



# BIPV meets History

## D4.3



## BIPV meets history

**D4.3: Criteri guida e metodi  
d'intervento, possibilità di replicabilità  
e armonizzazione nelle diverse aree  
transfrontaliere**

**A cura di:**

Isabella Dall’Orto (Regione Lombardia), Elena Lucchi (Eurac Research)

**Contributi di:**

Alessia Peluchetti, Carlotta Cocco, Andrea Costa (R2M Solutions).

**Revisione:**

Sandra Zappella, Stefania Barbieri, Isabella Dall’Orto (Regione Lombardia),  
Elena Lucchi (Eurac Research).

**Dettaglio documento:**

Titolo: D4.3, P30 – Criteri guida e metodi d’intervento, possibilità di replicabilità e armonizzazione nelle diverse aree transfrontaliere.

Work Package: WP4

Data di pubblicazione: 29 luglio 2022

**Dettaglio progetto:**

Titolo del progetto: BIPV MEETS HISTORY - CREAZIONE DI UNA CATENA DI VALORE PER IL FOTOVOLTAICO INTEGRATO IN ARCHITETTURA NEL RISANAMENTO ENERGETICO DEL PATRIMONIO COSTRUITO STORICO TRANSFRONTALIERO

Codice progetto: 603882

Durata del progetto: Giugno 2019 – Agosto 2022 (39 mesi)

**Partners:**



*Operazione co-finanziata dall'Unione europea, Fondo Europeo di Sviluppo Regionale, dallo Stato Italiano, dalla Confederazione elvetica e dai Cantoni nell'ambito del Programma di Cooperazione Interreg V-A Italia-Svizzera*

# INDICE

<b>INDICE .....</b>	<b>3</b>
<b>INDICE delle FIGURE.....</b>	<b>4</b>
<b>INDICE delle TABELLE .....</b>	<b>7</b>
<b>GLOSSARIO .....</b>	<b>8</b>
<b>PREMESSA .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITOLO 1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>10</b>
1.1 Briefing Sessions.....	11
<b>CAPITOLO 2. SISTEMI FOTOVOLTAICI INTEGRATI BIPV .....</b>	<b>13</b>
2.1 Tipologia di pannello fotovoltaico.....	13
2.2 Sistemi BIPV e BAPV .....	18
2.3 Tipologie di applicazioni costruttive del BIPV .....	19
<b>CAPITOLO 3. CRITERI DI VALUTAZIONE DEGLI INTERVENTI.....</b>	<b>26</b>
3.1 Integrazione Tecnologica.....	26
3.2 Integrazione estetica .....	35
3.3 Integrazione energetica.....	54
3.4 Il processo di integrazione dei sistemi BIPV .....	58
<b>CAPITOLO 4. CONCLUSIONI .....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>61</b>

## INDICE delle FIGURE

Figura 2.1 Pannello in silicio monocristallino - fonte: <a href="http://www.solarinnova.net">www.solarinnova.net</a> .....	14
Figura 2.2 Pannello in silicio policristallino - fonte: <a href="http://www.solarinnova.net">www.solarinnova.net</a> .....	14
Figura 2.3 Pannelli fotovoltaici a film sottile - fonte: <a href="https://maxeon.com/">https://maxeon.com/</a> .....	15
Figura 2.4 Pannelli fotovoltaici in silicio amorfo a-Si - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> 16	16
Figura 2.5 Pannelli fotovoltaici in CIS - fonte: <a href="https://sunisyou.wordpress.com/">https://sunisyou.wordpress.com/</a> ..	16
Figura 2.6 Pannelli fotovoltaici in CIGS - fonte: <a href="https://nice-solarenergy.com">https://nice-solarenergy.com</a> .....	16
6Figura 2.7 Pannelli fotovoltaici in CdTE - fonte: @substancep - <a href="https://www.fotolia.com/">https://www.fotolia.com/</a> ).....	16
Figura 2.8 Tipologie di pannelli fotovoltaici – fonte: <a href="http://www.energysage.com">www.energysage.com</a> .....	17
Figura 2.9 Pannelli fotovoltaici OPV - fonte: <a href="http://www.pannellifotovoltaicisolari.com">www.pannellifotovoltaicisolari.com</a> 17	17
Figura 2.10 Esempi sistemi BIPV e BAPV [5].....	19
0Figura 2.11 Tipologie più diffuse di sistemi BIPV – fonte: <a href="http://www.BIPV.ch">www.BIPV.ch</a> .....	19
Figura 2.12 Parco Urbano, Isola di Certosa - fonte: <a href="http://www.gruppostg.com">www.gruppostg.com</a> .....	21
Figura 2.13 Town Hall, Alzira - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	22
Figura 2.14 Cascina Rurale - fonte: <a href="http://www.fornacefonti.it">www.fornacefonti.it</a> .....	22
Figura 2.15 Dettaglio Cascina Rurale - fonte: <a href="http://www.fornacefonti.it">www.fornacefonti.it</a> .....	23
Figura 2.16 St. Andrews Cathedral, Sydney - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	23
Figura 2.17 City hall, LinaFER - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	24
Figura 2.18 Compagnie Parisienne Distribution Electricite, Parigi [6] .....	25
Figura 2.19 Compagnie Parisienne Distribution Electricite, Parigi [6] .....	25
Figura 2.20 Residential Building, Parigi [7].....	26
Figura 2.21 Solar Silo, Gundeldinger Feld [5] .....	26
Figura 2.22 Torre Bassano Hotel, Napoli – fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	27
Figura 2.23 Canopy Residence, Algarve – fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	27
Figura 2.24 Schnitterhaus, Nechlin [5] .....	27
Figura 3.1: Multifunzionalità del sistema BIPV .....	26
Figura 3.2: Giochi di luci e ombre grazie all’utilizzo di vetrate fotovoltaiche per Balenciaga – fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	29

Figura 3.3: Giochi di luci e ombre grazie all’utilizzo di vetrate fotovoltaiche per Balenciaga – fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	29
Figura 3.4: Esempio di fotovoltaico “nascosto” nel contesto di una riqualificazione urbana, Isola della Certosa - fonte: <a href="http://www.gruppostg.com">www.gruppostg.com</a> .....	36
Figura 3.5: Esempio di fotovoltaico reso protagonista del concept architettonico di una nuova costruzione, Copenaghen [5] .....	36
Figura 3.6 Palette di Colori per pannelli fotovoltaici di tipo monocristallino [29]..	37
Figura 3.7 Palette di Colori per pannelli fotovoltaici di tipo policristallino [29] .....	37
Figura 3.8 Esempi di vetro fotovoltaico in colorazioni diverse – fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	37
Figura 3.9 Esempi di pannelli fotovoltaici semitrasparenti in silicio amorfo – fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	37
Figura 3.10: Esempio di modulo fotovoltaico in copertura con colorazione che si integra al contesto esistente – fonte: <a href="http://www.besmartproject.eu">www.besmartproject.eu</a> .....	38
Figura 3.11: Esempio di modulo fotovoltaico in copertura con colorazione che non si integra al contesto esistente – fonte: @Bête spatio-temporelle – Own work ..	38
Figura 3.12 Esempio di copertura in ardesia – fonte: <a href="http://www.mnv-ardesia.it">www.mnv-ardesia.it</a> .....	39
Figura 3.13 Esempio di BIPV in copertura con texture opaca – fonte: <a href="http://www.inhabitat.com">www.inhabitat.com</a> .....	40
Figura 3.14 Esempio di BIPV in copertura con texture lucida – fonte: <a href="http://www.seelectricalservicesltd.com">www.seelectricalservicesltd.com</a> .....	40
Figura 3.15 Un mock-up di facciata al campus di Trevano della SUPSI mostra le varie possibilità di progettare moduli in diverse tipologie di facciata. [31].....	41
Figura 3.16 Esempio di soluzioni progettuali con pattern diversi.....	42
Figura 3.17 Esempi di BIPV con texture diversa in silicio amorfo (sinistra) e silicio cristallino (Destra) – fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	42
Figura 3.18 Esempi di BIPV con texture diversa in silicio amorfo (sinistra) e silicio cristallino (Destra) – fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	42
Figura 3.19 Esempio di integrazione a livello di pattern [5] .....	43
Figura 3.20 Esempio di integrazione a livello di pattern - fonte: <a href="http://www.onyxsolar.com">www.onyxsolar.com</a> .....	43
Figura 3.21 Esempio di integrazione a livello di pattern - fonte: <a href="http://www.casafacile.it">www.casafacile.it</a> ..	43
Figura 3.22 Esempio di BAPV in copertura con problemi di riflessione – fonte: <a href="http://www.gwhsolar.com">www.gwhsolar.com</a> .....	44
Figura 3.23 Esempio di pannelli con diversi tipi di riflessione fonte: <a href="http://www.bipv.ch">www.bipv.ch</a> .	44

Figura 3.24 Esempio di BIPV riflettente in facciata – fonte: <a href="http://www.igsmag.com">www.igsmag.com</a> .....	46
Figura 3.25 Esempio di BIPV poco riflettente in facciata – fonte: <a href="http://www.kuczia.com">www.kuczia.com</a> .....	46
Figura 3.26 Sistemi BIPV in silicio cristallino con diversi livelli di distanziamento tra celle fotovoltaiche - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	47
Figura 3.27 Sistemi BIPV in silicio cristallino con celle diversamente distanziate - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	48
Figura 3.28 Sistemi BIPV in silicio amorfo con diversi livelli di trasparenza: basso (10%), medio (20%) e alto (30%) - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	48
Figura 3.29 Sistemi BIPV in silicio amorfo con trasparenza omogenea - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	48
Figura 3.30 Esempio 1 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	49
Figura 3.31 Esempio 2 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	49
Figura 3.32 Esempio 3 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	49
Figura 3.33 Esempio di pannelli non raggruppati omogeneamente - fonte: <a href="http://www.wegalux.gruppogstg.com">www.wegalux.gruppogstg.com</a> .....	50
Figura 3.34 Esempio di pannelli non raggruppati omogeneamente - fonte <a href="http://www.news.energysage.com">www.news.energysage.com</a> .....	50
Figura 3.35 Esempio di sistemi BIPV non integrati dal punto di vista geometrico con la coperture esistente [32] .....	51
Figura 3.36 Esempio di sistemi BIPV integrati dal punto di vista geometrico con la coperture esistente – fonte: <a href="http://www.architecturemagazine.co.uk">www.architecturemagazine.co.uk</a> .....	51
Figura 3.37 Esempio di sistemi BIPV che non seguono le linee della coperture esistente – fonte: <a href="http://www.bvisolar.com">www.bvisolar.com</a> .....	52
Figura 3.38 Esempio di sistemi BIPV che seguono le linee della coperture esistente fonte: <a href="http://www.buildwithrise.com">www.buildwithrise.com</a> .....	52
Figura 3.39 Esempio di sistemi BAPV appoggiati sulla copertura ma non integrati - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	53
Figura 3.40 Esempio di sistemi BIPV integrati nella pavimentazione - fonte: <a href="http://www.onyx solar.com">www.onyx solar.com</a> .....	53
Figura 3.41 Inclinazione di un pannello fotovoltaico .....	55
Figura 3.42: Orientamento di un pannello fotovoltaico .....	55

Figura 3.43 Perdita di potenza dovuta alle diverse temperature dei PV– fonte  
www.bipv.ch @IEAT2 ..... 57

## INDICE delle TABELLE

Tabella 2.1 Tipologie di sistemi BIPV utilizzate in copertura .....	20
Tabella 2.2 Tipologie di sistemi BIPV utilizzati in facciata .....	23
Tabella 3.1 Produzione energetica al variare di inclinazione e orientamento. ....	56
Tabella 3.2 Criteri di integrazione per sistemi BIPV e BAPV .....	58
Tabella 3.3 Processo progettuale per l'integrazione di sistemi BIPV.....	59

# GLOSSARIO

- BIPV: Building Integrated Photovoltaic | Fotovoltaico integrato
- a-Si: Amorphous silicon | Silicio Amorfo
- BAPV: Building Attached Photovoltaics | Fotovoltaico applicato
- BIPVT: Building-integrated photovoltaic-thermal | Fotovoltaico integrato-termico
- CdTe: Cadmium telluride photovoltaics | Tellururo di cadmio
- CIGSCopper: indium gallium selenide | Diseleniuro di rame, indio e gallio
- CIS: Copper indium selenide | Diseleniuro di rame e indio
- EED: Energy Efficiency Directive | Direttiva sull'efficienza Energetica
- EPBD: Energy Performance Building Directive | Direttiva sulle prestazioni energetiche degli edifici
- FER: Renewable Energy Resources (RES) | Fonti di Energia Rinnovabile
- mc-Si: Multicrystalline Silicon | Silicio Policristallino
- nZEB: Nearly Zero Energy Buildings | Edifici ad energia quasi zero
- OPV: Organic Photovoltaics | Fotovoltaico Organico
- PV: Photovoltaic | Fotovoltaico
- RED: Renewable Energy Directive | Direttiva sull'energia rinnovabile
- sc-Si: Singlecrystalline Silicon | Silicio Monocristallino
- UE: European Union | Unione Europea
- VOC: Volatile organic compounds | Composti organici volatili

## PREMESSA

Il progetto “BIPV meets History” mira a creare nuove prospettive di business nei territori transfrontalieri tra Italia e Svizzera per la filiera del fotovoltaico integrato (BIPV) nel recupero del patrimonio edilizio storico-architettonico e paesaggistico, rispondendo alle politiche europee, nazionali e locali in fatto di efficienza energetica e di tutela del patrimonio culturale. La filiera sarà basata sulla complementarità di expertise tra Pubbliche Amministrazioni, ricerca e imprese dei settori della costruzione e del fotovoltaico, al fine di aprire un mercato che porterà benefici economici e produttivi per tutti gli attori della catena del valore.

I criteri contenuti nel presente “Deliverable di progetto” (di seguito Deliverable) sono il risultato di un percorso di analisi sviluppato nell’ambito del progetto INTERREG IT-CH “BIPV MEETS HISTORY”, che ha approfondito le potenzialità dell’utilizzo di sistemi di fotovoltaico integrato, detto BIPV, sul patrimonio immobiliare esistente con un focus su edifici situati in contesti tutelati e di pregio storico e artistico. Le soluzioni fotovoltaiche integrabili nei sistemi costruttivi tradizionali risultano ancora poco conosciute ai progettisti e tecnici di settore, ai funzionari delle Pubbliche Amministrazioni, agli utenti finali e, quindi, poco diffuse.

In particolare, l’analisi delle diverse tecnologie disponibili ad oggi sul mercato, l’individuazione dei casi studio esemplari, lo studio del sistema normativo ed autorizzativo dei diversi territori coinvolti nel progetto e le briefing session organizzate con i diversi stakeholders, hanno fornito la base per la redazione di questo documento. Nello specifico, l’analisi delle diverse tecnologie ha fornito un quadro generale sulle diverse tipologie di sistemi BIPV disponibili ad oggi sul mercato; l’analisi della normativa e dell’iter procedurale ha fatto emergere le criticità e le barriere di maggiore rilievo nell’impiego della tecnologia BIPV ed in particolare in ambiti tutelati; l’analisi dei casi studio selezionati come esemplari ha fornito degli esempi sulle buone pratiche già esistenti in Italia ed in Europa; l’organizzazione delle briefing sessions ha permesso di tener conto delle esigenze e del punto di vista di Pubbliche Amministrazioni, progettisti e Soprintendenze, soggetti che generalmente affrontano i sistemi fotovoltaici nel patrimonio edilizio esistente con approcci molto diversi gli uni dagli altri. Il risultato è un documento che riassume i risultati di maggior rilievo del lavoro di ricerca svolto all’interno del progetto, descrivendo in maniera semplice ed intuitiva le principali caratteristiche di questi sistemi e definendo, in via preliminare, una serie di criteri guida per l’adozione di sistemi di fotovoltaico integrato. Il documento si pone quindi l’obiettivo di fornire indicazioni di base per guidare i progettisti nell’integrazione della tecnologia fotovoltaica nel patrimonio edilizio esistente.

# CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

Lo scopo del Deliverable è quello di individuare criteri guida per l'utilizzo di tecnologie di fotovoltaico con integrazione architettonica, noto come "Building Integrated Photovoltaic" (BIPV), nel paesaggio e nel patrimonio costruito dell'area di cooperazione transfrontaliera IT-CH, che possano risultare utili all'aggiornamento delle linee guida locali, ove esistenti, o alla redazione di nuove, ponendo in evidenza gli aspetti singolari e specifici dell'area territoriale e la potenziale replicabilità in altri contesti limitrofi.

Il documento si pone come obiettivo la descrizione di regole per la progettazione e l'installazione di sistemi di fotovoltaico integrato negli edifici esistenti, al fine di facilitarne l'applicazione in contesti di pregio storico e paesaggistico, con soluzioni condivise con gli enti preposti al rilascio delle necessarie autorizzazioni. Pertanto, esso è rivolto a Pubbliche Amministrazioni, tecnici, progettisti e a chiunque si confronti con scelte di trasformazione del territorio legate a nuove forme di infrastrutturazione energetica.

La redazione del Deliverable è partita sfruttando le attività di progetto già realizzate relative all'analisi del sistema normativo e autorizzativo dell'area territoriale di cooperazione, all'organizzazione di briefing session con i principali *stakeholders* e all'individuazione di casi studio esemplari.

Nella prima parte, il documento contiene una analisi delle diverse tecnologie, fornendo un quadro generale sulla definizione di BIPV, sui materiali e sulle diverse tipologie di sistemi integrati disponibili ad oggi sul mercato, al fine di fornire le informazioni di base necessarie a comprendere le caratteristiche e le peculiarità di questi sistemi. Nella seconda parte, vengono illustrati i principali criteri da considerare per la valutazione dei diversi tipi di intervento, in modo da consapevolizzare i progettisti e i tecnici e guidarli, in maniera semplice ed efficace, nella scelta della migliore tecnologia fotovoltaica per operare correttamente su immobili ricadenti in ambiti tutelati.

## 1.1 Briefing Sessions

Per l'elaborazione dei criteri guida e dei metodi intervento contenuti nel presente Deliverable si sono rivelati di particolare importanza i risultati pervenuti dall'organizzazione di alcune Briefing Sessions.

Tra dicembre 2020 e aprile 2022, sono stati attivati diversi tavoli di lavoro con i principali stakeholders: (1) Soprintendenze Archeologia, Belle Arti e Paesaggio, individuate come soggetto primario di riferimento nella valutazione di progetti che riguardano beni assoggettati a tutela ai sensi del Codice dei beni culturali e del paesaggio, (2) Pubbliche Amministrazioni e (3) Progettisti.

Nelle Briefing Sessions sono state affrontate diverse attività:

- presentazione della normativa e delle procedure autorizzative (a scala nazionale e locale di Regione Lombardia e della Provincia Autonoma di Bolzano);
- presentazione di alcune best-practices di applicazione di sistemi fotovoltaici tradizionali e di tipo integrato in contesti di pregio;
- dialogo strutturato con i partecipanti, volto a capire i punti di debolezza e le potenzialità dell'utilizzo di queste tecnologie in contesti tutelati, cercando di individuare eventuali migliorie da introdurre nel processo autorizzatorio e le priorità da considerare nella redazione di linee guida.

I risultati hanno mostrato un'apertura all'inserimento dei sistemi fotovoltaici in contesti di pregio come conseguenza della riconosciuta necessità di agire per mitigare il problema dei cambiamenti climatici, ma hanno anche evidenziato che la frammentazione della legislazione e la complessità dell'iter autorizzatorio del contesto italiano rappresenta una delle maggiori barriere alla diffusione di questi sistemi.

In linea generale, si è concordato sull'importanza di spostare l'attenzione dal solo aspetto tecnologico a quello architettonico energetica negli interventi di installazione di impianti fotovoltaici e che il bilanciamento tra aspetti di integrazione tecnologica, estetica ed energetica è l'obiettivo fondamentale da raggiungere per un risultato che soddisfi le esigenze di tutela del patrimonio edilizio da una parte e di risparmio energetico dall'altra.

Questi tre macro-gruppi - integrazione tecnologica, estetica ed energetica - risultano avere lo stesso significato nelle diverse aree territoriali coinvolte nel progetto, costituendo la base comune su cui costruire dei criteri che presentano una potenziale replicabilità nelle aree transfrontaliere.

In linea generale, il criterio dell'integrazione estetica è stato considerato fondamentale per intervenire in ambiti assoggettati a tutela, tuttavia, è stato sottolineato che l'introduzione di queste componenti tecnologiche sul patrimonio edilizio debba essere calibrata e valutata in maniera specifica e differente a seconda dei contesti di applicazione e dei regimi di tutela vigenti su di essi.

Dai diversi incontri è emersa la necessità di redigere delle linee guida aggiornate, volte a promuovere l'inserimento di sistemi fotovoltaici di tipo integrato sugli edifici esistenti, con un focus sul patrimonio storico-architettonico assoggettato a specifica tutela.

Pertanto, i criteri e i metodi di intervento illustrati nel presente documento prendono spunto dai risultati emersi dai gruppi di lavoro, e si prefiggono di individuare ed analizzare i principali criteri di integrazione tecnologica, estetica ed energetica dei sistemi fotovoltaici, per supportare sia l'attività degli enti pubblici e delle istituzioni, locali e regionali, nell'attività di valutazione degli interventi in contesti di particolare pregio storico e paesaggistico, sia i progettisti.

I criteri e i metodi di intervento sono stati sviluppati in coerenza con le tipologie edilizie presenti nelle aree transfrontaliere coinvolte nel progetto e che costituiscono un potenziale mercato per le aziende. Il contributo del documento è quindi anche quello di innescare un processo virtuoso che porti allo sviluppo di nuovi prodotti, migliorando le competitività delle aziende del settore.

# CAPITOLO 2. SISTEMI FOTOVOLTAICI INTEGRATI

In questo capitolo vengono elencate e descritte le diverse tecnologie fotovoltaiche, aventi ognuna delle caratteristiche differenti a seconda del tipo di cella, con un focus sulle diverse tipologie di applicazioni costruttive.

Questo capitolo intende fornire una panoramica delle principali tecnologie di BIPV sviluppate e presenti sul mercato, per fornire una chiave di lettura per le future applicazioni di questi sistemi.

## 2.1 Tipologia di pannello fotovoltaico

Il pannello fotovoltaico è un dispositivo composto da elementi che sono in grado di produrre energia, mediante l'effetto fotovoltaico, quel fenomeno che permette alle celle fotovoltaiche di trasformare la radiazione elettromagnetica solare in energia elettrica.

Esistono diverse tecnologie fotovoltaiche, ognuna con caratteristiche diverse a seconda del tipo di cella o tecnologia impiegata. Tra queste, le più diffuse sono:

- monocristallina;
- policristallina;
- a film sottile (silicio amorfo, micromorfo, CIGS, CdTe).

I pannelli solari tradizionali sono costituiti da celle al silicio cristallino (monocristallino o policristallino). I pannelli in silicio monocristallino (sc-Si) sono composti dall'unione di barre in silicio, generate da un singolo cristallo di silicio fatto crescere lungo un'unica direzione, e disposte in modo tale da costituire un unico cristallo. Generalmente sono caratterizzati da un rendimento molto alto e presentano un colore nero o blu uniforme (Figura 0.1).

I pannelli in silicio policristallino (mc-Si) sono composti dall'unione di dischi di silicio, generati da un cristallo multifaccettato che viene fatto crescere in più direzioni, fino ad ottenere, generalmente, una forma quadrata o rettangolare. Questi elementi presentano alcuni difetti in superficie, dovuti al sistema di solidificazione del silicio, che comportano una leggera diminuzione del rendimento rispetto alla tecnologia monocristallina (Figura 0.2).

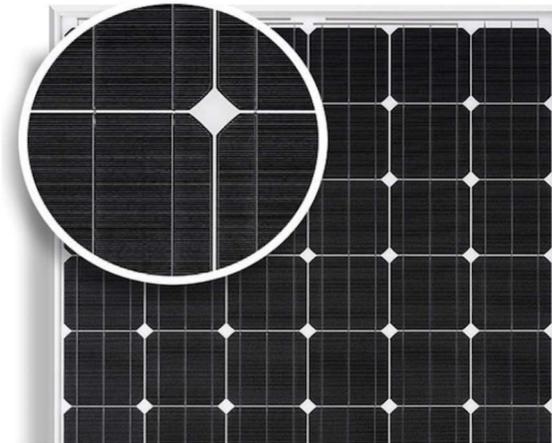


Figura 0.1 Pannello in silicio monocristallino - fonte: [www.solarinnova.net](http://www.solarinnova.net)



Figura 0.2 Pannello in silicio policristallino - fonte: [www.solarinnova.net](http://www.solarinnova.net)

I pannelli solari a film sottile, che utilizzano, oltre al silicio, anche altre tipologie di materiali semiconduttori, e sono caratterizzati da un film sottile di spessore inferiore al millimetro (Figura 0.3.) Rientrano in questa categoria i pannelli in silicio amorfo (a-Si) (

diseleniuro di rame e indio (CIS) (

Figura 0.4), in

*Figura 2.4 Pannelli fotovoltaici in silico amorfo a-Si – fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)*

Figura 0.5), in diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS) (

Figura 0.6) e in tellururo di cadmio (CdTe) (

Figura 0.7).



*Figura 0.3 Pannelli fotovoltaici a film sottile - fonte: <https://maxeon.com/>*



Figura 0.4



Figura 2.4 Pannelli fotovoltaici in silicio amorfo a-Si – fonte: [www.onyx-solar.com](http://www.onyx-solar.com)

Figura 0.5 Pannelli fotovoltaici in CIS – fonte: <https://sunisyou.wordpress.com/>

Figura 0.6 Pannelli fotovoltaici in CIGS – fonte: <https://nice-solarenergy.com>

Figura 0.7 Pannelli fotovoltaici in CdTE – fonte: @substancep – <https://www.fotolia.com/>

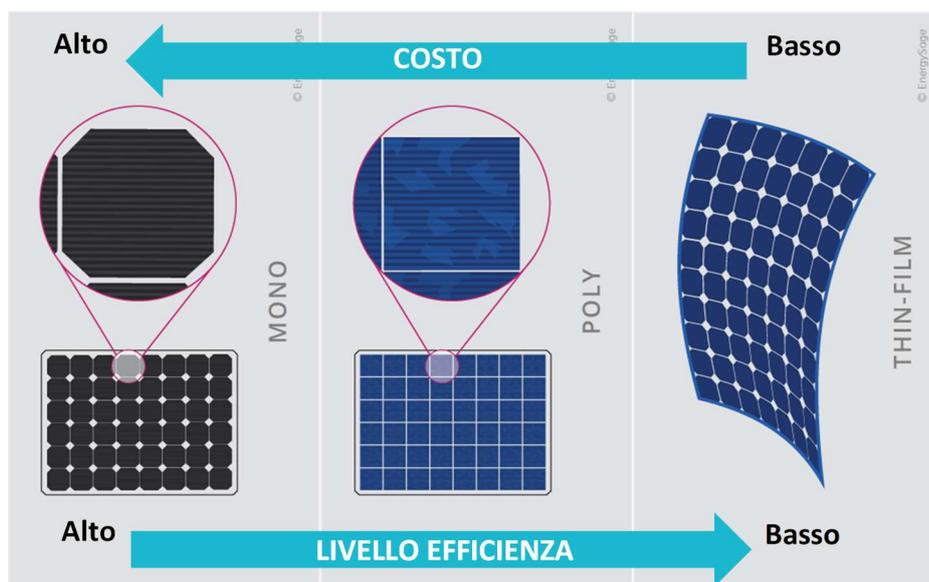


Figura 0.8 Tipologie di pannelli fotovoltaici – fonte: [www.energysage.com](http://www.energysage.com)

A seconda del tipo di materiale utilizzato e del tipo di tecnologia e struttura chimica impiegata si possono definire tre sistemi diversi di fotovoltaico:

- fotovoltaico di prima generazione;
- fotovoltaico di seconda generazione;
- fotovoltaico di terza generazione.

Il fotovoltaico di prima generazione corrisponde al fotovoltaico tradizionale, con pannelli in silicio policristallino e monocristallino. Il fotovoltaico di seconda generazione è rappresentato dai moduli a film sottile, la cui applicazione si è diffusa molto negli ultimi anni e che offre una notevole riduzione nel costo dei materiali rispetto alla generazione precedente, sebbene abbia valori di efficienza minori. Infine, il fotovoltaico di terza generazione è la categoria più innovativa e ancora in via di sviluppo, a cui appartengono le celle multigiunzione e i dispositivi organici OPV (Organic Photovoltaics).

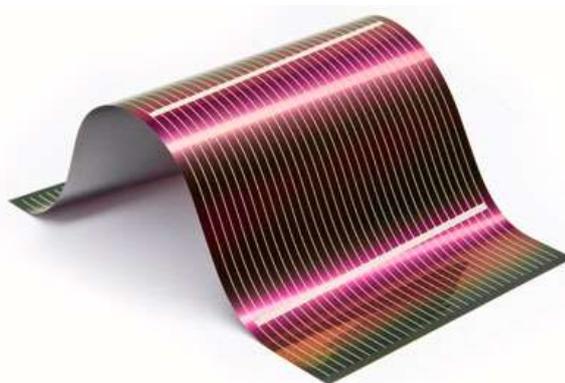


Figura 0.9 Pannelli fotovoltaici OPV - fonte: [www.pannellifotovoltaicisolari.com](http://www.pannellifotovoltaicisolari.com)

## 2.2 Sistemi BIPV e BAPV

I sistemi fotovoltaici possono essere collegati a edifici esistenti o integrati nel tessuto della nuova architettura. A seconda del grado di integrazione tra modulo fotovoltaico ed edificio possiamo parlare principalmente di due diversi tipi di sistemi:

1. Building Attached PhotoVoltaics (BAPV), ovvero sistemi fotovoltaici non integrati, ma semplicemente applicati sull'edificio;
2. Building Integrated PhotoVoltaics (BIPV), ossia moduli fotovoltaici totalmente integrati nell'involucro edilizio.

A livello internazionale una definizione chiara delle due diverse tipologie di sistemi è descritta dalla norma EN 50583, che disciplina i sistemi fotovoltaici negli edifici. Nello specifico, la seconda parte della EN 50583 inerente i sistemi BIPV dà due definizioni distinte di sistemi fotovoltaici, a seconda che essi siano integrati (BIPV) o applicati all'edificio (BAPV) [2]. Secondo la norma, *gli impianti fotovoltaici possono esser considerati BIPV se i moduli fotovoltaici utilizzati sono integrati nell'edificio e soddisfano i criteri per i moduli BIPV come definiti nella Parte 1 della stessa direttiva [3] e quindi formano un prodotto da costruzione con una funzione specifica, come definito nel Regolamento Europeo sui Prodotti da Costruzione CPR 305/2011 [4]. Il modulo BIPV è quindi un prerequisito per l'integrità della funzionalità dell'edificio. Se il modulo fotovoltaico integrato viene smontato, deve essere sostituito da un prodotto da costruzione appropriato.*

I criteri descritti nella prima parte della EN 50583 [3] fanno riferimento a sette principali categorie di funzioni che un modulo fotovoltaico BIPV può assolvere, in aggiunta alle proprietà elettrotecniche intrinseche del pannello:

1. Rigidezza meccanica e resistenza strutturale;
2. Protezione primaria dagli impatti atmosferici: pioggia, neve, vento, grandine;
3. Risparmio energetico grazie ad ombreggiamento, illuminazione diurna e isolamento termico;
4. Protezione in caso d'incendio;
5. Separazione tra ambienti interni ed esterni;
6. Sicurezza, riparo e difesa;
7. Protezione al rumore.

Le sole proprietà elettrotecniche intrinseche del fotovoltaico come la funzione dell'antenna, la produzione di energia, la schermatura elettromagnetica ecc., non qualificano i moduli fotovoltaici come BIPV [2]. Rientrano invece nel gruppo BAPV tutti quegli impianti fotovoltaici attaccati all'edificio che non soddisfano i criteri per sistemi BIPV come definiti nella EN 50583 Parte 1 [3].

In pratica, la principale differenza tra sistemi BAPV e BIPV sta proprio nella modalità in cui questi elementi sono progettati e integrati nell'edificio in questione. Il metodo BAPV, utilizzato per le soluzioni fotovoltaiche tradizionali,

consiste nel sovrapporre i moduli fotovoltaici alle superfici esistenti, senza che vi sia un'integrazione tecnologica tra il costruito e il pannello. Un esempio di questo tipo di sistemi è il tipico pannello fotovoltaico montato su una copertura esistente, progettato solo considerando l'esposizione e il potenziale energetico. Al contrario, il BIPV prevede la sostituzione dell'elemento costruttivo tradizionale con elementi costruttivi multifunzionali, che incorporano moduli solari e sono quindi in grado di produrre energia. I sistemi BIPV, quindi, non vengono sovrapposti all'edificio, ma ne sostituiscono gli elementi di costruzione (elemento di rivestimento, vetrata, elemento di copertura), diventando parte integrante dell'involucro edilizio.

I sistemi BIPV permettono la coesistenza in un unico elemento di diverse funzioni, che non si limitano alla sola produzione energetica dei pannelli fotovoltaici tradizionali, ma spaziano dalla funzione prettamente estetica a quella strutturale, fornendo ad esempio isolamento termico e acustico, comportando così un risparmio in termini di materiali.

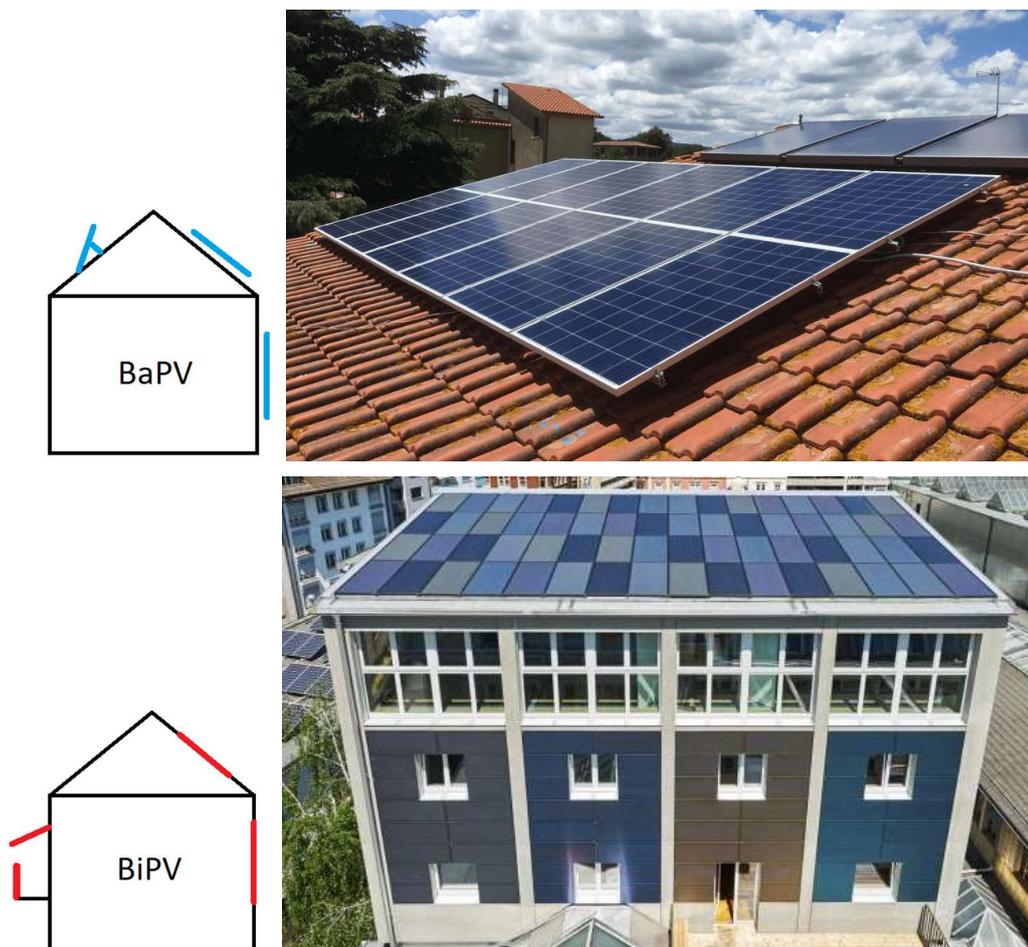


Figura 0.10 Esempi sistemi BIPV e BAPV [5]

## 2.3 Tipologie di applicazioni costruttive del BIPV

I componenti edilizi che possono costituire BIPV sono:

- Elemento di copertura (ad es. manto discontinuo o lucernario);
- Elemento di facciata opaca (sistema di rivestimento);
- Elemento di facciata trasparente (finestra o facciata);
- Protezione anticaduta (ad es. balaustre, parapetti, ecc.);
- Sistemi di ombreggiamento.

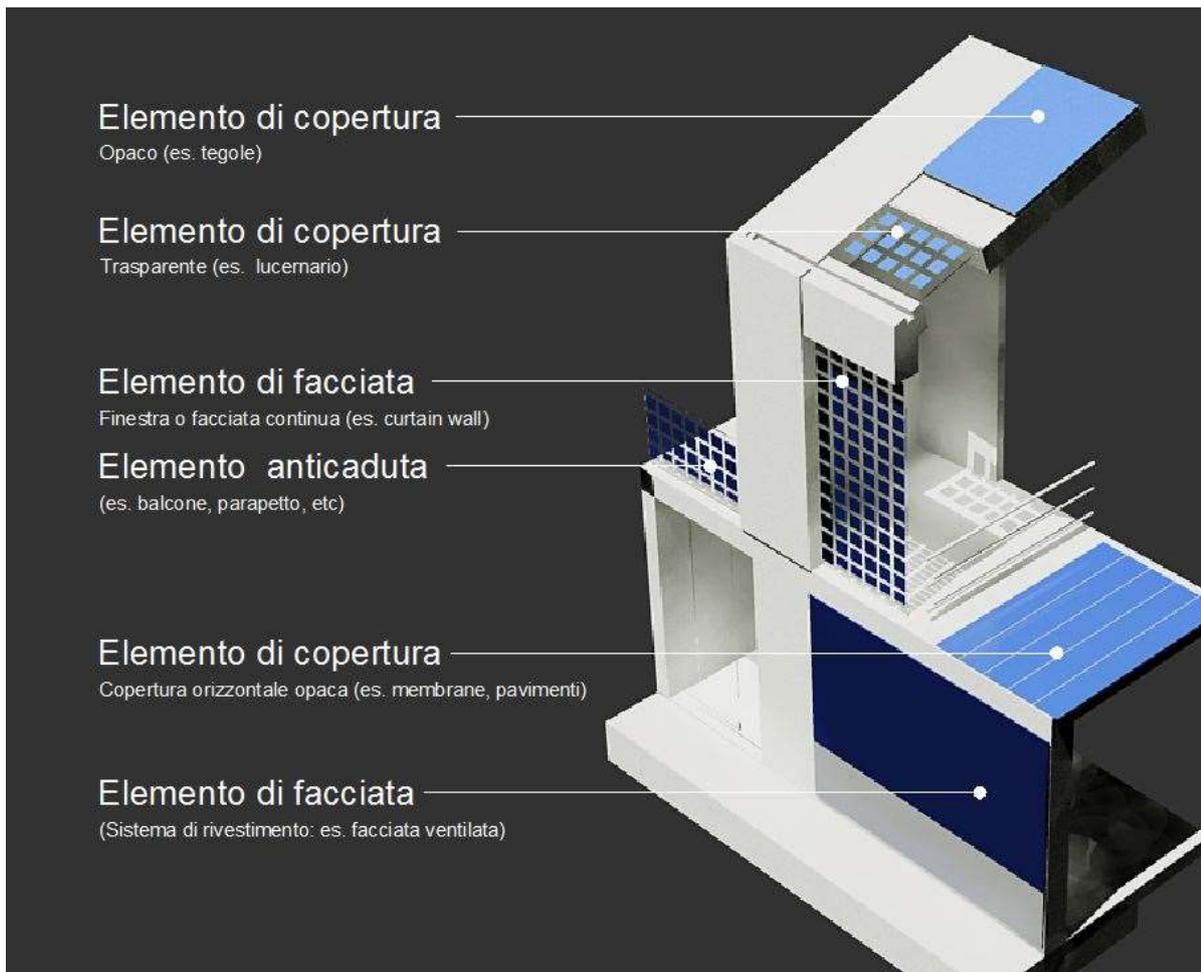


Figura 0.11 Tipologie più diffuse di sistemi BIPV – fonte: [www.BIPV.ch](http://www.BIPV.ch)

I diversi sistemi BIPV possono essere raggruppati fondamentalmente in due principali aree di applicazione: coperture e facciate (

Tabella 0.2 Tipologie di sistemi BIPV utilizzati in facciata

e

Tabella 0.2).

Tabella 0.1 Tipologie di sistemi BIPV utilizzate in copertura



## BIPV in copertura

**Elemento BIPV:** Moduli complanari in copertura

**Tipologia:** Elemento di copertura

La soluzione a tutto tetto non rappresenta un "inserimento" del fotovoltaico all'interno di una superficie del tetto già definita, ma è un fattore caratterizzante della tecnologia costruttiva e del design architettonico. Si ha quindi una sorta di tetto solare, con la superficie del tetto concepita come un collettore solare per la produzione di energia. Gli elementi fotovoltaici (ad es. moduli con speciali cornici, bordi, giunti e connessioni) vengono appositamente sviluppati, insieme alle procedure di installazione, per soddisfare i principali requisiti di costruzione e montaggio.



Figura 0.12 Parco Urbano, Isola di Certosa - fonte: [www.gruppostg.com](http://www.gruppostg.com)



Figura 0.13 Town Hall, Alzira - fonte: [www.onyx-solar.com](http://www.onyx-solar.com)

### **Elemento BIPV:** Tegole fotovoltaiche

#### **Tipologia:** Elemento di copertura

Le tegole solari sono elementi di copertura di forma e materiali tipici della tradizione costruttiva sul quale sono installati sistemi PV. Sono generalmente inserite in una porzione del tetto geometricamente definita, accanto al tetto convenzionale in tegole. L'altezza del pannello viene scelta uguale a quella della tegola. Questo assicura una fusione ottica dei moduli solari con quella delle tegole convenzionali. Le tegole più piccole hanno il vantaggio di offrire un maggiore riempimento del tetto e una migliore estetica, quelle più grandi hanno un costo inferiore. Le tegole solari possono essere smaltate (sottostrato/sovrastato di vetro), oppure a base di fogli, ovvero membrane di polimeri. Le tegole solari ad oggi hanno una piccola quota di mercato a causa degli alti costi.



Figura 0.14 Cascina Rurale - fonte: [www.fornacefonti.it](http://www.fornacefonti.it)



Figura 0.15 Dettaglio Cascina Rurale - fonte: [www.fornacefonti.it](http://www.fornacefonti.it)

**Elemento BIPV:** Lucernari fotovoltaici

**Tipologia:** Elemento di copertura

I lucernari BIPV sono composti da laminati fotovoltaici vetrati, spesso realizzati in cristalli di silicio con spaziatura regolata, o mediante film sottile scanalato al laser che permette di ottenere la trasparenza del vetro. Sono largamente utilizzati in edifici con sistemi di telai (in alluminio estruso, acciaio, legno, ecc.) e creano un effetto simile a quello di una facciata continua. Sono simili ai classici lucernari, nel quale lo strato trasparente è sostituito da vetri fotovoltaici. Queste strutture, di norma, combinano laminati fotovoltaici vetro-vetro con trame e trasparenze diverse, che permettono una progettazione architettonica con giochi di luci e ombre e svolgono un ruolo fondamentale per il bilancio energetico dell'edificio. I lucernari possono essere utilizzati in tetti piani, tetti inclinati e talvolta anche su superfici curve.



Figura 0.16 St. Andrews Cathedral, Sydney - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)



Figura 0.17 City hall, LinaFER - fonte: [www.onyx solar.com](http://www.onyx solar.com)

Tabella 0.2 Tipologie di sistemi BIPV utilizzati in facciata



## BIPV in facciata

**Elemento BIPV:** Facciata continua vetrata

**Tipologia:** Elemento di facciata

La facciata continua fotovoltaica è formata da una lastra di vetro fotovoltaico (ad esempio un vetro laminato) e da una parte portante, rappresentata dal telaio, attrezzata per i passaggi dei cablaggi elettrici. Dal momento che i pannelli fotovoltaici sono completamente integrati nell'involucro dell'edificio, quando si utilizzano facciate continue vetrate i parametri energetici relativi al controllo solare, come il comfort termico e visivo, sono strettamente correlati al progetto fotovoltaico (ad es. disposizione della cella, distanza, ecc.).



*Figura 0.18 Compagnie Parisienne Distribution Electricite, Parigi [6]*



*Figura 0.19 Compagnie Parisienne Distribution Electricite, Parigi [6]*

**Elemento BIPV:** Facciata continua opaca

**Integrazione:** Elemento di facciata

Questo sistema di facciata solare viene utilizzato per sostituire il rivestimento antipioggia convenzionale; è in genere costituito da un sotto-telaio portante ed un pannello di rivestimento fotovoltaico, che può assumere diverse colorazioni e diversi gradi di trasparenza. In estate il calore del sole è dissipato grazie all'intercapedine d'aria ventilata naturalmente attraverso le aperture inferiori e superiori. Questo è il motivo per cui il sistema è anche chiamato "facciata fredda", dato che apporta un effetto rinfrescante, che migliora anche l'efficienza dei moduli stessi. Il risultato è una superficie di facciata liscia e piana, con un notevole effetto estetico.



*Figura 0.20 Residential Building, Parigi [7]*



*Figura 0.21 Solar Silo, Gundeldinger Feld [5]*

Elemento BIPV: Accessori solari

Integrazione: Protezione anticaduta e ombreggiamenti

Queste componenti possono includere balconi, parapetti, pareti divisorie esterne, sistemi di ombreggiatura e molti altri elementi. I dispositivi di ombreggiatura possono essere di vario tipo:

- applicati su tetto o facciata;
- esterni, interposti (ad es. in doppia pelle) o interni;
- verticali, orizzontali o orientati;
- lamellari, micro-lamellari, a vela, a griglia;
- a tenda o schermatura; a schermo o pannelli mobili;

- con elemento speciale (vetro selettivo, pellicola solare, vetro prismatico).

Le celle solari possono essere facilmente laminate in questi accessori offrendo un modo perfetto per utilizzare la funzione ombra con produzione di elettricità.



*Figura 0.22 Torre Bassano Hotel, Napoli – fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)*



*Figura 0.23 Canopy Residence, Algarve – fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)*



*Figura 0.24 Schnitterhaus, Nechlin [5]*

## CAPITOLO 3. CRITERI DI VALUTAZIONE DEGLI INTERVENTI

Le premesse presentate nei precedenti capitoli dimostrano come i sistemi BIPV possano dare un effettivo contributo alla realizzazione degli obiettivi di decarbonizzazione prefissati dall'Unione Europea, sia attraverso il raggiungimento della condizione di edifici ad energia quasi zero (nZEB) per le nuove costruzioni, sia con il risanamento del patrimonio immobiliare esistente. Proprio in relazione al risanamento degli edifici esistenti, questi sistemi permettono un elevato grado di

integrazione con il contesto di tipo storico e paesaggistico. L'integrazione di sistemi PV nel contesto costruito e paesaggistico richiede il bilanciamento tra aspetti di integrazione tecnologica, estetica ed energetica [23, 24] (Figura 3.1), come approfondito nei prossimi paragrafi.



*Figura 3.1: Multifunzionalità del sistema BIPV*

### 3.1 Integrazione Tecnologica

L'integrazione tecnologica rimanda alla multifunzionalità del componente PV che, oltre a svolgere la funzione di produzione energetica, svolge anche il ruolo di componente edilizio, adempiendo a una funzione definita nel Regolamento Europeo di prodotto CPR 305/2011 [4]. Questi sistemi diventano parte integrante dell'involucro edilizio. Le funzioni edilizie attribuibili ai BIPV possono essere le seguenti:

- protezione dagli agenti atmosferici;
- protezione dal rumore;
- isolamento termico;
- ombreggiamento e controllo della luce naturale (daylighting);
- rigidità, resistenza meccanica ed integrità strutturale;
- igiene, salute ed ambiente;
- sicurezza e accessibilità nell'uso;
- durata ed affidabilità.

Questi aspetti sono dettagliati di seguito.

#### 3.1.1 Protezione dagli agenti atmosferici

A seconda del tipo di applicazione, alcuni sistemi BIPV devono garantire protezione da agenti atmosferici come pioggia, neve, vento, grandine e raggi UV durante la loro vita utile, prevenendo gravi danni all'involucro edilizio ed evitando effetti negativi sul comfort interno. I diversi sistemi devono quindi essere progettati e testati in modo da equiparare le prestazioni dei componenti edilizi classici che sostituiscono, soprattutto per quanto riguarda infiltrazioni d'acqua o aria, che hanno un impatto diretto in termini di prestazioni energetiche e comfort interno degli ambienti.

A titolo di esempio, le tegole BIPV devono resistere a test di impermeabilità in condizioni ventose come qualsiasi altra struttura convenzionale del tetto, se installata in conformità con le istruzioni del produttore. Generalmente il produttore fornisce i requisiti minimi necessari per garantire queste prestazioni. In molti paesi è diventata pratica comune installare un sottofondo sotto la copertura del tetto a giunto aperto (barriera primaria contro le intemperie) per fornire una protezione secondaria dall'umidità da condensa, pioggia, vento e neve.

Le infiltrazioni d'aria hanno un impatto diretto sulle prestazioni energetiche, sulla qualità dell'aria interna e sul comfort termico e acustico degli occupanti. La corretta installazione di sistemi BIPV, sia che si tratti di elementi di chiusura come finestre, porte o lucernari, o di rivestimento come facciate e coperture, può essere verificata con un test di ermeticità dell'edificio. Questo tipo di verifica permette di valutare se la quantità di infiltrazioni d'aria esterna nell'involucro rientra in un intervallo accettabile. Il livello di ermeticità richiesto è generalmente determinato a livello nazionale o regionale. La tenuta all'aria dell'elemento può anche essere indicata tra le specifiche tecniche del prodotto.

### 3.1.2 Protezione dal rumore

Secondo il CPR 305/2011, *“Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo che il rumore cui sono sottoposti gli occupanti e le persone situate in prossimità si mantenga a livelli che non nuocciano alla loro salute e tali da consentire soddisfacenti condizioni di sonno, di riposo e di lavoro”* [4].

Il modulo PV non produce alcun suono e, se correttamente integrato nell'edificio, non dovrebbe creare nessun rumore in condizioni di vento normale. Quando opportunamente progettata, l'integrazione dei moduli fotovoltaici può creare una barriera acustica e contribuire a smorzare o reindirizzare il rumore di fondo indesiderato. Diversamente dai moduli BIPV, gli inverter, che hanno il compito di convertire la corrente continua prodotta dal pannello in corrente alternata, sono una potenziale fonte di rumore che deve essere presa in considerazione durante la fase di progettazione. In generale, il rumore prodotto è proporzionale alla loro dimensione, il che significa che gli inverter molto piccoli, solitamente integrati all'interno dei moduli fotovoltaici, non causano problemi di rumore. Gli inverter centrali o di stringa, invece, necessitano di particolare attenzione rispetto all'inquinamento acustico.

### 3.1.3 Isolamento termico

Secondo il CPR 305/2011, *“Le opere di costruzione e i relativi impianti di riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e aerazione devono essere concepiti e realizzati in modo che il consumo di energia richiesto durante l'uso sia moderato, tenuto conto degli occupanti e delle condizioni climatiche del luogo. Le opere di costruzione devono inoltre essere efficienti sotto il profilo energetico e durante la loro costruzione e demolizione deve essere utilizzata quanta meno energia possibile”* [4].

I sistemi di PV integrato, grazie alla loro multifunzionalità, possono infatti costituire un sistema isolante. Sistemi BIPV di copertura, rivestimenti in facciata e vetrate, se opportunamente progettati e combinati con materiali isolanti, possono dunque contribuire a ridurre i carichi annuali di riscaldamento e raffrescamento. Esistono inoltre particolari moduli BIPV, noti come *building integrated photovoltaic thermal* (BIPVT), che sono dotati di sistemi recupero di calore sul lato posteriore e che contribuiscono a migliorare l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. I sistemi BIPV dovrebbero sempre essere progettati e installati per migliorare o mantenere le prestazioni termiche, visive ed il comfort acustico degli occupanti. Il comfort termico è solitamente assicurato quando l'isolamento termico a livello dell'involucro edilizio, comprese quelle aree occupate da BIPV, è elevato.

### 3.1.4 Ombreggiamento e controllo della luce naturale (daylighting)

Le vetrate fotovoltaiche possono contribuire a migliorare l'ombreggiamento durante l'estate, grazie a giochi di luci e ombre (Figura 3.3, Figura 3.2 e Figura 3.3).



Figura 3.2: Giochi di luci e ombre grazie all'utilizzo di vetrate fotovoltaiche per Balenciaga – fonte: [www.onyx-solar.com](http://www.onyx-solar.com)



Figura 3.3: Giochi di luci e ombre grazie all'utilizzo di vetrate fotovoltaiche per Balenciaga – fonte: [www.onyx-solar.com](http://www.onyx-solar.com)

I sistemi PV integrati su elementi vetrati o su sistemi di schermatura solare semitrasparente devono garantire la presenza di un'illuminazione naturale atta a soddisfare le esigenze di comfort visivo degli utenti, in relazione alla funzione dell'edificio. In questo modo si possono ridurre i consumi di energia legati all'illuminazione artificiale. I parametri da considerare nella progettazione di questi sistemi sono: contatto visivo con l'esterno, controllo dell'abbagliamento, requisiti di contrasto luminoso, luminanza e livelli di illuminamento. Simulazioni di daylight o modelli fisici possono aiutare ad analizzare queste problematiche e a guidare i progettisti verso alla scelta di sistemi adeguati.

### 3.1.5 Rigidezza, resistenza meccanica ed integrità strutturale

Nell'Unione Europea, l'Eurocodice EN 1990 *“stabilisce principi e requisiti per la sicurezza, l'esercizio e la durabilità delle strutture, descrive i criteri generali per la loro progettazione e verifica e fornisce linee guida per i correlati aspetti di affidabilità strutturale”* [25]. Inoltre, la resistenza meccanica e la stabilità sono anche uno dei requisiti essenziali fissati nell'Unione Europea dal CPR 305/2011 [4]. Gli standard che definiscono le caratteristiche e i metodi di prova e valutazione utilizzati per verificare che un elemento rispetti i requisiti richiesti sono molteplici.

Il CPR 305/2011 afferma: *“Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo che i carichi cui possono essere sottoposti durante la realizzazione e l'uso non provochino:*

- a) *il crollo, totale o parziale, della costruzione;*
- b) *gravi ed inammissibili deformazioni;*
- c) *danni ad altre parti delle opere di costruzione, o a impianti principali o accessori, in seguito a una grave deformazione degli elementi portanti;*
- d) *danni accidentali sproporzionati alla causa che li ha provocati” [4].*

I carichi e le forze specifiche nel caso di impianti PV sono tipicamente i seguenti:

- Il peso dell'impianto PV stesso e delle sue sottostrutture e infissi;
- Carichi neve;
- Carichi vento;
- Carichi sismici;
- Urti violenti da grandine o altri oggetti esterni che possono cadere su un modulo PV;
- Urti leggeri (dati, ad esempio, da persone che cadono o si appoggiano su un modulo PV);
- Dilatazione termica e sollecitazioni termiche;
- Carichi puntuali o distribuiti (dati, ad esempio, da persone in piedi o che camminano sul PV);
- Carichi che si verificano durante lavori di costruzione o manutenzione (quali la pulizia o la sostituzione di componenti o moduli del sistema);
- Carichi dovuti ad altre componenti dell'edificio, ove applicabile.

A differenza degli altri fattori la prevalenza di neve, grandine e vento è strettamente legata e influenzata dalla posizione geografica. I livelli specifici nazionali sono definiti nelle appendici dell'Eurocodice EN 1990-1999 e in ulteriori norme nazionali e codici edilizi [25], ma variano anche all'interno delle singole nazioni. Per il vento, in particolare, i carichi dipendono fortemente sia dall'altezza dell'edificio che dal posizionamento dell'impianto BIPV sulla costruzione.

L'attuale standard EN 50583 [3, 2] riassume le norme che possono essere utilizzate come riferimento per i requisiti sulla resistenza meccanica e sulla stabilità dei sistemi BIPV, differenziandole sia per composizione del pannello PV che per tipologia di applicazione.

Nello specifico, la tipologia di applicazione del sistema BIPV incide molto sui requisiti meccanici e di stabilità che il pannello deve soddisfare, i quali variano a seconda che il pannello sia usato come elemento di copertura, facciata o come dispositivo di schermatura solare. Generalmente il prodotto BIPV non è progettato per trasportare carichi speciali, tuttavia esistono applicazioni particolari, come le pavimentazioni fotovoltaiche o le coperture in vetro PV, che devono garantire elevati standard di resistenza ai carichi e necessitano pertanto di particolari attenzioni nella progettazione. In molte applicazioni i prodotti BIPV richiedono una maggiore resistenza al carico e rigidità strutturale rispetto a moduli fotovoltaici

standard e, cosa ancora più importante, devono garantire l'integrità post-rottura del sistema.

Sistemi BIPV applicati in copertura devono generalmente garantire:

- Resistenza a carichi di neve e vento;
- Tolleranza ai carichi imposti durante i lavori di costruzione e manutenzione;
- Requisiti aggiuntivi di resistenza al carico e agli urti per le vetrate calpestabili.

Sistemi BIPV applicati verticalmente in facciata devono generalmente garantire:

- Proprietà del vetro laminato e maggiore rigidità alla flessione dovuta all'installazione verticale dei pannelli;
- Resistenza a carichi vento superiori a quelli specificati negli standards della Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) per installazioni ad altezze elevate;
- Maggiore resistenza ai carichi puntuali dati dalle schermature;
- Proprietà del vetro laminato nel caso di elementi in vetro-vetro.

Sistemi BIPV verticali "vetro barriera" con funzione protettiva, come balaustre per terrazze, devono generalmente garantire:

- Proprietà del vetro laminato nel caso di elementi in vetro-vetro.

Sistemi BIPV usati per installazioni sopraelevate come tetti in vetro, pensiline ed elementi ombreggianti, devono generalmente garantire:

- Proprietà del vetro laminato nel caso di elementi in vetro-vetro.

Esiste inoltre una normativa specifica sulla sicurezza e sulla resistenza meccanica dei pannelli fotovoltaici, la IEC 61730 [26], che descrive i presupposti necessari ai pannelli fotovoltaici per essere impiegati nelle costruzioni, garantendo dei margini di sicurezza dal punto di vista meccanico ed elettrico.

### **3.1.6 Igiene, salute ed ambiente**

Secondo il CPR 305/2011 [4] *"Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo da non rappresentare, durante il loro intero ciclo di vita, una minaccia per l'igiene o la salute e la sicurezza dei lavoratori, degli occupanti o dei vicini e da non esercitare un impatto eccessivo, per tutto il loro ciclo di vita, sulla qualità dell'ambiente o sul clima, durante la loro costruzione, uso e demolizione, in particolare a causa di uno dei seguenti eventi:*

*a) sviluppo di gas tossici;*

*b) emissione di sostanze pericolose, composti organici volatili (VOC), gas a effetto serra o particolato pericoloso nell'aria interna o esterna;*

*c) emissioni di radiazioni pericolose;*

- d) dispersione di sostanze pericolose nelle falde acquifere, nelle acque marine, nelle acque di superficie o nel suolo;*
- e) dispersione di sostanze pericolose o di sostanze aventi un impatto negativo sull'acqua potabile;*
- f) scarico scorretto di acque reflue, emissione di gas di combustione o scorretta eliminazione di rifiuti solidi o liquidi;*
- g) umidità in parti o sulle superfici delle opere di costruzione”.*

I materiali che compongono il modulo BIPV, come il vetro, il telaio, la struttura portante, la scatola di giunzione ed il cablaggio, devono essere conformi ai requisiti sopra elencati. L'uso di materiali tossici o di quantità significative di materiali rari deve essere evitato, ove possibile, ed i prodotti devono essere progettati in modo tale da poter essere facilmente separati per permettere un riciclaggio efficace.

Inoltre, poiché i moduli BIPV sono solitamente impermeabili all'acqua e al vapore, proprio come qualsiasi altro componente di costruzione in vetro o metallo, è importante che il sistema sia costruito secondo pratiche costruttive all'avanguardia, per consentire il controllo della diffusione dell'acqua e del vapore ed i problemi ad essi connessi. Gli impianti BIPV installati, essendo impianti elettrotecnici, devono essere conformi con gli standard della IEC e con gli standard locali e le normative sui livelli di campo elettromagnetico.

### **3.1.7 Sicurezza e accessibilità nell'uso**

In tema di sicurezza ed accessibilità nell'uso, il CPR 305/2011 [4] specifica che *“Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo che il loro funzionamento o uso non comporti rischi inaccettabili di incidenti o danni, come scivolamenti, cadute, collisioni, ustioni, folgorazioni, ferimenti a seguito di esplosioni o furti. In particolare, le opere di costruzione devono essere progettate e realizzate tenendo conto dell'accessibilità e dell'utilizzo da parte di persone disabili”.*

Queste esigenze sono state tradotte anche dal punto di vista della sicurezza elettrica e di quella costruttiva/meccanica. Un esempio è lo standard IEC 62109-1:2010 [27], secondo il quale gli inverter devono garantire determinati requisiti di sicurezza:

- a) Protezione contro scosse elettriche e rischi energetici;
- b) Protezione contro i rischi meccanici;
- c) Protezione contro i rischi di incendio;
- d) Protezione contro i rischi di pressione sonora;
- e) Protezione contro i rischi di liquidi;

- f) Protezione contro i rischi chimici;
- g) Indicazioni su come gestire un elemento BAPV/BIPV (cablaggio, connessione, ecc.).

A tal proposito, gli standard di sicurezza dei moduli fotovoltaici, IEC 61730 parte 1 e 2 [26], includono una serie di test riguardanti l'ispezione generale, il rischio di scosse elettriche, il rischio incendio e lo stress meccanico e ambientale.

Anche la sicurezza antincendio è uno dei requisiti essenziali fissati nel CPR 305/2011 [4], che stabilisce quanto segue:

*“Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo che, in caso di incendio:*

- a) la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;*
- b) la generazione e la propagazione del fuoco e del fumo al loro interno siano limitate;*
- c) la propagazione del fuoco a opere di costruzione vicine sia limitata;*
- d) gli occupanti possano abbandonare le opere di costruzione o essere soccorsi in altro modo;*
- e) si tenga conto della sicurezza delle squadre di soccorso”.*

Il CPR 305/2011 [4] richiede che tutti i prodotti o sistemi BIPV utilizzati come elementi costruttivi non riducano la sicurezza degli occupanti in caso di incendio. I requisiti minimi e le prestazioni di sicurezza sono stati specificati in diversi standard e regolamenti.

Per architetti e progettisti edili è essenziale disporre di informazioni relative alla classificazione al fuoco dell'elemento BIPV. Ciò include non solo i moduli fotovoltaici e le relative sottostrutture, ma anche gli inverter.

### **3.1.8 Durata ed affidabilità**

Idealmente un sistema BIPV dovrebbe funzionare per tutta la vita utile dell'edificio, mantenendo tutte le sue funzioni, sia come componente dell'edificio che come generatore di elettricità.

La sostituzione di un modulo guasto è più complessa quando l'elemento è integrato nell'edificio rispetto a quando è semplicemente applicato. È quindi importante che i moduli BIPV abbiano lo stesso livello di durata e affidabilità per ciascuna funzione.

Per garantire adeguati standard prestazionali, durante la sua vita utile il sistema BIPV deve essere sottoposto a manutenzione periodica. La manutenzione deve essere eseguita senza compromettere il comfort o la sicurezza degli abitanti o l'edificio stesso. I produttori ed i progettisti di sistemi BIPV dovrebbero tenere in

considerazione la manutenzione del sistema BIPV durante la fase di progettazione. La quantità e il tipo di manutenzione necessari dipendono dalle condizioni climatiche nel luogo di installazione. Nella progettazione dovrebbero essere considerati i seguenti aspetti:

- Accessibilità del sistema BIPV;
- Predisposizione per camminare sui tetti BIPV per scopi di manutenzione;
- Possibilità di sostituzione di singoli moduli (di tetti o facciate BIPV);
- Tolleranza all'ombreggiamento dei moduli BIPV, se puliti o mantenuti durante il giorno;
- Istruzioni e strumenti necessari per la pulizia della superficie.

***Un sistema PV è integrato tecnologicamente quando non si limita alla sola produzione energetica ma svolge anche altre funzioni.***

***Per un'adeguata integrazione tecnologica dei sistemi BIPV i progettisti dovrebbero considerare tutte le possibili funzioni del pannello PV, considerando il suo contributo all'involucro nella protezione dagli agenti atmosferici, dal rumore, dalla radiazione solare e dai flussi termici indesiderati, garantendone le prestazioni meccaniche, elettriche e la durata. I progettisti devono valutare, caso per caso, quale è l'impatto che le singole scelte possono avere sul sistema edificio-impianto, per poter identificare la soluzione progettuale più adatta, agendo sempre nel rispetto della sicurezza e della salute degli individui.***

### 3.2 Integrazione estetica

Con integrazione estetica si intende la capacità del PV di rispettare il linguaggio stilistico, compositivo e morfologico di un edificio, integrandosi armoniosamente nel costruito e rispettando la composizione architettonica dell'edificio. A questo scopo, l'International Energy Agency (IEA) nel SHC Task 41 su "Energia solare e architettura" [24] consiglia di valutare l'integrazione estetica di un modulo tenendo conto di diversi fattori:

- i materiali visibili del modulo PV, la texture ed il colore devono essere coerenti con gli altri materiali dell'involucro edilizio;
- la posizione, la forma e la dimensione dei moduli, devono essere in linea con le caratteristiche morfologiche e compositive dell'edificio;
- la dimensione e la forma dei moduli devono essere compatibili con la griglia compositiva e con le diverse dimensioni degli elementi dell'edificio, rispettando le diverse linee dell'architettura;
- i sistemi di giunzione devono essere attentamente considerati in fase di scelta del sistema, poiché possono influenzare la percezione della griglia modulare del sistema.

I criteri che un progettista deve valutare per integrare il sistema BIPV nell'edificio possono quindi essere riassunti come:

1. Criteri estetici legati alla composizione del sistema BIPV;
  - Texture;
  - Colore;
  - Pattern;
  - Trasparenza;
  - Riflessione;
2. Criteri estetici legati al posizionamento del sistema BIPV;
  - Complanarità;
  - Forma e dimensione;
  - Raggruppamenti;
  - Rispetto delle linee.

Le scelte progettuali legate a ogni singolo criterio determinano il livello di integrazione e visibilità finale del pannello. A seconda del tipo di progetto si potranno prediligere scelte progettuali volte a “nascondere” il PV all'interno dell'edificio (Figura 3.4) o scelte volte a farlo emergere come protagonista (Figura 3.5). La seconda opzione generalmente è attuabile nelle nuove costruzioni, mentre la prima si addice soprattutto a edifici esistenti e sottoposti a qualsiasi forma di tutela.

L'accettabilità delle tecnologie PV è più sfidante in contesti esistenti, perché richiede anche il rispetto delle linee edilizie, il raggruppamento dei pannelli, la riduzione degli spazi tra i pannelli e un design accurato.



*Figura 3.4: Esempio di fotovoltaico “nascosto” nel contesto di una riqualificazione urbana, Isola della Certosa - fonte: [www.gruppostg.com](http://www.gruppostg.com)*



*Figura 3.5: Esempio di fotovoltaico reso protagonista del concept architettonico di una nuova costruzione, Copenhagen [5]*

### 3.2.1 Colore

Il colore dei diversi moduli ha un elevato impatto visivo sull'edificio e sul contesto costruito o naturalistico di riferimento. I pannelli PV colorati hanno permesso nuove possibilità di integrazione cromatica di questi sistemi. La maggior parte dei moduli fotovoltaici standard sono nella gamma di colori scuri (nero, blu, viola, verde), mentre con i fotovoltaici colorati si raggiungono anche gamme di colori chiari. Le prestazioni energetiche di questi pannelli sono generalmente inferiori rispetto a quelle dei moduli tradizionali, con una perdita di potenza compresa tra il 7% e il 10% [28].



*Figura 3.6 Palette di Colori per pannelli fotovoltaici di tipo monocristallino [29]*



*Figura 3.7 Palette di Colori per pannelli fotovoltaici di tipo policristallino [29]*

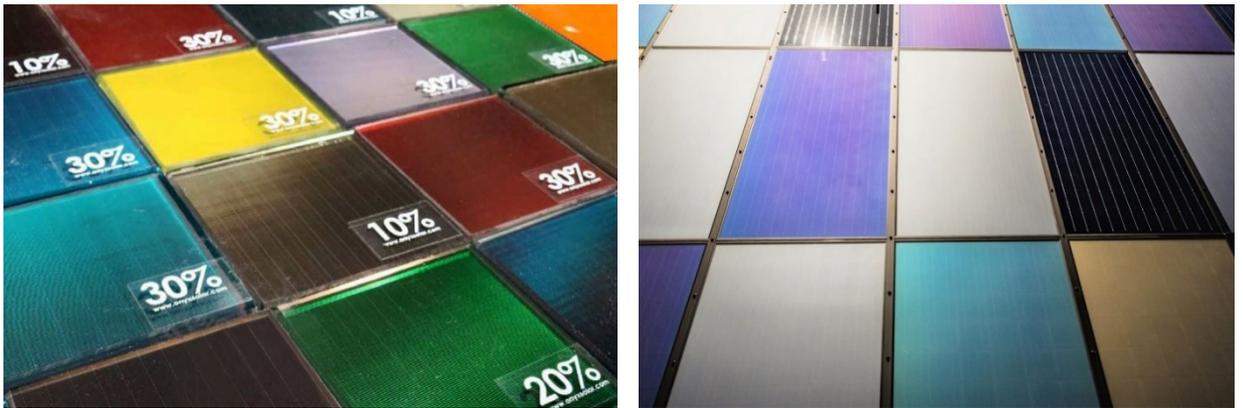


Figura 3.8 Esempi di vetro fotovoltaico in colorazioni diverse – fonte: [www.onyx.com](http://www.onyx.com)



Figura 3.9 Esempi di pannelli fotovoltaici semitrasparenti in silicio amorfo – fonte: [www.onyx.com](http://www.onyx.com)

L'integrazione cromatica dei pannelli PV con i materiali tradizionali è un requisito importante soprattutto in contesti di edilizia esistente. Nel contesto italiano si consiglia l'utilizzo di celle color terracotta per i coppi, celle antracite o grigio-verde per ardesia o pietra, celle bianche per intonaco o immagini ad alta risoluzione come marmo o legno [30].

#### Esempio di integrazione cromatica

Le immagini seguenti mostrano due esempi diversi di integrazione del PV. Nella prima immagine la totalità del pannello BIPV è molto simile alla tonalità del manto di copertura esistente, rendendolo poco riconoscibile dal punto di vista cromatico. Nella seconda immagine i coppi fotovoltaici scelti hanno un colore diverso rispetto al manto di copertura esistente, rendendo l'intervento ben riconoscibile e non integrato dal punto di vista cromatico.



*Figura 3.10: Esempio di modulo fotovoltaico in copertura con colorazione che si integra al contesto esistente – fonte: [www.besmartproject.eu](http://www.besmartproject.eu)*



*Figura 3.11: Esempio di modulo fotovoltaico in copertura con colorazione che non si integra al contesto esistente – fonte: @Bête spatio-temporelle – Own work*

### 3.2.2 Texture

La texture, in ambito architettonico, indica la grana di un materiale, l'intreccio omogeneo di segni, che fanno apparire una superficie unitaria. Questo termine richiama una sensazione tattile del materiale. Nel PV la texture è una caratteristica dello strato anteriore del vetro, che può essere ottenuta mediante diverse tecniche personalizzate. A seconda della grana del materiale usato per lo strato anteriore del modulo, esso può risultare opaco (grana grossa) o lucido (grana fine). Inoltre, in relazione al modo in cui il materiale riflette la luce, la superficie può essere statica o scintillante.

### Esempio di integrazione a livello di texture

Le immagini seguenti mostrano due approcci diversi nell'integrazione del PV, per quanto riguarda la texture di una copertura in ardesia tradizionale (Figura 3.12). Nel primo esempio, mostrato in Figura 3.13, i pannelli utilizzati sono opachi e poco riflettenti, e ricordano la texture di un manto di copertura in ardesia. Nel secondo i pannelli sono lucidi, riflettenti e lisci, e non ricordano la texture della copertura in ardesia, risultando quindi non integrati dal punto di vista della texture (Figura 3.14).



*Figura 3.12 Esempio di copertura in ardesia – fonte: [www.mnv-ardesia.it](http://www.mnv-ardesia.it)*



*Figura 3.13 Esempio di BIPV in copertura con texture opaca – fonte: [www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com)*



Figura 3.14 Esempio di BIPV in copertura con texture lucida – fonte: [www.seelectricalservicesltd.com](http://www.seelectricalservicesltd.com)

### 3.2.3 Pattern

Il pattern all'interno di un pannello PV è dato dalla disposizione specifica delle diverse celle fotovoltaiche, che vanno a costituire una trama composta da diversi pixel che influenza l'aspetto estetico del modulo. Grazie all'utilizzo di speciali materiali di rivestimento e di tecniche di stampaggio del vetro particolari, è possibile ottenere sia superfici omogenee monocromatiche, dove la cella fotovoltaica non è visibile, sia superfici caratterizzate da trame studiate ad hoc e progettate su misura a seconda delle esigenze. Un esempio è il mock-up sviluppato nell'ambito del progetto europeo *Construct PV* [31], che vede l'installazione di moduli con pattern diversi gli uni dagli altri. I moduli sfruttano la tecnologia cristallina ed una speciale tecnica di lavorazione chiamata *Sand Blasting*, che permette di personalizzare il vetro frontale dei sistemi BIPV. Alcuni prototipi sono successivamente stati realizzati e testati in edifici pilota.



*Figura 3.15 Un mock-up di facciata al campus di Treviso della SUPSI mostra le varie possibilità di progettare moduli in diverse tipologie di facciata. [31]*

Generalmente i moduli in silicio cristallino presentano una superficie disomogenea e composta da diversi pixel quadratici, mentre i moduli in silicio amorfo presentano una superficie liscia e monocromatica. Le immagini seguenti mostrano alcuni esempi di pannelli con pattern diversi.

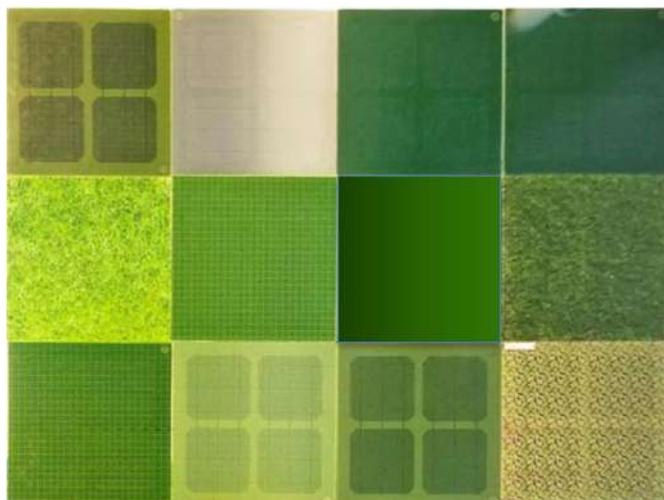


Figura 3.16 Esempio di soluzioni progettuali con pattern diversi

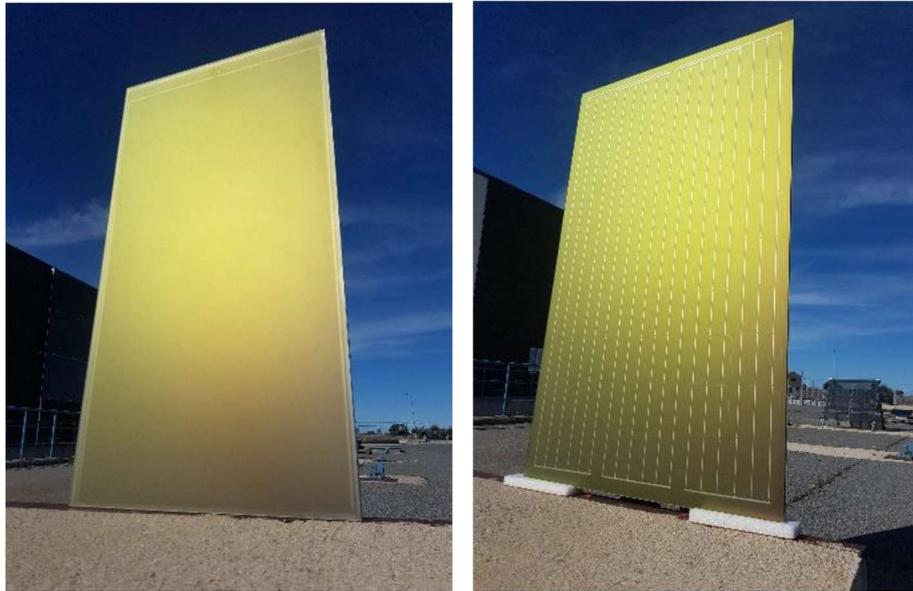


Figura 3.17 Esempi di BIPV con texture diversa in silicio amorfo (sinistra) e silicio cristallino (Destra)  
– fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)



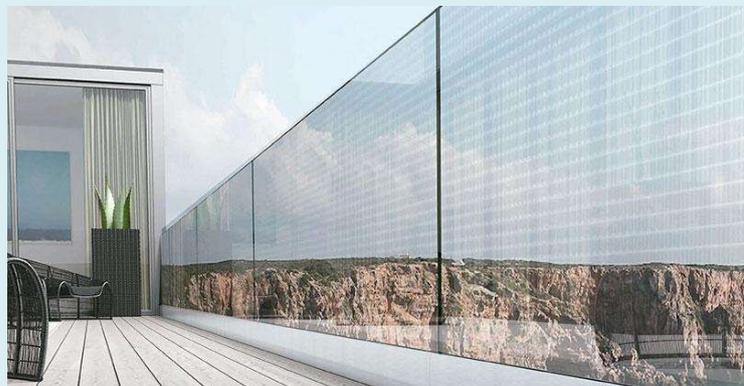
Figura 3.18 Esempi di BIPV con texture diversa in silicio amorfo (sinistra) e silicio cristallino (Destra)  
– fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)

### Esempio di integrazione a livello di pattern

Le immagini seguenti mostrano tre applicazioni diverse di sistemi BIPV per parapetti. La prima vede l'utilizzo di moduli in silicio amorfo, con un pattern che sembra dare continuità al rivestimento di facciata dell'edificio. La seconda vede l'utilizzo di moduli in silicio amorfo, dal pattern trasparente, che si mimetizzano nel paesaggio circostante. La terza vede ancora l'utilizzo di moduli in silicio amorfo, il cui pattern si distacca dal materiale utilizzato per il rivestimento di facciata, rendendo il pannello ben visibile e facilmente individuabile ad occhio nudo.



*Figura 3.19 Esempio di integrazione a livello di pattern [5]*



*Figura 3.20 Esempio di integrazione a livello di pattern - fonte: [www.onyx-solar.com](http://www.onyx-solar.com)*



*Figura 3.21 Esempio di integrazione a livello di pattern - fonte: [www.casafacile.it](http://www.casafacile.it)*

### 3.2.4 Riflessione

Come accade per tutte le superfici vetrate o riflettenti degli edifici, quando la luce solare colpisce i moduli BIPV installati su una facciata, può provocare abbagliamento e riscaldamento dell'ambiente circostante (Figura 3.22), fenomeni che dovrebbero essere considerati ed evitati.



Figura 3.22 Esempio di BAPV in copertura con problemi di riflessione – fonte: [www.gwhsolar.com](http://www.gwhsolar.com)

Per ridurre al minimo la riflessione ottica e catturare al massimo la radiazione solare, pertanto, sin dalle prime fasi di progettazione i progettisti dovrebbero considerare la morfologia dell'edificio, l'ambiente circostante, il posizionamento dei pannelli (orientamento ed inclinazione) e le caratteristiche dei vari materiali fotovoltaici. La posizione relativa del sole, il posizionamento del pannello e l'ambiente circostante sono fattori importanti da considerare per indagare la traiettoria della luce riflessa. La quantità di luce riflessa, infatti, cambia notevolmente al variare della posizione e dell'orientamento del sistema BIPV e della posizione del sole, che a sua volta varia a seconda della stagione e dell'ora del giorno.

I moduli riflettono la luce in modo diverso gli uni dagli altri, a seconda del tipo di materiale scelto. Come mostrato in Figura 3.23, alcuni pannelli non riflettono l'immagine (esempio riflessione 1), altri riflettono solo la forma sfocata (esempio riflessione 2) ed altri ancora riflettono l'immagine ben definita, come avviene in uno specchio (esempio riflessione 3).

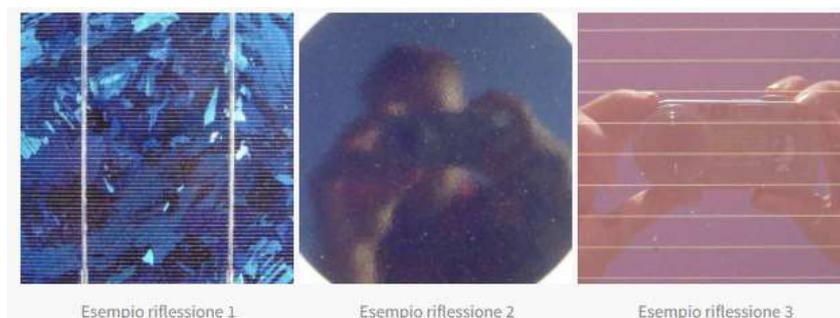


Figura 3.23 Esempio di pannelli con diversi tipi di riflessione fonte: [www.bipv.ch](http://www.bipv.ch)

Per alcuni tipi di materiali, come il metallo, la riflessione può essere ridotta giocando su colori e texture dei moduli, ed utilizzando particolari tecniche di rivestimento. Per ridurre la quantità di radiazione solare riflessa e aumentare efficienza elettrica, i pannelli possono essere dotati di particolari rivestimenti antiriflesso, generalmente applicati sulla superficie del vetro PV. Tuttavia, questi

rivestimenti riducono solo in parte l'abbagliamento e non risolvono completamente il problema. È quindi necessario non limitarsi ad utilizzare queste tecnologie antiriflesso e valutare, caso per caso, il percorso e l'intensità della luce riflessa dai pannelli BIPV per rimuovere o ridurre l'abbagliamento e altri riflessi di disturbo. In genere i modi più efficaci per ridurre l'abbagliamento dei pannelli solari sono:

- Scegliere un pannello con una texture più ruvida e meno riflettente;
- Modificare l'orientamento e l'inclinazione dei pannelli;
- Schermare e nascondere i pannelli in modo che non siano visibili dall'ambiente circostante.

#### **Esempio di integrazione a livello di riflessione**

Le immagini seguenti mostrano due approcci diversi usati nell'installazione di ombreggiamenti fotovoltaici. La prima vede l'utilizzo di moduli BIPV traslucidi, che riflettono la luce e possono generare fenomeni di abbagliamento. La seconda vede l'utilizzo ombreggiamenti dalla texture meno riflettente, che riducono il verificarsi di

abbagliamenti.



*Figura 3.24 Esempio di BIPV riflettente in facciata – fonte: [www.igsmag.com](http://www.igsmag.com)*



*Figura 3.25 Esempio di BIPV poco riflettente in facciata – fonte: [www.kuczia.com](http://www.kuczia.com)*

### 3.2.5 Trasparenza

Nei sistemi BIPV vetriati, siano essi in facciata o in copertura, la trasparenza è un fattore importante per il benessere interno, sia per i giochi di luci ed ombre che il livello di trasparenza può creare, sia per l'apporto termico dato. A seconda del tipo di vetro PV scelto, si potranno avere moduli completamente trasparenti o moduli

semi-trasparenti. All'aumentare del livello di trasparenza del modulo corrisponde una diminuzione proporzionale della sua efficienza. I vetri fotovoltaici offrono diverse opzioni di design e possono adattarsi a tutte le esigenze progettuali. Nei moduli in silicio monocristallini e multicristallini il grado di trasparenza del pannello si ottiene modificando la distanza tra le diverse celle, che possono avere forme e dimensioni diverse (

*Figura 3.26 e*

*Figura 3.27*). Nei moduli a film sottile, come quelli in silicio amorfo, la trasparenza è data dall'assenza dello strato riflessivo posto sotto le celle o da un processo di incisione al laser che permette di ottenere un rivestimento con una trasparenza omogenea, equivalente a quella ottenibile con un vetro colorato (*Figura 3.28 e Figura 3.29*).





Figura 3.26 Sistemi BIPV in silicio cristallino con diversi livelli di distanziamento tra celle fotovoltaiche - fonte: [www.onyx solar.com](http://www.onyx solar.com)



Figura 3.27 Sistemi BIPV in silicio cristallino con celle diversamente distanziate - fonte: [www.onyx solar.com](http://www.onyx solar.com)



Figura 3.28 Sistemi BIPV in silicio amorfo con diversi livelli di trasparenza: basso (10%), medio (20%) e alto (30%) - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)



Figura 3.29 Sistemi BIPV in silicio amorfo con trasparenza omogenea - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)

### Esempio di integrazione a livello di trasparenza

Le immagini seguenti mostrano tre approcci diversi usati nell'installazione di coperture in vetro PV. La prima vede l'utilizzo di moduli BIPV in silicio cristallino, utilizzati per creare un effetto schermatura solare e generare giochi di luci ed ombre. La seconda vede l'installazione di BIPV semi-trasparenti, che permettono alla luce di entrare, ma non di vedere perfettamente attraverso il vetro. La terza presenta moduli silicio amorfo completamente trasparenti, scelti per simulare l'effetto del vetro classico e permettere una continuità visiva tra esterno ed interno.

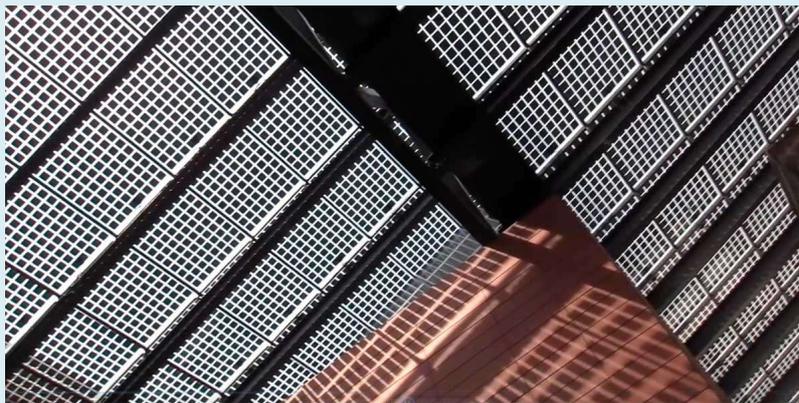


Figura 3.30 Esempio 1 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)



Figura 3.31 Esempio 2 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)



Figura 3.32 Esempio 3 di integrazione a livello di trasparenza - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)

### 3.2.6 Raggruppamenti

Il raggruppamento dei pannelli PV in zone specifiche dell'edificio permette di ridurre l'impatto visivo, contribuendo quindi all'integrazione estetica dei pannelli fotovoltaici. Lo stesso ragionamento vale per la copertura, dove il raggruppamento dei pannelli su un'intera falda crea un'immagine geometrica e cromatica uniforme.

#### Esempio di integrazione a livello di raggruppamenti

Le immagini seguenti mostrano due esempi diversi di integrazione del PV. Nella prima immagine i pannelli sono distribuiti in più gruppi sulla falda dell'edificio, mentre nel secondo i pannelli sono raggruppati in un unico gruppo compatto ed ordinato, che risulta meno impattante dal punto di vista visivo.



Figura 3.33 Esempio di pannelli non raggruppati omogeneamente - fonte: [www.wegalux.gruppostg.com](http://www.wegalux.gruppostg.com)



Figura 3.34 Esempio di pannelli non raggruppati omogeneamente - fonte [www.news.energysage.com](http://www.news.energysage.com)

### 3.2.7 Forma e dimensione

La forma dei moduli BIPV, come il colore, ha un grande impatto sull'integrazione estetica di questi sistemi. Impianti BIPV con forma e dimensione simile alle coperture tradizionali si mimetizzano più facilmente, integrandosi con il contesto esistente e riducendo l'impatto visivo della parte fotovoltaica.

#### Esempio di integrazione a livello di forma

Le immagini seguenti mostrano due esempi diversi di integrazione del PV. Nella prima immagine la forma e la dimensione del pannello BIPV si discostano da quelle del manto di copertura esistente, rendendolo riconoscibile dal punto di vista geometrico. Nella seconda immagine i moduli scelti hanno forma e dimensione simili a quelle del tetto

esistente, rendendo l'intervento meno riconoscibile e ben integrato dal punto di vista geometrico.



Figura 3.35 Esempio di sistemi BIPV non integrati dal punto di vista geometrico con la copertura esistente [32]

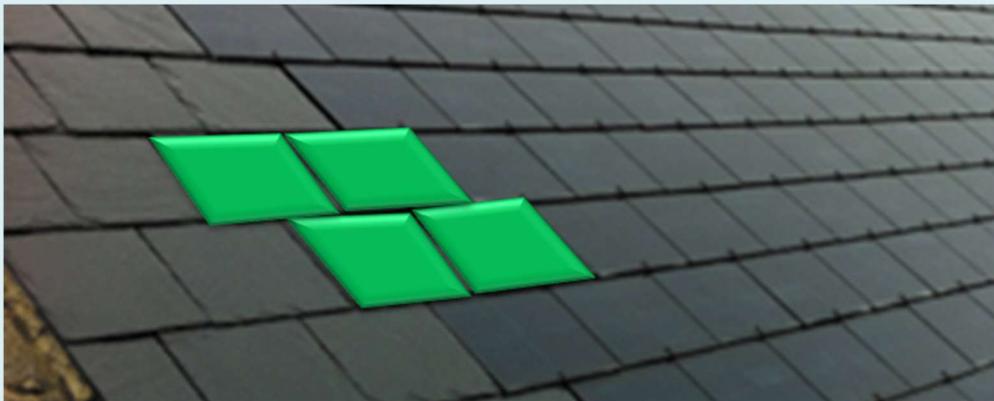


Figura 3.36 Esempio di sistemi BIPV integrati dal punto di vista geometrico con la copertura esistente – fonte: [www.architecturemagazine.co.uk](http://www.architecturemagazine.co.uk)

### 3.2.8 Rispetto delle linee

Il rispetto delle linee fa riferimento alla distribuzione dei moduli fotovoltaici che, per risultare ben integrati dal punto di vista estetico, dovrebbero seguire i principali schemi compositivi del sistema architettonico. Il progettista, nella distribuzione dei moduli fotovoltaici, dovrebbe pertanto seguire, per quanto possibile, le linee compositive di copertura e facciata per minimizzare l'impatto visivo dei sistemi fotovoltaici.

#### Esempio di integrazione a livello di rispetto delle linee

Le immagini seguenti mostrano due esempi diversi di integrazione del PV dal punto di vista distributivo. Nella prima immagine i diversi moduli non seguono le linee delle falde inclinate

della copertura esistente, rendendo l'intervento più riconoscibile dal punto di vista distributivo. Nella seconda immagine i moduli fotovoltaici scelti seguono le diverse linee compositive del manto di copertura esistente, riducendo la visibilità dell'intervento ed integrandolo dal punto di vista distributivo.



Figura 3.37 Esempio di sistemi BIPV che non seguono le linee della copertura esistente – fonte: [www.bvisolar.com](http://www.bvisolar.com)



Figura 3.38 Esempio di sistemi BIPV che seguono le linee della copertura esistente fonte: [www.buildwithrise.com](http://www.buildwithrise.com)

### 3.2.9 Complanarità

La complanarità fa riferimento alla modalità di applicazione dei moduli, ed è una delle caratteristiche distintive tra sistemi BIPV e BAPV. I moduli PB, per risultare complanari, devono essere montati conservando la stessa inclinazione della superficie sulla quale sono posizionati, con spessore del modulo e della struttura di supporto adatti a minimizzare la porzione di modulo che emerge rispetto alla superficie esistente. In ogni caso i sistemi BIPV non devono sporgere rispetto alla falda di copertura.

**Esempio di integrazione a livello di complanarità**

Le immagini seguenti mostrano due esempi diversi di integrazione del PV. La prima immagine mostra dei sistemi BAPV appoggiati su una copertura esistente che, sebbene rispettino le tonalità cromatiche del manto, non ne rispettano i requisiti di complanarità e risultano pertanto ben visibili e non completamente integrati dal punto di vista estetico. La seconda immagine mostra invece dei moduli BIPV utilizzati in alternanza a piastrelle tradizionali per una pavimentazione in copertura. I moduli risultano perfettamente complanari rispetto al resto della struttura, rendendo l'intervento meno riconoscibile e ben integrato dal punto di vista applicativo.



Figura 3.39 Esempio di sistemi BAPV appoggiati sulla copertura ma non integrati - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)

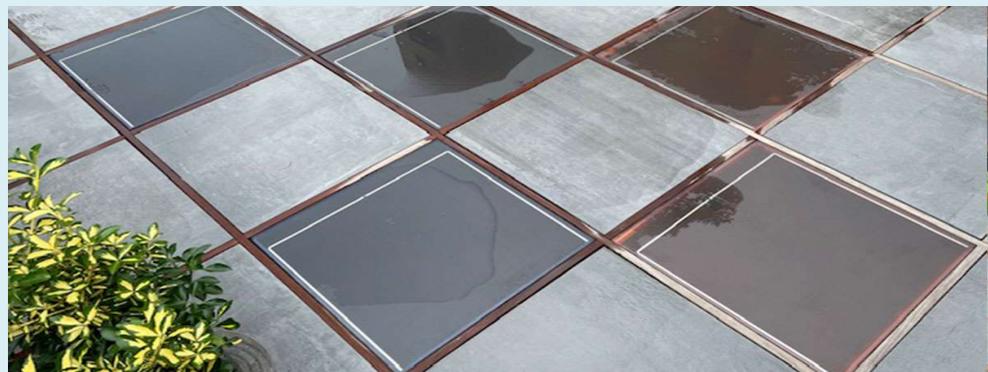


Figura 3.40 Esempio di sistemi BIPV integrati nella pavimentazione - fonte: [www.onyxsolar.com](http://www.onyxsolar.com)

***Un sistema PV è integrato esteticamente quando risulta poco visibile e/o riconoscibile, mimetizzandosi nella composizione architettonica e nel contesto esistente. I criteri da considerare per garantire un buon livello di integrazione architettonica sono molteplici, e spesso non tutti perseguibili in un'unica scelta. La logica dell'integrazione estetica non è valida ed univoca per tutte le costruzioni ed il processo di integrazione estetica va visto come una procedura specifica per ogni intervento. Il progettista deve, caso per***

***caso, valutare i diversi criteri di integrazione estetica, cercando di rispettarli per quanto possibile, in modo da mimetizzare il PV nella composizione architettonica esistente.***

### 3.3 Integrazione energetica

L'integrazione energetica esprime la capacità del PV di produrre energia, e valuta quindi il contributo dato dalle FER alla diminuzione dei consumi energetici dell'edificio. Fa quindi riferimento alla gestione dell'energia, tema di grande attualità, se si considera che l'edificio è sempre meno considerato come una semplice unità indipendente che consuma energia dalla rete, ma come una componente attiva che usa, produce, immagazzina e fornisce energia all'interno di un sistema energetico più complesso ed ampio. L'integrazione energetica può essere valutata attraverso la produzione energetica, ovvero la quantità di energia prodotta a copertura del fabbisogno dell'edificio. Questa è influenzata da diversi fattori, che possono essere considerati come criteri guida per valutare il livello di integrazione energetica:

- esposizione;
  - orientamento;
  - inclinazione;
- ombreggiamento;
- tipo di tecnologia;
- ventilazione.

#### 3.3.1 Esposizione

Per ottimizzare la produzione energetica i pannelli fotovoltaici devono essere esposti in modo da massimizzare la quantità di radiazione solare. I fattori che i progettisti devono considerare per massimizzare la produzione energetica sono quindi inclinazione ed orientamento dei moduli. L'inclinazione indica di quanti gradi è inclinato il modulo PV rispetto al piano orizzontale (Figura 3.41), mentre l'orientamento indica di quanti gradi è ruotato il pannello rispetto ai punti cardinali, partendo da sud come punto 0 (Figura 3.42).

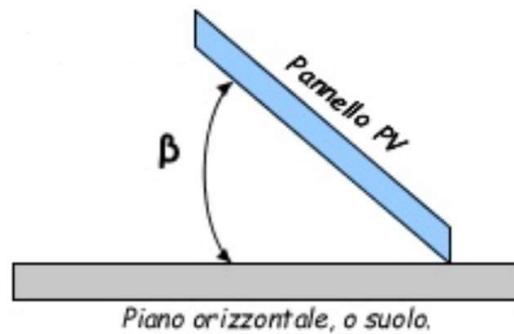


Figura 3.41 Inclinazione di un pannello fotovoltaico

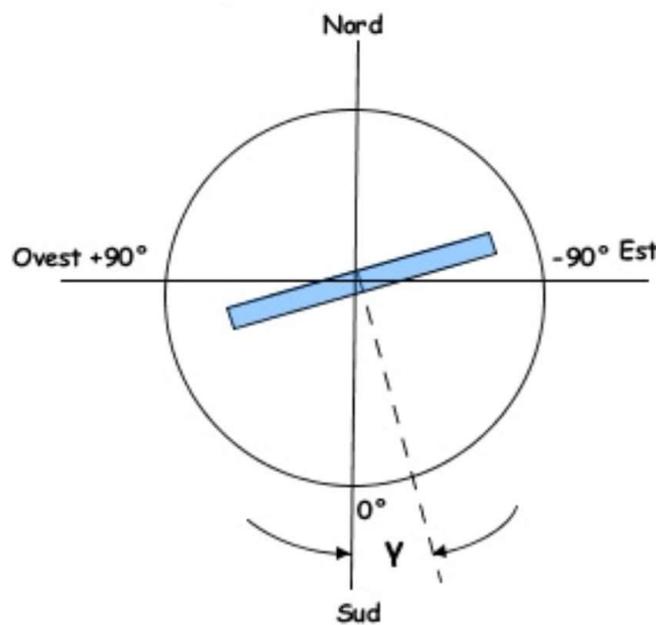


Figura 3.42: Orientamento di un pannello fotovoltaico

In generale, per ottimizzare la produzione energetica, i moduli dovrebbero essere montati con un'inclinazione (tilt) fra  $10^\circ$  e  $60^\circ$ , a seconda della latitudine del luogo, e con esposizione del pannello compresa tra sud-est e sud-ovest. Per massimizzare l'energia prodotta durante l'anno ed integrare il pannello nel migliore dei modi dal punto di vista energetico, l'inclinazione del modulo PV dovrebbe avvicinarsi a  $30^\circ$ , mentre il suo orientamento dovrebbe avvicinarsi il più possibile al sud perfetto (Tabella 3.1). Per un'adeguata integrazione dei sistemi PV nei contesti costruiti è

opportuno bilanciare i criteri di integrazione estetica ed energetica per quanto riguarda orientamento e inclinazione dei moduli.

*Tabella 3.1 Produzione energetica al variare di inclinazione e orientamento.*

Orientamento / Inclinazione	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ovest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ovest	0,93	0,90	0,78	0,55

### 3.3.2 Valutazione ombre

La presenza di ombreggiamenti che incidono direttamente sul modulo PV limita la produzione energetica durante la giornata. È opportuno considerare la presenza di ombre, avvalendosi anche di simulazioni durante tutto il periodo dell'anno, al fine di stimare una produzione verosimile del sistema.

### 3.3.3 Tipo di tecnologia

Come visto nei paragrafi precedenti, l'efficienza del modulo PV varia sia in funzione del tipo di materiale usato (es. a-Si, sc-Si, mc-Si, CdTe, CIGS, CIS etc.), che alla colorazione e trasparenza del modulo.

### 3.3.4 Ventilazione

Una buona ventilazione del modulo aiuta a ridurre la temperatura, contribuendo ad aumentarne l'efficienza. Infatti, quando la temperatura dei moduli fotovoltaici aumenta, si ha una diminuzione della tensione e della potenza erogata dall'impianto. Per evitare la perdita di potenza del sistema, è opportuno posizionare i pannelli in modo che la ventilazione possa contribuire ad abbassarne la temperatura.

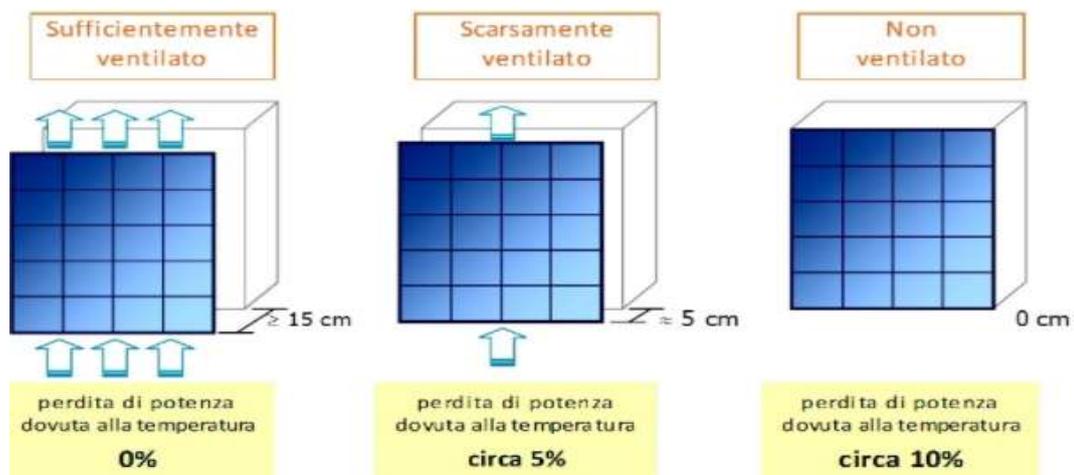


Figura 3.43 Perdita di potenza dovuta alle diverse temperature dei PV– fonte [www.bipv.ch](http://www.bipv.ch) @IEAT2

***Un sistema PV è integrato energeticamente quando la produzione energetica è in grado di contribuire in maniera effettiva al soddisfacimento del fabbisogno dell'edificio.***

***Per un'adeguata integrazione energetica sarebbe sufficiente installare il maggior quantitativo possibile di pannelli fotovoltaici, scegliendo la tipologia di pannello solo in base alla sua efficienza e posizionandolo in modo da captare la maggior quantità di radiazione solare.***

***Tuttavia, come è emerso dai paragrafi precedenti, per far sì che un sistema BIPV sia ben integrato non è possibile ridurre l'analisi alla sola valutazione energetica, ma è necessario trovare il giusto equilibrio tra le esigenze dettate dal mantenimento dei canoni estetici, e quelle volte alla riduzione dei consumi energetici negli edifici.***

### 3.4 Il processo di integrazione dei sistemi BIPV

Il processo di integrazione dei sistemi BIPV nel patrimonio costruito è un compito molto complesso, che prevede l'analisi ed il connubio di molteplici fattori, che possono escludersi l'un l'altro. Da una parte le esigenze dettate dalla conservazione del patrimonio costruito e dall'integrazione di questi nuovi sistemi nell'ambiente circostante, dall'altra la volontà di conseguire gli obiettivi energetici prefissati a livello europeo e nazionale, minimizzando il più possibile i consumi

degli edifici. Il ruolo del progettista sta proprio nel trovare la giusta armonia tra integrazione estetica, tecnologica ed energetica, valutando caso per caso, l'applicabilità dei diversi criteri sopra citati, e riassunti nella tabella seguente:

Criteri																				
INTEGRAZIONE	TECNOLOGICA	Protezione dagli agenti atmosferici Protezione dal rumore Isolamento termico Daylighting Rigidezza, resistenza meccanica ed integrità strutturale Igiene, salute ed ambiente Sicurezza e accessibilità nell'uso Durata ed affidabilità																		
	ESTETICA	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">Composizione del sistema BIPV</td> <td>Texture</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Colore</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Pattern</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Trasparenza</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Riflessione</td> </tr> <tr> <td>Posizionamento del BIPV</td> <td>Complanarità</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Forma e dimensione</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Raggruppamenti</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Rispetto delle linee</td> </tr> </table>	Composizione del sistema BIPV	Texture		Colore		Pattern		Trasparenza		Riflessione	Posizionamento del BIPV	Complanarità		Forma e dimensione		Raggruppamenti		Rispetto delle linee
	Composizione del sistema BIPV	Texture																		
	Colore																			
	Pattern																			
	Trasparenza																			
	Riflessione																			
Posizionamento del BIPV	Complanarità																			
	Forma e dimensione																			
	Raggruppamenti																			
	Rispetto delle linee																			
ENERGETICA	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">Esposizione</td> <td>Inclinazione</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Orientamento</td> </tr> <tr> <td>Ombreggiamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tipo di tecnologia</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ventilazione</td> <td></td> </tr> </table>	Esposizione	Inclinazione		Orientamento	Ombreggiamento		Tipo di tecnologia		Ventilazione										
Esposizione	Inclinazione																			
	Orientamento																			
Ombreggiamento																				
Tipo di tecnologia																				
Ventilazione																				

Tabella 3.2 Criteri di integrazione per sistemi BIPV e BAPV

Questo documento fornisce delle linee guida per il progettista, per facilitare la migliore decisione in ogni singolo caso. Di seguito è riportata una procedura schematica, che riassume il processo che dovrebbe essere intrapreso dal progettista. La procedura non definisce né prescrive misure in generale, ma può essere utilizzata come guida per identificare le soluzioni progettuali più appropriate.

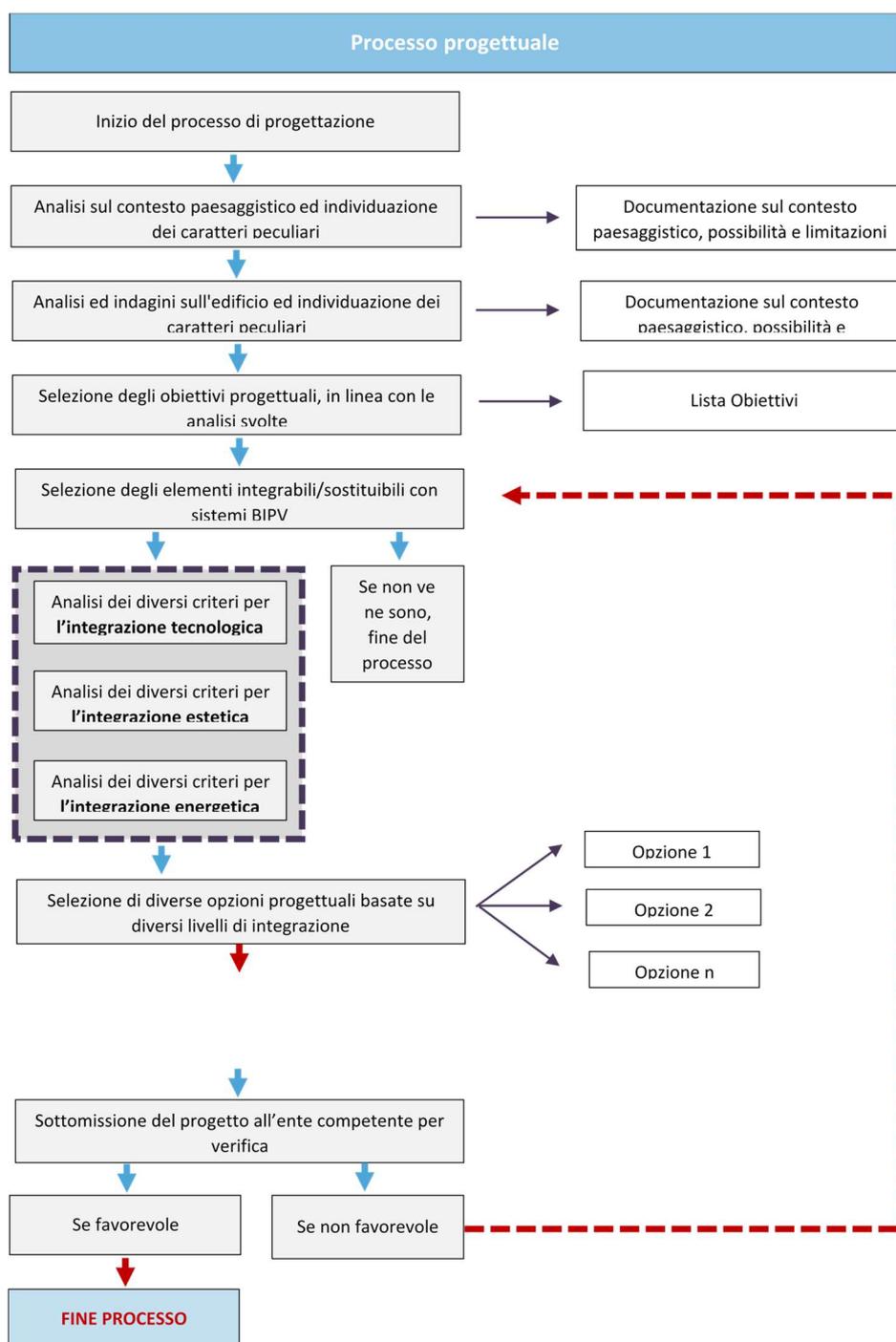


Tabella 3.3 Processo progettuale per l'integrazione di sistemi BIPV

## CAPITOLO 4. CONCLUSIONI

La tecnologia fotovoltaica integrata (BIPV) ha fatto enormi progressi tecnologici nell'arco degli ultimi anni ed oggi offre soluzioni gradevoli esteticamente ed integrabili nel contesto urbano e nel parco edilizio esistente. Attraverso

l'integrazione delle tecnologie rinnovabili si può migliorare la qualità architettonica dell'edificio in chiave di sostenibilità economica e ambientale. La legislazione europea impone obblighi di inserimento di fonti rinnovabili nel risanamento del patrimonio edilizio; tuttavia, le soluzioni fotovoltaiche integrabili nei sistemi costruttivi tradizionali risultano ancora poco conosciute ai tecnici di settore e quindi poco diffuse. Il progetto "BIPV Meets History" punta a porre le basi per una metodologia d'analisi comune, volta a colmare le lacune esistenti e fornire un metodo per individuare le potenzialità dei sistemi BIPV e favorirne la diffusione nel risanamento edilizio del territorio italo-elvetico.

Il presente documento si prefigge di assistere i progettisti nel processo di progettazione dei sistemi fotovoltaici nel patrimonio edilizio esistente, guidandoli nell'analisi per la loro integrazione, che è una condizione necessaria per ottenere il via libera dagli enti preposti e procedere con l'installazione dei pannelli.

Il bilanciamento delle tre componenti – integrazione estetica, tecnologica ed energetica - è ritenuto risolutivo per gli interventi di installazione di impianti fotovoltaici di tipo integrato sul patrimonio edilizio esistente e, nello specifico, in ambiti assoggettati a tutela.

Vengono quindi definiti una serie di criteri, con lo scopo di guidare, in maniera semplice ed efficace, i progettisti nell'integrazione delle tecnologie fotovoltaiche nel contesto urbano e nel parco edilizio, così come le Pubbliche Amministrazioni e le Commissioni per il paesaggio nella loro attività di valutazione dei progetti.

Il contenuto del presente Deliverable e delle future linee guida locali è finalizzato anche a divulgare il sapere e la conoscenza dei più avanzati prodotti presenti sul mercato delle energie rinnovabili fotovoltaiche e, in particolare, delle tecnologie di tipo integrato nell'architettura, accelerandone la diffusione e l'utilizzo, coinvolgendo tutta la filiera operativa (progettisti, installatori, consulenti energetici, produttori, ricercatori e proprietari di immobili), fondamentale per stimolare la competitività del mercato e raggiungere risultati sempre più di alta qualità.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *D. Lgs. 42/04 "Codice dei beni culturali e del paesaggio"*, 2004.
- [2] *EN 50583-2 "Photovoltaics in buildings - Part 2: BIPV systems"*, 2016.
- [3] *EN 50583-1 "Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules"*, 2016.
- [4] *CPR 305/2011 "Regolamento Europeo sui Prodotti da Costruzione"*, 2011.
- [5] IEA, «IEA-PVPS TCP Task 15 "Acceleration of BIPV" Case study book (Subtask A) 2017-2019,» 2020.
- [6] MiBACT "Ministero per i Beni e le Attività Culturali", «Linee di Indirizzo per il Miglioramento Dell'efficienza Energetica del Patrimonio Culturale: Architettura, Centri e Nuclei Storici ed Urbani,» Roma, Italy, 2015.
- [7] P. Bonomo e P. De Berardinis, «BIPV in the Refurbishment of Minor Historical Centres: The Project of Integrability between Standard and Customized Technology,» *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 7, n. 9, pp. 1063-1079, 2013.
- [8] *RED II "Direttiva (UE) 2018/2001 Del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili"*, 2018.
- [9] *EED II "Direttiva (UE) 2018/2001 Del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'11 dicembre 2018 che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica"*, 2018.
- [10] *EPBD II "Direttiva (UE) 2018/844 Del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica"*, 2018.
- [11] *EPBD I "Direttiva (UE) 2010/31 Del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia"*, 2010.
- [12] *EPBD "Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia"*, 2002.
- [13] *EED "Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE"*, 2012.
- [14] *RED "Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009 , sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE"*, 2009.

- [15] PAN "Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili, conforme alla direttiva 2009/28/CE e alla decisione della Commissione del 30 giugno 2009", 2010.
- [16] SEN "Strategia energetica nazionale emanata con Decreto interministeriale il 10 novembre 2017 dal Ministero dello sviluppo economico", 2017.
- [17] PNIEC "Piano Energia e Clima pubblicato il 18 dicembre 2019 dal Ministero dello sviluppo economico", 2019.
- [18] Decreto 26 giugno 2015 del Ministro dello Sviluppo Economico, "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", 2015.
- [19] «S.I.B.A. - Sistema Informativo Beni e Ambiti Paesaggistici,» [Online]. Available: <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioServizio/servizi-e-informazioni/Enti-e-Operatori/Territorio/Paesaggio/siba-sistema-Informativo-beni-amb>. [Consultato il giorno 1 10 2021].
- [20] Ministero per i beni e le attività culturali (MIBACT), «Vincoli in rete,» [Online]. Available: <http://vincoliinrete.beniculturali.it>. [Consultato il giorno 1 10 2021].
- [21] Regione Lombardia, Legge Regionale (L.R.) 11 marzo 2005, n. 12 "Legge per il governo del territorio", 2005.
- [22] Decreto del Presidente della Repubblica 13 febbraio 2017, n. 31 "Regolamento recante individuazione degli interventi dall'autorizzazione paesaggistica o sottoposti a procedura autorizzatoria semplificata", 2017.
- [23] IEA-SHC T59, «Deep renovation of historic buildings towards lowest possible energy demand and CO2 emission (nZEB),» [Online]. Available: <http://task59.iea-shc.org>. [Consultato il giorno 1 10 2021].
- [24] IEA-SHC T41, «Solar Energy and Architecture,» [Online]. Available: <http://task41.iea-shc.org>. [Consultato il giorno 1 10 2021].
- [25] Eurocodice EN 1990-1999 "Criteri generali di progettazione strutturale", 1990-1999.
- [26] CEI EN IEC 61730-1 (CEI 82-27) "Qualificazione per la sicurezza dei moduli fotovoltaici (FV) – Parte 1: Prescrizioni per la costruzione", 2007.
- [27] IEC 62109-1 "Safety of power converters for use in photovoltaic power systems", 2010.
- [28] International Energy Agency (IEA), «Report IEA-PVPS T15 "Coloured BIPV, Market, Research and Development",» 2019.
- [29] L. Maturi, *Building skin as energy supply: Prototype development of a wooden prefabricated BiPV wall*, Trento: Università degli studi di Trento ed Eurac Research, 2013.

- [30] M. Pelle, E. Lucchi, L. Maturu, A. Astigarraga e F. Causone, «Coloured BIPV Technologies: Methodological and Experimental Assessment for Architecturally Sensitive Areas,» *Energies*, vol. 13, n. 17, p. 4506, 2020.
- [31] «Progetto europeo Construct-PV, finanziato da FP7 Energy, ID progetto 295981,» [Online]. Available: [www.constructpv.eu](http://www.constructpv.eu). [Consultato il giorno 1 10 2021].
- [32] C. Ballif, L. Perret-Aebi, S. Lufkin e E. Rey, «Integrated thinking for photovoltaics in buildings,» *Nature Energy*, vol. 3, p. 438–442, 2018.