizzati come casi di studio;
- progetto di integrazione richiede un grado di dettaglio elevato;
- manutenzione complessa: la sostituzione di celle difettose in alcuni casi non è fattibile;
- progettazione costosa;
- processo di produzione lungo, la lastra di vetro di superficie elevata deve essere poi lavorata e trasportata in cantiere;
- l'applicazione può avvenire su qualsiasi tipo di superficie, per una superficie curva però risulterebbe più cara e complessa.

Grafico 1:

Principi costruttivi utilizzati lungo il tempo. Dal 2000 ad oggi.

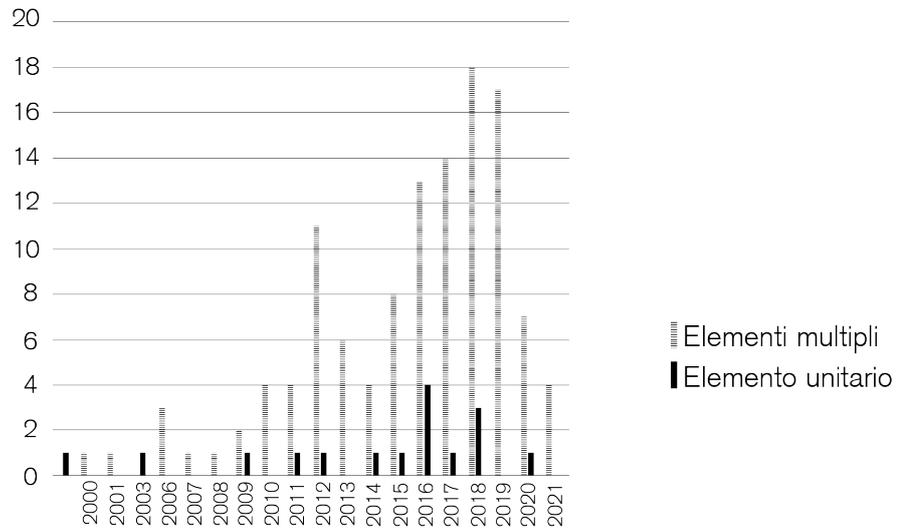
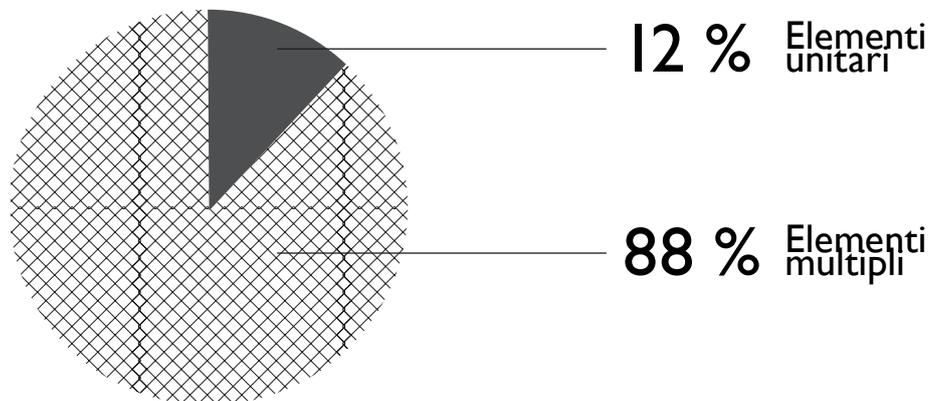


Grafico 2:

Percentuali di integrazione tra elementi multipli ed elementi unitari sul totale dei casi di studio collezionati.



Principi costruttivi per nuove costruzioni e rinnovamenti

Il grafico 3 illustra le analisi dei principi costruttivi rispetto alla tipologia di intervento: nuovo o rinnovato. In generale, per tutti e due i tipi di intervento il numero di integrazione di elementi multipli è maggiore. Questo dato è influenzato dal fatto che in generale, come mostrato nel grafico 1, i progetti in cui sono stati utilizzati elementi multipli sono molto più numerosi. Gli elementi unitari, quindi, sono meno utilizzati, ma riescono a trovare un buono spazio di applicazione soprattutto nelle nuove costruzioni. Infatti in percentuale gli elementi multipli sono utilizzati al 92% negli interventi di rinnovamento e all'82% sugli edifici di nuova costruzione; gli elementi unitari invece sono solo l'8% negli interventi di rinnovamento e il 18% negli interventi di nuova costruzione.

Principi costruttivi e committenze

La preferenza sui principi costruttivi dei diversi tipi di committenza è illustrata nel grafico 4. Gli elementi unitari, in proporzione, sono utilizzati in quantità maggiore nei progetti di committenza pubblica. La differenza sostanziale del tipo di committenza privata rispetto alle altre due è la disponibilità di denaro investito nel progetto: chiaramente le committenze pubbliche o di aziende private hanno un budget maggiore rispetto a quelle private. Spesso, la motivazione che spinge una committenza pubblica o di azienda privata ad utilizzare il BIPV è l'immagine, più che la produzione energetica. L'elemento unitario dal punto di vista estetico spesso risulta più spettacolare rispetto agli elementi multipli: permette di ottenere trasparenze, giochi di luci e a coprire delle altezze maggiori, aumentando il prestigio dell'edificio e di conseguenza della committenza.

Grafico 3:

I principi costruttivi integrati su nuove costruzioni e edifici di nuova costruzione.

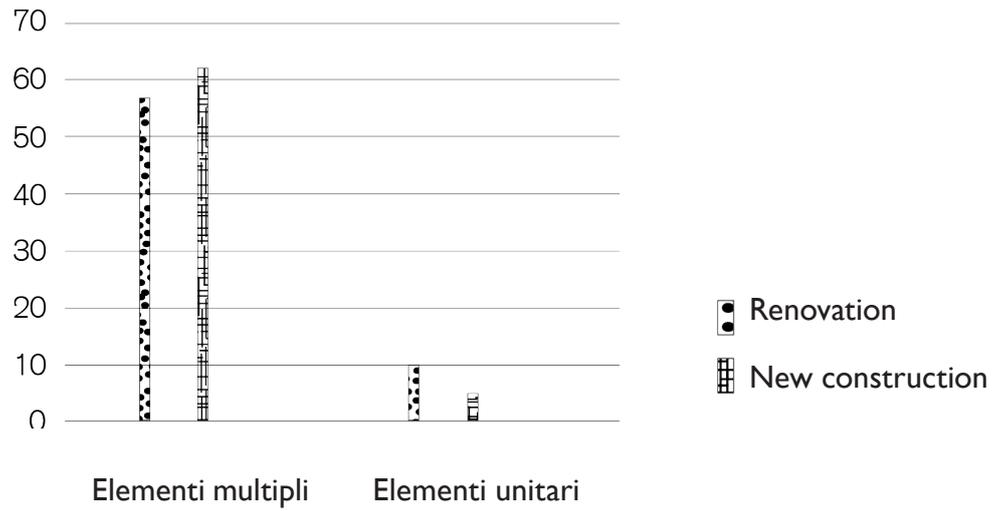
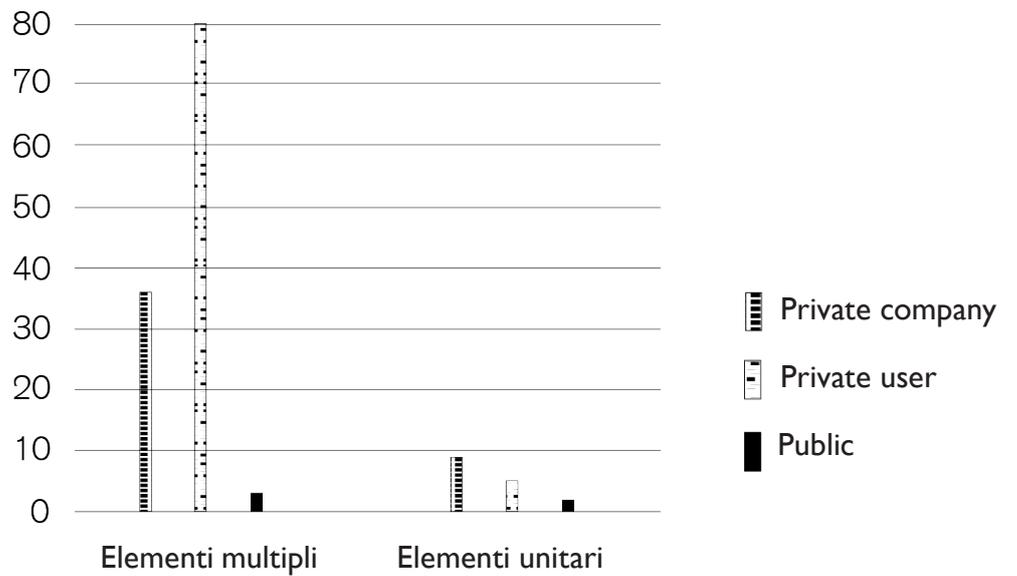


Grafico 4:

Le diverse scelte della committenza su elementi multipli o elementi unitari.



ANALISI DELLE FASI DI INNOVAZIONE

Lungo il tempo

I risultati dell'analisi mostrano come il concetto di permanenza sia il più diffuso. Nella pratica, quindi, ad oggi il fotovoltaico è integrato come pelle esterna, con l'unica funzione di proteggere l'edificio dagli agenti esterni e mantenendo forme archetipiche. Per lo più l'architettura solare si sta adattando alle forme tradizionali dell'architettura, facendo fatica a trovare spazio per nuove forme.

Oltre alla permanenza, nel grafico I si osserva che anche negli ultimi anni l'approccio mimetico ha avuto un buon successo tra il pubblico e l'utenza. La mimesi è un buon modo per sensibilizzare l'utenza sul largo uso che si può fare del fotovoltaico in architettura. Infatti, la barriera dell'estetica del pannello solare viene facilmente superata grazie al mascheramento del fotovoltaico con diverse tecniche che oltre a nascondere le celle solari imitano le texture dei materiali tradizionali. Da un punto di vista dell'accettazione della tecnologia fotovoltaica però, la dissimulazione dell'aspetto del fotovoltaico implica la dissimulazione della tecnologia stessa, limitando l'innovazione del linguaggio architettonico.

Questa tendenza conservatrice rispetto alle forme tradizionali, si nota anche per quanto riguarda il principio "*superamento degli archetipi*" dalle analisi risulta che i progetti di questo tipo sono ancora molto pochi (grafico I). Il numero di progetti limitato di questa categoria non permette di fare considerazioni riguardo i progetti con morfologie nuove e fuori dagli schemi archetipici.

Grafico 1:

Le fasi di innovazione lungo gli anni, dal 2000 ad oggi.

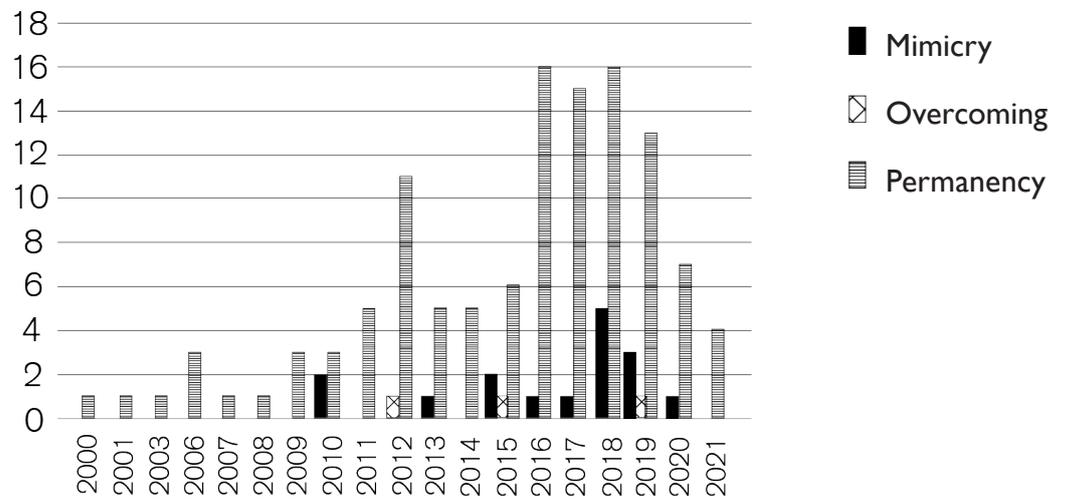
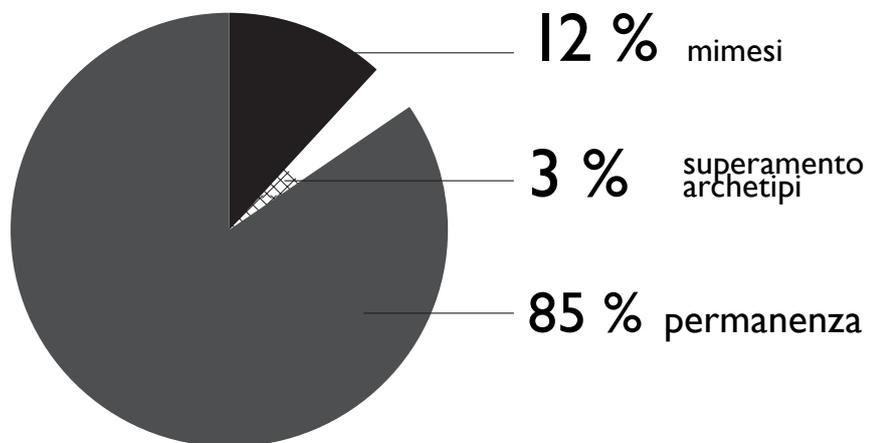


Grafico 2:

Fasi di innvazione in percentuale sul totale dei casi di studio analizzati .



Fasi di innovazione per tipo di committenza

Il grafico 3 illustra le fasi di innovazione per committenza. Si può osservare che per la fase “permanenza”, la committenza che più ha utilizzato questo tipo di approccio sono gli utenti privati, poi le aziende private, ed infine il settore pubblico. Infatti, i progetti commissionati dal pubblico e dalle aziende private sono classificati maggiormente nelle fasi di superamento dell’archetipo e nella mimesi. La classificazione di “permanenza” include progetti che hanno un processo di progettazione più semplice poiché dal punto di vista dell’ideazione si tratta di seguire forme già esistenti nel caso dei rinnovamenti o seguire le forme archetipiche nel caso delle nuove costruzioni.

Fasi di innovazione per componente edilizio

Questa tendenza è ben evidente anche nel grafico 2, che illustra le soluzioni di mimesi, permanenza e superamento nei diversi componenti edilizi.

Nell’analisi illustrata nel grafico 2, non sono mostrati gli elementi esterni integrati poiché sono stati tutti classificati nella permanenza dell’archetipo e i risultati non erano particolarmente rilevanti ai fini dell’analisi.

Per quanto riguarda i casi di integrazione in facciate e coperture, è interessante notare come il livello di sperimentazione di nuove forme sia maggiore nell’involucro verticale che nelle coperture. Infatti, i progetti di mimesi nelle coperture sono più frequenti. La ragione di ciò può essere ricondotta al fatto che l’utilizzo del fotovoltaico nei componenti verticali come le facciate è già di per sé un fatto innovativo e la committenza per questioni di immagine innovativa non senta la necessità di dissimulare la tecnologia. Sulla copertura, al contrario, l’utilizzo di materiali tradizionali ricorrenti (come coppi o tegole in terracotta) rende l’utilizzo della mimesi interessante per mantenere forme e colori usuali.

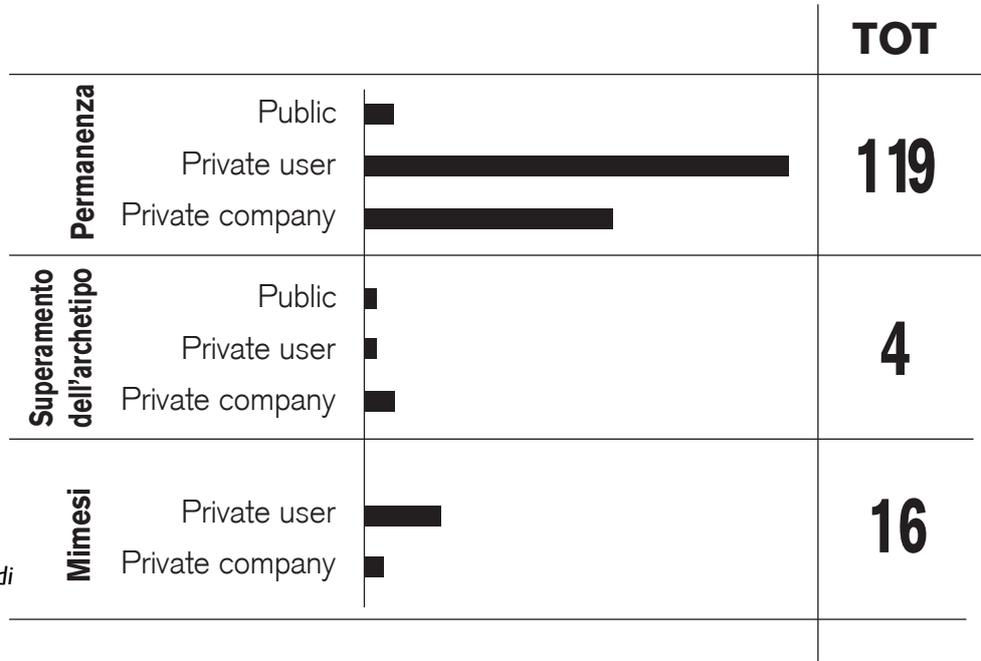


Grafico 3:

Fasi di innovazione per tipo di committenza.

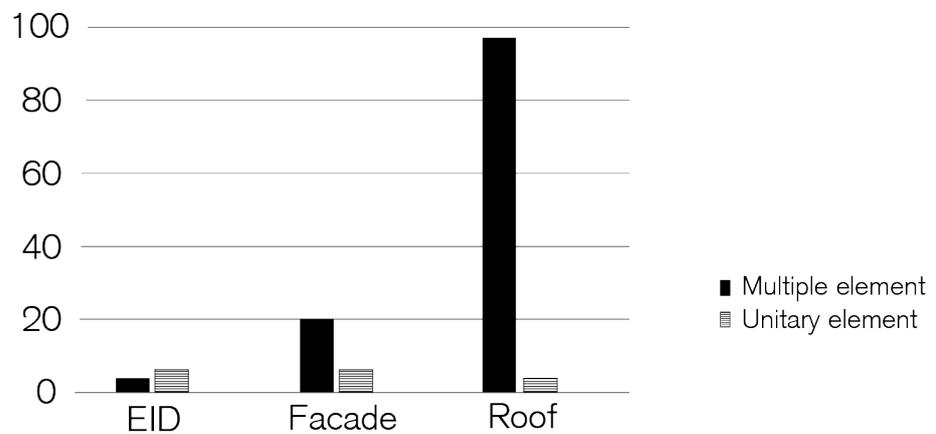


Grafico 4:

Fasi di innovazione per componente edilizio.

ANALISI DEGLI ARCHETIPI DI INNOVAZIONE

Lungo il tempo

Nell'analisi rispetto agli archetipi di innovazione, viene illustrato quale approccio formale viene utilizzato nel progetto: le forme seguono l'archetipo dell'edificio, la produzione energetica, oppure sono volumi liberi da entrambi i concetti?

Nel caso del grafico I, la tendenza mostrata è l'energia che segue la forma: su 139 progetti analizzati 114 sono classificati sotto questo archetipo di innovazione. I rimanenti casi di studio, 20 sono stati ordinati sotto forma che segue l'energia, e 4 sotto forme libere di energia.

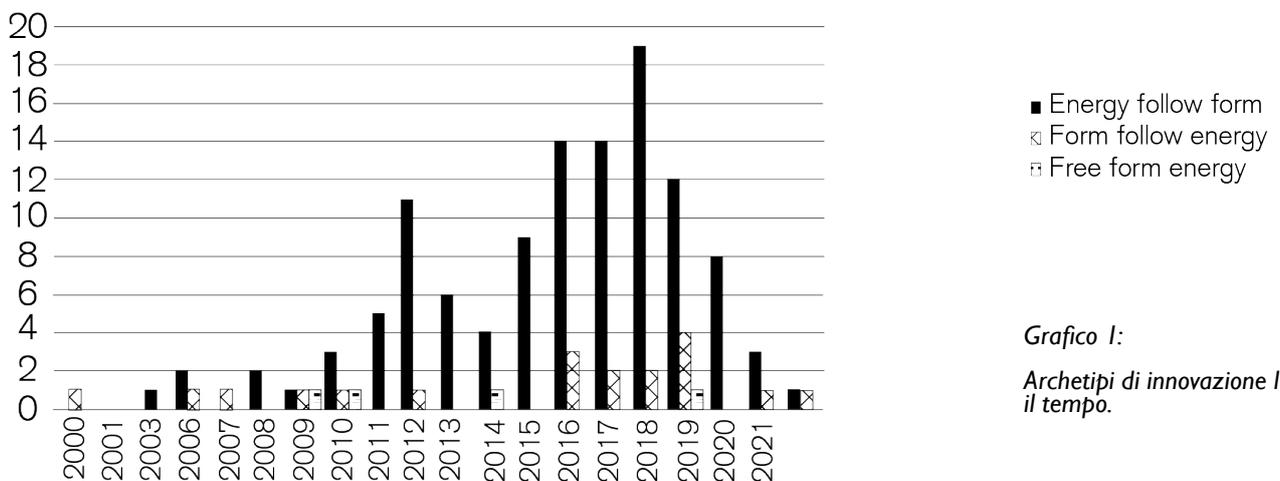


Grafico I:
Archetipi di innovazione lungo il tempo.

Si può affermare che ad oggi l'approccio al progetto solare è ancora molto legato alle forme preesistenti e tradizionali, a discapito della produzione energetica.

Il BIPV viene utilizzato come un materiale di rivestimento allo stesso modo di un consueto materiale da costruzione. A livello di innovazione possiamo intenderla in maniera positiva questa tendenza, come una normalizzazione del progetto solare da parte dei professionisti, i quali si avvicinano ad esso in maniera tradizionale. Anche per la ricerca può essere uno stimolo positivo per trovare nuove soluzioni che ottimizzano la resa energetica.

	Energia segue la forma	La forma segue l'energia	Forme libere di energia
Numero di progetti	114	20	4
% di progetti	83%	14%	3%

Grafico 2:

Archetipi di innovazione sul totale di progetti analizzati.

Archetipi di innovazione per committenza

Il grafico 3 mostra come variano gli archetipi di innovazione al variare della committenza. I risultati che si discostano maggiormente sono quelli relativi alla committenza pubblica: due progetti sono stati classificati come forma che segue l'energia e forme libere di energia.

La forma che segue l'energia e la forma libera di energia in questa ricerca sono considerate ad un livello di innovazione più avanzato: entrambi implicano il superamento delle forme tradizionali dell'architettura e la formazione di un'identità propria del fotovoltaico in campo edilizio. Il settore pubblico, a causa di una maggiore disponibilità di fondi, e come committenti di molti "progetti pilota" sperimenta nuove forme per l'architettura solare.

Gli utenti privati che adottano una soluzione fotovoltaica integrata all'involucro, sono più spesso orientati verso l'ottimizzazione della produzione energetica piuttosto che all'estetica. Ciò contribuisce alla conservazione della forma e quindi del progetto tradizionale di architettura, ciò comporta un costo dell'edificio minore, più adatto alle disponibilità di un utente privato.

Archetipi di innovazione per edifici nuovi o rinnovati

Le fasi di innovazione per intervento di nuova costruzione o di rinnovamento sono mostrate nel grafico 4, in questo caso la forma è già definita ed in certi casi l'integrazione è difficile da progettare fuori dalle forme preesistenti della struttura. Le nuove costruzioni, ovviamente, non seguono forme già configurate e la percentuale, in proporzione, è più alta rispetto agli interventi di rinnovamento.

Grafico 3: Committenza e archetipi di innovazione.

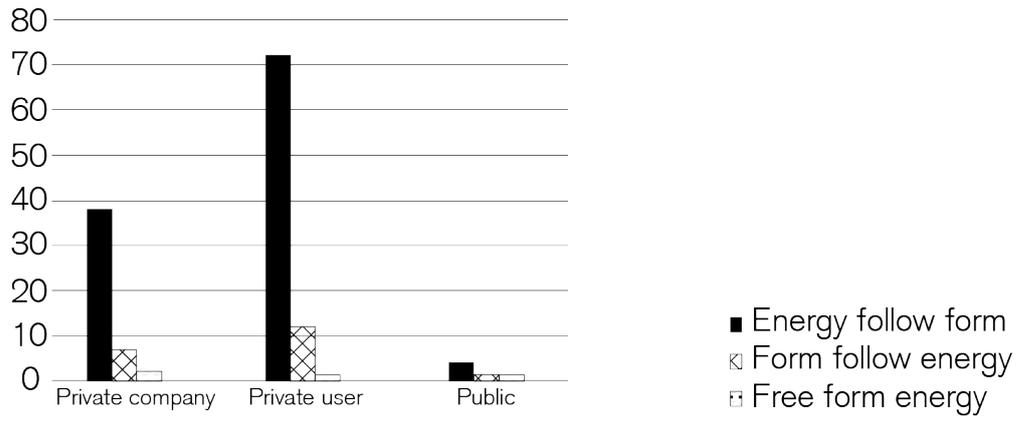
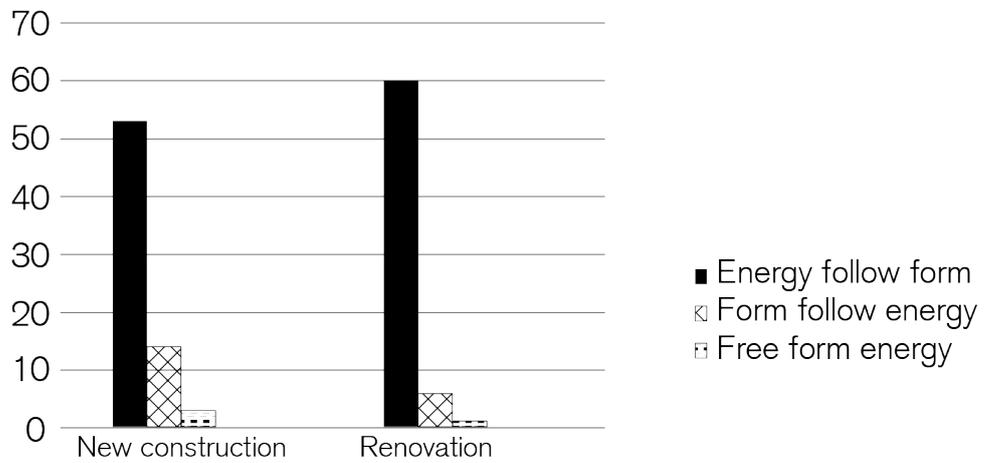


Grafico 4: Fasi di innovazione per tipologia edilizia: nuovo o rinnovato.



ANALISI DEI CONTESTI DI INNOVAZIONE

La personalizzazione dei moduli sui diversi componenti edilizi

Il primo grafico mostra qual è il grado di personalizzazione dei moduli fotovoltaici rispetto al componente in cui avviene l'integrazione. Un grado di personalizzazione alto è stato individuato solo tra le facciate, mentre per le coperture troviamo un grado di personalizzazione più basso. In quest'ultimo componente infatti (le coperture) si utilizzano più spesso degli elementi multipli con dimensioni standard ripetute.

L'integrazione in diversi componenti edilizi in diversi contesti

La seconda analisi portata avanti tratta dell'integrazione di differenti componenti edilizi in differenti contesti. Il contesto urbano è quello più frequente in generale. Il dato interessante da analizzare sono le integrazioni negli ambienti urbani in cui si osserva una preferenza delle integrazioni sulle coperture maggiore in proporzione maggiore rispetto agli altri due contesti.

Grafico 1: Grado di personalizzazione per componenti edilizi.

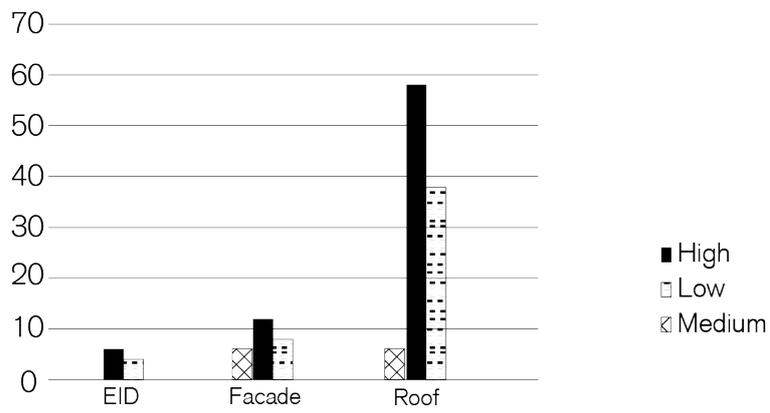
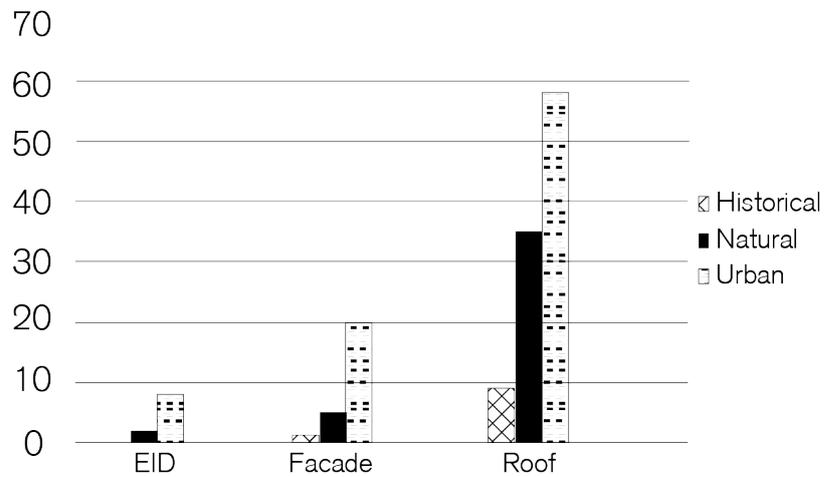


Grafico 2: Integrazione nei diversi contesti ambientali rispetto ai diversi componenti edilizi.



CONCLUSIONI DELLE ANALISI

L'analisi, incentrata sugli aspetti di integrazione della tecnologia nel progetto e nei processi di architettura, ha indagato il trasferimento tecnologico del BIPV nel settore dell'edilizia, illustrando i principali fattori responsabili del passaggio di percezione da "innovazione tecnologica" a "innovazione architettonica", proponendo di collocarsi come ponte tra la ricerca applicata e la pratica. Infatti, il fulcro fondamentale dell'analisi è stata l'identificazione dei fattori che descrivono il processo di trasferimento di una pratica in architettura: per trovarli si è cercato di fornire prove su alcuni principi guida riguardanti queste domande cruciali (concettuali e pratiche), fasi e tendenze dell'innovazione. L'approccio utilizzato ha permesso di allargare la visione del processo di trasferimento tecnologico in architettura alle ragioni del progetto di architettura più profonde come l'identità di un luogo e di una società tradotte negli archetipi formali.

Esaminando il contenuto del capitolo, si osserva che partendo da una revisione critica dell'evoluzione del BIPV nel corso degli ultimi due decenni, l'integrazione del fotovoltaico è oscillata tra tradizione e innovazione. L'utilizzo di alcuni principi costruttivi ha implementato e incoraggiato la divulgazione di invenzioni nel campo dell'edilizia e dell'architettura. La prospettiva di delineazione di scenari tecnologici relativi ai principali percorsi BIPV e dei processi innovativi in corso, ha permesso di descrivere i caratteri di riferimento attraverso i quali l'innovazione è avvenuta e sta ancora avvenendo. I risultati hanno evidenziato un elenco di diverse strategie e approcci progettuali che vanno da "innovazioni nascoste" a modi completamente nuovi di utilizzo nell'involucro, dove gli aspetti "architettonici" e "tipo morfologici" del prodotto fotovoltaico utilizzato sono considerati congiuntamente.

Tuttavia, dai risultati ottenuti analizzando gli "indicatori di innovazione" si osserva che la tendenza del BIPV è di simulare i materiali tradizionali. Infatti, per quanto riguarda i principi costruttivi, la maggior parte dei progetti di integrazione risultano come elementi multipli, e quindi utilizzati con il sistema a "facciata ventilata" che si utilizza con qualsiasi altro tipo di materiale per le chiusure verticali. Per le fasi di innovazione l'indicatore più individuato è la permanenza, e quindi la conservazione di una certa morfologia e forma. Mentre per gli archetipi di innovazione è l'energia che segue la forma. Si può dire che i risultati sono veritieri, poichè basandosi sul principio che la pratica stimola la ricerca, negli ultimi anni la ricerca si è concentrata a rendere la progettazione del fotovoltaico più simile possibile a quella di un materiale tradizionale. Gli output sono stati positivi, considerando che in vent'anni i progetti di BIPV sono cresciuti tantissimo. I sistemi costruttivi degli elementi multipli sono totalmente paragonabili a quelli di un materiale tradizionale: la maggior parte delle facciate BIPV è sostenuta da un sistema portante reticolare in acciaio. Non solo il sistema costruttivo, ma anche l'estetica e le problematiche energetiche sono state migliorate, Infatti, il colore sui pannelli è sempre meno impattante sulla resa dei moduli, i processi di produzione sono diventati più efficienti e allo stesso tempo anche il costo di

messa in opera per l'utente si è abbassato. Oltre a ciò, le soluzioni di colori e texture disponibili sono ad oggi davvero tantissime. L'integrazione sulla facciata senza seguire la miglior esposizione o inclinazione ha alcune conseguenze sulla preservazione dei moduli. Infatti, le zone di ombra sui pannelli possono provocare alcune differenze di tensione rovinando i sistemi elettrici. A questa problematica la ricerca ha elaborato diverse soluzioni, rendendo i moduli utilizzabili senza gravi conseguenze anche in questo tipo di integrazioni.

Come risultato delle analisi si può concludere che la fase attuale dell'uso del fotovoltaico integrato nell'involucro è la "normalizzazione" di esso all'interno del processo edilizio. Il passaggio da innovazione tecnologica ad innovazione architettonica sta facendo coincidere sempre più la tecnologia fotovoltaica ad un materiale tradizionale, e questo processo come risultato da la diffusione dell'utilizzo su ogni tipo di committenza. Dal punto di vista identificativo della tecnologia, non ci sono ancora grandi segnali di questo tipo: i progetti classificati in superamento dell'archetipo o forme libere di energia sono ancora molto poche, ma da questo punto di vista i fattori che contribuiscono a questo tipo di evoluzione sono molteplici. Analizzato il processo si può ipotizzare che prima di arrivare a classificare un numero di progetti consistenti come progetti che hanno superato l'archetipo, il BIPV dovrà essere totalmente integrato nel processo edilizio, e nella tradizione del costruire.

IL PROGETTO DI PREGASSONA

04

Il seguente capitolo, conclusivo di questo lavoro, analizza un progetto di fotovoltaico integrato realizzato a Pregassona in Ticino. L'analisi condotta su questo edificio utilizza i parametri dei capitoli precedenti, indagando quale siano le dinamiche di integrazione della tecnologia rispetto agli aspetti costruttivi e architettonici dell'edificio. Inoltre, grazie all'esperienza in SUPSI, è stata sfruttata l'opportunità di poter parlare con i principali attori del progetto, ed ascoltare quale sia stato l'approccio del progetto di architettura rispetto all'integrazione del BIPV nell'involucro.

Nella prima parte di questa sezione si analizzerà il progetto rispetto ai parametri di indicatori e contesti di innovazione, riportando disegni architettonici e dettagli costruttivi utili ad approfondire e comprendere in maniera esaustiva le tecnologie e l'approccio utilizzato in questo progetto. Oltre alle molteplici informazioni disponibili per questo progetto, la scelta di studiare questo edificio è dipesa dal fatto che i parametri individuati nell'edificio sono i parametri più frequenti nell'analisi del database. Per esempio, l'utilizzo di elementi multipli nell'involucro verticale e la tendenza ad utilizzare la tecnologia su archetipi tradizionali (permanenza dell'archetipo). Queste caratteristiche hanno reso l'edificio polifunzionale di Pregassona un perfetto esempio per raggiungere l'obiettivo dell'analisi: testare il modello metodologico su un caso concreto e mettendolo in relazione al reale processo progettuale e realizzato, oltre che al rapporto diretto con gli stakeholder coinvolti.

Nel sotto capitolo successivo invece si riportano le risposte delle interviste effettuate. Le domande poste agli attori che hanno preso parte al processo hanno avuto l'obiettivo di indagare quale sia stato il loro ruolo all'interno del processo costruttivo e quali siano state le impressioni nel lavorare con il fotovoltaico integrato.

04.1 Il progetto

Il progetto nasce per volontà della Città di Lugano, il centro polifunzionale di Pregassona è un'opera molto importante per la città in quanto al suo interno ospiterà una residenza medicalizzata per persone anziane con 114 posti letto; un centro diurno per persone affette da demenza senile; la nuova sede del Servizio di Accompagnamento Sociale comunale (SAS) ed un nido per l'infanzia.

I lavori per la realizzazione del centro sono iniziati il 4 dicembre 2017, e solo nel marzo 2019 il Municipio ha preso la decisione di sostituire le lastre di rivestimento delle facciate in fibro-cemento a favore di moduli fotovoltaici. Questa decisione ha reso l'edificio pubblico di Pregassona il più grande impianto fotovoltaico integrato sulle facciate, con una potenza totale dell'impianto di 173 kWp.

La planimetria ha una forma a "ferro di cavallo", che permette di poter creare una corte esterna a servizio dell'edificio. Nei piani primo e secondo si troveranno le residenze per gli anziani mentre il piano terra sarà destinato all'asilo nido e ad uno spazio allestito a cucina e refettorio.

Foto scattata a Pregassona il 16 luglio 2021, in occasione di una visita al cantiere quasi completato dell'edificio polifunzionale.





Il progetto rappresenta un primato ticines in quanto il nuovo edificio polifunzionale di Pregassona diventerà l'edificio pubblico con il più grande impianto fotovoltaico integrato in facciata per una potenza installata di circa 170 kWp pari ad una superficie di oltre 1600 m².

*Fonte delle informazioni:
opuscolo informativo della
città di Lugano sul progetto a
Pregassona.*

Il Municipio ha scelto di cambiare il concetto di facciata, passando da un classico rivestimento in lastre in fibro-cemento ad uno con superficie interamente fotovoltaica, senza rinunciare al linguaggio architettonico grazie a dei moduli innovativi in vetro colorato prodotti su misura da Sunage SA. Questa evoluzione è stata possibile grazie ad una collaborazione sinergica fra tutte le parti coinvolte nel progetto che hanno creduto nella validità di una variante "solare" per rendere l'edificio auto-produttore di energia solare.

La finitura dei pannelli fotovoltaico è di colore grigio satinata ed è ottenuta grazie alla stampa digitale di una texture sul vetro frontale. Questo tipo di colorazione è stata studiata per ottenere una percezione cromatica uniforme della facciata, la completa dissimulazione delle celle solari e un buon rendimento energetico.

moduli fotovoltaici

806

kWp

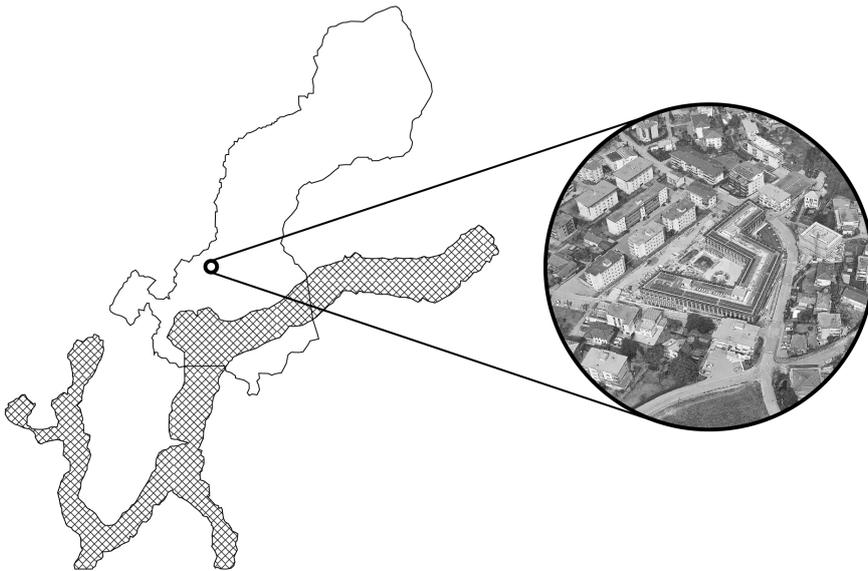
170

m² di facciata fotovoltaiche

1600

UBICAZIONE

- territorio ticinese
- ▨ lago di Lugano



COMMITTENTI

- Città di Lugano Edilizia pubblica
- Lugano Istituti Sociali (IST)

IMPRESA GENERALE DI COSTRUZIONE

- Consorzio Garzoni-RdE, Lugano

PROGETTO

- Studio d'architettura Mario Campi e Associati, Lugano
- Studio d'architettura Galgano, Lugano

PARTNER TECNICI

- Sunage SA, Chiasso
- Alsosis SA, Mendrisio

PARTNER DI SUPPORTO TECNICO-SCIENTIFICO PER MONITORAGGIO DELL'OPERA

- SUPSI; responsabile del progetto: Pierluigi Bonomo

LA STORIA DEL PROGETTO

2004

La nuova residenza anziani e centro polifunzionale era un progetto del Comune di Pregassona che, in seguito alle aggregazioni, è stato ripreso dalla Città di Lugano nel 2004.

2009

Nel 2008 è stato aperto un concorso di architettura, a cui hanno partecipato 38 architetti professionisti, vinto nel 2009 dal progetto Twins, dello Studio d'architettura Mario Campi e Associati di Lugano.

2015

Nel 2015 è stato indetto il concorso per l'assegnazione delle opere di impresa generale, attribuito al consorzio Garzoni-RdE nel 2016.

2017

I lavori, attualmente in corso, hanno avuto inizio nel dicembre 2017.

2019

Nel 2019 viene presa la decisione di sostituire i pannelli di fibro cemento con pannelli fotovoltaici integrati.



04.2 L'analisi del progetto

Per coerenza rispetto all'analisi dei casi di studio sul database di progetti, su questo edificio si applicano gli stessi parametri che sono stati applicati al database. In questo caso, in quanto si tratta di un solo progetto, si analizza l'edificio per ogni indicatore di innovazione e per ogni contesto di innovazione. I risultati delle analisi sono riassunti brevemente nella tabella riportata qui di seguito, mentre i commenti con i disegni allegati sono riportati nelle pagine successive.

In generale ciò che si può affermare rispetto ai risultati dell'edificio di Pregassona è che i parametri in cui rientra sono gli stessi parametri che nei risultati del database sono risultati più frequenti. L'edificio polifunzionale rappresenta un modello di ciò che l'applicazione del fotovoltaico è, e potrà essere negli anni a venire. Infatti, essendo un progetto commissionato da un'ente pubblico, è stato concepito come un "progetto pilota" ovvero come un progetto che possa essere di esempio a opere future di privati cittadini o qualsiasi tipo di committenza.

Allo stesso tempo, è necessario sottolineare che la quantità di soldi investiti per questa opera pubblica è piuttosto alta ed infatti rispecchia perfettamente i progetti pubblici o di grandi aziende, mentre potrebbe non rispecchiare la tendenza dei progetti commissionati dai soggetti privati, anche se si pone come esempio da seguire per gli anni futuri, cercando di abbattere barriere all'utilizzo del fotovoltaico, e di aprire nuovi interrogativi e dubbi che dovranno essere superati sia da parte dei professionisti e sia dal punto di vista legale e normativo.

Schema sulla destra di INDICATORI DI INNOVAZIONE e CONTESTI DI INNOVAZIONE: indicano i parametri nei quali è stato classificato il progetto di Pregassona.

INDICATORI DI INNOVAZIONE

PRINCIPI COSTRUTTIVI	elementi unitari	elementi multipli	
FASI DI INNOVAZIONE	mimesi	permanenza	superamento dell'archetipo
ARCHETIPI DI INNOVAZIONE	l'energia segue la forma	la forma segue l'energia	forme libere di energia

CONTESTI DI INNOVAZIONE

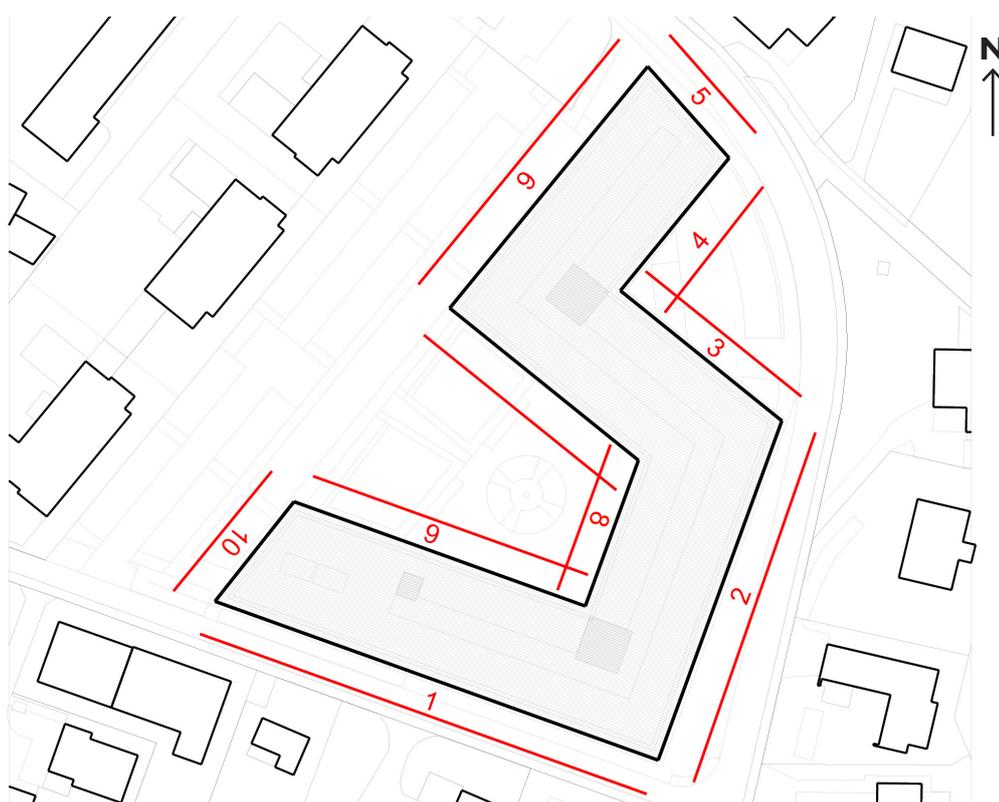
COMPONENTE DELL'EDIFICIO	facciata	copertura	elementi esterni integrati
COMMITTENZA	pubblica	azienda privata	utenti privati
LIVELLO DI PERSONALIZZAZIONE	alto	medio	basso
INTERVENTO EDILIZIO	nuova costruzione	ristrutturazione	
AMBIENTE CIRCOSTANTE	naturale	urbano	storico

ANALISI DEL PRINCIPIO COSTRUTTIVO: ELEMENTO MULTIPLO

Il progetto di Pregassona è chiaramente caratterizzato da elementi multipli. Gli elementi multipli si ripetono lungo le facciate con formati diversi che si adattano alle diverse configurazioni. Nel caso specifico, la decisione di utilizzare i pannelli fotovoltaici nelle facciate è stata una scelta postuma alla progettazione della facciata: i pannelli quindi riprendono le forme dei pannelli in fibrocemento precedentemente ideati per le facciate.

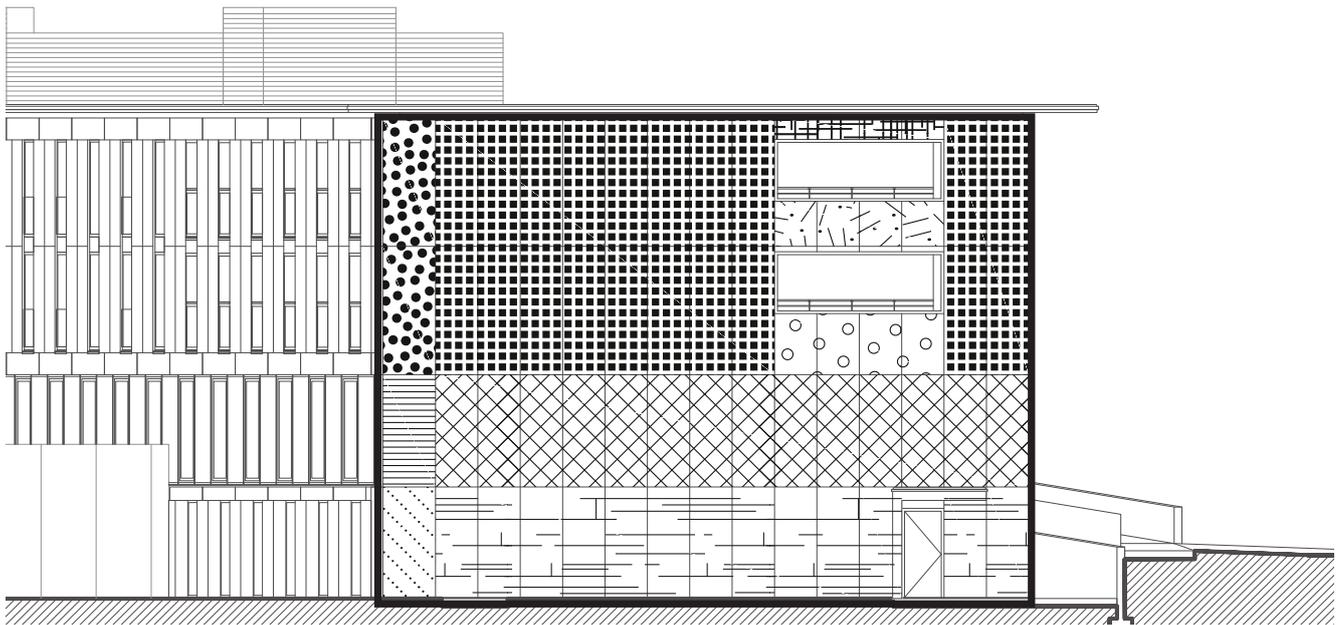
In totale, i moduli delle facciate che sono stati fabbricati per questo progetto sono 34. Si può affermare quindi che il livello di personalizzazione BIPV è medio: la forma è rettangolare per tutti i moduli e la colorazione dei moduli è la stessa per tutti i pannelli utilizzati nel progetto.

Assumendo l'edificio una forma a “ferro di cavallo”, ed essendo che tutte le facciate sono state interessate all'intervento di applicazione di pannelli fotovoltaici attivi, ogni facciata ha una configurazione differente degli elementi multipli. In questo elaborato si riporta ad esempio la configurazione degli elementi multipli della “facciata 10”.



A sinistra si riporta l'immagine dell'edificio con la numerazione delle facciate interessate all'intervento di integrazione del fotovoltaico.

Facciata 10



La facciata 10 ha un orientamento ottimale per la produzione fotovoltaica: è infatti rivolta verso sud e ha un irraggiamento che dura tutto il giorno. Non sono presenti “dummy” su questa facciata, i dummy sono dei pannelli che imitano l'estetica ma non sono energeticamente attivi. In totale la superficie ricoperta dagli elementi multipli su questo prospetto è di 207 m² e i moduli fotovoltaici sono in totale 63.

Le tipologie di moduli su questa facciata sono 7, con dimensioni differenti mostrate di seguito.

2 x		1,43 x 3,52 m;	20 x		1,15 x 3,52 m;	4 x		1,15 x 0,59 m;	4 x		1,15 x 1,67 m;	4 x		1,15 x 0,59 m;
1 x		1,43 x 0,8 m;	14 x		1,15 x 3,08 m;	1 x		1,15 x 3,03 m;	1 x		1,43 x 3,03 m;			

Stratigrafia dell'involucro edilizio: principio costruttivo

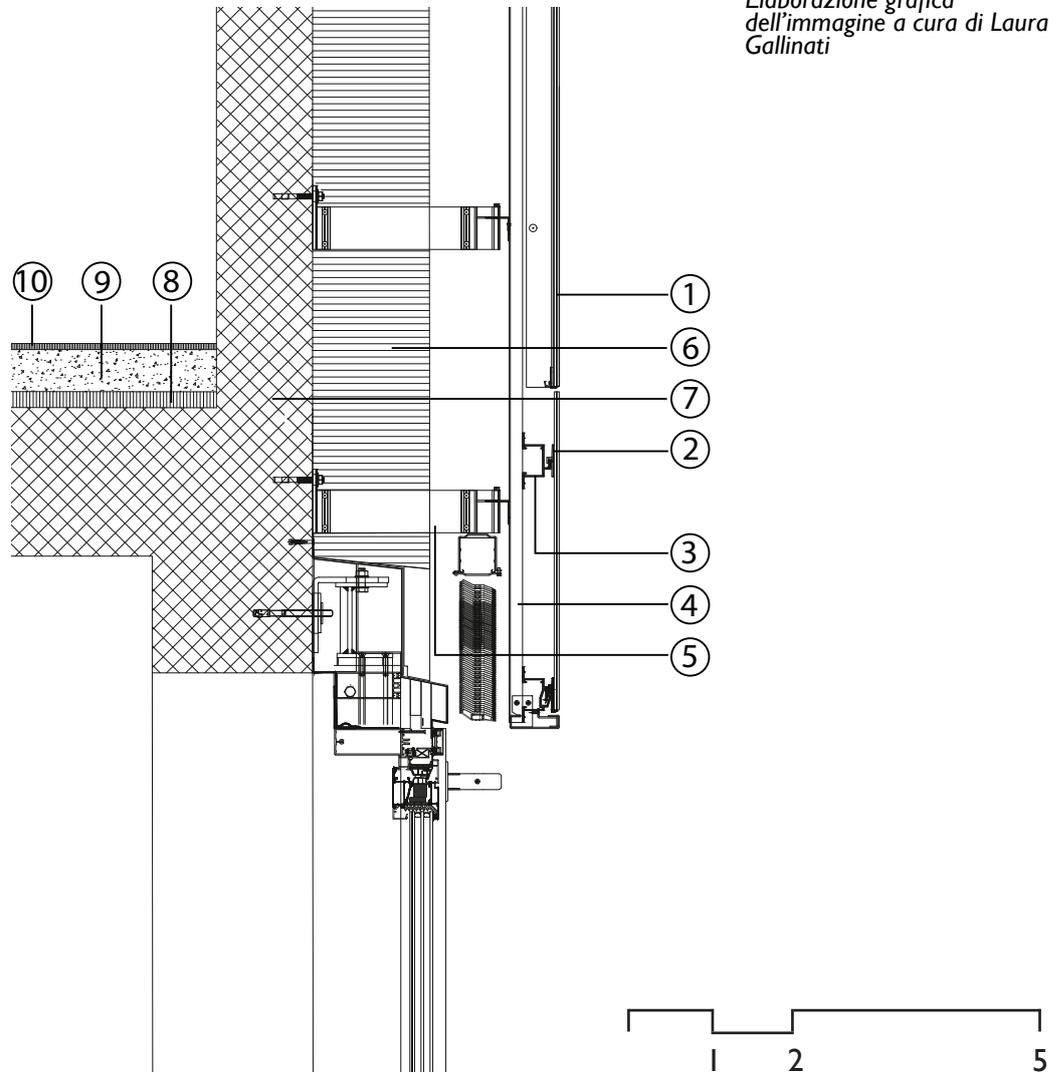
Gli elementi multipli compongono la facciata sorretti da un sistema strutturale del tutto simile a quello di una facciata ventilata. La stratigrafia infatti partendo dall'interno si compone della struttura portante dell'edificio in cemento armato, dallo strato isolante impermeabilizzato verso sulla superficie esterna e poi dal sistema portante dei pannelli. I pannelli sono infatti sorretti da un'intelaiatura in acciaio costituita da parti verticali ed orizzontali alle quali sono ancorati i moduli fotovoltaici. Abbiamo osservato nel capitolo 3, che gli elementi multipli in facciata sono i più utilizzati.

Questo sistema costruttivo presenta molti vantaggi:

- permette di integrare i pannelli fotovoltaici in una fase avanzata del progetto e del cantiere, come nel caso del progetto di Pregassona;
- è un sistema costruttivo conosciuto da imprese ed architetti, supera perciò la barriera della scarsa conoscenza della tecnica;
- permette di poter sostituire i moduli in qualunque momento e fare manutenzione dell'impianto senza costi elevati.

Durante il mio periodo di collaborazione con il Dipartimento di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito a Mendrisio, ho avuto la possibilità di ridisegnare i dettagli costruttivi dell'edificio di Pregassona. Il lavoro di ridisegno svolto è avvenuto per la pubblicazione dei disegni sul sito solarchitecture.ch, gestito da SUPSI e da altre partnership (tra cui l'ETH, Università pubblica di Zurigo). Durante la mia collaborazione mi sono occupata di ridisegnare alcuni dettagli di progetti BIPV, su layout forniti dai colleghi dell' e sul quale ho lavorato con ridisegni di dettagli, traduzioni e pubblicazioni di articoli. Nelle pagine successive sono riportati i disegni da me realizzati, e alcune foto che ho scattato durante la visita al cantiere di Pregassona in data 16 luglio 2021.

Elaborazione grafica
dell'immagine a cura di Laura
Gallinati



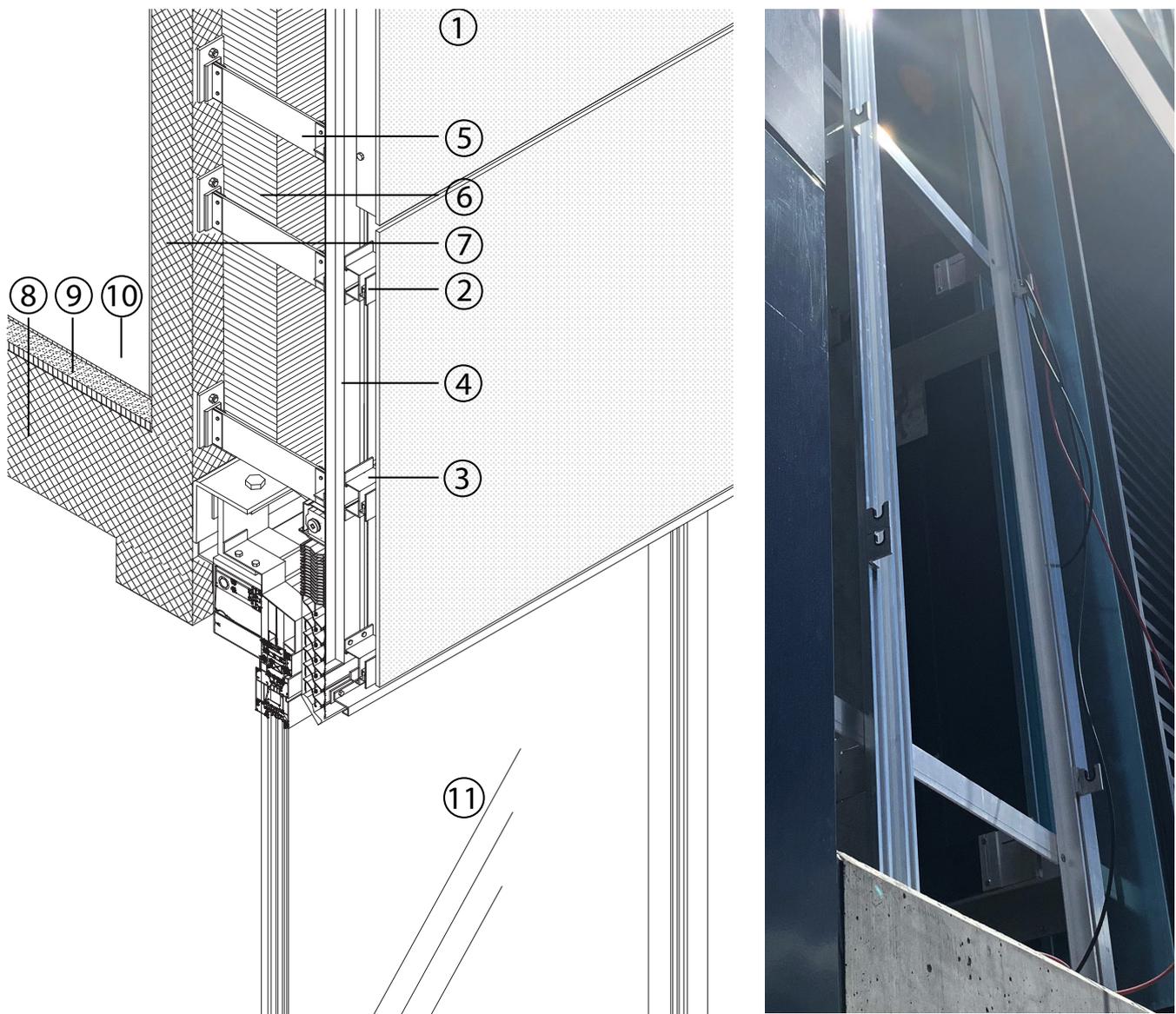
- | | |
|---|---|
| ① Modulo fotovoltaico con vetro frontale colorato con pattern grigio chiaro. | ⑥ Isolante, 20 cm. |
| ② Sistema di aggancio incollato al modulo fotovoltaico. | ⑦ Struttura portante in cemento armato. |
| ③ Gancio tra il sistema attaccato al pannello e la struttura portante verticale dei pannelli. | ⑧ Isolante termoacustico, 4 cm. |
| ④ Struttura portante verticale dei pannelli. | ⑨ Massetto, 8 cm. |
| ⑤ Struttura portante orizzontale dei pannelli. | ⑩ Pavimentazione, 2 cm. |



A sinistra: facciata 10, elementi multipli in facciata.

Sopra: fotografia del sistema reticolare portante della facciata BIPV.

A destra: assonometria del dettaglio costruttivo delle facciate e fotografia della stratigrafia dei pannelli con elementi costruttivi reticolari.



- ① Modulo fotovoltaico con vetro frontale colorato con pattern grigio chiaro.
- ② Sistema di aggancio incollato al modulo fotovoltaico.
- ③ Gancio tra il sistema attaccato al pannello e la struttura portante verticale dei pannelli.
- ④ Struttura portante verticale dei pannelli.
- ⑤ Struttura portante orizzontale dei pannelli.
- ⑥ Isolante, 20 cm.
- ⑦ Struttura portante in cemento armato.
- ⑧ Isolante termoacustico, 4 cm.
- ⑨ Massetto, 8 cm.
- ⑩ Pavimentazione, 2 cm.

ANALISI DELLA FASE DI INNOVAZIONE: LA PERMANENZA

La fase di innovazione nella quale è stato individuato il progetto di Pregassona è la fase della permanenza. La permanenza, come è stato già ampiamente spiegato nel capitolo 3, si riferisce soprattutto al prodotto fotovoltaico. In questo caso il modulo fotovoltaico scelto per il progetto tenta di dissimulare le celle fotovoltaiche senza mostrarle, ma non imita un particolare materiale e non può quindi essere inteso come progetto di mimesi. Inoltre come è stato mostrato nei disegni delle pagine precedenti anche il sistema costruttivo utilizzato è tipico dei sistemi costruttivi tradizionali delle facciate ventilate.

In generale, ad un occhio non esperto, i pannelli di rivestimento non sono individuabili come pannelli fotovoltaici poichè le celle non sono assolutamente visibili. Nelle pagine successive si approfondisce l'aspetto tecnico dei pannelli fotovoltaici.



A sinistra: fotografia dei moduli fotovoltaici scelti per il progetto di Pregassona.

A destra: fotografia dell'edificio polifunzionale di Pregassona, fronte verso Sud.



Approfondimento sui moduli fotovoltaici

I moduli fotovoltaici sono prodotti dall'azienda Sunage, fondata a Chiasso, in Canton Ticino (Svizzera) nel 2007. Inizialmente la loro produzione si è concentrata nel BAPV, ovvero nei moduli addizionati alla pelle dell'edificio. Nel 2015 l'azienda ha iniziato a produrre anche fotovoltaici colorati per rispondere alla domanda di pannelli sempre più soddisfacenti dal punto di vista estetico, creando il brand "Suncol Glass". La linea di produzione che ebbe successo, nel 2017 inizia ad essere utilizzata non solo per il fotovoltaico applicato all'edificio, ma anche per il fotovoltaico integrato BIPV.

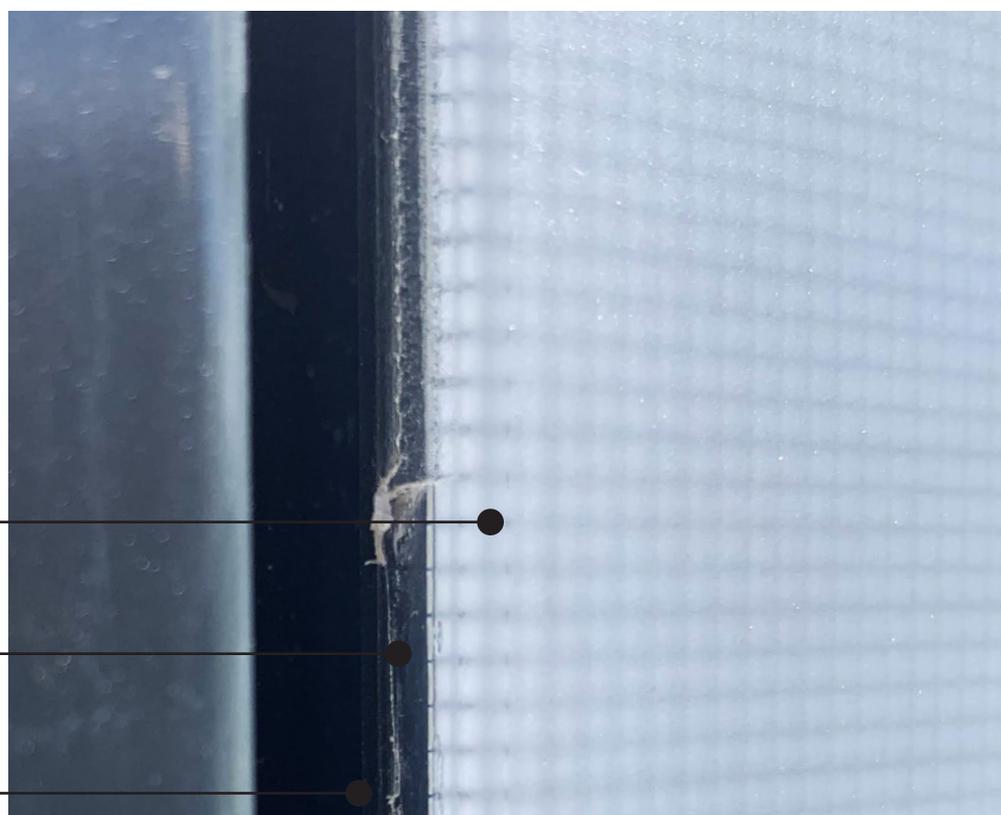
Nel progetto di Pregassona i fotovoltaici scelti sono stati proprio quelli della linea Suncol. Rispetto a questa linea l'azienda permette di scegliere la personalizzazione del modulo rispetto al colore (sono presenti diversi colori e diverse tonalità di colore), la finitura (ovvero la tipologia di vetro più adatta all'elemento edilizio), e la progettazione del design, ovvero la possibilità di riprodurre un'immagine o una texture sul vetro frontale.

I moduli di Pregassona hanno moduli di diverse dimensioni (già mostrate nell'analisi del principio costruttivo). Il vetro frontale ha una finitura di tipo satinato. La texture scelta per i pannelli, rende l'estetica dei pannelli di colore chiaro come è stata richiesta dalla committenza. Si tratta di una texture fitta che permette di coprire perfettamente tutte le celle fotovoltaiche. nella pagina a fianco si riportano le fotografie che mostrano la texture del modulo fotovoltaico e la stratigrafia.



Immagine sopra: fotografia nella quale si può osservare la texture utilizzata per il modulo fotovoltaico scelto.

Immagine a destra: fotografia della stratigrafia del pannello fotovoltaico, composta dai due vetri e lo strato intermedio.



Vetro frontale satinato.

Strato intermedio di collante, tra strato colorato con pattern e i due vetri che compongono il modulo fotovoltaico.

Vetro posteriore.

ANALISI DEGLI ARCHETIPI DI INNOVAZIONE: L'ENERGIA SEGUE LA FORMA

A Pregassona, come è stato più volte sottolineato nelle pagine precedenti, la decisione di utilizzare del fotovoltaico integrato è avvenuta in fase postuma al progetto esecutivo dell'edificio. In questo caso quindi, ci si trova davanti senza dubbio ad una categorizzazione di "energia segue la forma", ovvero si può affermare che l'aspetto energetico non ha influenzato la forma dell'edificio, ed il progetto del fotovoltaico integrato ha dovuto adottarsi alle forme del progetto.

Così come nei risultati dei capitoli precedenti, il progetto di Pregassona si ritrova nei risultati ottenuti dall'analisi dei casi di studio del capitolo 3, in cui la tendenza della progettazione BIPV è chiaramente ancora orientata ad utilizzare il fotovoltaico integrato come un rivestimento tradizionale. Inoltre, osservando l'orientamento della planimetria del progetto di Pregassona si può notare come i fronti siano stati progettati del tutto indipendentemente dal potenziale energetico solare di ogni orientamento.

Per calcolare il potenziale solare delle facciate, il Cantone Ticino ha sviluppato una piattaforma web, che permette di quantificare il potenziale di irraggiamento solare annuo al suolo per metro quadro. Questo varia in base all'esposizione, all'altitudine, alle ore di insolazione, e al clima locale. L'incertezza media dei valori di irraggiamento è valutata intorno al 10% su terreno aperto e pianeggiante, a causa della variabilità meteorologica⁹.

⁹: <https://www.oasi.ti.ch/web/energia/mappatura-solare.html>

Nelle pagine successive, si confrontano i potenziale solari trovati sul Catasto Solare del Ticino con le superfici totali di fotovoltaico presenti su ogni facciata. Confrontando questi dati si può osservare se l'integrazione del fotovoltaico sia avvenuta secondo un ragionamento di potenziale energetico o ha solo seguito le forme esistenti del progetto.

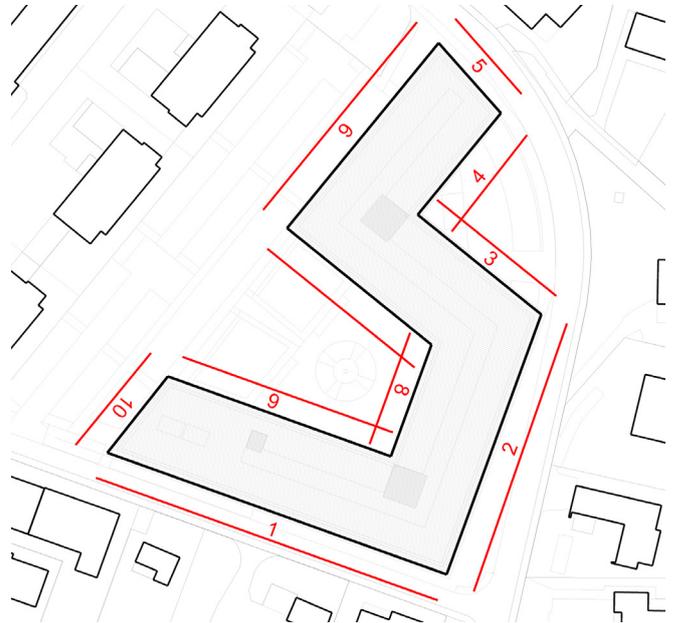


Nella fotografia scattata in data 16 luglio, si osserva la "facciata 9" di moduli BIPV. Nell'orario in cui è stata scattata la fotografia i moduli si trovavano completamente all'ombra.

Il progetto dell'energia che segue la forma

Nell'immagine a destra è riportato il disegno nel quale si può osservare l'orientamento di ogni fronte e la legenda del nome delle facciate che di seguito saranno riportate con i relativi disegni di progetto, e l'area in metri quadri del fotovoltaico.

Nella pagina accanto, si incrociano i dati energetici e quelli geometrici di ogni facciata per mostrare se ci siano ragionamenti relativi alla quantità di fotovoltaico installato rispetto al potenziale energetico di ogni fronte.



Osservando i dati riportati, si deduce che effettivamente nelle facciate con maggiore insolazione i metri quadri di fotovoltaico sono in quantità sensibilmente minore. Questo è dimostrazione del fatto che anche se l'energia segue la forma e non influenza la geometria del progetto, è impossibile slegare completamente l'utilizzo del fotovoltaico integrato dal suo aspetto energetico. L'approccio di utilizzare l'archetipo tradizionale per un progetto solare può essere funzionale da un punto di vista dell'accettazione del fotovoltaico importante per sviluppare un buon mercato del BIPV, ma dal punto di vista dei costi e dell'efficienza dell'impianto (ovvero un ritorno economico) è fondamentale calcolare l'aspetto energetico. SUPSI investigherà questi aspetti nel progetto di ricerca "Vero-EST" finanziato dal FER del Canton Ticino.

In un fronte con un impianto integrato ed energeticamente attivo valutare dove e come integrare i pannelli fotovoltaici può essere un punto di svolta per aumentare la redditività economica ed energetica del BIPV, e aumentare quindi l'accettazione della tecnologia tra gli utilizzatori. Inoltre, anche orientare e progettare i fronti in base all'impianto energetico può portare all'utilizzo di nuove forme archetipiche e dare un carattere riconoscibile ed apprezzabile della tecnologia fotovoltaica nel progetto e nell'estetica di ogni edificio, nei progetti di nuova costruzione così come i progetti di rinnovamento.

	orientamento	azimut	insolazione	superficie attiva
Facciata 1	sud	20°	1 177 kWh/m ²	254 m ²
Facciata 2	sud est	-70°	991 kWh/m ²	190 m ²
Facciata 3	nord	-141°	488 kWh/m ²	113 m ²
Facciata 4	sud est	-51°	1088 kWh/m ²	97 m ²
Facciata 5	nord	-131°	533 kWh/m ²	164 m ²
Facciata 6	nord ovest	129°	571 kWh/m ²	177 m ²
Facciata 7	sud ovest	39°	1137 kWh/m ²	140 m ²
Facciata 8	sud	110°	713 kWh/m ²	97 m ²
Facciata 9	nord	-160°	389 kWh/m ²	177 m ²
Facciata 10	ovest	128°	578 kWh/m ²	207 m ²

A sinistra: legenda delle denominazione delle facciate.

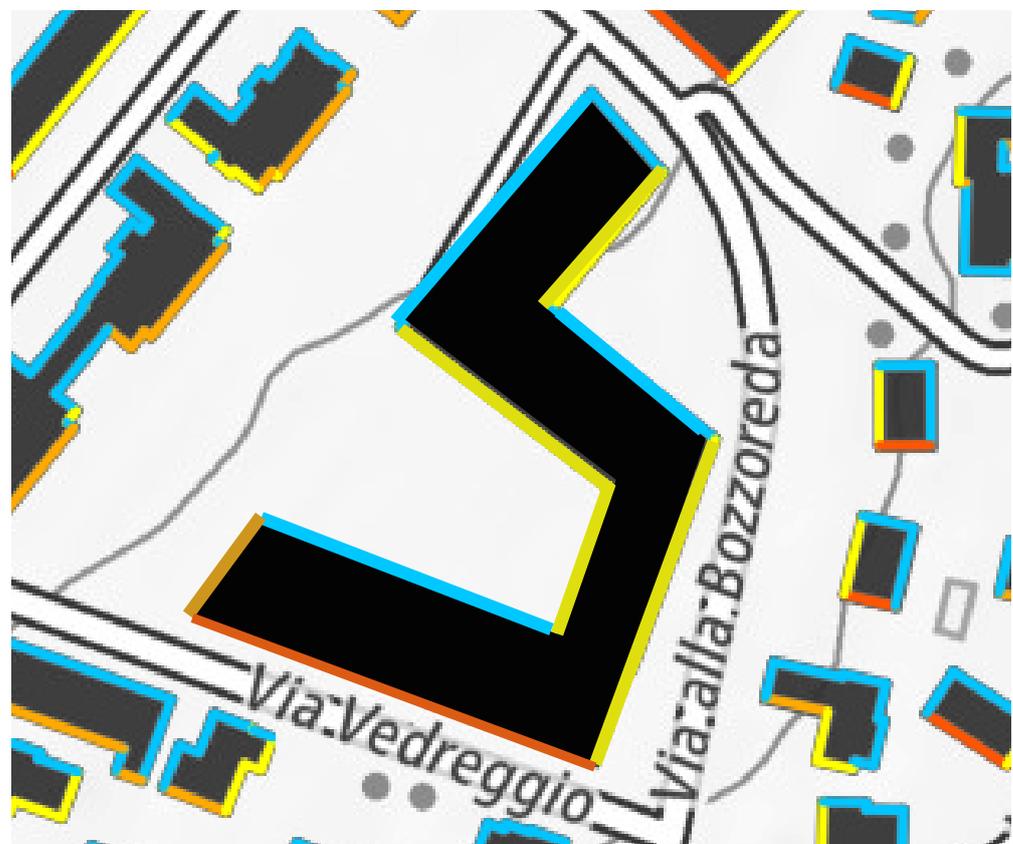
Fonte: SUNAGE

Sopra: dati sulle facciate

Fonte: SUNAGE

A destra: Potenziale solare delle facciate di Pregassona.

Fonte: <https://www.oasi.ti.ch/web/energia/mappatura-solare.html>



Scarso Ottimo

04.3 Il processo di costruzione e le interviste

In questo capitolo sono descritte le fasi relative al processo di integrazione del fotovoltaico nel progetto di Pregassona. Il progetto del fotovoltaico è stato seguito dal Comune di Lugano, il quale ha commissionato il progetto, dall'Istituto Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito che ha effettuato le analisi solari sui fronti dell'edificio, da SUNAGE che ha prodotto i moduli fotovoltaici di diverse dimensioni e infine da Alsolis, che ha progettato il sistema strutturale dei pannelli fotovoltaici.

Le fasi sono state individuate attraverso un processo logico che inizia dallo sviluppo dell'idea di utilizzo del BIPV, passando per le fasi di consulenza con i professionisti, per poi arrivare alla produzione dei moduli fotovoltaici e alla loro messa in opera.

Il processo è stato diviso in 5 fasi:

1. **Processo decisionale del BIPV:** in questa fase sono state indagate le motivazioni che hanno spinto il progettista ed il comune di Lugano a sostituire i pannelli di fibrocemento con i pannelli di fotovoltaico integrato.
2. **Sviluppo del progetto BIPV:** durante questo step è stato configurato il prodotto BIPV, ciò implica scegliere e individuare le priorità estetiche, i costi sostenibili per la committenza, il tipo di sistema fotovoltaico più adatto all'edificio e altre decisioni fondamentali per lo sviluppo del processo.
3. **Risultati ed elaborazione delle analisi:** durante il processo SUPSI si è occupata di svolgere le analisi solari sull'edificio, e di progettare l'impianto di monitoraggio energetico che è stato aggiunto all'impianto per valutare l'efficienza dell'impianto, Le analisi preliminare sono state utilizzate per scegliere i moduli e fare un'indagine della convenienza dell'intervento.
4. **Produzione dei moduli fotovoltaici:** prima della fase finale di messa in opera i diversi moduli sono stati prodotti con dimensioni differenti, dall'azienda SUNAGE.
5. **Messa in opera:** infine nella fase finale, forse la più delicata dell'intero processo, i pannelli sono stati posati sulle facciate. A riguardo questa fase sono stati intervistati gli attori che ne hanno preso parte, i quali hanno dato diversi pareri e consigli su come non rischiare di sbagliare nella posa dei pannelli sull'edificio.

Per ogni fase del processo è stata individuata l'azienda o l'ente "protagonista" e ovvero che si è occupato della specifica fase di progetto, e sono state quindi formulate delle domande. Nello schema in basso sono mostrate le fasi e le relative interviste.

FASI	INTERVISTATO
1 / Processo decisionale del BIPV	Città di Lugano
2 / Sviluppo del progetto BIPV	Città di Lugano
3 / Risultati ed elaborazione delle analisi	ISAAC SUPSI
4 / Produzione dei moduli fotovoltaici	SUNAGE
5 / Messa in opera	ALSOLIS

FASE 1: Processo decisionale del BIPV

Per la fase 1 e 2 è stato intervistato **Marco Mattei - Architetto STS della Città di Lugano**. Infatti, la città di Lugano è stata protagonista nel scegliere di cambiare sistema di rivestimento ed utilizzare un sistema fotovoltaico. Lo stesso per la fase 2, in cui si è trattato di decidere l'estetica e la tipologia del prodotto.

Da chi e come è nata l'idea di utilizzare il BIPV nel progetto?

Il 16 ottobre 2018, in occasione di una serata organizzata alla SUPSI ("costruire un uomo nuovo – l'edificio sostenibile è quello non costruito") l'architetto Emasnuele Sauerwein ha presentato il progetto di un edificio completamente autonomo che tra le altre cose ha anche tutte le facciate rivestite con pannelli fotovoltaici (edificio a Brütten, nel canton Zurigo). Mi ha colpito il fatto che gli stessi hanno un risultato estetico molto simile a quello ottenuto con rivestimento tipo Eternit. Mi sono quindi riproposto di chiedere a AIL (Moggi) di valutare un loro eventuale interesse a realizzare la testata ovest con questo sistema anziché con lamiera come previsto nel progetto e da lì è partito il tutto. Va precisato che senza la piena collaborazione di progettisti (architetto, specialista impianti elettrici, ...), dell'impresa generale (consorzio Garzoni-RdE) con relativi subappaltatori e non da ultimo della mia direzione e del Municipio non sarebbe stato possibile concretizzare il tutto in quanto il cantiere era già avviato e impostato con rivestimento in lastre in fibrocemento.

FASE 2: Sviluppo del progetto BIPV

Quali sono stati i principali motivi che vi hanno portato all'utilizzo di questa tecnologia?

La volontà iniziale è stata quella di eseguire qualche cosa che fosse anche a favore dell'uso di tecnologie ecologiche. Il fatto di poter utilizzare materiali esteticamente estremamente concorrenziali con quelli tradizionali ha senz'altro influito sulle scelte fatte.

Quali sono state le priorità (estetica, rendimento, processo, costi, ...) nel processo decisionale su quale tipo di sistema fotovoltaico inserire nell'edificio?

Lo scopo principale di questo progetto ritengo sia diventato quello di permettere alla Città di Lugano di raccogliere sufficienti informazioni sulla sostenibilità tecnica ed economica delle facciate fotovoltaiche, così da poterne valutare la realizzazione anche per altri progetti. Faranno parte di queste analisi gli aspetti economici, quelli relativi alla resa, ma anche quelli più tecnici relativi alla progettazione, realizzazione, e in seguito manutenzione dell'impianto.

Si può individuare una particolare esperienza che vi ha guidato nella progettazione della facciata del progetto di Pregassona?

Di sicuro, il fatto che il progetto originale prevedeva già delle facciate ventilate che di loro sono molto simili a quanto poi eseguito anche dal profilo tecnico-costruttivo, ha facilitato parecchio l'orientamento delle scelte fatte anche perché, come già sopra indicato, il progetto era già in uno stadio avanzato di progettazione ed esecuzione.

Che differenze ha comportato rispetto alla progettazione di un rivestimento convenzionale?

Seppur molto simili nel loro approccio, avendo previsto un rivestimento in fibrocemento, abbiamo dovuto rivedere tutti i dettagli, i raccordi con i serramenti, gli angoli, le suddivisioni degli elementi e parecchio altro. Dal punto di vista tecnico, inoltre, l'esigenza di collegamenti di tutti gli elementi di facciata con gli ottimizzatori posti sulla copertura ha richiesto modifiche progettuali di un certo peso.

Avete riscontrato vantaggi e/o svantaggi?

Le scelte del colore sono state parecchio limitate per non compromettere troppo la resa. Il fatto che si tratta di una tecnologia non ancora sviluppata e consolidata ci ha creato non pochi problemi (soprattutto all'IG). Il coordinamento con gli altri lavori è stato sicuramente più impegnativo. Abbiamo inoltre avuto qualche problema con i fissaggi del rivestimento alla sottostruttura in calcestruzzo (non ancora del tutto risolti). Un numero significativo di lastre ha poi richiesto un intervento di pulizia particolare e/o di sostituzione per macchie o difetti dovuti a cause non ben identificate. Per quanto attiene ai vantaggi non siamo ancora in grado di apprezzarli appieno non essendo l'impianto ancora funzionante. Il risultato estetico nel suo insieme soddisfa tutti e confidiamo comunque di poter arrivare alla conclusione dei lavori nei termini previsti e, tra qualche tempo, poter pensare di aver fatto qualche cosa di interessante e utile per la Città, per la struttura, e per chi vorrà intraprendere scelte simili.

FASE 3: Risultati ed elaborazione delle analisi

Durante questa fase il team dell'ISAAC di SUPSI (Istituto Sostenibilità Applicata all'ambiente Costruito) ha sviluppato il piano per monitorare l'efficienza energetica dell'edificio di Pregassona. Ha risposto alle domande dell'intervista Pierluigi Bonomo, responsabile del team e corelatore di questo lavoro di ricerca.

Che tipo di analisi sono in programma di essere svolte sull'edificio?

Nel Centro Polis di Pregassona la Città di Lugano ha scelto di lanciare una sfida dimostrativa passando da un classico rivestimento di facciata ad una superficie interamente fotovoltaica, senza rinunciare al linguaggio architettonico prescelto grazie alla possibilità di integrare in un sistema di facciata ventilata delle lastre in vetro fotovoltaico colorato prodotte su misura dalla Sunage SA e messi in opera da Alsolis SA. Con una potenza installata di circa 170 kWp pari ad una superficie di oltre 1'600 mq di vetri fotovoltaici, disposti su tutte le facciate del complesso sui variegati orientamenti ed esposizioni, l'edificio vanta il primato cantonale. Con un trattamento satinato del vetro, una tinta colore grigio omogeneo grazie alla stampa digitale di una texture, il rivestimento è stato studiato per ottenere una percezione cromatica uniforme della facciata, con la completa scomparsa visiva delle celle solari.

Il team Involucro Innovativo della SUPSI segue il progetto con il supporto del Fondo Energie Rinnovabili (FER) e in collaborazione con la Città di Lugano, Alsolis SA e Sunage SA. La SUPSI ha come obiettivo lo studio e il monitoraggio dell'edificio per lo sviluppo di un modello operativo replicabile finalizzato a promuovere l'implementazione sul territorio. I risultati raccolti nel progetto "Verso-EST" costituiranno un riferimento per la definizione degli aspetti di fattibilità tecnica, economica ed energetica e serviranno anche a sensibilizzare e informare i progettisti e gli attori del processo edilizio, sulla base di un caso reale. Ulteriori approfondimenti e aggiornamenti su esempi realizzati in Svizzera sono presenti sul nuovo sito www.solararchitecture.ch così come su quelli di alcuni progetti europei sul BIPV (www.bipvboost.ch) o progetti internazionali (Task 15 International Energy Agency) in cui la SUPSI è attiva.

Quali benefici porteranno al settore?

Si spera che questo sforzo congiunto tra Municipalità, ricerca e industria in Ticino possa dare il via ad un crescente interesse per la realizzazione su vasta scala di involucri solari in grado di mettere in atto una produzione elettrica rinnovabile decentralizzata di elevata qualità architettonica.

FASE 4: Produzione dei moduli fotovoltaici

In questa fase i protagonisti sono stati i professionisti di SUNAGE SA, che progettano e producono soluzioni fotovoltaiche da ormai un decennio. Il professionista intervistato è stato **Gazmed Luzi**.

Quali sono state le sfide tecniche di questa opera?

Il progetto CPPR è stato una sfida su più punti. Siamo partiti da un progetto già in fase avanzata e progettato con l'utilizzo di un materiale tradizionale non attivo. Sostituire il rivestimento tradizionale con i nostri moduli BIPV ha comportato un importante studio iniziale per trovare la miglior soluzione a livello estetico e di efficienza. Per ottenere la migliore produzione energetica dei moduli, mantenendo una colorazione molto chiara, come richiesto dal progettista e dalla committenza, abbiamo studiato un sistema di colorazione dei moduli con una tecnica di applicazione "SUNCOL particolarizzata".

Un'altra importante sfida è stata la realizzazione di moduli con dimensioni molto grandi. I moduli che si ripetono maggiormente nella geometria delle facciate sono di due tipi: i moduli verticali tra le finestre di dimensione 900x2905 mm e i moduli orizzontali sopra e sotto le finestre di dimensione 2690x600 mm. Ciò nonostante queste non sono le dimensioni massime dei moduli all'interno del progetto, ma sono stati realizzati moduli di dimensione fino a 1141x2905 mm. Le diverse dimensioni dei moduli comportano diverse tipologie di circuiti che sono stati studiati anche in collaborazione con SUPSI, in modo che in base all'orientamento dell'edificio e il movimento del sole durante le stagioni la produzione di energia dei moduli sia sempre ottimale.

Quali sono le richieste del mercato attuale in tema di facciate BIPV?

Attualmente riscontriamo un notevole aumento di richieste in merito a moduli BIPV per integrazione in facciata con vetri frontali strutturati o tridimensionali. Questa soluzione permette una migliore integrazione dei moduli in facciata e una maggiore accettazione da parte di architetti e cittadinanza. Il movimento tridimensionale della struttura del vetro ne aumenta i pregi estetici ed i moduli attivi assomigliano ancor più a un materiale tradizionale, riscuotendo maggiore apprezzamento e accettazione. Per questo motivo stiamo proprio studiando e testando diverse tipologie di vetri tridimensionali per trovare le miglior soluzioni di bilanciamento tra estetica ed efficienza, aumentando ancor più le possibilità di scelta per architetti e clienti.

Per quanto riguarda le colorazioni dei moduli abbiamo da subito riscontrato una maggiore richiesta verso colori chiari tipo bianco. Queste colorazioni non sono semplici da ottenere con una buona resa estetica e con una buona efficienza, ma con la nostra esperienza e la nostra esclusiva tecnologia SUNCOL abbiamo studiato e trovato diverse soluzioni per soddisfare anche queste richieste.

Quali sono secondo la vostra esperienza gli ostacoli all'implementazione di facciate BIPV su mercato?

Le facciate BIPV sono prodotti nuovi e la prima barriera da superare è la poca conoscenza delle possibilità estetiche e di performance dei prodotti. Molti architetti e costruttori non conoscono ancora bene le innumerevoli possibilità di personalizzazione che si possono ottenere dai nostri prodotti BIPV con l'esclusiva tecnologia SUNCOL, infatti quando prendono contatto con noi rimangono sempre stupiti della quantità di varianti e possibilità che si possono ottenere. Non tutti sanno che i nostri moduli BIPV possono essere personalizzati per tonalità di colore, tipologia di colore (uniforme o texture) e finitura del vetro frontale, così da ottenere la miglior soluzione che si integri perfettamente in ogni progetto e contesto paesaggistico. Una volta superato questo step abbiamo quasi sempre riscontrato un notevole successo in quanto anche i progettisti si rendono conto degli innumerevoli benefici e vantaggi che si possono ottenere da delle facciate attive BIPV SUNCOL.

Quali trend vedete?

Nei prossimi anni ci aspettiamo una crescita esponenziale nella richiesta e utilizzo dei moduli BIPV SUNCOL in facciata e nel resto delle parti della costruzione (tetto, balconi, pensiline, ecc.). La maggiore conoscenza di queste tecnologie, la sensibilità da parte degli organi competenti e di tutta la popolazione nell'utilizzo di energie pulite permetterà un'importante crescita.

Negli ultimi anni, l'Unione Europea, gli Stati Uniti e altri paesi avanzati hanno spostato in modo significativo la loro attenzione verso la progettazione di edifici a energia zero. Diversi obiettivi e traguardi per la realizzazione di edifici green sono già stati annunciati o sono in fase di discussione e proposta a livello internazionale. Questo, a sua volta, dovrebbe creare opportunità significative per il futuro dei moduli BIPV.

FASE 5: Messa in opera

In questa fase è stata intervistata ALSOLIS, azienda che dal 2007 progetta ed installa impianti fotovoltaici. Nel progetto di Pregassona si sono occupati della fase di messa in opera. Di seguito le domande inerenti al lavoro svolto per il centro Polifunzionale di Pregassona.

Quali sono gli accorgimenti da prendere in fase di progettazione esecutiva per un sistema di facciata BIPV di questo genere?

Sono parecchi, partendo da una progettazione dei layouts in funzione degli aspetti meccanici che garantiscano un peso ed una maneggiabilità in fase di posa oltre che ad una resa ottimale dei moduli a loro volta ottimizzati dal punto di vista del cablaggio elettrico delle celle attive. Un altro aspetto importante è la progettazione di dettaglio delle interfacce attorno ai serramenti, investire tempo in questa fase limita le sorprese e i costi in fase di realizzazione

Quali sono state le sfide tecniche di questa opera?

Ve ne sono diverse, la dimensione ed il peso devono permettere un certa maneggiabilità durante la posa, ci sono poi gli aspetti legati al cablaggio e configurazione degli ottimizzatori che vanno progettati con criteri diversi rispetto ad un impianto a tetto.

Quali sono le richieste del mercato attuale in tema di facciate BIPV?

Notiamo un interesse accresciuto dato principalmente dalle soluzioni estetiche attualmente possibili, vengono spesso richieste più varianti sia per l'estetica, per la resa come per il costo.

Quali sono secondo la vostra esperienza gli ostacoli all'implementazione di facciate BIPV su mercato?

Il costo è importante come anche la progettazione dei layouts che vanno subito considerati già nella fase progettuale per sfruttare al meglio il potenziale del fotovoltaico.



Source: foto archivio cantiere
SUPSI

/ CONCLUSIONI

Pur indagando in maniera approfondita le dinamiche attuali e passate dell'utilizzo del BIPV, il lavoro di tesi ha avuto per tutto il periodo di sviluppo uno sguardo orientato verso il futuro. Alla base della ricerca portata avanti in questo lavoro c'è la visione di una città futura differente, basata sul paradigma della sostenibilità. In particolare, si è cercato di indagare la ridefinizione del progetto architettonico e del modo in cui esso si relaziona con l'ambiente esterno. In questa tesi l'innovazione formale del sistema fotovoltaico è stato inteso come un involucro libero da idee autoreferenziali, composto da logiche che mettono al primo posto il rispetto dei materiali utilizzati e la necessità di un basso impatto ambientale.

Il cambio dell'interpretazione del sistema fotovoltaico e la sua integrazione nell'edificio è il tema centrale su cui verte il lavoro. Partendo da un ragionamento sulla necessità di cambiamento dei consumi ad alto impatto sul pianeta, si è passato a spiegare in maniera più tecnica quale siano le definizioni di fotovoltaico oggi e la storia di esso. Il valore aggiunto della ricerca in questa tesi non si limita solo alla definizione del sistema fotovoltaico, ma anche delle forme architettoniche che esso sta assumendo, le quali pongono le basi per lo sviluppo futuro di questa tecnologia. L'analisi e i parametri utilizzati cercano di inquadrare quindi quale sia l'approccio al fotovoltaico integrato e quale siano i caratteri di innovazione del BIPV nel progetto di architettura.

La prevalenza di edifici in cui permangono le forme archetipiche tradizionali sottolinea la novità del sistema BIPV nel progetto di architettura. Ragionando su quale possa essere l'identità formale che esso assumerà in futuro, le prospettive possono essere due ed opposte. La prima visione vede la ricerca e l'industria impegnate a trovare soluzioni in cui il fotovoltaico non è riconoscibile, viene dissimulato con colori e texture creative che non compromettono in modo rilevante la resa energetica del sistema. La seconda visione supera la fase di dissimulazione nella quale ci troviamo oggi, il fotovoltaico potrà essere utilizzato in maniera libera anche sugli involucri verticali, senza per forza nascondere le celle che identificano il carattere energetico e funzionale di questo tipo di materiale.

L'augurio per il futuro è che il mercato di massa e le nazioni coglieranno l'importanza di cambiare rotta dal punto di vista energetico, e si impegneranno nello sforzo interdisciplinare al cento del campo BIPV per superare alcuni conflitti attuali, anche dal punto di vista culturale. Per influenzare e incoraggiare un nuovo modo di costruire che mette al centro le future generazioni, creando nuovi posti di lavoro e un nuovo modo di intendere gli edifici ed osservare la città.

/ RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro, che conclude i miei cinque anni di studi al Politecnico di Torino, rappresenta un grande traguardo per me. Vorrei dedicare queste pagine a tutte le persone che mi hanno accompagnato nel mio percorso universitario. È stato un periodo di grande crescita intellettuale e personale, che mi ha fatto conoscere la versione migliore di me stessa.

Ai miei genitori Silvana e Danilo perché hanno sempre creduto in me, stimolando la mia curiosità e dandomi la possibilità di conoscere il mondo in libertà. A mio fratello Alberto che ha sempre controllato da lontano che io prendessi la strada giusta. Ai miei nonni che mi hanno cresciuto ripetendomi di realizzare i miei sogni. A Ilaria, che mi ha insegnato la costanza e la perseveranza nel raggiungere i miei obiettivi. A Federico, mio compagno per una grande parte di questo viaggio, mi è sempre stato vicino e sostenuto nei momenti di difficoltà. A Cristina, Arianna e Beatrice con cui ho condiviso buona parte del mio tempo e del mio spazio vitale, tra risate e risotti. A Giorgio, Martina, Gianluca, Alma, Anita, Camilla, e a tutti i miei più cari amici che fortunatamente sono tanti da non poter essere citati tutti. Siete il mio grande sostegno nella vita di tutti i giorni, e mi ricordate quotidianamente il valore dell'amicizia.

Al professore Callegari per avermi dato la possibilità di sviluppare questo lavoro di ricerca. A Pierluigi Bonomo e a tutte le persone conosciute nel mio periodo in SUPSI, per avermi accolta a Mendrisio e per avermi trasmesso la passione per la ricerca e per il proprio lavoro.

Grazie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA e UN environment, «2018 Global Status Report, Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector» Global Alliance for Buildings and Constructions, 2018.
- [2] P. Corti, P. Bonomo, F. Frontini, P. Macé e E. Bosch, «BIPV Status Report 2020», 2020.
- [3] BIPVBOOST, «BIPV SOLUTIONS IN EUROPE: COMPETITIVINESS STATUS & ROADMAP TOWARD 2030», 21 giugno 2021.
- [4] N. Sinopoli e T. Valeria, «Sulle tracce dell'innovazione, tra tecniche e architettura», Milano, FrancoAngeli, 2002.
- [6] IEA, «Global Status Report for Buildings and Construction», 2019.
- [7] IEA, «World Energy Outlook», 2019.
- [8] IPCC, «Glossary of terms», in Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012, pp. 555-564.
- [12] IEA, «Global Energy Review» 2020.
- [15] World Green Building Council, «Bringing embodied carbon upfront» 2019.
- [16] World Green Building Council, «Advancing Net Zero - global project» 2019
- [31] Gestore dei Servizi Energetici GSE, «Rapporto delle attività 2020,» 2020.
- [36] Members REN21, «RENEWABLES 2021, Global Status Report,» REN21 Secretariat, Parigi, 2021.

-
- [37] I. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, «PSE Projects GmbH,» Freiburg, 2021
- [39] O. Humm e P. Toggweiler, Photovoltaik und Architektur, Berlino: Birkhauser, 1993.
- [40] E. Merolla, «Building Integrated Photovoltaics; Progetto di architettura ed innovazione tecnologica, Prassi, sperimentazioni e scenari futuri,» Politecnico di Torino, 2021.
- [41] EN5083-1, Photovoltaics in Buildings - Part 1: BIPV Modules, 2016.
- [42] A. Prieto, T. Klein, U. Knaack e T. Auer, «Main perceived barriers for the development of building service integrated facades: Results from an expert survey,» Journal of Building Engineering, 2017.
- [45] V. Vega-Garita, A. Hanif, N. R.-E. L. Narayan e P. Bauer, «Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery,» Journal of Power Source, 2019.
- [53] F. Crassard e J. Rode, «The evolution of building integrated photovoltaics (BIPV) in the German and French technological innovation systems for solar cells,» CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg , 2207.
- [54] S. e. a. T., «Building with Photovoltaics — The Challenge For Task VII Of The IEA PV Power Systems Program.,» Proceedings of the EC Photovoltaic Energy Conference, Vienna, 1997.
- [55] «Charter of European Cities & Towns Towards Sustainability,» Aalborg, 1994.
- [56] S. Roberts e N. Guariento, Building integrated photovoltaics/ a handbook, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2009.

-
- [57] S.—S. B. C. Centre e S. Solar Energy Application Centre, «Building Integrated Photovoltaics: Product overview for solar building skins,» 2017.
- [58] G. e. a. Eder, «COOLOURED BIPV, Market Research and Development,» IEA-PVPS T15-07, 2019.
- [59] G. Peharz e e. al., «Application of plasmonic coloring for making building,» Renewable, 2017.
- [60] I. Zanetti, P. Bonomo, F. Frontini, E. Saretta, M. Can den Donker, F. Vossen e W. Folkerts, «BIPV Status Report 2017; Building integrated Photovoltaics: Product overview for solar building,» 2017.
- [62] J. E. H.-Y. L. C. B. Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, «When PV modules are becoming real building elements: White solar module, a revolution for BIPV,» SPIE Optics + Photonics for Sustainable Energy , 2015.
- [63] J. Z. Tachan, S. Rühle e A. Zaba, «Dye-sensitized solar tubes: A new solar cell design».
- [64] S. Wittkopf, «Schön viel Strom produzieren».
- [66] I. E. A. IEA, «Categorization of BIPV applications,» 2021.

SITOGRAFIA

- [5] IPCC, «AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis,» 7 agosto 2021. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> .
- [9] «United Nations , Azione per il clima,» [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> .
- [10] C. Europea, «Climate change, le conseguenze dei cambiamenti climatici», [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_it .
- [11] C. europea, «Cause dei cambiamenti climatici», [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_it .
- [13] NASA GISS, «Global climate change, global temperature», [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> .
- [14] United Nations, «Climate action,» [Online]. Available: https://www.un.org/climatechange?gclid=Cj0KCQiA4b2MBhD2ARIsAlrcB-TYJzaPGFmzzkXjWVG3hkIdFCHIILjXbELMzoD86mlqaMZ2Umnj5B8aAsmrEALw_wcB.
- [17] D. M. De Luca, «Il Post», [Online]. Available: <https://www.ilpost.it/2012/10/06/la-storia-della-guerra-dello-yom-kippur/>.
- [18] C. Europea, «L'Europa in 12 lezioni», [Online]. Available: <https://op.europa.eu/webpub/com/eu-in-12-lessons/it/>.
- [19] International Energy Agency IEA, «IEA history,» 18 febbraio 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/about/history>. [Consultato il giorno 02 settembre 2021].
- [20] Brundtland, 1987. [Online]. Available: https://eurlex.europa.eu/summary/glossary/sustainable_development.html?locale=it.

-
- [21] Commissione Europea, «Our planet, our future», [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/sites/youth/milestones_it .
- [22] Commissione europea, «Negozianti sul clima,» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations_it .
- [23] Commissione europea, «Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici,» [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/> .
- [24] Commissione Europea, «Accordo di Parigi», [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_it .
- [25] G. Crescente, «Il risultato più importante della conferenza di Glasgow,» 15 novembre 2021. [Online]. Available: <https://www.internazionale.it/opinione/gabriele-crescente/2021/11/15/glasgow-cop26>. [Consultato il giorno 25 settembre 2021].
- [26] United Nation, UNFFF e U. Government, «COP26 THE GLASGOW CLIMATE PACT,» [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fukcop26.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F11%2FCOP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf&clen=7724933&chunk=true>.
- [27] C. europea, «Delivering the European Green Deal» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
- [28] C. europea, «Energia per un'economia climaticamente neutra,» 8 luglio 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/ip_20_1259. [Consultato il giorno 2 settembre 2021].
- [29] C. Europea, «Un Green Deal europeo,» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it.

-
- [31] Commissione Europea, «Efficienza energetica nell'edilizia,» 17 febbraio 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_it.
- [32] Commissione europea. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_1835.
- [33] [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_it#ristrutturare-gli-edifici-per-uno-stile-di-vita-pi-ecologico.
- [34] E. Kabir, P. Kumarb, S. Kumar, A. A. Adelodund e K.-H. Kim, «ScienceDirect.com,» 2018. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwgbis.ces.iisc.ernet.in%2Fbiodiversity%2Fsahyadri_en
- [35] CERES, «ScienceDirect,» 2014 . [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/ceres-experiment>. [Consultato il giorno 10 gennaio 2022].
- [38] B. Italiana, «Il tasso annuo di crescita composto» [Online]. Available: <https://www.borsaitaliana.it/notizie/sotto-la-lente/cagr-259.html>
- [43] Istituto Sostenibilità Applicata all'ambiente Costruito SUPSI; «Laboratorio SUPSI PVLab» [Online]. Available: <https://www.supsi.ch/isaac/servizi/SUPSI-PVLab.html>. [Consultato il giorno 2021 dicembre 15].
- [44] N. Kunz, «Photovoltaik System,» 2021 giugno 4. [Online]. Available: <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/photovoltaics/photovoltaic-system>. [Consultato il giorno 2021 12 15].
- [46] J. J. Loferski, «The first forty years: A brief history of the modern photovoltaic age,» January 1993. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.4670010109>. [Consultato il giorno 8 12 2021] [48] S. diary, «Startup business,» 14 giugno 2020. [Online]. Available: <https://www.startupbusiness.it/chi-ha-inventato-il-fotovoltaico-storia-dinnovazione/104729/>. [Consultato il giorno 8 dicembre

-
- [47] S. diary, «Startup business,» 14 giugno 2020. [Online]. Available: <https://www.startupbusiness.it/chi-ha-inventato-il-fotovoltaico-storia-dinnovazione/104729/>. [Consultato il giorno 8 dicembre 2021].
- [48] Treccani, «Effetto fotovoltaico,» [Online]. Available: <https://www.treccani.it/enciclopedia/effetto-fotovoltaico/>.
- [49] A. Goetzberg, C. Hebling e H. W. Schock, «Photovoltaic materials, history, status and outlook,» 20 Agosto 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/mser. [Consultato il giorno 12 dicembre 2021].
- [50] M. A. Green, «Wiley Interscience,» 18 Aprile 2005. [Online]. Available: www.interscience.wiley.com. [Consultato il giorno 15 dicembre 2021].
- [51] Institute of Energy Conversion iec, «Sito web dell’Institute of Energy Conversion,» [Online]. Available: <https://iec.udel.edu/about/history/>.
- [61] «lofsolar-Colour Solar Cell,» [Online]. Available: www.lofsolar.com.
- [67] Osservatorio Ambientale della Svizzera Italiana, «Mappatura solare,» [Online]. Available: <https://www.oasi.ti.ch/web/energia/mappatura-solare.html>.
- [68] SUPSI, «Istituto Sostenibilità Applicata all’Ambiente Costruito (ISAAC),» [Online]. Available: <https://www.supsi.ch/isaac/ricerca-applicata/involucro-innovativo.html> [Consultato il giorno 8 gennaio 2022].

