



Ricerca di Sistema elettrico

BIPV: Tecnologie e Linee Guida per la diffusione di sistemi BIPV

V. D'Ambrosio, M. Losasso, E. Tersigni, G. Santomartino



BIPV: TECNOLOGIE E LINEE GUIDA PER LA DIFFUSIONE DI SISTEMI BIPV

V. D'Ambrosio, M. Losasso, E. Tersigni, G. Santomartino

Università di Napoli "Federico II" - DiARC

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package 2: Fotovoltaico Piano

Linea di attività: LA2.21 BIPV: Tecnologie e Linee Guida per la diffusione di sistemi BIPV

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri ENEA

Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana*"

Responsabile scientifico ENEA: arch. PhD Alessandra Scognamiglio

Responsabile scientifico DiARC (UNINA): prof. arch. Valeria D'Ambrosio

Si ringraziano gli studi di architettura e le aziende che hanno fornito il materiale documentale utilizzato per la presente ricerca.

In particolare, i Progettisti: Agenzia di Architettura - AdA (arch. I. Rizk), Cool Projects S.r.l., Gdieni Architetti, MCE - The Milan Company S.r.l. (ing. F. Repossi), Pei Cobb Freed & partners architects (arch. M. Milani), Renzo Piano Building Workshop, Silvio d'Ascia Architetti.

Le Aziende: General Membrane S.p.A., GruppoSTG Fabbrica S.r.l. (dott. R. Macconi), ISA S.p.A. (ing. E. Baldelli), Solmonte S.r.l. (ing. S. Tiozzo Pezzoli), Sunage SA (ing. G. Luzi), Sunerg Solar S.r.l.

Con il contributo di: C. Acquaviva (Borsista), E. Bassolino (RTDa), G. Di Tuoro, M. Landi, A. Pallotta e S. Puzone (Tirocinanti).

Indice

SOMMARIO.....	5
INTRODUZIONE	7
1 BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS. LINEE GUIDA PER IL PROGETTO.....	9
1.1 PROCESSI DI TRANSIZIONE ENERGETICA E LOW CARBON ALLA SCALA EDILIZIA E URBANA.....	9
1.2 PRINCIPALI NORMATIVE DI RIFERIMENTO IN ITALIA	10
1.3 PREMESSE METODOLOGICHE E CONTENUTI DELLE LINEE GUIDA	11
1.4 OBIETTIVI E MODALITÀ DI UTILIZZO DELLE LINEE GUIDA.....	12
2 CONOSCENZA.....	15
2.1. PRODOTTI E SISTEMI BIPV PER L'INTEGRAZIONE IN ARCHITETTURA	15
2.1.1 <i>Aspetti definitivi</i>	15
2.1.2 <i>Classificazione delle soluzioni BIPV</i>	16
2.1.3 <i>La produzione di sistemi e prodotti</i>	17
2.2 CONTESTO URBANO	19
2.2.1 <i>Classificazione di tipi di tessuto urbano</i>	19
2.2.2 <i>Caratteri urbani</i>	20
2.2.3 <i>Relazione tra edificio e contesto</i>	21
2.2.4 <i>Rapporto tipologia/morfologia</i>	22
2.3 ASPETTI TIPO-MORFOLOGICI E TECNOLOGICI	22
2.3.1 <i>Classificazione di morfologie e tipi di edifici</i>	22
2.3.2 <i>Orientamento degli edifici</i>	26
2.3.3 <i>Individuazione dei temi architettonici</i>	26
2.3.4 <i>Interpretazione dei caratteri architettonici e costruttivi degli edifici</i>	27
2.3.5 <i>Classificazione e caratteristiche di elementi e parti costitutive dell'involucro edilizio</i>	27
3 PROGETTO.....	29
3.1 STRATEGIE DI PROGETTO PER L'INTEGRAZIONE DEI SISTEMI BIPV NELL'INVOLUCRO EDILIZIO	29
3.1.1 <i>Indirizzi per la metaprogettazione</i>	29
3.1.2 <i>Indirizzi e concept di progetto per gli interventi ex-novo e di riqualificazione</i>	30
3.1.3 <i>Massimizzazione della produzione energetica</i>	31
3.1.4 <i>Rispetto dell'autorialità e dei caratteri del contesto</i>	32
3.1.5 <i>Coerenza degli aspetti tecnico-materici</i>	33
3.1.6 <i>Sistemi FV integrati: innovazione evidente, mimetica, nascosta</i>	33
3.2 INDICATORI DI POTENZIALE PRODUCIBILITÀ ENERGETICA	35
3.2.1 <i>Tessuti Urbani</i>	35
3.2.2 <i>Morfologia dell'edificio</i>	36
3.2.3 <i>Orientamento delle superfici</i>	37
3.2.4 <i>Inclinazione delle superfici</i>	38
3.3 MODALITÀ DI INTEGRAZIONE DI SISTEMI FOTOVOLTAICI NELLE PARTI COSTITUTIVE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO	39
3.3.1 <i>Basamento</i>	39
3.3.2 <i>Corpo Centrale</i>	40
3.3.3 <i>Coronamento</i>	48
3.3.4 <i>Copertura</i>	50
3.4 CRITERI, INDICATORI E REQUISITI PER GLI INTERVENTI SULL'INVOLUCRO EDILIZIO	53
3.4.1 <i>Coerenza geometrica</i>	54
3.4.2 <i>Coerenza morfologica</i>	55
3.4.3 <i>Coerenza cromatica</i>	57
3.4.4 <i>Coerenza di installazione</i>	58
3.4.5 <i>Requisiti per gli interventi</i>	58
3.5 REPERTORI.....	61
3.5.1 <i>Contenuti e criteri di utilizzo</i>	61
3.5.2 <i>Casi di successo</i>	62

3.5.3	<i>Buone pratiche</i>	62
3.5.4	<i>Soluzioni tecniche BIPV</i>	63
3.5.5	<i>Informazione tecnica</i>	63
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	65
5	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	68
6	APPENDICI.....	70

Sommario

L'impiego di tecnologie e prodotti innovativi FV nel progetto di architettura richiede specifici approfondimenti mettendo in evidenza il ruolo centrale che deve essere rappresentato dall'adeguata diffusione di informazioni e conoscenze tra i protagonisti del processo progettuale, finalizzandole alla qualità degli interventi. Le potenzialità qualitative e quantitative delle scelte progettuali impongono di considerare preventivamente gli effetti sulla concezione architettonica, sulla forma e sul linguaggio correlati all'incremento del grado di innovazione dei prodotti BIPV e al loro aspetto morfologico. Il presente documento definisce Linee Guida per l'integrazione del fotovoltaico in architettura fornendo informazioni e raccomandazioni utili nello sviluppo di un progetto che preveda l'utilizzo di prodotti e sistemi BIPV a partire dalla fase di concezione, al fine di facilitarne la diffusione e massimizzarne l'impiego, coerentemente con le finalità architettoniche dell'intervento. Le Linee Guida si configurano come uno strumento operativo di affiancamento ai progettisti per sostenere l'elaborazione di progetti orientati alla transizione energetica secondo indirizzi strutturati, in cui l'informazione tecnica e la conoscenza scientifica rappresentano rilevanti implicazioni sul progetto e costituiscono la base per il controllo e la diffusione nell'utilizzo di sistemi BIPV. Le Linee Guida sono strutturate in tre capitoli:

- il primo inquadra l'impiego del fotovoltaico integrato in architettura nell'ambito dei processi di transizione energetica definiti dal quadro della politica tecnica e del panorama normativo e chiarisce i contenuti, la struttura e le modalità di utilizzo delle Linee Guida nel processo progettuale;
- il secondo fornisce indirizzi per la fase di conoscenza, propedeutica alla fase di costruzione del progetto, nella quale vengono messe a sistema le informazioni tecniche relative ai BIPV e sono precisate le modalità di lettura del contesto urbano, degli aspetti tipo-morfologici e tecnologici dell'edificio che si intende progettare o riqualificare, al fine di attuare un'integrazione coerente dei sistemi fotovoltaici;
- il terzo fornisce indirizzi e raccomandazioni per la definizione di scelte di tipo strategico, architettoniche e tecniche per l'elaborazione di un progetto che integri prodotti e sistemi BIPV a partire dalla fase di concezione, attraverso il controllo della coerenza con il carattere architettonico e l'appropriatezza delle scelte di soluzioni tecniche e prodotti industrializzati. La formulazione di queste scelte è supportata da un articolato apparato di Repertori riportati nella sezione Appendici (*Casi di successo, Buone pratiche, Soluzioni tecniche BIPV, Informazione tecnica*).

Le Linee Guida si configurano come uno strumento di supporto e di indirizzo per:

- comprendere le tecnologie solari fotovoltaiche disponibili e il loro impiego come prodotti e sistemi integrati per il progetto;
- riconoscere le condizioni contestuali e gli aspetti tipo-morfologici al fine di definire i fattori di scelta metaprogettuale con essi più coerenti per l'integrazione architettonica dei sistemi e prodotti BIPV;
- identificare le principali opzioni strategiche che connotano il progetto con BIPV;
- individuare le caratteristiche del costruito che influenzano la producibilità energetica dei sistemi BIPV;
- comprendere le modalità di integrazione di BIPV maggiormente ricorrenti negli edifici e le relative soluzioni tecniche;
- valutare i livelli di coerenza architettonica di sistemi e prodotti BIPV attraverso un set di criteri e indicatori;
- informare attraverso Repertori tecnici, Casi di successo e Prodotti industrializzati BIPV le diverse fasi di costruzione del progetto;
- facilitare la consultazione dei principali aspetti di indirizzo per il progetto con prodotti e sistemi BIPV attraverso uno strumento digitale interattivo semplice e accessibile (cfr. Appendici *Booklet_Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto*).

Il *Booklet_Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto* presente nelle Appendici si configura come uno strumento digitale finalizzato alla consultazione semplice e accessibile delle Linee Guida,

consentendo una navigazione interattiva all'interno del database informativo con la possibilità di orientare i diversi portatori di interesse nella costruzione di un iter decisionale coerente e consapevole con gli obiettivi di massimizzazione della produzione energetica da fotovoltaico e la sua coerente integrazione nel progetto.

Introduzione

Il presente documento descrive l'attività di ricerca svolta nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (DiARC) dal titolo "Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana".

Le Linee di Attività oggetto dell'Accordo si inseriscono nell'ambito del Progetto 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza" della Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021. In particolare, le due Linee di Attività sono la LA2.20 dal titolo "BIPV: Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative" e la LA2.21 "BIPV: Tecnologie e Linee Guida per la diffusione di sistemi BIPV".

L'attività di ricerca LA2.21, a cui fa riferimento il presente Report, è stata condotta a partire dagli esiti della linea LA2.20 che ha prodotto un quadro aggiornato e sistematizzato sulle conoscenze relative all'innovazione tecnologica dei sistemi BIPV riferiti al mondo della produzione industriale e della loro applicazione al progetto architettonico sia ex novo che di riqualificazione, con particolare riferimento al contesto italiano.

Alcuni dei prodotti esito della prima linea di attività sono stati integrati all'interno delle Linee Guida per indirizzare la fase di Conoscenza e quella di Progetto per un impiego consapevole e integrato del fotovoltaico in architettura. Le Linee Guida contengono indirizzi per l'attuazione di un processo di progettazione tecnologica che coniughi le esigenze di low carbon e l'utilizzo di sistemi BIPV appropriatamente integrati, proponendosi come uno strumento di supporto alle decisioni per le azioni di interventi edilizi ex-novo, di retrofit e di sostituzione nell'involucro edilizio.

La linea di attività è stata sviluppata a partire da un'indagine sul campo su prodotti e sistemi FV industrializzati, casi di successo e buone pratiche e approcci sperimentali di tipo metaprogettuale che hanno consentito, in una filiera di tipo induttivo-deduttivo, di estrapolare criteri e indirizzi generalizzabili in funzione di schematizzazioni tipologiche.

Il gruppo di ricerca del DiARC, costituito da docenti, borsisti e tirocinanti, ha sviluppato un'attività di coinvolgimento di diversi stakeholder, con particolare riferimento a studi di progettazione e aziende produttrici, prevalentemente italiane, leader nel settore BIPV, al fine di operare un confronto continuo con gli operatori del settore.

In continuità con quanto effettuato nella prima linea di attività, nella LA2.21 il gruppo di ricerca ha partecipato a incontri del Task group IEA PVPS Task 15 - *Enabling framework for the development of BIPV*, Subtask C (*BIPV Guidelines*) al fine di mantenere un aggiornamento costante sugli ultimi sviluppi e avanzamenti della ricerca internazionale e di produrre risultati con essa coerenti e condivisi.

È stata attuata, infine, una disseminazione dei risultati di ricerca attraverso la pubblicazione degli esiti dell'attività di ricerca in due contributi, il primo dei quali sullo *Special Issue* "Energy Transition and Cities: Renewable Energy Storage, Production and Social Issues" della rivista *Sustainability*, il secondo sulla rivista scientifica di classe A SMC - *Sustainable Mediterranean Construction. Land Culture, Research and Technology*, n.14.

È stato inoltre organizzato un Convegno nazionale svolto presso l'Università di Napoli Federico II e in modalità streaming, che ha visto la partecipazione di studiosi, aziende, rappresentanti di Amministrazioni comunali, Enti di ricerca, professionisti e studenti.

Si riporta di seguito l'elenco completo delle attività svolte nell'ambito dell'Accordo di collaborazione.

Borsa di studio

COD. RIF_18_B_2021 "Integrazione di prodotti e componenti Building Integrated Photovoltaics in architettura secondo un approccio processuale e sistemico", (C. Acquaviva, 09.2021/11.2021);

Pubblicazioni

- D'Ambrosio, V.; Losasso, M.; Tersigni, E. Towards the Energy Transition of the Building Stock with BIPV: Innovations, Gaps and Potential Steps for a Widespread Use of Multifunctional PV Components in the Building Envelope. *Sustainability* 2021, 13, 12609. <https://doi.org/10.3390/su132212609>
- D'Ambrosio, V.; Tersigni, E. Technological innovation and design of BIPV systems for energy transition processes. *Sustainable Mediterranean Construction*, 2021, 14.

1 Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto

1.1 Processi di transizione energetica e low carbon alla scala edilizia e urbana

Le molteplici crisi degli ultimi anni (climatica, pandemica, energetica) hanno messo in luce l'importanza degli insediamenti urbani, ma hanno anche evidenziato quanto si sia in presenza di un'organizzazione delle città e degli stili di vita oltre che di uno stock abitativo non più adatti a sopportare impatti molteplici e convergenti. Se con il lockdown del 2020 si è verificata una forte contrazione del fabbisogno energetico, la ripresa economica generalizzata del 2021 e le successive aspettative - che nel nostro paese per il 2022 alimentavano prospettive di crescita del PIL pari a + 4% - ha indotto un picco di domanda di energia elettrica che si è tradotto in un'impennata dei costi.

Su questo terreno di crescita per le economie mondiali e nel solco della sfida indotta dalla transizione energetica di Next Generation EU [01], nel mese di febbraio 2022 si sono innestate le profonde criticità delle tensioni geopolitiche in Europa. Ciò ha improvvisamente aggravato la sicurezza dell'approvvigionamento delle fonti fossili "di transizione" (il gas) con un "effetto contagio" sui prezzi dell'elettricità che, nel nostro paese, è prodotta attraverso una rilevante quota da fonti energetiche fossili [02].

A fronte di un quadro così complesso e in divenire, diventa ancor più necessario attuare azioni di rinnovo del costruito su vasta scala [01] adottando strategie operative e gestionali che possano ridurre in tempi rapidi la dipendenza da fonti energetiche fossili. La necessità di una rapida riduzione del consumo di combustibili fossili dovrebbe quindi fare affidamento sulle fonti rinnovabili e sull'efficienza energetica, senza discostarsi da quanto previsto per il 2030 dal pacchetto clima-energia *Fit for 55* [03]. Secondo la Commissione Europea, fra gli ambiti di intervento prioritari più interessanti per il settore edilizio si individuano da un lato l'efficienza, il risparmio energetico e di risorse, con la riduzione dei consumi energetici degli edifici, dall'altro lo sviluppo della catena del valore nelle innovazioni tecnologiche per le energie rinnovabili e le tecnologie edilizie [04]. L'attuale scenario di fondo presenta un processo di accelerazione della volatilità dei prezzi dell'energia, previsto almeno fino al 2023, e prefigura la scelta di ridurre la domanda dell'Unione Europea di gas russo di 2/3 entro la fine del 2022 [04]. Sarà necessario diversificare le fonti energetiche e puntare sulle rinnovabili tenendo conto dei tre obiettivi congiunti di clima, energia e sicurezza, anche in un'ipotesi di revisione di alcune *mission* del PNRR.

Nel recente schema di piano *REPowerEU*, la Commissione Europea ha posto l'obiettivo di aumentare l'indipendenza energetica dell'Europa e la resilienza energetica non solo sulla base della diversificazione delle forniture di gas, ma anche con una più rapida riduzione dell'uso di combustibili fossili e nella riduzione dei consumi energetici, intensificando la decarbonizzazione, puntando all'efficienza energetica, all'incremento delle energie rinnovabili, alla transizione verso l'utilizzo prevalente di energia elettrica negli edifici, alla riduzione dei tempi e alla facilitazione dell'iter di approvazione dei progetti di installazione di impianti FER (Fonti Energetiche Rinnovabili) [04].

Secondo una stima congiunta di Greenpeace, Legambiente e WWF, l'utilizzo delle FER e, quindi, anche dei sistemi fotovoltaici integrati in maniera diffusa nelle architetture, può introdurre un cambio di marcia facendo affidamento sui nuovi disposti legislativi nazionali che permetterebbero di ridurre i consumi di gas di 36 miliardi di metri cubi all'anno entro fine 2026. Il Governo italiano ha lanciato misure per l'efficienza e la riconversione energetica a favore delle imprese e delle utenze domestiche, fra le quali va segnalata l'installazione facilitata di impianti fotovoltaici integrati negli edifici anche nei centri storici, purché non si ricada in costruzioni vincolate o di "notevole interesse pubblico" e gli impianti non siano visibili dagli spazi pubblici esterni e dai punti di vista panoramici. L'installazione di impianti solari fotovoltaici non sarà subordinata all'acquisizione di permessi, autorizzazioni o atti amministrativi di assenso, qualificandosi come manutenzione ordinaria.

Tali interventi sono ancora più urgenti se si considera che la crisi energetica avrà, con ogni probabilità, effetti strutturali, incidendo parallelamente sull'incremento dei rischi climatici. Un dibattito è aperto su quanto l'attuale crisi geopolitica contrasti con la programmazione di un progressivo processo di transizione energetica, rappresentando un ostacolo al perseguimento degli obiettivi di contenimento e riduzione delle emissioni climalteranti. Tuttavia, sulla crescente pericolosità degli impatti climatici, gli esiti del 6° Rapporto

IPCC [05] non lasciano dubbi, poiché delineano quanto la salute, gli insediamenti e le infrastrutture critiche siano sempre più colpiti da ondate di calore, piogge intense, tempeste di vento, siccità e inondazioni [05]. In un quadro mutato, la sfida che può essere giocata dai sistemi BIPV sulle richieste di rinnovo edilizio dovrebbero essere attuate con azioni rapide e ben strutturate di retrofit tecnologico di alloggi, edifici e complessi edilizi, verificandole nella fattibilità ambientale, tecnica ed economica. Si tratta di prevedere azioni programmate per ottenere, anche in tempi rapidi, contributi alla risoluzione delle criticità energetiche integrando gli obiettivi di decarbonizzazione e della transizione verde. Le modalità di intervento con sistemi fotovoltaici integrati negli edifici in maniera diffusa anche alla scala urbana per la riqualificazione in chiave *energy saving* e di mitigazione climatica, richiedono linee di indirizzo che orientino la pubblica amministrazione e i progettisti tali da combinare gli interventi con obiettivi di basso consumo energetico degli edifici, efficienza dei sistemi tecnologici e sistemi di regolazione passiva delle condizioni termiche.

1.2 Principali normative di riferimento in Italia

L'utilizzo di sistemi BIPV all'interno dei progetti architettonici viene promosso e regolamentato da direttive internazionali recepite in piani legislativi e normativi nazionali. Il sistema normativo e legislativo attuato recentemente dalla politica tecnica nazionale inquadra un'interessante apertura verso diverse transizioni, da quella strettamente energetica a quella amministrativa, edilizia e urbana, prefigurando nuovi scenari all'interno dei quali il BIPV - se opportunamente sostenuto sul piano dell'applicabilità, del rendimento e dei costi nel confronto con altre soluzioni FER - può ritagliarsi spazi via via più promettenti. Le disposizioni in materia di risparmio energetico si sono arricchite negli ultimi anni di leggi finalizzate al raggiungimento dell'obiettivo, posto dalla Comunità Europea, di ricorrere a fonti di energia rinnovabili in percentuali crescenti.

I sistemi BIPV sono normati dalla UNI EN 50583-1:2016 la quale stabilisce che i moduli fotovoltaici sono considerati integrati se svolgono un ruolo di componente costruttivo e, come tali, adempiono ad una delle funzioni specificate dal Regolamento Prodotti da costruzione CPR 305/2011.

Il DM 19/02/2007 "*Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare*" specifica che l'integrazione FV si ottiene quando i «moduli sono integrati, in elementi di arredo urbano e viario, superfici esterne degli involucri di edifici, fabbricati, strutture edilizie di qualsiasi funzione e destinazione».

La Legge 90/2013, che recepisce la Direttiva 2010/31/UE, ha come obiettivo quello di promuovere il miglioramento della prestazione energetica degli edifici definendo le modalità per favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici che diventa obbligatoria nelle ristrutturazioni importanti.

Il D.L. 48/2020 definisce e integra criteri, condizioni e modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, favorisce lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici e impone che il fabbisogno energetico degli edifici a energia quasi zero sia coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili.

Il più recente D. Lgs 199/2021, che recepisce la Direttiva UE 2018/2001, ha come obiettivo quello di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici massimizzando l'autoconsumo di energia rinnovabile prodotta dagli edifici stessi, perseguendo l'obiettivo nazionale della copertura del 30% del consumo finale lordo prodotto da fonti rinnovabili, in coerenza con gli obiettivi europei di decarbonizzazione del sistema energetico al 2030 e di completa decarbonizzazione al 2050. Il Decreto impone l'obbligo di utilizzo dell'energia rinnovabile per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici, e l'uso di una quota di energia rinnovabile pari al 60% della copertura dei consumi per edifici ex novo o sottoposti a una ristrutturazione in caso di edilizia privata e una quota del 65% della copertura dei consumi nel caso di edilizia pubblica.

Il D.L. 17/2022, convertito nella Legge 34/2022, promuove misure per lo sviluppo delle fonti rinnovabili e per il contenimento dei prezzi energetici e fa riferimento all'installazione di impianti solari fotovoltaici anche su immobili appartenenti al Codice dei beni culturali e del paesaggio attraverso una procedura più semplificata. In presenza di vincoli, infatti, l'installazione di pannelli integrati può avvenire «nelle coperture non visibili dagli spazi pubblici esterni e dai punti di vista panoramici, eccettuate le coperture i cui manti siano realizzati in materiali della tradizione locale».

È bene precisare che le norme precedentemente citate non esauriscono il complesso quadro normativo che è in costante aggiornamento, anche in funzione dell'innovazione tecnologica e dell'evoluzione delle direttive a livello comunitario in risposta alle crisi contemporanee, ma definiscono una sintesi delle maggiori linee di riferimento per una corretta applicazione dei sistemi BIPV.

1.3 Premesse metodologiche e contenuti delle Linee Guida

L'impiego di tecnologie e prodotti innovativi nel progetto di architettura richiede specifici approfondimenti mettendo in evidenza il ruolo centrale che deve essere rappresentato dall'adeguata diffusione di informazioni e conoscenze tra i protagonisti del processo, finalizzandole alla qualità degli interventi. Le potenzialità qualitative e quantitative delle scelte progettuali impongono di considerare preventivamente gli effetti sulla concezione architettonica, sulla forma e sul linguaggio correlati all'incremento del grado di innovazione dei prodotti FV e al loro aspetto morfologico.

L'elaborazione di Linee Guida per l'integrazione nel progetto architettonico del fotovoltaico si è attuato attraverso un mix di fasi con impostazioni riferite alla ricerca di base e a quella operativa nel confronto fra finalità progettuali di tipo architettonico e mondo della produzione. La ricerca ha fatto proprie le necessarie interazioni, ricorsive piuttosto che in filiera lineare, fra mondo della produzione per l'edilizia e supporto ad esso fornito dall'attività di ricerca, collegandosi all'ambito della progettazione sui versanti morfologici, tecnologici e ambientali.

Le Linee Guida sono strutturate in tre capitoli: il primo inquadra l'impiego del fotovoltaico integrato in architettura nell'ambito dei processi di transizione energetica definiti dal quadro della politica tecnica e del panorama normativo chiarendo i contenuti, la struttura e le modalità di utilizzo delle Linee Guida nel processo progettuale; il secondo fornisce indirizzi per la fase di conoscenza, propedeutica alla fase di costruzione del progetto, nella quale convergono attività di analisi delle condizioni di contesto, tipo-morfologiche e tecnologiche degli edifici; il terzo è dedicato alla costruzione di un quadro decisionale in merito a scelte di tipo strategico, architettoniche e tecniche per la definizione di un progetto che integri prodotti e sistemi BIPV nella sua fase di concezione.

In particolare, nel primo capitolo è inquadrato lo scenario di politica tecnica e normativo in cui si inserisce il documento. Pur trattandosi di un quadro in continua evoluzione sono individuate le premesse e gli obiettivi generali di transizione energetica all'interno dei quali la tecnologia FV rappresenta un ruolo rilevante per il processo di decarbonizzazione e progressiva elettrificazione dei consumi energetici, obiettivo condiviso dalle politiche tecniche nazionali ed europee. In questo capitolo vengono inoltre chiariti i contenuti, gli obiettivi e le modalità di utilizzo delle Linee Guida nel processo di costruzione di un progetto con BIPV.

Nel secondo capitolo le Linee Guida forniscono indirizzi per la fase di conoscenza mettendo a sistema informazioni di tipo definitorio e classificatorio relative ai BIPV ed evidenziando, in relazione all'innovazione tecnologica del FV, le principali caratteristiche della produzione industrializzata di prodotti e sistemi BIPV. Nella sezione relativa alla conoscenza sono inoltre precisate le modalità di lettura e analisi del contesto urbano e degli aspetti tipo-morfologici e tecnologici dell'edificio che si intende progettare o riqualificare, necessari per una integrazione coerente dei sistemi fotovoltaici nel progetto di architettura.

Nel terzo capitolo sono fornite raccomandazioni finalizzate all'individuazione delle scelte strategiche, alle opzioni e modalità di integrazione architettonica di sistemi e prodotti BIPV nelle parti costitutive dell'edificio (basamento, corpo centrale e copertura) e viene definito un set di Indicatori per la valutazione e il controllo della potenziale producibilità energetica di sistemi FV. Quest'ultimo si configura come uno strumento attraverso cui valutare, in maniera speditiva, le potenzialità in termini di produzione energetica in fase metaprogettuale in relazione al tipo di tessuto urbano in cui si prevede l'intervento, alla morfologia dell'edificio, all'orientamento e all'inclinazione delle superfici.

In questo capitolo è individuato un sistema di Criteri progettuali e di relativi Indicatori che fornisce un contributo all'individuazione degli aspetti di coerenza architettonica di tecnologie FV, prodotti e sistemi attraverso cui verificare/programmare un'integrazione appropriata con il manufatto edilizio e con il carattere architettonico dell'edificio. Infine, sono definiti i principali requisiti per il progetto di integrazione dei sistemi BIPV riportando richieste di caratteristiche e comportamenti in uso.

I Repertori, infine, forniscono un quadro di informazioni utili al fine di supportare il processo progettuale in relazione alle modalità di intervento, alle soluzioni progettuali, agli aspetti tecnico-prestazionali e rispetto alla ricaduta architettonica della tecnologia fotovoltaica integrata nell'edificio. I Repertori completi (*Casi di successo, Buone pratiche, Soluzioni tecniche BIPV, Informazione tecnica*) sono riportati nella sezione Appendici.

Le Linee Guida sono state elaborate anche nel formato Booklet digitale (cfr. Appendici *Booklet_Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto*) elaborato per la consultazione semplice e accessibile delle Linee Guida. Il Booklet consente una navigazione interattiva all'interno del database informativo con la possibilità di orientare i diversi portatori di interesse nella costruzione di un iter decisionale coerente e consapevole con gli obiettivi di massimizzazione della produzione energetica da fotovoltaico e la sua coerente integrazione nel progetto.

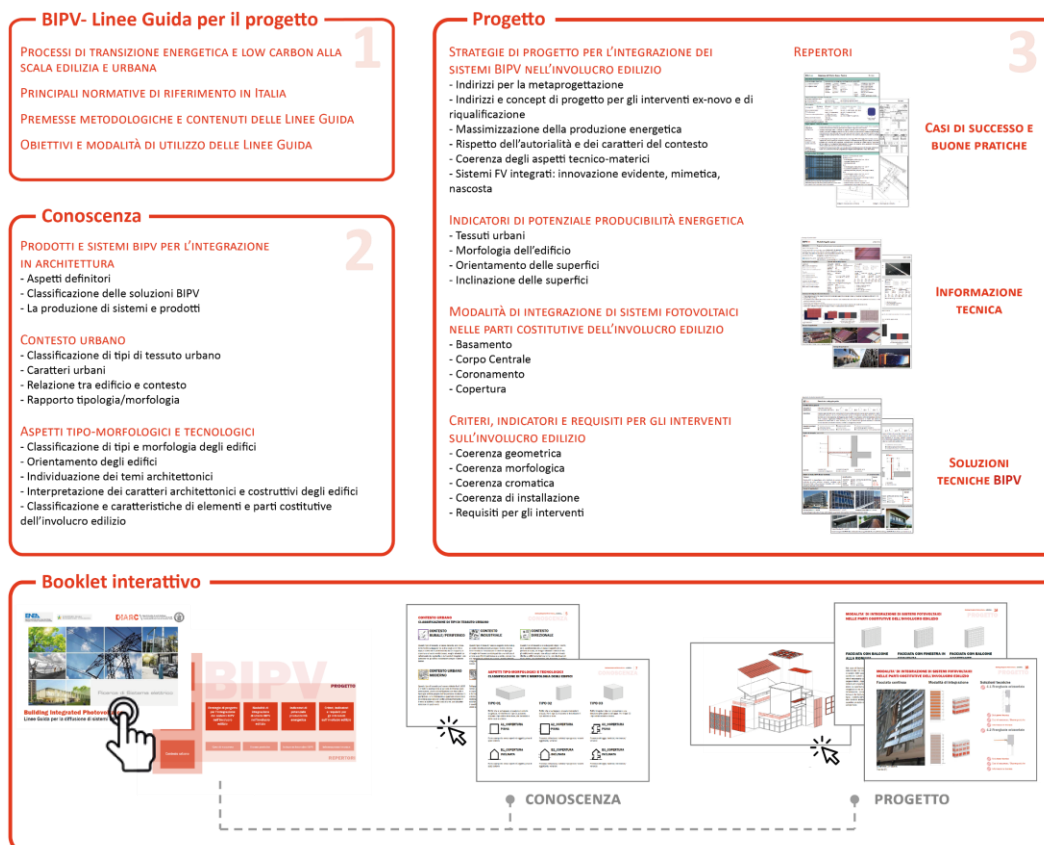


Figura 2. Contenuti delle Linee Guida per la progettazione del fotovoltaico integrato in architettura.

1.4 Obiettivi e modalità di utilizzo delle Linee Guida

Le Linee Guida per l'integrazione del fotovoltaico in architettura intendono sensibilizzare gli operatori del settore verso la selezione di soluzioni fotovoltaiche integrate in architettura capaci di avere valide ripercussioni sulla qualità degli interventi sia ex novo, sia di retrofit tecnologico, definendo criteri progettuali e informazioni tecniche per una coerente integrazione tecnologica, linguistico-morfologica ed energetica fin dalla fase di concept del progetto.

Le Linee Guida si configurano come strumenti operativi di affiancamento ai progettisti per sostenere l'elaborazione di progetti orientati alla transizione energetica secondo indirizzi strutturati, in cui l'informazione tecnica e la conoscenza scientifica rappresentano rilevanti implicazioni sul progetto e costituiscono la base per il controllo e la diffusione nell'utilizzo di sistemi BIPV. In tale senso rappresentano uno strumento di indirizzo per i progettisti, le Pubbliche Amministrazioni e il mondo della produzione impegnate in azioni tese a contribuire in maniera efficace alle modalità di adattamento e di mitigazione climatica degli edifici attraverso una integrazione fisica e funzionale dei sistemi attivi FV nell'involucro edilizio

in combinazione con modalità progettuali di tipo passivo. Questa combinazione conduce a concepire interventi edilizi come sistemi a basso consumo energetico e a ridotte emissioni di GHG basandosi su modalità di autoproduzione, autoconsumo e riduzione dei fabbisogni energetici.

Le Linee Guida si configurano come uno strumento di supporto e di indirizzo per:

- comprendere le tecnologie solari fotovoltaiche disponibili e il loro impiego come prodotti e sistemi integrati per il progetto;
- riconoscere le condizioni contestuali e gli aspetti tipo-morfologici al fine di definire i fattori di scelta metaprogettuale con essi più coerenti per l'integrazione architettonica dei sistemi e prodotti BIPV;
- identificare le principali opzioni strategiche che connotano il progetto con BIPV;
- individuare le caratteristiche del costruito che influenzano la producibilità energetica dei sistemi BIPV;
- comprendere le modalità di integrazione di BIPV maggiormente ricorrenti negli edifici e le relative soluzioni tecniche;
- valutare i livelli di coerenza architettonica di sistemi e prodotti BIPV attraverso un set di criteri e indicatori;
- informare attraverso Repertori tecnici, Casi di successo e Prodotti industrializzati BIPV le diverse fasi di costruzione del progetto;
- facilitare la consultazione dei principali aspetti di indirizzo per il progetto con prodotti e sistemi BIPV attraverso uno strumento digitale interattivo semplice e accessibile (cfr. Appendici *Booklet_Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto*).

Le Linee Guida forniscono informazioni e raccomandazioni utili nello sviluppo di un progetto che preveda l'utilizzo di BIPV a partire dalla fase di concezione, al fine di facilitarne la diffusione e massimizzarne l'impiego coerentemente con le finalità architettoniche degli interventi.

Nel diagramma di flusso che segue sono individuate le principali informazioni per la definizione delle fasi di metaprogettazione e di concept di un progetto con fotovoltaico integrato (Figura 3).

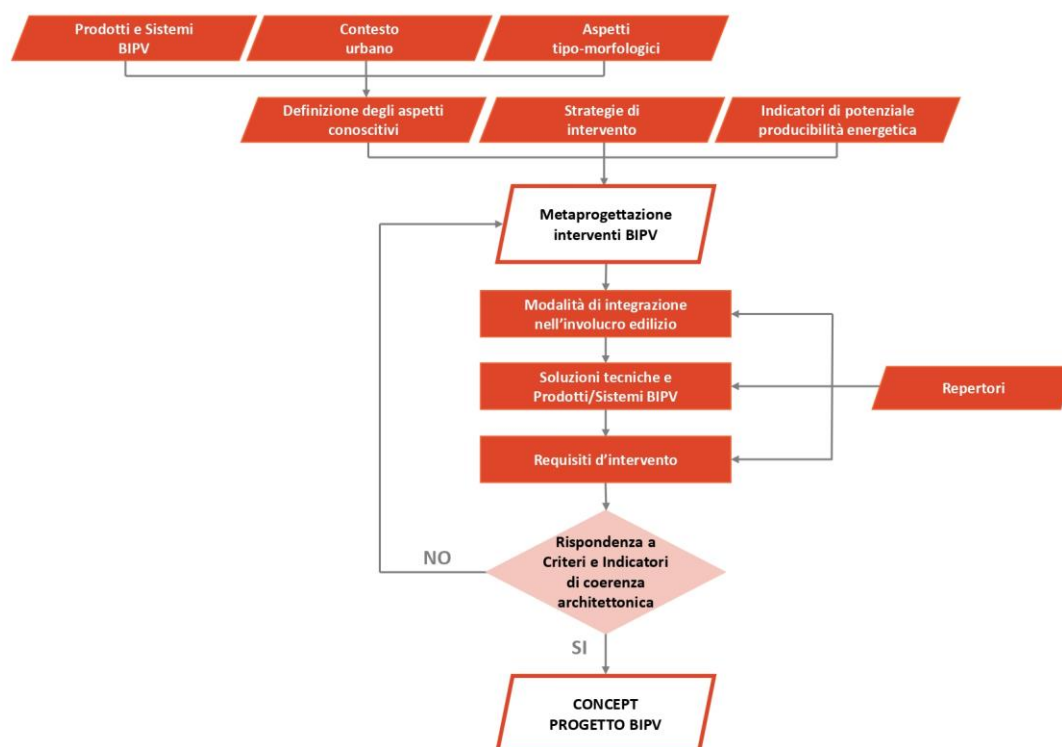


Figura 3. Diagramma di flusso per la formulazione del Concept progettuale di un intervento con tecnologie fotovoltaiche integrate.

La progettazione di un intervento, sia ex novo che di riqualificazione, prevede una prima fase di metaprogettazione ovvero una fase di sintesi tra le attività di raccolta dati e analisi degli aspetti conoscitivi, l'individuazione delle principali strategie di intervento e la valutazione della potenziale producibilità energetica delle scelte effettuate.

A valle della fase di metaprogettazione è possibile definire le modalità di integrazione del fotovoltaico nelle parti che costituiscono l'involucro edilizio (Basamento, Corpo centrale, Coronamento) attraverso la scelta di specifiche soluzioni tecniche, sistemi e prodotti BIPV al fine di definire, attraverso la scelta di pattern, colore, trasparenza, non visibilità della cella, flessibilità, personalizzazione dei formati ecc. il carattere architettonico dell'edificio. La formulazione di queste scelte è supportata da un articolato apparato di Repertori (*Casi di successo, Buone pratiche, Soluzioni tecniche BIPV, Informazione tecnica*) che informano, attraverso una struttura omogenea e sintetica i principali aspetti tecnici, prestazionali, energetici e di ricaduta architettonica della tecnologia fotovoltaica integrata nell'edificio. A valle di questa fase vengono definiti i requisiti degli interventi.

Per la configurazione del concept progettuale è necessario valutare il livello di integrazione architettonica delle scelte effettuate attraverso la verifica di rispondenza ai Criteri di coerenza geometrica, morfologica, cromatica e di installazione e ai relativi Indicatori. Se la rispondenza non è verificata è necessario rivedere il quadro delle scelte a partire dalla verifica di quei criteri e indicatori che non risultano soddisfatti.

2 Conoscenza

2.1. Prodotti e sistemi BIPV per l'integrazione in architettura

2.1.1 Aspetti definitivi

Il *Building Integrated Photovoltaics* (in Italia “FAI - Fotovoltaico Architettonicamente Integrato”) fa riferimento a tutti i componenti della tecnologia fotovoltaica che costituiscono parte integrante dell’involucro edilizio. In tal senso il componente o sistema di tipo BIPV viene considerato un componente edile che non può essere rimosso dall’edificio senza compromettere funzionalità primarie della stratificazione costruttiva o dell’intero sistema edilizio [06].

Lo standard internazionale di riferimento EN 50583-1:2016 “Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules” [07], riferito ai moduli fotovoltaici utilizzati come prodotti da costruzione, stabilisce che questi ultimi sono considerati integrati nell’edificio se svolgono il ruolo di un componente costruttivo adempiendo a una delle funzioni specificate dal Regolamento Prodotti da Costruzione CPR (*Construction Products Regulation*) 305/2011.

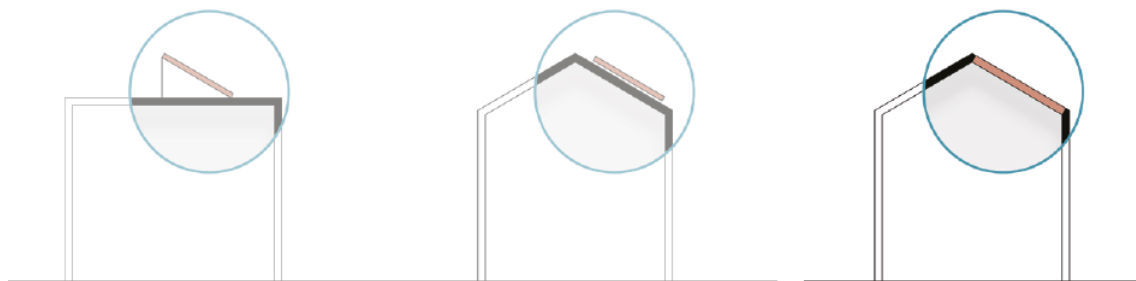


Figura 4. Modalità di integrazione del fotovoltaico: non integrato, parzialmente integrato, integrato.

Tale definizione si riferisce principalmente al concetto tecnologico di “multifunzionalità”, secondo cui un modulo BIPV deve soddisfare requisiti connotanti aggiuntivi rispetto alla sola produzione di energia quali ad esempio la protezione dagli agenti atmosferici come pioggia, neve, vento, grandine, la protezione dai raggi UV, l’isolamento termico, l’isolamento acustico e la protezione dal rumore, rigidità, resistenza meccanica ed integrità strutturale, ombreggiamento/controllo della luce naturale.

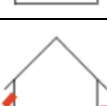
A partire dallo Standard EN 50583-1:2016, nell’IEA PVPS Task 15, viene fornita una definizione distinta tra “modulo (o prodotto) BIPV” e “sistema BIPV”, poiché il produttore del modulo generalmente non coincide con l’installatore del sistema e occorre dunque separare le rispettive sfere di responsabilità [06].

Un *modulo (o prodotto) BIPV* è insieme un modulo fotovoltaico e un prodotto da costruzione, progettato per essere un componente dell’edificio; in altre parole, è l’unità fotovoltaica più piccola e non divisibile (elettricamente e meccanicamente) in un sistema BIPV che conserva la funzionalità correlata all’edificio. Se il prodotto BIPV viene smontato, deve essere sostituito da un prodotto da costruzione appropriato in grado di espletare le medesime funzioni tecnologiche.

Un *sistema BIPV* è un sistema fotovoltaico in cui i singoli moduli fotovoltaici soddisfano la definizione di cui sopra per i prodotti BIPV; il sistema comprende i componenti elettrici necessari per collegare i moduli BIPV ai circuiti esterni e i sistemi di installazione e montaggio necessari per integrarli nell’organismo edilizio.

In base al tipo di installazione lo standard internazionale di riferimento IEC 63092-1:2020 “Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules” [08] suddivide i sistemi BIPV in cinque categorie, secondo la combinazione dei criteri di integrazione nell’involucro edilizio, accessibilità e inclinazione (Tabella 1). La dicitura “non accessibile” implica che un altro prodotto da costruzione, installato al di sotto del modulo BIPV, impedisce il contatto diretto con la superficie interna del modulo e fornisce protezione contro gli urti meccanici e l’eventuale caduta di frammenti di grandi dimensioni all’interno dell’edificio, conseguente alla rottura accidentale del modulo.

Tabella 1. Categorie di intervento secondo lo standard IEC 63092-1:2020.

Cat. A	Integrato nella copertura, non accessibile dall'interno dell'edificio I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 0° e 75° rispetto al piano orizzontale, con un altro prodotto da costruzione al di sotto.	
Cat. B	Integrato nella copertura, accessibile dall'interno dell'edificio I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 0° e 75° rispetto al piano orizzontale.	
Cat. C	Integrato nella facciata, non accessibile dall'interno dell'edificio I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 75° e 90° rispetto al piano orizzontale, con un altro prodotto da costruzione al di sotto.	
Cat. D	Integrato nella facciata, accessibile dall'interno dell'edificio I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 75° e 90° rispetto al piano orizzontale.	
Cat. E	Integrato esternamente, accessibile/non accessibile dall'interno dell'edificio I moduli BIPV forniscono un ulteriore livello funzionale. Es. parapetti, balaustre, pensiline, schermature, ecc.	

2.1.2 Classificazione delle soluzioni BIPV

La classificazione delle soluzioni BIPV tiene conto di una lettura integrata tra la scomposizione del sistema tecnologico operata dalla norma UNI 8290-1:1981 [95] e le nomenclature da utilizzare, a vantaggio di un linguaggio condiviso, operata nell'ambito del Report *Categorization of BIPV applications*, dell'IEA PVPS Task 15, Subtask B [09]. La classificazione adotta un parametro di tipo tecnologico-funzionale, identificando i sistemi BIPV a partire dal sub-sistema tecnologico in cui si osserva l'integrazione di uno strato funzionale destinato alla produzione di energia elettrica. Per ciascuna delle macrocategorie funzionali (Unità Tecnologiche: Copertura, Facciata, Dispositivi Esterni Integrati) si individuano delle parti costitutive del sistema tecnologico (Classi di Elementi Tecnici), che indentificano, in maniera univoca, i componenti del sistema interessati dall'integrazione fotovoltaica (Tabella 2).

Tabella 2. Unità tecnologiche con rispettive classi di elementi tecnici.

Unità tecnologiche	Classi di elementi tecnici	<i>Categorization of BIPV applications</i>
COPERTURA <i>ROOF</i>	C1 copertura discontinua	<i>discontinuation roof</i> (<i>cold roof, shingled roof, pitched roof, sloped roof</i>)
	C2 copertura continua	<i>continuous roof</i> (<i>flat roof, planar roof, low-sloped roof</i>)
	C3 copertura vetrata/atrio/lucernario	<i>atrium/skylight</i> (<i>glazed roof, (semi) transparent roof</i>)
FACCIATA <i>FACADE</i>	F1 facciata continua	<i>curtain wall</i> (<i>warm facade</i>)
	F2 facciata ventilata	<i>rainscreen facade</i> (<i>cold facade, ventilated façade</i>)
	F3 facciata a doppia pelle	<i>double skin façade</i> (<i>second skin</i>)
	F4 serramento	<i>window</i> (<i>fenestration</i>)

DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI EXTERNAL INTEGRATED DEVICES	D1 parapetto/coronamento	parapet (<i>balustrade, railing</i>)
	D2 frangisole/schermature solari	solar shading (<i>louvres, breise-soilei, shading devices, shutters, blinds</i>)
	D3 pensilina/tettoia/ pergola	canopy (<i>shelter, pergola</i>)

Si riporta di seguito un glossario tecnico di riferimento, che armonizza la classificazione proposta dal Task 15, Subtask B [09] con il sistema definitorio fornito dalla norma UNI 8290-1:1981.

Unità tecnologica: raggruppamento di funzioni, compatibili tecnologicamente, necessarie per l'ottenimento di prestazioni ambientali finalizzate a soddisfare esigenze dell'utenza.

Classe di elementi tecnici: insieme di prodotti edilizi che configurano modalità di risposta complessiva o parziale alle funzioni delle unità tecnologiche, tali da evitare il più possibile soluzioni precostituite.

Elemento tecnico: prodotto edilizio più o meno complesso capace di svolgere completamente o parzialmente funzioni proprie di una o più unità tecnologiche e che si configura come componente caratterizzante di un sottosistema tecnologico.

Involucro edilizio: insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici che morfologicamente e funzionalmente definiscono il limite tra l'ambiente interno (insieme di unità ambientali ed elementi spaziali che devono garantire il soddisfacimento delle esigenze dell'utenza) e l'ambiente esterno (contesto ambientale, condizioni al contorno) di un organismo edilizio, avente la funzione di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno.

Copertura (chiusura superiore): insieme degli elementi tecnici orizzontali e sub-orizzontali dell'involucro edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio dallo spazio esterno sovrastante.

Facciata (chiusura verticale): insieme degli elementi tecnici verticali dell'involucro edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio rispetto all'esterno.

Dispositivi esterni integrati (partizioni esterne): insieme degli elementi tecnici orizzontali/verticali/inclinati del sistema edilizio aventi funzione di dividere e articolare gli spazi interni connessi con il sistema edilizio stesso.

2.1.3 La produzione di sistemi e prodotti

Nell'ambito dei sistemi e prodotti BIPV, le tecnologie di celle FV più utilizzate sono il silicio mono- e policristallino e il film sottile. I costi delle differenti soluzioni variano, così come il rendimento e la manutenzione, che dipendono dalle modalità di applicazione. È possibile distinguere alcune caratteristiche fondamentali rispetto alle generazioni tecnologiche del fotovoltaico [10]:

- le **tecnologie di prima generazione** comprendono il silicio mono e policristallino (Si mono o Si multi) e sono caratterizzate da un rendimento relativamente alto per metro quadrato, variano in efficienza dal 14% al 22% e il costo aumenta con l'efficienza e la qualità. I pannelli di silicio cristallino sono tradizionalmente blu, ma sono oggi disponibili prodotti in una gamma più ampia di colori. I colori che si distanziano molto dal blu o nero sono meno efficienti, il che significa che convertono una percentuale minore di luce solare in elettricità utilizzabile.

- le **tecnologie di seconda generazione**, come il film sottile, hanno un costo inferiore per metro quadrato rispetto ai pannelli di silicio cristallino, ma sono tipicamente meno efficienti; la loro efficienza varia dal 12% al 18%. Il film sottile necessita quindi di superfici più ampie per la stessa produzione elettrica di un silicio mono o policristallino, anche se ha dimostrato di funzionare meglio in luoghi parzialmente ombreggiati, come quelli che si trovano comunemente in ambito urbano. Il film sottile è tipicamente nero, ma è oggi disponibile sul mercato in una vasta gamma di finiture e diversi livelli di trasparenza, il che permette di integrarlo nelle vetrate. Il film sottile può essere rigido o flessibile. I pannelli flessibili sono spesso scelti per applicazioni architettoniche o leggere negli edifici, come tettoie o ombreggiature, ma tendono ad essere più costosi.

- la **terza generazione** comprende diversi tipi di tecnologie emergenti e innovative (DSSCs - *Dye-sensitized solar cells*; OSCs - *Organic solar cells*; PSCs - *Perovskite solar cells*; QDSCs - *Quantum dot solar cells*),

potenzialmente più economiche delle precedenti, e si proietta su un grado di efficienza del 30%. Si tratta tuttavia di soluzioni in fase sperimentale e ancora lontano da una produzione diffusa sul mercato.

Le attuali ricerche nella produzione di sistemi e prodotti BIPV innovativi si concentrano sulla realizzazione di celle solari o moduli flessibili, colorati, in grado di offrire elevata efficienza anche in caso di esposizione parziale alla luce o con condizioni di cielo nuvoloso. La possibilità di realizzare dispositivi fotovoltaici a basso costo e ad alta efficienza rappresenta uno dei traguardi più ambiziosi per la ricerca scientifica.

I moduli BIPV non si differenziano solo a livello di tecnologia, ma anche per quanto riguarda l'aspetto visivo, variando il colore delle celle, dello sfondo e della cornice, la forma delle celle e del modulo, il tipo di griglie per i contatti elettrici, la riflessione ottica del modulo, la trasparenza e la flessibilità [11]. Le caratteristiche che maggiormente si rivelano determinanti per i progettisti nella scelta di prodotti e sistemi fotovoltaici integrati si riferiscono a specifici aspetti visivi:

- *colore delle celle*: il colore blu delle celle mono- e policristalline risulta la soluzione comunemente più usata, ma la scelta dei possibili colori già presenti sul mercato è ampia. La riduzione in termini di rendimento delle celle colorate può essere compensata dalle ricadute positive sulla qualità architettonica della soluzione BIPV scelta.

- *colore dello sfondo*: se nei moduli tradizionali lo sfondo del modulo è bianco o nero, è possibile optare per diverse alternative cromatiche variando il colore del materiale incapsulante (normalmente EVA - Etilene Vinil Acetato o PVB - Polivinilbutirrale). L'uso del vetro nella stratigrafia del modulo permette di cambiare il colore, le caratteristiche e creare disegni serigrafati. L'uso di sfondi trasparenti consente, inoltre, di ottenere moduli semi-trasparenti particolarmente versatili in edilizia.

- *colore della cornice*: le cornici più diffuse sono in alluminio anodizzato naturale o colorato, soluzione che migliora la resistenza meccanica del modulo e ne facilita il fissaggio, ma diversi produttori forniscono oggi soluzioni da catalogo senza cornice che facilitano l'integrazione in architettura, soprattutto rispetto a specifiche applicazioni come facciate continue o frangisole.

- *motivi e forme*: le celle possono avere forme e dimensioni diverse, ma quelle più comuni sono 10x10, 12.5x12.5, 15x15cm. La distanza fra le celle, ai fini del rendimento energetico è minima, ma per ragioni estetiche può variare, creando anche motivi particolari nell'assemblaggio del prodotto. Anche le dimensioni dei moduli non sono più standard, consentendo di poter selezionare fra numerose varianti.

- *riflessione ottica*: questa caratteristica varia rispetto alla scelta del materiale di protezione anteriore e dall'eventuale trattamento. Ai fini del rendimento energetico, la riflessione ottica andrebbe minimizzata per consentire di catturare al massimo la radiazione solare.

- *trasparenza*: si tratta di una caratteristica fondamentale in architettura perché in alcuni casi potrebbe condizionare benessere visivo e apporti termici. La semi-trasparenza della cella può raggiungere oggi soglie del 40% (standard 20%), con tuttavia riduzioni proporzionali dell'efficienza.

- *flessibilità*: esistono sul mercato anche diversi tipi di moduli che possono essere integrati in componenti curvi o flessibili (come tende, vetri curvi, coperture in alluminio, ecc.).

Oltre agli aspetti visivi descritti, anche il sistema di montaggio si rivela fondamentale nella scelta di soluzioni BIPV. Il mercato attuale presenta sistemi evoluti e specifici rispetto alle diverse modalità di integrazione con caratteristiche che vanno dalla modularità e semplicità del montaggio, alla leggerezza e alla sicurezza strutturale, con la possibilità di includere sistemi isolanti o di micro-ventilazione.

In ambito edilizio, sia per nuova edificazione che per interventi di riqualificazione, le principali categorie per l'applicazione del BIPV (cfr. *Repertorio di Informazione tecnica*) fanno riferimento a:

- soluzioni per le coperture attraverso prodotti come i moduli tegola o sistemi per il pavimento;
- dispositivi esterni integrati come frangisole e parapetti FV;
- soluzioni per le facciate, principalmente attraverso moduli di rivestimento.

Nello sviluppo innovativo di prodotti e soluzioni BIPV le risposte che molte aziende stanno attuando per essere competitive e presenti sul mercato sono orientate alla flessibilità, alla versatilità, alla specializzazione e alla risposta prestazionale complessa dei singoli prodotti e dei sistemi integrati. La corrente produzione a catalogo, basata su strategie di ottimizzazione dell'impiego delle risorse materiali ed energetiche, presenta evidenti potenzialità di innalzamento della *green quality* e di riduzione degli impatti, favorendo la rispondenza del progetto a requisiti di leggerezza, risparmio di risorse e compatibilità ambientale.

Gli obiettivi che saranno sempre più centrali nel corso dei prossimi anni saranno legati allo sviluppo di nuove tecnologie per le celle fotovoltaiche, al miglioramento delle performance di quelle già esistenti e all'espansione dei campi di applicazione di tale tecnologia. Proprio i possibili campi di applicazione che esulano dalla tradizionale produzione energetica sono quelli in grado di destare maggiore interesse, in quanto ancora aperti a numerose possibilità di sviluppo tuttora da definire.

2.2 Contesto urbano

2.2.1 Classificazione di tipi di tessuto urbano

I principi di classificazione dei tipi di tessuto urbano rappresentano un primo passo metodologico teso a comprendere e schematizzare le prevalenti caratteristiche tipo-morfologiche del costruito negli ambiti urbani, come derivazione dalla maglia viaria degli impianti urbani e dalle trasformazioni secondo processi di formazione e crescita che si sono succeduti nelle diverse epoche.

Con il termine tessuto urbano si intende un'organizzazione territoriale e urbanistica-edilizia, che presenta caratteri di omogeneità dal punto di vista della trasformazione storica, del rapporto formale e dimensionale tra spazi pubblici e spazi privati, nonché del rapporto tra tipi di edifici e lotti di riferimento, con la prevalenza di una o più funzioni urbane principali [12].

In relazione all'utilizzo di sistemi fotovoltaici in edilizia, le relazioni che intercorrono tra tipologie di tessuto urbano e caratteristiche del costruito consentono di attuare una valutazione qualitativa del rapporto tra morfologia urbana e rendimento energetico, quale premessa per prendere in considerazione i contesti e le modalità degli interventi di integrazione dei sistemi fotovoltaici.

La caratterizzazione di un tipo di tessuto urbano può essere definita da diversi fattori sintetizzabili in tre parametri chiave:

- distanza media tra gli edifici o ampiezza delle strade - W_m ;
- altezza media degli edifici - H_m ;
- Building Coverage Ratio - BCR: rapporto tra la superficie edificata e quella libera di una determinata area.

Da tali parametri è possibile ricavare l'indice di morfologia urbana [10] $U = BCR \cdot H_m / W_m$ che descrive sinteticamente le caratteristiche di un contesto.

La classificazione delle tipologie di tessuti urbani, al fine di essere rinvenibili nei numerosi contesti nazionali, deve essere necessariamente schematica e fare riferimento a una datazione storica in cui si riscontrino omogenee caratteristiche per i tipi di edifici, le loro modalità di aggregazione, le altezze, le tecniche costruttive, nonché il rapporto tra costruito, spazi vuoti e tracciati viari.

Rispetto alle classificazioni elaborate in base a principi urbanistici e architettonici, la classificazione proposta per valutare la potenza energetica installabile e il rendimento energetico ottenibile attraverso l'applicazione di sistemi BIPV, fa riferimento ai seguenti parametri:

- densità edilizia;
- altezza;
- rapporto di copertura;
- larghezze stradali;
- distanze fra gli edifici.

Rispetto allo specifico campo di indagine, sono classificati i seguenti tipi di tessuto urbano:

1 - Tessuto urbano storico

Si tratta di un contesto precedente al 1700, caratterizzato da un elevato rapporto di copertura al suolo, maglie stradali regolari se derivanti da uno sviluppo urbano per assi e poli oppure da lottizzazione pianificata, mentre possono risultare irregolari quelle individuate come effetto di sviluppi su percorsi-matrice. A parte alcuni viali propri della città barocca, l'impianto stradale è di ridotta ampiezza, mentre gli edifici sono di altezza media dai quattro ai sei piani fuori terra. Spesso è prevalente il tema della cortina continua sul fronte strada. Anche se sono presenti sostituzioni edilizie avvenute nel corso dei secoli, si riscontra in ogni caso una alta densità edilizia.

2 - Tessuto urbano ottocentesco

Sviluppato tra il '700 e la fine dell'800, è caratterizzato da un rapporto medio-elevato di copertura al suolo, maglie stradali regolari abbastanza ampie a formare lotti squadrati o rettangolari e edifici di altezza media tra i 4 e gli 8 piani fuori terra; l'impianto urbano è caratterizzato da isolati con cortili e dotazioni di verde collettivo o privato. La destinazione prevalente è di tipo residenziale con attività commerciali e di servizio al piano terra; spesso il singolo edificio coincide con l'isolato urbano.

3 - Tessuto urbano moderno

Questo tipo di tessuto può essere datato fra il 1920 e il 1960 e corrisponde al periodo di intensa sperimentazione urbana di edificazione con tecniche e tipologie edilizie proprie dell'esperienza moderna dell'architettura e della città. Ci si riferisce in tal caso all'esperienza comune di quartieri residenziali di edilizia popolare con edifici prevalentemente in linea o a schiera, in altri casi a torre, con discrete dotazioni di spazi verdi. I tessuti moderni presentano un medio rapporto di copertura al suolo, maglie stradali regolari e ampie a formare lotti squadrati o rettangolari con edifici di altezza media.

4 - Tessuto urbano per unità complesse

Questo tipo di tessuto si è sviluppato dopo il 1960, ed è caratterizzato da un basso rapporto di copertura al suolo, da maglie stradali e distanze tra gli edifici molto ampie, con altezze edilizie elevate riferite a edifici lamellari o a torre, con destinazioni d'uso miste, sia residenziali che direzionali e di tipo terziario.

5 - Tessuto urbano industriale

Lo sviluppo delle attività produttive dopo il 1960 ha determinato la realizzazione di diverse tipologie di luoghi del lavoro caratterizzati da una edilizia di ampie superfici, con un medio rapporto di copertura al suolo, maglie stradali irregolari, distanze tra gli edifici accentuate e altezze basse. Ampia è la dotazione di spazi di pertinenza o di spazi verdi.

6 - Tessuto periurbano/periferico

Questo tipo di tessuto, a bassa densità, si è prevalentemente sviluppato tra la fine degli anni '50 e dopo il 1960 ed è caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo medio-basso, maglie stradali caratterizzate da regolarità o, in aderenza alle idee di città più organiche, da tracciati irregolari, con distanze tra gli edifici abbastanza ampie e altezze basse. Alcuni tessuti sono stati oggetto di sperimentazioni progettuali e urbanistiche, con una mixité tipologica evoluta e dotazioni di spazi aperti e spazi verdi.

Il riconoscimento del tipo di tessuto urbano è un primo passo rilevante in quanto rappresenta una precondizione che determina, attraverso la classificazione dell'indice di morfologia urbana, una prelievitazione dell'efficacia e dell'efficienza energetica degli interventi.

Tabella 3. Individuazione dei contesti classificati in base alla morfologia urbana.

Hm/Wm	BCR				
	<0,1	0,1÷0,3	0,3÷0,4	0,4÷0,6	>0,6
<0,5		01. Contesto rurale/ periferico $U < 0,15$	02. Contesto industriale $0,03 < U < 0,2$		
0,5÷1,0	03. Contesto direzionale $U < 0,2$		04. Contesto urbano moderno $0,15 < U < 0,4$		
1,0÷2,0				05. Contesto urbano ottocentesco $0,4 < U < 1,2$	
>2					06. Contesto urbano storico $U > 1,2$

2.2.2 Caratteri urbani

Orientamento, tipo di facciata e superficie, altezza degli edifici, dimensione stradale ed altri parametri inducono specifiche considerazioni sull'opportunità o meno e sull'efficienza dell'integrazione di sistemi fotovoltaici negli edifici, sia nelle progettazioni ex novo che in quelli esistenti. Gli interventi di integrazione di

sistemi fotovoltaici negli edifici richiedono di riferire le scelte a fattori di carattere architettonico oltre che di tipo tecnico. Tali parametri devono inevitabilmente incrociarsi con i caratteri urbani, con i valori del contesto e con la relazione fra tipo di edificio e più generale morfologia urbana.

La nozione di carattere – sia urbano che degli edifici singolarmente considerati – discende dal greco *charaktèr*, che significa “impronta” e rappresenta il complesso delle qualità che distinguono un insieme di edifici da un altro, con la finalità di identificare la parte oggettiva e razionale del progetto distinguendolo da quella più soggettiva ed intuitiva. Gli edifici vanno riconosciuti studiandone le caratteristiche comuni - oltre che le peculiarità costruttive, distributive e stilistiche – individuabili nei tratti ricorrenti e trasmissibili proprie della tipicità della sua forma.

Il tema dell’espressività architettonica rappresenta un ulteriore fattore che tende a definire la qualità del progetto attraverso il linguaggio dell’architettura contribuendo, nei casi in cui è opportuno o consentito, anche all’introduzione di registri espressivi di tipo innovativo.

Un punto di partenza per la definizione progettuale di un intervento di BIPV è rappresentato dalla necessità di sviluppare un appropriato sistema di conoscenze per considerare un edificio o un complesso edilizio come interno a un sistema costituito dai principali fattori dell’assetto spaziale urbano o territoriale, nonché delle regole che costituiscono le basi di un determinato insediamento, dalla localizzazione, dal ruolo del sito e delle relazioni reciproche con il contesto, fino alla struttura dei tracciati urbani.

Questo passaggio interpretativo, finalizzato alla comprensione dei caratteri urbani con cui si confronta un edificio, richiede di comprendere i rapporti gerarchici e i ruoli funzionali esistenti fra gli elementi che compongono un ambito urbano, considerandone l’incidenza su singoli edifici e sui sistemi di relazione fra edifici e spazi aperti:

- sequenza di edifici e loro rilevanza in termini architettonici, funzionali o di uso;
- tipo di spazi e loro valore urbano (assi principali, assi di quartiere, percorsi locali, piazze, larghi);
- sistema degli ingressi agli edifici e ai luoghi (rilevanza e ubicazioni);
- fronti principali e condizioni di affaccio (dimensione, sequenze, intensità);
- modalità di aggregazione degli edifici nei tessuti urbani (cortine, isolati urbani, ecc.);
- percezione del contesto (coni ottici, sequenze percettive);
- relazioni d’ordine fra edifici con funzioni specialistiche ed edifici residenziali (edifici di testata, gerarchia fra edifici, condizioni specialistiche o seriali).

2.2.3 Relazione tra edificio e contesto

La relazione fra edifici e contesto stabilisce il legame tra essi e la riconoscibilità e rappresentazione dei luoghi nei parametri naturali, culturali e materici, oltre che tecnologici, che si relazionano con gli edifici stessi. Gli interventi con BIPV vanno confrontati dunque con la spazialità dei luoghi, determinata dalla loro ubicazione e dalla loro organizzazione, mentre le componenti morfologiche dei luoghi - intese nella loro condizione oggettiva e razionale - costituiscono il fattore fondante da comprendere per la leggibilità, la percezione e la comprensione di un sito.

Con interventi realizzati con sistemi BIPV è possibile, e a volte anche necessario, incidere sulla spazialità di un luogo. Ciò implica la ridefinizione di singole componenti che lo costituiscono, ma anche l’attenzione a interazioni, percezioni e impatti che tali elementi possono generare. Vanno compresi i punti focali in cui il carattere dei luoghi si esplicita, anche in un “immaginario identitario” che, nel tempo, appartiene al luogo e lo fa proprio diventandone parte della sua essenza.

Il progetto di integrazione di sistemi fotovoltaici richiede di essere impostato attraverso un equilibrato rapporto fra soluzioni che ne valorizzino riconoscibilità e rappresentazione e i linguaggi espressivi che siano capaci di interpretare la natura e la vocazione dei luoghi, assecondandone invece i caratteri identitari.

Il progetto deve in tal modo costruire i margini di un’interazione complessa con il contesto che diventa esso stesso un elemento progettuale con la sua identità, le sue caratteristiche e i suoi vincoli. Uno studio interpretativo del contesto nelle sue componenti materiali e immateriali, ricercando i fattori oggettivi e dotati di senso, incidono sul progetto e ne motivano le scelte. La conoscenza del contesto va oltre la semplice osservazione, indagando la storia e le sue complesse stratificazioni al fine di comprenderne l’evoluzione nel tempo per dedurre regole-guida nella progettazione a scala urbana ed edilizia come per esempio di specifiche

vocazioni, tracce storiche, allineamenti e sequenze, sistemi insediativi, fattori percettivi, generatrici di sviluppo urbano, ecc.

L'altro aspetto determinante da considerare non solo rispetto ai caratteri degli edifici ma anche rispetto a quelli contestuali è costituito dai fattori ambientali (soleggiamento, geomorfologia, venti, ecc.) e naturali. Oltre ai fattori di carattere bioclimatico (orientamento, affacci, densità abitativa, altezze, aggregazioni edilizia, ecc.) la conoscenza deve avvalersi di dati e informazioni su altri fattori ambientali come la ventilazione naturale o le precipitazioni fino alle condizioni determinate dagli impatti climatici. I fattori percettivi, anche rispetto alle componenti dell'ambiente antropizzato e naturale, come le prospettive dei tracciati e degli assi urbani, sono elementi che vanno conosciuti e presi in considerazione per l'incidenza e l'impatto visivo dovuti all'utilizzo di sistemi BIPV. Le sequenze dei tipi di spazi aperti (spazio pubblico, privato e collettivo; viali, piazze, punti panoramici, ecc.) o di edifici costituiscono un ulteriore elemento da considerare per le scelte di carattere progettuale.

2.2.4 Rapporto tipologia/morfologia

I termini "tipologia edilizia" e "morfologia urbana" si inseriscono all'interno dei fattori relativi all'analisi urbana per indirizzare la conoscenza degli ambiti urbani in cui attuare gli interventi

Nella definizione dei fattori qualificanti del progetto, il concetto di tipologia si collega alla nozione di tipo di edificio, nozione astratta che fa riferimento a uno schema organizzativo e di relazione fra le parti qualificanti di un edificio: ingresso dell'edificio, ingressi degli alloggi, ingombro dei singoli alloggi, affacci, posizione e ingombro del blocco scala. Il concetto di tipologia di edificio collegato alle modalità aggregative degli edifici stessi in relazione agli elementi urbani (isolati, cortine, unità residenziali complesse, ecc.) consente di comprendere i principi insediativi di un'area o di un tessuto urbano al fine di intervenire con cognizione sui rapporti tra progetto architettonico e morfologia urbana intesa come struttura riconoscibile e descrivibile di parti di città [13].

Infatti qualsiasi intervento di BIPV deve porsi il problema della conoscenza non solo del carattere dell'edificio in cui va a inserirsi, ma anche del carattere dei tessuti urbani in cui colloca l'edificio oggetto d'intervento, identificandone i modelli e le strutture sottostanti, ovvero le forme del costruito e le caratteristiche della città (tracciati viari, lotti, elementi di suddivisione territoriale, densità e usi, collegandoli ai fenomeni generativi quali le caratteristiche geomorfologiche, la topografia, i fattori culturali e di cultura materiale, il contesto socio-tecnico. Il rapporto fra tipo di edificio e forma urbana, anche all'interno dei processi di mutamento nel corso della storia, consente di comprendere le leggi formative e trasformative della costituzione fisica della città [14].

L'associazione di singole unità abitative – gli edifici - tese a formare delle unità di scala superiore si sviluppa secondo leggi proprie che variano nello spazio nel tempo fino a costituire tessuti edilizi esito di modalità di aggregazione e di tipi di edifici omogenei. Questi fattori devono essere necessariamente riconosciuti nei processi di impostazione di un intervento progettuale in termini di BIPV per il retrofit tecnologico di un edificio esistente o per edifici realizzati ex-novo.

La relazione fra tipi di edifici e morfologia urbana diventa una condizione interpretativa qualificante perché per esempio può essere riferita all'apporto della successione delle facciate degli edifici nei fronti urbani secondo ingressi, affacci, ritmi, altezze, occupazione del lotto. Tali sequenze incidono sul manifestarsi della forma urbana in specifici tessuti urbani caratterizzati dalle specifiche omogeneità tipo-morfologiche.

2.3 Aspetti tipo-morfologici e tecnologici

2.3.1 Classificazione di morfologie e tipi di edifici

Considerando le più comuni soluzioni architettoniche delle facciate e delle coperture, le caratteristiche morfologiche sono schematicamente individuabili in sei tipi di edifici ricorrenti. Un tipo di morfologia è rilevante nella concezione integrata di sistemi fotovoltaici inseriti nell'involucro. In presenza di edifici che presentino forme miste rispetto a uno dei sei tipi di morfologie individuate, va presa in considerazione quella prevalente in termini di superficie. La scelta di una opportuna morfologia di edificio in relazione al contesto

e al tessuto edilizio può essere determinante per possibili ombre proiettate sull'involucro, incidendo sul rendimento di un sistema BIPV.

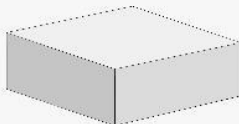
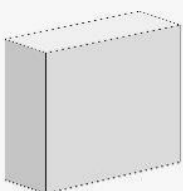
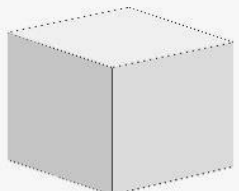
Tabella 4. Individuazione di sei tipi di morfologie ricorrenti.

Morfologia coperture	Morfologia facciate					
	1. Forma compatta senza sporti né aggetti, priva di spazi esterni		2. Presenza di balconi/ ballatoi/ sporgenze/ volumi aggettanti/ verande		3. Presenza di logge/ ballatoi/ rientranze/ verande	
A. copertura piana	A1		A2		A3	
B. copertura inclinata	B1		B2		B3	

Considerando gli aspetti tipologici in relazione allo sviluppo prevalentemente orizzontale o verticale degli edifici, sono stati individuati tre tipi rispetto ai rapporti dimensionali prevalenti che legano lo sviluppo dei fabbricati lungo le tre dimensioni: lunghezza, altezza e larghezza:

- tipo 01: edifici che si sviluppano prevalentemente in lunghezza;
- tipo 02: edifici che si sviluppano prevalentemente in altezza;
- tipo 03: edifici irregolari che non presentano una direzione principale di sviluppo.

Tabella 5. Individuazione dei tre possibili tipi di edifici in relazione ai rapporti dimensionali.

Tipi di edifici		
01	02	03
		

Oltre alla definizione dei tipi di edifici e ai relativi rapporti dimensionali, sono da considerare i tipi edilizi residenziali maggiormente diffusi sul territorio nazionale, valutandone la riconducibilità ai tre tipi di edifici individuati (01 – 02 – 03).

Secondo tale semplificazione, all'interno del *tipo 01* possono ricadere i tipi di edifici in linea, a ballatoio e a schiera, per il *tipo 02* è possibile individuare il tipo di edificio a torre, mentre, per il *tipo 03* i tipi di edifici isolato e a blocco.

Tabella 6. Individuazione dei tipi di edifici residenziali.

Tipo di edificio	Descrizione	Affacci	Piani
01. isolato 	Presente prevalentemente in aree rurali o periferiche a bassa densità abitativa, con maggiore disponibilità di terreno libero; singolo corpo edilizio organizzato liberamente su un lotto, con aggregazione di 1 o 2 unità abitative; accesso/i indipendente/i dal fronte stradale; ampio spazio di pertinenza aperto trattato a verde; eventuale vano scala interno all'alloggio.	3 - 4 lati	1 - 2
02. schiera 	Presente prevalentemente in aree periferiche a bassa/media densità abitativa; corpo edilizio organizzato come aggregazione di almeno 3 unità abitative in successione lineare; accesso indipendente dal fronte stradale; spazio aperto di pertinenza anteriore e posteriore; vano scala interno all'alloggio.	2 lati	2 - 3

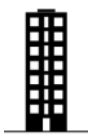
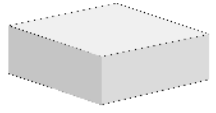
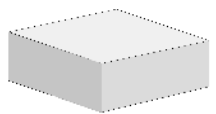
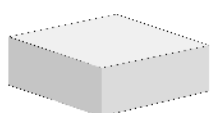
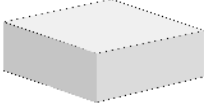
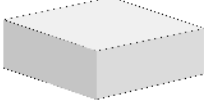
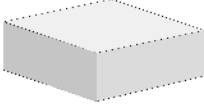
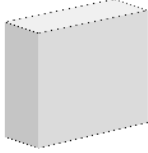
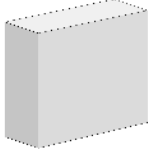
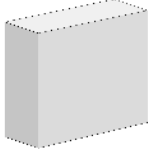
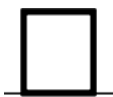
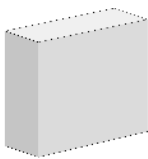
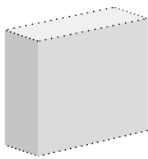
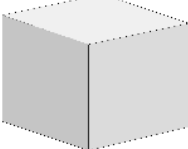
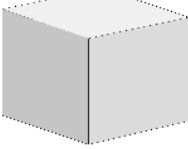
Tipo di edificio	Descrizione	Affacci	Piani
03. linea 	Presente sia nei centri urbani a media o alta densità abitativa che nelle aree periferiche con la possibilità di formazione di isolati dai fronti continui; corpo edilizio generalmente ad impianto rettangolare, organizzato come aggregazione lineare di almeno 2 unità abitative; piano terra adibito a spazio di servizio, magazzino o negozio; il vano scala distribuisce 2 o 3 alloggi per piano.	2 - 3 lati	≥ 3
04. ballatoio 	Presente prevalentemente in aree urbane centrali o periferiche con la possibilità di formazione di isolati dai fronti continui; corpo edilizio generalmente ad impianto rettangolare, organizzato come aggregazione di almeno 3 unità abitative in successione lineare; ballatoio aperto o chiuso, esterno o interno; vani scala (alle estremità) servono un percorso lineare tramite il quale si accede agli alloggi.	2 lati	≥ 3
05. blocco 	Presente prevalentemente nei centri urbani a media/alta densità abitativa, si adatta bene alla conformazione irregolare dei lotti; corpo edilizio complesso, generalmente ad impianto più tozzo rispetto al tipo in linea ma meno elevato rispetto al tipo a torre; piano terra a destinazione commerciale o terziaria; presenza di giardini e spazi aperti; presenza di più vani scala, soluzioni d'angolo complesse e una maggiore articolazione dei fronti soleggiati.	2 - 3 lati	≥ 4
06. torre 	Presente prevalentemente nei centri urbani ad alta densità abitativa di recente formazione, per la capacità di organizzare un gran numero di alloggi; corpo edilizio isolato di altezza consistente, generalmente ad impianto quadrangolare; solitamente circondato da spazi aperti e svincolato rispetto all'asse viario; il vano scala, generalmente centrale, può essere chiuso (con aerazione forzata) o con aperture verso l'esterno.	2 lati	≥ 6

Tabella 7. Schedatura di tipi di edifici, morfologie, orientamento e relativo caso esemplificativo.

Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Casi esemplificativi
A3  Logge C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali E-O Fronti secondari N-S	1 
A3  Logge C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali NO-SE Fronti secondari NE-SO	2 
A3  Logge C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali E-O Fronti secondari N-S	3 

Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Casi esemplificativi
A2  Balconi C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali NO-SE Fronti secondari NE-SO	4 
A2  Balconi C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	5 
A3  Logge C. piana	01  Sviluppo prevalente in lunghezza	Fronti principali N-S Fronti secondari E-O	6 
A3  Logge C. piana	02  Sviluppo prevalente in altezza	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	7 
A2  Balconi C. piana	02  Sviluppo prevalente in altezza	Fronti principali N-S E-O	8 
A2  Balconi C. piana	02  Sviluppo prevalente in altezza	Fronti principali NO-SE NE-SO	9 

Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Casi esemplificativi
A1  Forma compatta C. piana	02  Sviluppo prevalente in altezza	Fronti principali NO-SE NE-SO	10 
A2  Balconi C. piana	02  Sviluppo prevalente in altezza	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	11 
A2  Balconi C. piana	03  Nessuna direzione di sviluppo prevalente	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	12 
B1  Forma compatta C. inclinata	03  Nessuna direzione di sviluppo prevalente	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	13 

2.3.2 Orientamento degli edifici

Nella progettazione dei sistemi BIPV, un fattore principale da considerare è la collocazione dell'edificio rispetto all'orientamento affinché l'integrazione si attui a partire dalla superficie con la migliore esposizione solare. Un elemento che incide sul rendimento del PV è l'ombra portata, dipendente da specifiche ostruzioni presenti nel contesto. Al fine di facilitare, per quanto possibile, l'applicazione dei sistemi BIPV, si richiede con una semplificazione del tipo di tessuto urbano ipotizzando un contesto che non influenzi la performance del fotovoltaico. In caso contrario, l'utilizzo dei pannelli *dummies*, cioè moduli non attivi che hanno le stesse caratteristiche tecnologiche e morfologiche dei pannelli BIPV, pone rimedio al possibile improduttivo impiego di moduli attivi.

Un rilevante aspetto da prendere in considerazione è l'angolo di azimut e tilt. In riferimento all'azimut, nell'emisfero boreale i moduli vanno orientati a sud che corrisponde a un azimut di 0°, mentre l'inclinazione ottimale dei moduli dipende dalla latitudine, e dunque dalla posizione geografica dell'edificio e si attesta fra i 10° e i 60°. Per le latitudini del territorio italiano il tilt ottimale è di circa 30°.

2.3.3 Individuazione dei temi architettonici

L'integrazione di sistemi fotovoltaici va inquadrata nel rapporto fra tecnologia e progetto architettonico in relazione a tre specifiche condizioni:

- appropriatezza dell'integrazione finalizzata alla potenza installata e alla efficienza dei sistemi fotovoltaici relazione all'esposizione, alle ombre portate e all'inserimento nella facciata o in copertura;
- capacità delle scelte tecnologiche di corrispondere al carattere architettonico complessivo dell'edificio;
- necessità di attuare le scelte dei sistemi fotovoltaici in accordo ai temi architettonici che sono individuati nella relazione con le intenzionalità dei progettisti.

La triplice caratterizzazione dell'inserimento integrato di sistemi fotovoltaici per il progetto riguarda le modalità dell'inserimento stesso in relazione all'efficacia e all'efficienza tecnologica, nonché la rispondenza al carattere architettonico e ai temi dell'architettura secondo gli aspetti morfologici e linguistici.

Per poter controllare la morfologia dei sistemi BIPV integrati negli edifici, si richiede il riconoscimento dei temi architettonici che esprimono specifiche soluzioni progettuali (quali l'ingresso, la cortina, gli affacci, il sistema dei pieni e dei vuoti, i collegamenti verticali, le soluzioni di copertura, le sequenze degli spazi, ecc.). Un tema architettonico non si definisce in base a questioni funzionali o di destinazioni d'uso quanto rispetto a questioni di finalità: un tema fissa il senso di tutto l'edificio o di sue parti, che rende intellegibili le questioni poste dalle scelte progettuali nelle relazioni riferite ai luoghi e fra le parti.

La relazione dell'inserimento di sistemi tecnologici BIPV va riferita a una concezione univoca, in modo da non determinare equivoci di interpretazione e da essere adeguata all'oggetto architettonico. Per questo motivo va colta un'attribuzione di senso e ruolo alle forme in modo che esse siano finalizzate, anche gerarchicamente oltre che come significato, alla chiarezza e alla riconoscibilità dei temi di architettura. Questa operazione deve avvenire evitando incertezze formalistiche che si generano laddove si muta la costruzione in descrizione di forme o in uno sperimentalismo fine a sé stesso, quasi nei termini di un esercizio calligrafico. Ciascun intervento di integrazione architettonica deve presentarsi quindi come una soluzione di un tema di architettura capace di esprimere un legame diretto e concreto con la realtà e con le comunità.

2.3.4 Interpretazione dei caratteri architettonici e costruttivi degli edifici

Intervenire sull'esistente richiede di prendere in considerazione un approccio che sia in grado di restituire una forma capace di rivelare la definizione della sua ragion d'essere. Nel caso specifico di una preesistenza, essa va analizzata e conosciuta nella sua complessità di appartenenza al contesto, nella definizione dei temi architettonici che le sono propri, nella manifestazione delle intenzionalità proprie del progetto originario. Come qualsiasi operazione di riqualificazione e retrofit tecnologico su una preesistenza, si tratta di svelare la sua ragione individuale e collettiva, rivelando qualcosa che già esiste ed è resa evidente in termini di riconoscibilità architettonica.

La precisazione del carattere architettonico e costruttivo di un edificio va ricercata nel grado di aderenza all'unitarietà del progetto. L'interpretazione della complessiva coerenza progettuale potrà rappresentare la finalità compiuta dell'edificio e dei suoi caratteri architettonici e costruttivi. Ciò consente di rivelare uno specifico carattere architettonico e costruttivo attraverso un'attività conoscitiva del senso più generale sia dell'edificio che dei temi che lo caratterizzano, capace di trasformare un'aspirazione in un dato reale e materiale attraverso la forma riconoscibile della sua costruzione [15].

2.3.5 Classificazione e caratteristiche di elementi e parti costitutive dell'involucro edilizio

Tenuto conto delle caratteristiche di tessuto urbano, tipo di edificio e morfologia dell'edificio, la lettura delle modalità di integrazione morfologica dei sistemi fotovoltaici in parti ed elementi architettonici fa riferimento ad una scomposizione basata sulla nomenclatura architettonica di elementi e parti costitutive dell'involucro edilizio.

Con riferimento al glossario tecnico RET8, al report “*Categorization of BIPV applications*”, alla norma UNI-8290 e al *Regolamento Edilizio Tipo*¹, valido sull'intero territorio nazionale, si riportano le definizioni dei principali elementi e parti dell'involucro edilizio:

Balcone: elemento edilizio praticabile e aperto su almeno due lati, a sviluppo orizzontale in aggetto, munito di ringhiera o parapetto e direttamente accessibile da uno o più locali interni.

Ballatoio: elemento edilizio praticabile a sviluppo orizzontale, e anche in aggetto, che si sviluppa lungo il perimetro di una muratura con funzione di distribuzione, munito di ringhiera o parapetto.

Basamento: derivato di *basare*, “fondare”, il termine indica, in generale, la parte inferiore di un edificio, di una struttura, distinguibile dal resto della costruzione a seguito di differenze nei materiali, nella forma o nei caratteri costruttivi. Per essere definito come tale, deve avere un'altezza significativa, che si imponga visivamente all'attenzione dell'osservatore. In un edificio, il basamento ha funzione, in primo luogo, di appoggio delle parti superiori della costruzione rispetto al suolo, sia da un punto di vista statico, sia da un punto di vista formale e, in secondo luogo, di protezione dalle stesse dall'eventuale umidità di risalita.

Copertura: struttura di chiusura superiore di un volume costruito, posta a separare lo spazio confinato dall'ambiente esterno proteggendolo e riparandolo. Protegge gli ambienti interni, in cui debbano essere stabilizzate particolari condizioni termo igrometriche e acustiche. Si divide in: *copertura piana* con pendenza compresa tra lo 0% e il 5%; *copertura inclinata* con pendenza superiore al 5%; *copertura curva* quando la superficie dell'estradosso presenta un andamento curvo regolare o irregolare.

Coronamento: parte terminale superiore di una struttura architettonica che può essere definito da vari elementi quali una balaustra, cimasa, cornice, merlo ecc.

Corpo centrale: indica la porzione principale di un edificio collocata fra basamento e coronamento.

Corpo scala: insieme delle parti costituenti una scala e le sue strutture d'ambito, indicando anche le sue parti costruttive.

Loggia: elemento edilizio praticabile coperto, non aggettante, aperto su almeno un fronte, munito di ringhiera o parapetto, direttamente accessibile da uno o più vani interni.

Testata: indica l'estremità trasversale di un organismo architettonico o di una costruzione che si sviluppa in senso longitudinale.

Veranda: locale o spazio coperto avente le caratteristiche di loggiato, balcone, terrazza o portico, chiuso sui lati da superfici vetrate o con elementi trasparenti e impermeabili, parzialmente o totalmente apribili.

¹ L'adozione del Regolamento Edilizio Tipo (RET), prevista dall'Intesa raggiunta il 20/10/2016 tra Stato, Regioni e ANCI (G.U. n. 268 del 16/11/16), rappresenta una delle azioni di semplificazione e unificazione in materie edilizie promosse dal Governo.

3 Progetto

3.1 Strategie di progetto per l'integrazione dei sistemi BIPV nell'involucro edilizio

3.1.1 Indirizzi per la metaprogettazione

Lo slancio della ricerca nel campo dei sistemi fotovoltaici rientra all'interno della più ampia strategia di progressiva uscita del settore delle costruzioni dall'utilizzo delle fonti energetiche fossili attraverso una domanda finalizzata a migliorare i livelli qualitativi degli interventi attraverso azioni di autoproduzione, autoconsumo e *smart grid*.

L'autoproduzione energetica vede una produzione locale con impianti FV che, unitamente ad altri impianti basati sulle FER, possono integrarsi nel sistema energetico nazionale con *smart grid*, sistemi di accumulo e interventi di efficienza energetica [16]. Con l'autoconsumo, l'energia elettrica prodotta non viene immessa nella rete di distribuzione, ma viene direttamente utilizzata nello stesso luogo in cui viene prodotta dall'utente finale. Nel progetto sarà necessario dimensionare l'impianto in maniera che i consumi delle utenze avvengano nel momento della giornata in cui l'impianto produce energia, programmando attraverso device tecnologici l'utilizzo di impianti di servizio. Mentre il contatore di produzione misura l'elettricità prodotta, un secondo contatore di scambio di tipo bidirezionale consente di monitorare la quantità di energia immessa in rete e quella prelevata. In tal modo per il calcolo dell'autoconsumo si dovrà sottrarre l'energia immessa in rete da quella totale prodotta.

Nel progetto BIPV vanno infine controllate le ricadute sull'integrazione in rete riferita *smart grid* che si presentano come una delle componenti sostanziali di una efficiente smart city. Se le strategie progettuali si indirizzano verso un'economia low carbon e un sistema di approvvigionamento energetico sostenibile, sicuro e a prezzi competitivi, il progetto deve incorporare tecnologie per la conversione fotovoltaica e per la trasmissione e l'utilizzo dell'energia elettrica così prodotta con minor spreco possibile attraverso tecnologie per le Smart Grid, ovvero reti di distribuzione intelligenti che migliorino la distribuzione e riducano gli sprechi nell'utilizzo [17].

Le *smart grid* integrano sistemi di misura distribuiti, microcontrollori e sistemi informatici che ottimizzano lo scambio di dati e di informazioni per il controllo e la supervisione della rete per incrementarne l'affidabilità, la sicurezza e la sostenibilità, in un sistema elettrico sempre più caratterizzato da numerose micro-produzioni tuttavia intermittenti e discontinue [17].

L'adozione nel progetto di sistemi FV che interagiscano con reti intelligenti consente diversi benefici: assicura l'integrazione della generazione distribuita e garantisce l'energia necessaria ai nuovi usi elettrici finali mentre, proprio con le *smart grid*, si contribuisce a ridurre i tempi di interruzione elettrica, permettendo di migliorare la continuità del servizio [18].

Indirizzi strategici per gli interventi

A valle delle numerose considerazioni di tipo strategico, emerge l'esigenza di un ripensamento delle forme e dei modi convenzionali del costruire mentre l'affermarsi di una nuova cultura normativa è prevalentemente orientata su linee di indirizzo che si affiancano a un quadro legislativo, anche di recente elaborazione, teso a semplificare procedure, processi e attività. All'interno di questo scenario è importante definire approcci, modalità e soluzioni nella verifica di una condizione metaprogettuale in cui prevalgono fattori standardizzati e ricorrenti, concepiti in maniera che siano di guida a quelle che saranno successivamente le scelte di specifiche soluzioni tecnico-progettuali attuate da pubbliche amministrazioni, promotori privati e progettisti. Nelle strategie per la metaprogettazione degli interventi, l'innovazione industrializzata nel campo dei sistemi fotovoltaici ha ormai condotto questo segmento della produzione secondo la caratterizzazione di una vera e propria componentistica edilizia, paritetica rispetto ad altri sistemi e componenti maggiormente consolidati nel sapere tecnico e progettuale.

In relazione al ruolo degli aspetti energetici nel progetto architettonico, i prodotti industrializzati FV per l'edilizia concorrono ai due obiettivi prioritari di:

- riduzione delle emissioni di agenti climalteranti;
- riduzione del fabbisogno energetico.

Nelle scelte strategiche progettuali, sia per la costruzione di nuovi edifici che per il rinnovo di quelli esistenti, l'integrazione dei sistemi fotovoltaici si presenta come l'utilizzo di sistemi per l'involucro che siano anche

sostitutivi di componenti edilizi tradizionali, superando in tal modo il principio della sovrapposizione o della giustapposizione fisica. L'integrazione di sistemi fotovoltaici deve quindi avvenire secondo una prospettiva architettonica che guarda all'edificio nella sua unitarietà, considerando il ruolo che tali sistemi svolgono nella complessiva organizzazione nel carattere architettonico dell'edificio e in relazione al contesto, associandolo a una o più funzioni tecnologiche dell'involucro con valenza multifunzionale.

L'impiego dei sistemi fotovoltaici va strettamente associato a una progettazione dell'involucro in un'ottica integrata di strategie passive e di utilizzo di sistemi attivi, con l'obiettivo generale dell'efficienza energetica, dell'utilizzo di fonti rinnovabili in sostituzione di fonti fossili, della riduzione dei consumi e dei fabbisogni energetici associati al metabolismo energetico dell'edificio. A questi aspetti di carattere specifico si accompagna l'utilizzo di materiali e componenti finalizzati alla riduzione dell'energia incorporata, al fine di ottenere un bilancio energetico di elevata efficienza e tendenzialmente *carbon neutral* dell'intero sistema edilizio.

L'architettura basata su sistemi fotovoltaici integrati può contribuire a una trasformazione delle modalità di produzione industrializzata per l'involucro edilizio e di sue applicazioni, poiché i sistemi BIPV hanno un costo parzialmente controbilanciato dal costo degli elementi edilizi che sostituiscono o delle nuove funzioni assolve oltre quella della produzione energetica. L'utilizzo di sistemi BIPV si armonizza con la realizzazione di spazi abitabili indoor e outdoor strettamente interagenti con le tematiche ambientali e con la riduzione dell'inquinamento, delle cause del global warming e con l'adattamento agli impatti climatici.

Con la riduzione del fabbisogno energetico contribuisce, attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica di dispositivi e sistemi e del comportamento "passivo" degli edifici, a contenere i picchi della domanda di energia.

La qualità tecnica - riferita alla capacità di soddisfare funzioni e standard edilizi - dovrebbe parallelamente garantire gli aspetti morfologici delle soluzioni architettoniche. Una delle sfide progettuali più significative dovrà essere attuata per gli edifici nZEB - edifici a energia quasi zero introdotti dalla direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19/05/2010. Le caratteristiche che un edificio deve avere per essere definito "edificio a energia quasi zero" sono state stabilite dal DM del 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici". Secondo quanto previsto dal decreto, sono "edifici a energia quasi zero" tutti gli edifici, sia di nuova costruzione che esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati tutti i requisiti prestazionali previsti dal decreto stesso e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili previsti dal decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Per gli edifici nZEB si prevede che il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura particolarmente significativa non solo nelle vicinanze ma soprattutto in loco, interessando quindi l'intero involucro edilizio per raggiungere gli obiettivi prefissati.

3.1.2 Indirizzi e concept di progetto per gli interventi ex-novo e di riqualificazione

Particolarmente nell'edilizia ex-novo, l'innovazione nel concept progettuale riguarda sia l'organizzazione planimetrica che quella tridimensionale, nonché le spazialità e l'interazione fra tutti gli elementi tecnici delle parti dell'organismo edilizio, chiamato a diventare un micro-generatore di elettricità ma anche un sistema di dispositivi tecnologici di minimizzazione dell'energia consumata per il proprio metabolismo. Nel concept dell'edificio l'orientamento costituisce un fattore determinante per la progettazione delle facciate, al fine di massimizzare, da un lato, l'efficienza dei sistemi fotovoltaici e, dall'altro, l'isolamento termico e la capacità di controllo dei carichi termici indesiderati. I sistemi fotovoltaici integrati negli edifici vanno quindi considerati insieme alle soluzioni progettuali di tipo passivo ed è necessario individuare fin dalle prime fasi di progettazione le opportunità e le sperimentazioni applicabili nel progetto del sistema FV, come parte integrante dell'edificio stesso [19].

Gli interventi di retrofit tecnologico possono invece prevedere alcuni gradi di trasformazione più o meno spinti con interventi per sottrazione o addizione oltre che per integrazione di superfici o volumi. Sono numerosi gli esempi, prevalentemente internazionali, che operano con questa modalità al fine di modificare la configurazione dei volumi con lo scopo di migliorare contestualmente le prestazioni tecnologiche accanto alla qualità architettonica dell'esistente laddove quest'ultima non abbia specifici vincoli di contesto o di autorialità. Laddove non vi siano condizionamenti dovuti alla presenza di vincoli, è possibile optare per

soluzioni innovative sul piano architettonico e di sperimentazione tecnologica, mirando a incrementare le superfici favorevolmente esposte al fine di superare le problematiche di un cattivo orientamento dei corpi di fabbrica. Altre soluzioni sono quelle delle addizioni superficiali, definite anche come recladding, che mirano alla realizzazione di una seconda pelle sulle chiusure perimetrali esistenti, conferendo un differente carattere architettonico e sviluppando molteplici funzioni, da quella di superfici microventilate a quella di isolamento termico, di protezione dalle precipitazioni meteoriche fino alla produzione di energia [20].

3.1.3 Massimizzazione della produzione energetica

Nella progettazione di sistemi BIPV, le esigenze legate alle prestazioni energetiche dell'impianto si affiancano a quelle relative alla funzionalità tecnologica e alla qualità delle soluzioni proposte sotto il profilo architettonico. Una corretta progettazione sarà sempre il risultato di un bilanciato compromesso tra esigenze di carattere tecnico-energetico ed esigenze legate alle specificità architettoniche dell'edificio e del suo contesto.

In riferimento agli aspetti energetici, diversi parametri condizionano l'ottimizzazione della produzione: il posizionamento, la superficie dell'area attiva, le caratteristiche elettriche e la tecnologia dei componenti impiegati. Vengono di seguito approfonditi gli aspetti energetici da tenere in considerazione per la progettazione di BIPV.

Posizionamento

Dalle prime fasi di progettazione, è importante considerare in quale parte dell'edificio potrebbero essere collocati i sistemi BIPV. Questo presuppone la conoscenza delle condizioni climatiche del sito, il modo in cui il percorso del sole attraversa il cielo durante le diverse stagioni dell'anno, nonché l'incidenza delle ombre [21]. In generale, i sistemi BIPV andrebbero posizionati sulle superfici su cui la radiazione solare risulta essere massima, così da ottenere una produzione energetica maggiore a fronte di un'area di installazione minore. Alcuni sistemi BIPV possono essere progettati per adattarsi ai modelli di utilizzo degli occupanti dell'edificio. I sistemi che sono divisi su superfici orientate a est e a ovest possono fornire energia al mattino e alla sera. Mentre la loro produzione è complessivamente leggermente inferiore rispetto a quella dei sistemi orientati a sud, l'energia viene generata quando i residenti sono a casa, piuttosto che dare un picco di potenza nel mezzo della giornata come accade con i moduli orientati a sud. In questo modo, i residenti stessi possono sfruttare appieno l'energia che generano, piuttosto che esportarne la maggior parte in rete [10]. Tuttavia, una progettazione che tenga conto dell'utenza stagionale di un certo edificio è da adottare solo nel caso di impianti *stand-alone* mentre, nel caso di soluzioni *grid connected*, l'obiettivo sarà sempre quello di produrre la massima energia possibile nell'arco dell'intero anno [22].

Ombreggiamento

In fase di progetto va valutata la presenza di ombre portate dipendenti da specifici elementi del contesto (vegetazione, orografia del terreno, ecc.), dal tipo di tessuto urbano (caratterizzato da determinati livelli di densità edilizia, ampiezza delle strade e altezza degli edifici), e dalle caratteristiche morfologiche dell'edificio stesso (*self-shading*).

Progettare con un potenziale fotovoltaico in mente può orientare il posizionamento nel sito, la morfologia dell'edificio e il tipo di copertura nelle prime fasi della progettazione. Gli array fotovoltaici orientati in modo ottimale avranno un periodo di ammortamento più breve a causa della loro maggiore produzione. Una corretta progettazione delle soluzioni BIPV dovrebbe ridurre al minimo e raggruppare le ostruzioni su facciate e coperture, massimizzando le superfici libere disponibili.

Mitigazione dell'effetto della temperatura

Per la maggior parte delle tecnologie fotovoltaiche, ad eccezione del silicio amorfo, più è alta la temperatura dell'aria minore è l'efficienza. I moduli FV funzionano molto bene quando il sole è alto ma le temperature ambientali sono relativamente basse (per esempio, sotto i 25°C). Dato che il bacino mediterraneo ha un alto numero di giorni con una temperatura dell'aria superiore ai 25° C, è probabile che ci siano frequenti diminuzioni della produzione di energia, specialmente durante il periodo estivo. Inoltre, quando operano su un tetto o una superficie piana, i moduli FV possono raggiungere una temperatura interna tra i 50-75°C, causando un'ulteriore perdita di rendimento. Di conseguenza, è importante considerare l'influenza climatica sui diversi tipi di impianti fotovoltaici e il modo in cui possono essere integrati. La ventilazione naturale può

essere utilizzata attraverso una corretta progettazione per raffrescare i moduli FV a una temperatura operativa ottimale. Ciò è particolarmente importante per le facciate fotovoltaiche. Il BIPV può essere progettato per convogliare l'aria calda verso l'alto e all'esterno dell'edificio, fornendo così un ambiente più fresco in cui i pannelli possono operare. I moduli in silicio amorfo possono essere preferiti nelle applicazioni ad alta temperatura, nonostante la loro minore efficienza complessiva, poiché le loro prestazioni non sono così sensibili alla temperatura [21].

Manutenzione e monitoraggio

Una corretta manutenzione e il monitoraggio dei sistemi BIPV risulta fondamentale per consentire un assorbimento ottimale delle radiazioni solari e per mantenere alte le performance di produzione e producibilità del sistema. È necessario effettuare interventi di pulizia stagionali per rimuovere polveri e impurità che si depositano sui moduli, rendendoli opachi e meno produttivi.

Si raccomanda inoltre di monitorare costantemente la produzione degli impianti BIPV al fine di prevenire il rischio di danni e malfunzionamenti. Il confronto tra i dati di produzione e la producibilità media per la zona d'installazione è il primo indicatore dello stato dell'impianto fotovoltaico. Tutti i moderni inverter offrono la possibilità di monitorare la produzione da remoto tramite app e computer, controllando in tempo reale quanta energia viene prodotta. In caso di impianti *stand-alone* tale operazione si rivela fondamentale per controllare quanta energia viene consumata e la quota immessa in rete o conservata nelle batterie per accumulo. Il rapporto tra produzione e consumo indicherà la quota di autoconsumo, ovvero di energia prodotta e consumata direttamente, il dato più importante per capire se l'utilizzo del fotovoltaico è corretto.

3.1.4 Rispetto dell'autorialità e dei caratteri del contesto

Se la nozione di appartenenza individua l'interesse per la continuità, per l'idea di luogo, per il costruire come fondamento del progetto, si conferisce una connotazione di particolare valenza alla ricerca progettuale che va oltre la semplice applicazione delle categorie tecniche del regolamento edilizio (densità, altezza, superficie edificabile, ecc.). Le nuove caratterizzazioni dei progetti possono proporre, a partire dal fatto di essere concepiti come micro-generatori energetici, innovativi assetti nella ricerca tipologica e funzionale/spaziale, nelle sperimentazioni linguistiche e nelle soluzioni tecnologiche.

L'attualità delle tematiche della riqualificazione, laddove esse siano caratterizzate da riconosciuti livelli di autorialità pur se non in presenza di vincoli specifici, richiede l'applicazione di principi di minimo intervento e di distinguibilità, mentre si presenta più delicata la questione relativa alla ricerca delle soluzioni e delle tecniche originarie, essendo evidenti le difficoltà di fare ricorso a tecniche degli scorsi decenni spesso non più rinvenibili e a volte non più adeguate. Per individuare gli opportuni criteri metodologici di intervento va attuato il confronto con le documentazioni originarie, con i dati di rilievo critico e del degrado, delle destinazioni d'uso e dei caratteri tipo/morfologici oltre che delle tecniche costruttive e dei materiali.

La necessità di riqualificare i "quartieri di qualità" - inseriti di recente nelle strategie di programmi di riqualificazione urbana - si evidenzia un ulteriore fattore di spinta alla riqualificazione costituito dalla necessità di adeguare o migliorare le prestazioni in relazione alla evoluzione del quadro normativo in materia di sicurezza, di benessere e di salvaguardia dell'ambiente. Gli indirizzi progettuali in tal caso devono prevedere un basso impatto in termini morfologici e tecnologici con le preesistenze, garantendo la differenziazione senza che essi prevalgano sugli elementi tecnici contigui. Può essere indicato l'uso di tecniche reversibili per favorire un impatto leggero, secondo la logica del miglioramento delle prestazioni o con la finalità di introdurre di nuove senza interferire con il carattere architettonico complessivo.

Negli interventi di retrofit tecnologico, un fattore importante riguarda l'adattabilità alle diverse problematiche del costruito esistente, considerando i principi di tutela per l'edilizia storica o per il valore autoriale - nonché nel caso di punti di particolare visibilità ambientale - in cui l'inserimento del fotovoltaico deve essere attuato in termini quasi "sotto tono", in modo da non interferire con il carattere architettonico degli edifici.

Altro discorso può essere fatto per comparti edilizi esistenti di modesta qualità architettonica: in questo caso l'integrazione di sistemi fotovoltaici può rappresentare l'opportunità di una migliore caratterizzazione e migliori prestazioni tecnologiche e ambientali. Se non si è in presenza di edifici di pregio storico-architettonico o caratterizzati da valori di autorialità, gli interventi di retrofit tecnologico, oltre a migliorare

le prestazioni dell'involucro, possono così contribuire alla riconfigurazione architettonica dell'edificio non solo in termini di componenti tecnologici e funzionali, ma anche architettonici, estetici e di design. La riconfigurazione può condurre a edifici di nuova generazione di tipo smart con involucri intelligenti e adattivi, autosufficienti energeticamente, interattivi e dinamici in relazione alle azioni esterne e ai parametri microclimatici interni.

3.1.5 Coerenza degli aspetti tecnico-materici

Le soluzioni tecniche del sistema industrializzato FV - partitura e sottostruttura di supporto, tipo di cella e prodotto fotovoltaico – nonché le modalità adottate per gli interventi vanno selezionate fra quelle che siano in grado di combinarsi con aspetti di texture, grana, colore al fine di integrarsi ma distinguersi, coesistere ma non sovrapporsi nel sistema involucro di edifici ex-novo o preesistenti. Va infatti mantenuta la specificità degli interventi lasciando riconoscibili gli interventi; in un edificio esistente va mantenuta distinguibile la condizione preesistente. In ogni caso il risultato finale del progetto non deve mirare ad occultare o a conciliare punti di frizione, né a essere mimetico o ad attuare completamente intesi come tentativo di “chiusura del cerchio”, lasciando volutamente trasparire il senso di dialogo instaurato con le parti di supporto (o preesistenti nel caso di interventi di riqualificazione).

Gli abbinamenti tecnico materici devono infine inquadrare la possibilità di combinazioni di tecniche caratterizzate da un differente mix di industrializzazione, in cui possono confrontarsi differenti tecnologie dal diverso valore semantico. Questo possibile divario non deve generare delle contrapposizioni ma essere gestito secondo coerenze materiche e procedurali di compatibilità tecnologica e linguistica, nella consapevolezza di generare in ogni caso un unico sistema.

3.1.6 Sistemi FV integrati: innovazione evidente, mimetica, nascosta

Un tema di fondo dell'attuale dibattito fra innovazione tecnologica nel campo del fotovoltaico integrato e caratteri architettonici degli edifici è quello del “peso” di tale innovazione che può risultare nascosta o esibita. Molto spesso nell'evoluzione storica del rapporto fra tecnologia e progetto si è in presenza di tale dicotomia. L'architettura della modernità ha fatto proprio il principio, per esempio, della “sincerità costruttiva” dei materiali da utilizzare e da manifestare secondo le loro peculiarità meccaniche, visive ed estetiche. In altri casi, rispetto al valore seriale e collettivo delle opere architettoniche, molti progettisti hanno optato per fattori tecnologici di forte caratterizzazione morfologica e visti come elementi di distinzione, di autorialità, di stile. Il volersi distinguere ha spesso utilizzato un branding della ricerca progettuale veicolato attraverso specifiche e visibili innovazioni tecnologiche. I sistemi fotovoltaici sono stati utilizzati in molte architetture secondo tale approccio.

Su un altro versante della ricerca progettuale si muovono posizioni critiche sull'eccesso di “firma” e su un formalismo architettonico che utilizza le tecniche come veicolo di potenzialità linguistiche. Queste posizioni guardano in generale alle tecniche non come un fattore visivo da esibire o come un elemento esteticamente evidente, ma secondo una concezione in cui le tecniche sono un elemento della coerenza complessiva del progetto. Tali obiettivi sono messi in campo non solo quando si opera su edifici in cui sono presenti valori storico-culturali, ma anche nei casi in cui si interviene in contesti ambientali sensibili, nei quali si richiedono interventi di particolare delicatezza. Le scelte progettuali prendono in considerazione, fra le opzioni tecnologiche disponibili, quelle più appropriate alle finalità individuate per contenerne l'impatto, pur nella efficacia degli interventi proposti, in relazione alle esigenze di salvaguardia dei caratteri ambientali, architettonici e costruttivi.

La sperimentazione industriale e progettuale relativa a sistemi e componenti fotovoltaici integrabili nell'involucro edilizio si muove sulle innovazioni di prodotto e di progetto, con la finalità di innescare uno sviluppo significativo in relazione a qualità architettonica, qualità prestazionale e integrazione.

Anche i sistemi FV, attraverso un concetto di *tecnologia diffusa*, che permea l'edificio rinunciando alla *concentrazione* resa evidente solo in alcuni suoi punti forti, si presentano sul mercato attraverso differenti caratterizzazioni, segno di una evoluzione matura del mercato in relazione a specifici obiettivi di efficienza, rendimento ma anche di qualità architettonica. L'inversione di tendenza è derivata da una modificazione della logica del progettare in accordo con l'innovazione disponibile. Le principali spinte in questa direzione

sono provenute dall'azione svolta dai progettisti e dal settore produttivo, che ha promosso "l'introduzione e la diffusione su larga scala di prodotti risultanti da innovazioni più o meno palesi".²

Sono individuabili tre modalità secondo cui, in relazione differenziata rispetto a edifici ex novo o preesistenti, è possibile individuare da un punto di vista linguistico espressivo l'integrazione di sistemi fotovoltaici:

- a) la prima condizione riguarda una innovazione evidente e quindi esibita nei termini di offrire un contributo qualificante al linguaggio di edifici progettati per massimizzare la produzione di energia elettrica fotovoltaica o di edifici riqualificati nei quali la componente fotovoltaica diventa un fattore di rilevanza linguistica architettonica di edifici originariamente di scarso pregio e inseriti in contesti degradati;
- b) la seconda condizione è relativa a una componente mimetica dell'utilizzo di sistemi fotovoltaici rispetto al carattere architettonico esistente o da preservare; un esempio in tal senso è riferito alle coperture in laterizio in cui il fattore mimetico della dimensione del trattamento delle caratteristiche degli elementi fotovoltaici conduce a una assimilazione cromatica e linguistica che sia quanto meno impattante possibile;
- c) la terza condizione fa invece riferimento a quel tipo di innovazione che è stata definita "nascosta" e riferita, frequentemente, al campo della riqualificazione degli edifici esistenti per fornire qualità originariamente non previste o da incrementate sensibilmente, sviluppando un'innovazione non sempre percepibile che però interessa gli edifici in maniera pervasiva; alle elevate prestazioni si associano spesso materiali e sistemi di apparente semplicità e con basso grado di prefigurazione formale; l'essere poco appariscente o nascosta in parti convenzionali dell'edificio, può costituire, un significativo valore aggiunto dell'innovazione, in linea con la tendenza alla leggerezza e alla progressiva dematerializzazione degli interventi e secondo una prospettiva in cui essa risulta maggiormente diffusa garantendo, quindi, un elevato grado di uniformità delle prestazioni in tutti i punti del manufatto architettonico.

Le tre tipologie possono dunque riguardare una casistica di molteplici condizioni di carattere progettuale-architettonico nell'integrazione nell'involucro edilizio:

- sistemi fotovoltaici ad alta visibilità, sostituendo il concetto di elementi di progettazione "installati" con quello di elementi "espressi";
- caratteristiche architettoniche capaci di incorporare la componentistica FV secondo modalità non particolarmente evidenti, aprendo la R&D sulle ricadute per lo sviluppo di nuovi prodotti e di nuovi mercati;
- sistemi fotovoltaici che possono rappresentare alternative a sistemi e componenti edilizi di uso corrente;
- innovazione nel disegno architettonico degli elementi tecnici finalizzati non solo alla produzione di energia elettrica ma anche all'incremento del risparmio energetico [23];
- sistemi fotovoltaici a basso impatto visivo e linguistico-espressivo, in cui i sistemi non esibiscono evidenti valenze morfologiche o estetiche.

Nell'integrazione, i sistemi FV devono rientrare in un approccio complessivo per edifici in cui essi non costituiscano soltanto dei componenti della costruzione o un'integrazione unicamente estetica, ma rispondano alla capacità di svolgere altre funzioni (per esempio la tenuta all'acqua, il controllo del fattore solare, la protezione dall'irraggiamento solare diretto tramite schermature solari che utilizzano la stessa radiazione per la generazione di energia elettrica, ecc.). Di pari passo, con il progredire dei sistemi fotovoltaici - in particolare nel rendimento, nelle variazioni formali, nei materiali di supporto - si è evoluta anche la stessa capacità di integrazione con soluzioni dove non è strettamente definita la distinzione tra elemento di involucro ed elemento fotovoltaico [24].

L'opzione fra una innovazione "esibita" e una innovazione "nascosta" interessa dunque, pariteticamente, gli interventi ex-novo e quelli di retrofit tecnologico su edifici esistenti. La scelta fra le due opzioni è riferita non solo alle caratteristiche degli edifici e dei contesti di intervento, ma soprattutto a una visione dell'architettura nell'adesione a specifici indirizzi progettuali e a scelte di campo. Nei termini oggettivi che considerano contesti o edifici di valore architettonico-ambientale, diventa inevitabile ricorrere a sistemi BIPV integrati in modo nascosto e in alcuni casi mimetico.

² Guido Nardi, «Innovazione, sue caratteristiche nell'architettura», in: Guido Nardi., *Percorsi di un pensiero progettuale*, Clup, Milano, 2003

Al contrario, le scelte guidate da una adesione a specifici approcci al progetto di architettura delineano due principali strade di interventi con sistemi BIPV. La prima è occasione di denuncia evidente del contributo al carattere architettonico con la volontà di rendere palese la “sovrascrittura” con la tecnologia fotovoltaica. La seconda prevede un’assimilazione dei sistemi in termini di minimo impatto ed evidenza, scegliendo tecnologie e prodotti industrializzati a bassa caratterizzazione morfologica, tettonica ed estetica, che assecondano impostazioni progettuali basate sulle “ragioni” del progetto piuttosto che sulla esibizione del linguaggio architettonico

La progettazione basata su tali principi potrà, nelle sue applicazioni tecnologiche, contribuire a una ridefinizione del concetto di vivibilità rappresentando «un tema linguistico-configurazionale ben preciso, come è sempre stato quello dei materiali innovativi acquisiti dall'architettura in ogni epoca» [23].

3.2 Indicatori di potenziale producibilità energetica

Caratteristiche del costruito quali, il contesto urbano, la morfologia dell’edificio e l’orientamento/inclinazione delle superfici, costituiscono fattori determinanti non solo per la scelta delle modalità di integrazione architettonica di soluzioni FV, ma anche per la definizione di una potenziale producibilità energetica. Per comprendere i possibili esiti energetici derivanti dall’impiego di componenti BIPV rispetto a differenti condizioni contestuali e tipo-morfologiche (cfr. paragrafo 2.2.1 e 2.3.1) si è simulato il potenziale rendimento energetico di soluzioni FV integrate in facciata e in copertura [25]. L’obiettivo è quello di definire quattro indicatori per la valutazione della potenziale energia prodotta:

- *tipo di tessuto urbano*
- *morfologia dell’edificio*
- *orientamento/azimut*
- *inclinazione/tilt*

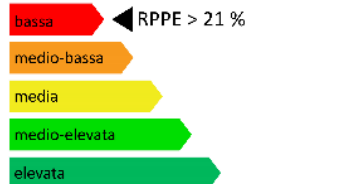
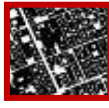
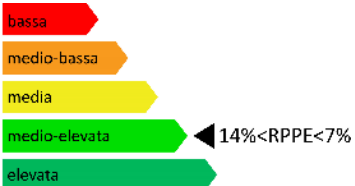
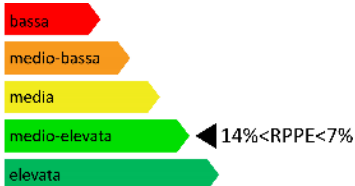
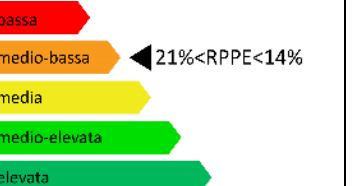
classificati rispetto a cinque classi, bassa/medio-bassa/media/medio-elevata/elevata. Le cinque classi sono correlate a range percentuali di Riduzione della Potenziale Produzione Energetica (RPPE) definiti di volta in volta per ogni indicatore. Una classe di producibilità elevata corrisponderà a percentuali di RPPE bassi e viceversa.

Il set di indicatori si configura come uno strumento attraverso cui valutare, in maniera speditiva, le potenzialità in termini di produzione energetica in fase metaprogettuale in relazione alle caratteristiche del costruito, valutando la ricaduta in termini Riduzione della Potenziale Produzione Energetica.

3.2.1 Tessuti Urbani

Rispetto ai sei differenti tipi di tessuti urbani identificati (cfr. paragrafo 2.2.1) sono state condotte simulazioni su un edificio dimostratore per analizzare l’impatto in termini di variazione della produzione energetica. Dalle simulazioni effettuate a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), dimensione dell’impianto simulato, orientamento/azimut (N-S/0°), inclinazione/tilt (facciata 90° e copertura 0°), morfologia edilizia (forma compatta e copertura piana) e tipo di edificio (tipo 01 - sviluppo in lunghezza), la valutazione rispetto ai range di producibilità risulta:

- bassa, quando si ha una Riduzione della Potenziale Produzione Energetica (RPPE) di almeno il 21%;
- medio-bassa, quando si ha una riduzione compresa tra il 14% e il 21%;
- medio-elevata, quando la riduzione è compresa tra il 14% e il 7%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 7%.

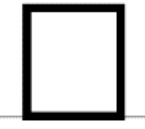
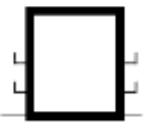
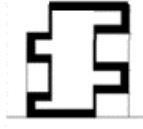
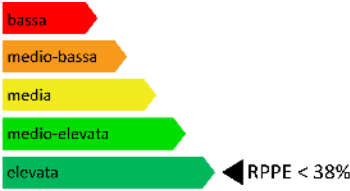
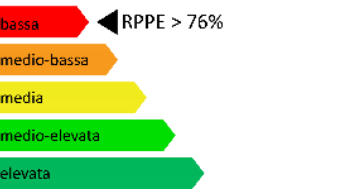
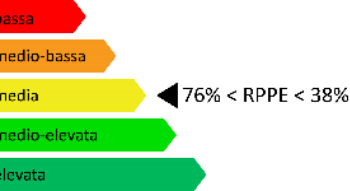
Indicatore 1 Tipo di tessuto urbano			
Tessuto	 01. Contesto rurale/periferico	 02. Contesto industriale	 03. Contesto direzionale
Valutazione produzione energetica			
Tessuto	 04. Contesto urbano moderno	 05. Contesto urbano ottocentesco	 06. Contesto urbano storico
Valutazione produzione energetica			

3.2.2 Morfologia dell'edificio

Rispetto ai tre tipi di morfologie individuate (cfr. paragrafo 2.3.1) – forma compatta, presenza di balconi o presenza di logge – è stata valutata la variazione della produzione energetica a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), orientamento/azimut (N-S/0°), inclinazione/tilt (facciata 90° e copertura 0°), tipo di tessuto (01-Contesto rurale/periferico) e tipo di edificio (tipo 01 e tipo 02).

Dalle simulazioni effettuate la valutazione della produzione energetica rispetto ai range di producibilità risulta:

- bassa, quando si ha una Riduzione della Potenziale Produzione Energetica (RPPE) di almeno il 76% (caso A2 – Presenza di balconi);
- media quando si ha una riduzione compresa tra il 38% e il 76% (caso A3 – Presenza di logge);
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 38% (caso A1 – Forma compatta).

Indicatore 2 Morfologia dell'edificio			
Morfologia dell'edificio	 A1. Forma compatta	 A2. Presenza di balconi	 A3. Presenza di logge
Valutazione produzione energetica			

3.2.3 Orientamento delle superfici

L'indicatore relativo all'orientamento delle superfici è stato desunto dalla letteratura di riferimento [25]. Le ricerche condotte sulla produzione energetica in relazione all'orientamento delle superfici mostrano come l'orientamento/azimut che consente di ottenere la massima produzione energetica, è il sud/0°, mentre verso ovest/+90° ed est/-90° la produzione si riduce fra il 25% e il 50% (a seconda dell'inclinazione/tilt), e per i fronti sud-est/-45° e sud-ovest/+45° la riduzione si attesta fra il 5% e il 35%.

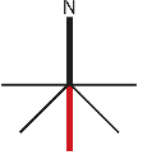
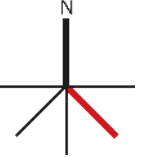
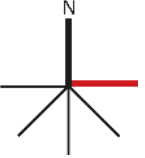
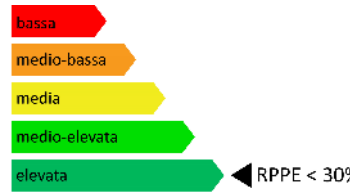
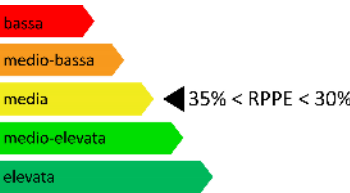
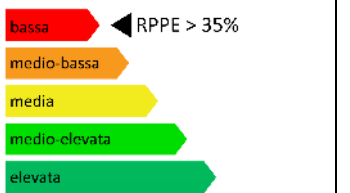
Nel caso di coperture orizzontali con inclinazione/tilt pari a 0° la produzione è invece superiore al 90%.

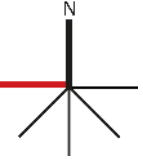
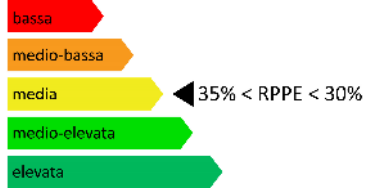
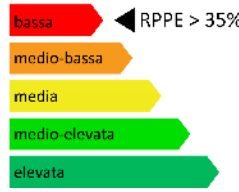
Per orientamenti/azimut rivolti a nord l'integrazione BIPV è solitamente sconsigliata se non per specifiche finalità di integrazione architettonica.

Rispetto all'orientamento/azimut, la valutazione rispetto ai range di producibilità risulta:

- bassa, quando si ha una Riduzione della Potenziale Produzione Energetica (RPPE) oltre il 35%;
- media, quando si ha una riduzione compresa tra il 30% e il 35%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 30%.

	Sud/0°	Sud-est/-45° e Sud-ovest/+45°	Est/-90° e Ovest/+90°
Riduzione percentuale della produzione energetica	0%-30%	5%-35%	25%-50%

Indicatore 3 Orientamento/azimut			
Orientamento/azimut	 Sud/0°	 Sud-est/-45°	 Est/-90°
Valutazione produzione energetica			

Orientamento/ azimut	 Sud-Ovest/+45°	 Ovest/+90°
Valutazione produzione energetica		

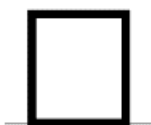
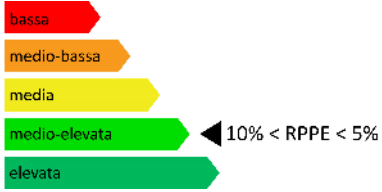
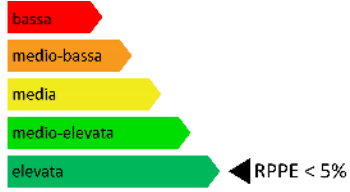
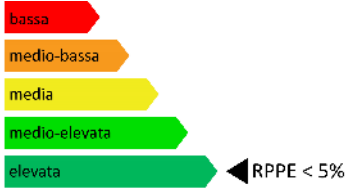
3.2.4 Inclinazione delle superfici

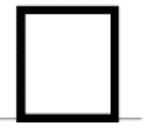
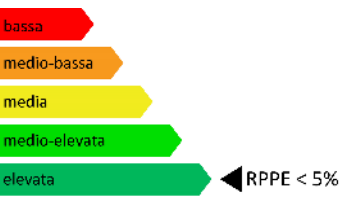
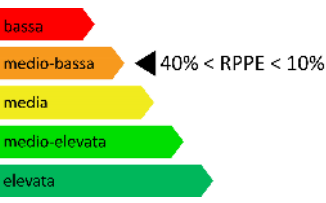
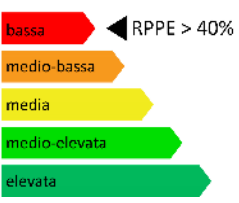
L'inclinazione/tilt ottimale per le superfici che integrano sistemi BIPV varia in relazione all'altitudine e al contesto di riferimento. Le simulazioni effettuate prendono in considerazione inclinazioni in copertura fra 0° - 60°, e superfici verticali a 90° e hanno l'obiettivo di valutare come varia la produzione energetica a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), dimensione dell'impianto simulato, tipo di tessuto (01-Contesto rurale/periferico), orientamento/azimut (N-S/0°) e tipo di edificio (tipo 03).

Dagli output vengono quindi definite le seguenti valutazioni rispetto ai range di producibilità:

- bassa, quando si ha una Riduzione della Potenziale Produzione Energetica (RPPE) di almeno il 40%;
- medio-bassa, quando si ha una riduzione compresa tra il 40% e il 10%;
- medio-elevata, quando la riduzione è tra il 10% e il 5%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 5%.

	Tilt 0°	Tilt 15°	Tilt 30°	Tilt 45°	Tilt 60°	Tilt 90°
Produzione energetica percentuale	94%	99%	100%	97%	89%	53%
Riduzione percentuale della produzione energetica	6%	1%	0%	3%	11%	47%

Indicatore 4 Inclinazione/tilt			
Tilt/ inclinazione	 A1. Tilt 0°	 B1.1. Tilt 15°	 B1.2. Tilt 30°
Valutazione produzione energetica			

Tilt/ inclinazione	 B1.3. Tilt 45°	 B1.4. Tilt 60°	 A1. Tilt 90°
Valutazione produzione energetica			

3.3 Modalità di integrazione di sistemi fotovoltaici nelle parti costitutive dell'involucro edilizio

3.3.1 Basamento

Il basamento, ai fini dell'integrazione morfologica con sistemi BIPV, rappresenta una parte di particolare interesse per una applicazione appropriata di sistemi fotovoltaici. Il basamento richiede di gestire più aspetti legati non solo alla morfologia dell'edificio ma anche alla sua accessibilità.

Rappresenta la parte dell'edificio a contatto con il suolo e nell'impostazione progettuale può essere distinto in parti piene, vuote o vetrate. Questa condizione può essere caratteristica per l'intera parte basamentale o solo per tratti del basamento con integrazione di parti piene opache, vuote o vetrate. L'aspetto da prendere in considerazione è fornito dalla continuità materica e geometrica dell'edificio e dalla percentuale di superfici vetrate (Figura 5).

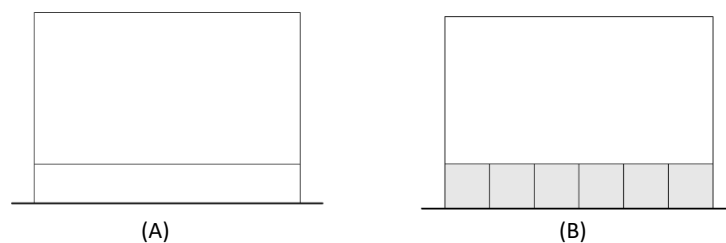


Figura 5. Basamento opaco (A) e basamento pieno (B).

La classificazione del basamento consente di individuare differenti alternative di integrazione fotovoltaica a seconda della sua conformazione basamentale: *facciata continua completamente vetrata o su superficie opaca, facciata ventilata su superficie opaca, facciata a doppia pelle trasparente, serramenti fotovoltaici* (tabella 8).

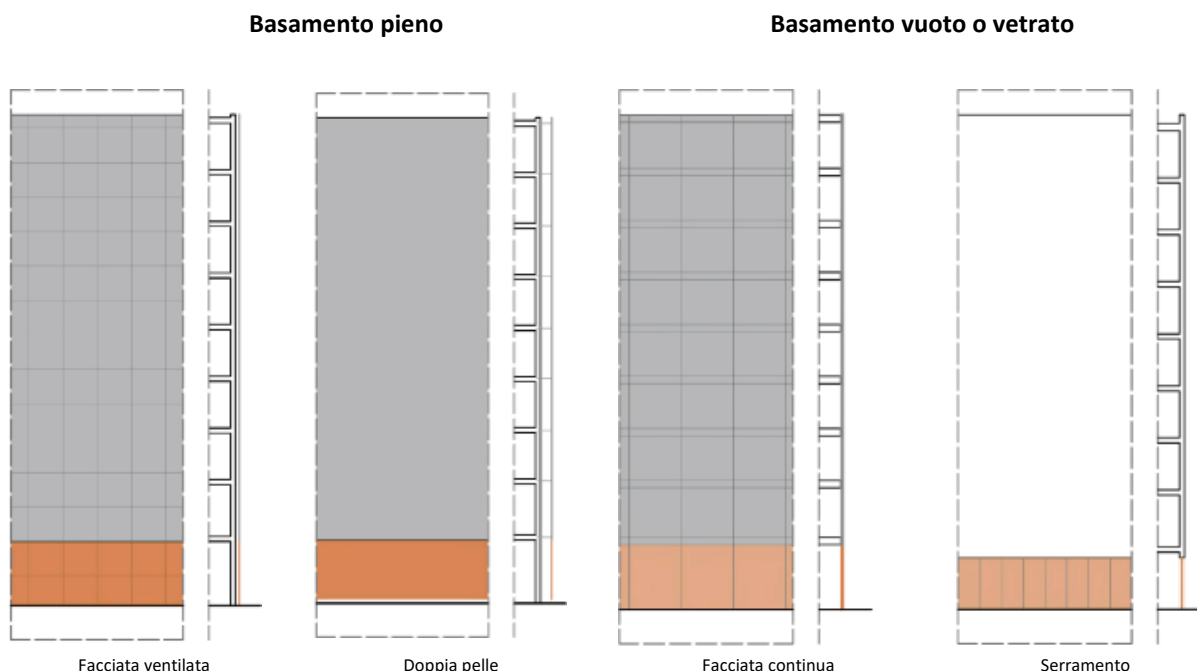
Tabella 8. Tipi di basamento e soluzioni tecniche alternative per l'integrazione del fotovoltaico.

TIPI DI BASAMENTO	SOLUZIONI TECNICHE BIPV			
	FACCIATA			
	Continua	Parete ventilata	Doppia pelle	Serramento
Opaco		•	•	
Vetrato	•			•

Il sistema classificatorio adottato mette in relazione le soluzioni tecniche tipizzate con i tipi di basamento precedentemente individuati per intervenire in maniera compiuta e morfologicamente appropriata, anche in relazione alla lettura interpretativa del carattere architettonico dell'edificio. La scelta dell'utilizzo di una soluzione piuttosto che un'altra richiede un'attenta analisi dell'edificio.

L'integrazione di sistemi BIPV può essere intesa sia in termini di discontinuità, sia come proseguimento della soluzione adottata nel corpo centrale. In ogni caso, il basamento può essere trattato come parte architettonica che esprime una caratterizzazione formale in riferimento al tema dell'ingresso dell'edificio o del suo rapporto con il suolo. La scelta del tipo di integrazione è determinata principalmente dalla lettura interpretativa del carattere architettonico delle facciate e, quindi, dal valore percettivo che si vuole attribuire all'edificio nel suo complesso.

A seconda della scelta del tipo di integrazione, del tipo di basamento e della modularità della facciata, le principali applicazioni possono essere schematizzate come di seguito riportato:



L'integrazione di sistemi BIPV nel basamento deve prendere in considerazione l'orientamento dell'edificio, il suo inserimento nel contesto, il tipo di attacco a terra, il rispetto di fattori di sicurezza per atti vandalici o per effrazione. In riferimento all'orientamento va presa in considerazione la superficie con la migliore esposizione solare e la sua posizione all'interno del contesto. È ben noto che questo fattore è particolarmente rilevante nella parte basamentale poiché risente della presenza di ombre portate e di ombre autoportate che inevitabilmente influenzano il rendimento dei sistemi FV.

Anche nel basamento, come nel corpo centrale della facciata, può essere necessaria una continuità di trattamento superficiale in presenza sia di parti piene opache che trasparenti utilizzando quindi, insieme ai sistemi fotovoltaici attivi, moduli non attivi tipo *dummies* o elementi serigrafati. Anche nel caso di ombre portate o autoportate (derivanti per esempio dall'arretramento della parete basamentale rispetto al filo della facciata) è possibile utilizzare elementi non attivi.

3.3.2 Corpo Centrale

Il corpo centrale è la componente della facciata che si presta maggiormente alla varietà di applicazione di sistemi fotovoltaici. Essendo la parte principale di un edificio, impone la gestione di molteplici aspetti relativi all'esposizione, alla percentuale di superficie vetrata, alla forma e alla disposizione delle aperture. Inoltre, sono da prendere in considerazione gli aspetti morfologici, i ritmi, le sequenze e le dimensioni degli elementi che costituiscono il corpo centrale: aperture, parti piene, elementi aggettanti e rientranti rispetto al piano del corpo centrale, elementi in rilievo ed elementi decorativi.

Per poter attuare le modalità di intervento, il corpo centrale è stato classificato in relazione alla presenza, alla disposizione e alla sequenza degli elementi trasparenti puntuali o continui, ed elementi di aggetto o rientranze rispetto al piano principale come balconi e logge (Figura 6):

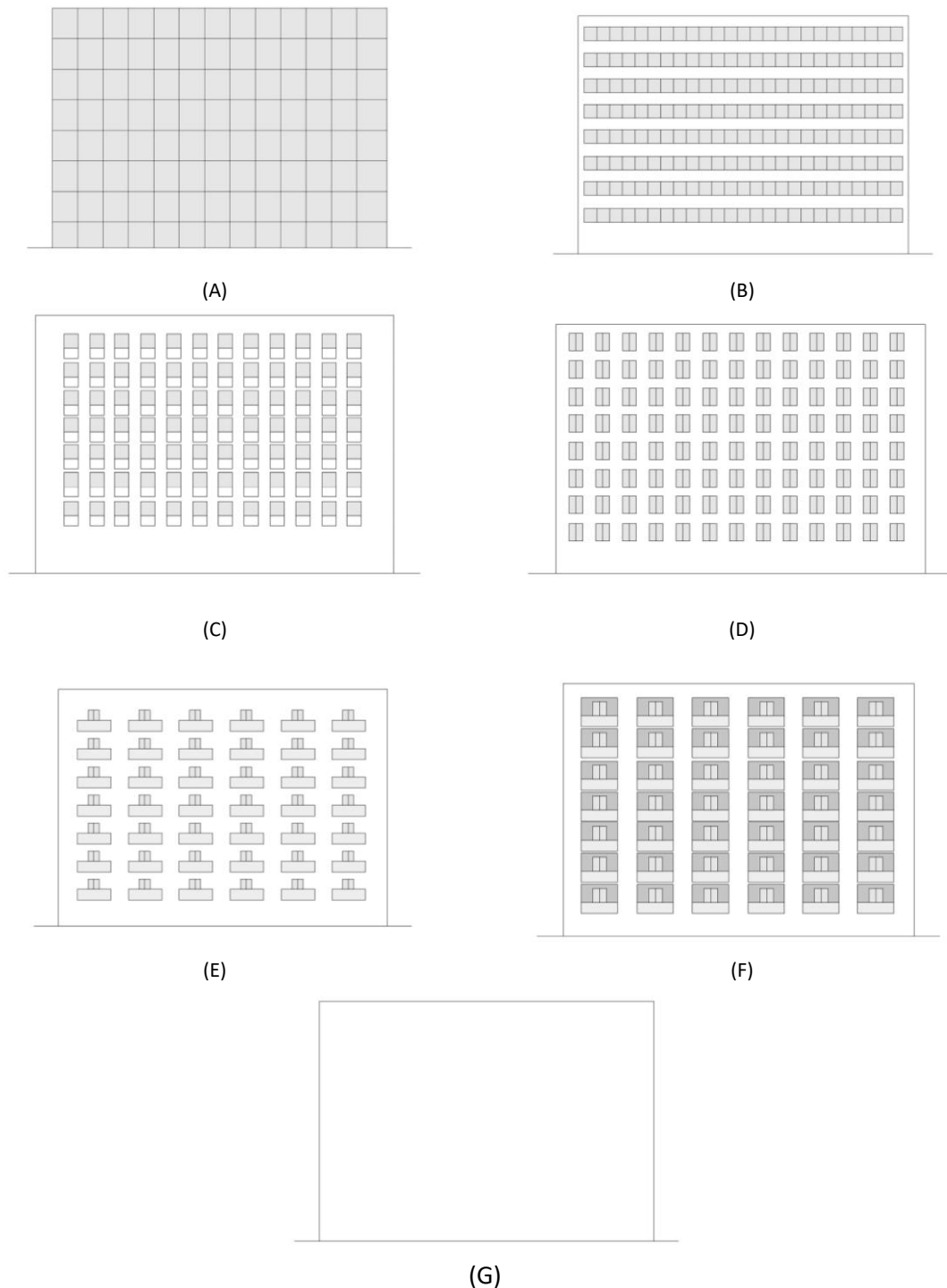


Figura 6. Facciata continua (A), facciata con finestre a nastro (B), facciata con balcone alla romana (C), facciata con finestre in sequenza (D), facciata con balcone aggettante (E), facciata con logge (F), facciata cieca (G).

La classificazione del corpo centrale consente di mettere in relazione soluzioni tecniche con tipi di facciata e la scelta di una soluzione è determinata soprattutto dalla quantità di superficie idonea ad ospitare i sistemi fotovoltaici, sia essa opaca o vetrata. Le differenti alternative di integrazione relative al corpo centrale sono:

facciata continua, facciata ventilata e doppia pelle, a cui si aggiungono dispositivi esterni integrati quali frangisole verticale, orizzontale e scorrevole e pensilina orizzontale, parapetto e serramenti (tabella 9).

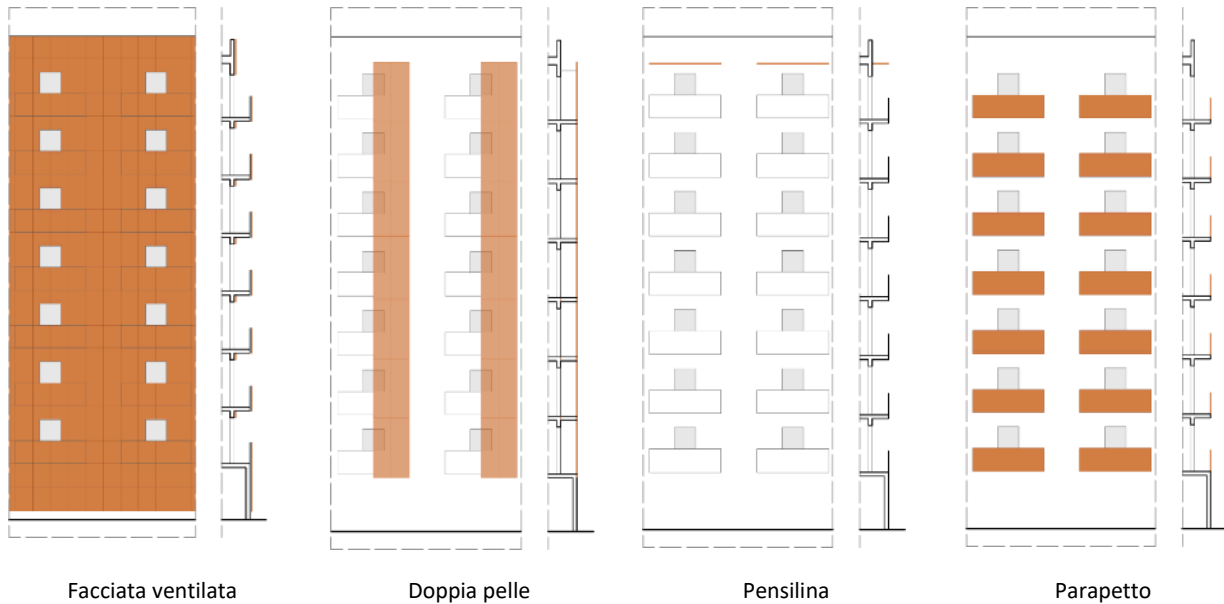
Tabella 9. Tipi di facciata e soluzioni tecniche alternative per l'integrazione del fotovoltaico.

TIPI DI FACCIATA	SOLUZIONI TECNICHE BIPV								
	FACCIATA				DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI				
	Continua	Ventilata	Doppia pelle	Serramento	Frangisole verticale	Frangisole orizzontale	Frangisole scorrevole	Pensilina	Parapetto
Facciata con balcone aggettante		•	•					•	•
Facciata con balcone alla romana		•			•			•	•
Facciata con logge		•	•		•			•	•
Facciata con finestre in sequenza	•	•		•	•	•	•	•	
Facciata con finestre a nastro		•	•	•	•			•	
Facciata continua	•		•		•	•			
Facciata cieca	•	•							

Come si evince dalla tabella, ad un tipo di facciata è possibile integrare più soluzioni tecniche che devono essere opportunamente scelte in funzione dei rapporti architettonici e tecnologici esistenti tra le diverse parti ed elementi. L'integrazione di sistemi BIPV in corrispondenza del corpo centrale deve rapportarsi alle specificità riportate nei tipi di facciata schematizzate in figura 6. Le alternative tecniche di integrazione fotovoltaica devono comunque essere ponderate in relazione al caso specifico, sia esso un edificio ex novo, sia che si tratti di un intervento di riqualificazione. In generale, la selezione di una soluzione tecnica è determinata, anche in questo caso come nel basamento, dall'esposizione della facciata e dall'orientamento dell'edificio, dal carattere architettonico delle facciate e dal valore percettivo che vi si vuole attribuire. Tuttavia, nel caso in cui il prospetto presenti particolari elementi decorativi, il progettista dovrà necessariamente tener conto di queste particolarità e adattare ad essi l'integrazione prevista. L'introduzione di sistemi BIPV, però, nel caso di interventi sul patrimonio esistente, diventa anche un'occasione per restituire l'originaria qualità architettonica in alcuni casi modificata nel tempo da alterazioni antropiche.

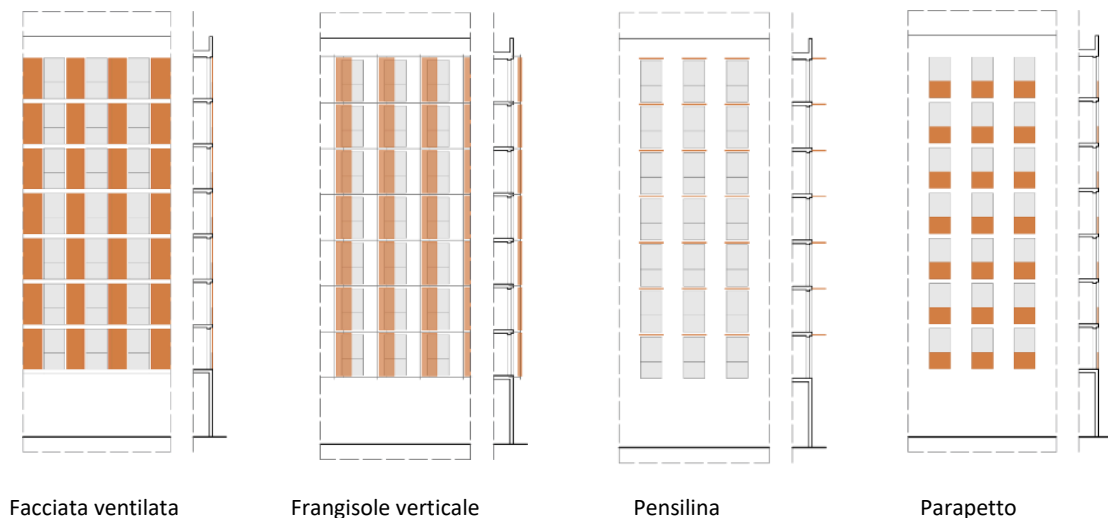
Di seguito sono schematizzate le differenti alternative di integrazione rispetto al tipo di facciata:

Facciata con balcone aggettante



Nel caso di corpo centrale con balconi aggettanti la scelta rispetto alla soluzione tecnica deve necessariamente prendere in considerazione gli elementi sporgenti rispetto al piano della facciata. La disposizione dei balconi e la profondità dell'aggetto sono elementi rilevanti per poter disporre in maniera più idonea i sistemi BIPV, garantendone non solo la funzione e l'efficienza, ma anche per mantenere il linguaggio e l'impostazione architettonica di tutto l'edificio. Nel caso specifico, sarà cura del progettista tener conto delle ombre autoportate determinate dagli aggetti che determinano il posizionamento del fotovoltaico e la scelta eventuale di moduli non attivi (*dummies*) al fine di enfatizzare o meno la continuità di trattamento superficiale di tutta la facciata. La presenza di elementi aggettanti come i balconi determina il posizionamento dell'impianto fotovoltaico sulle superfici più esterne dell'edificio per evitare l'interferenza di ombre proprie al fine di aumentarne la producibilità.

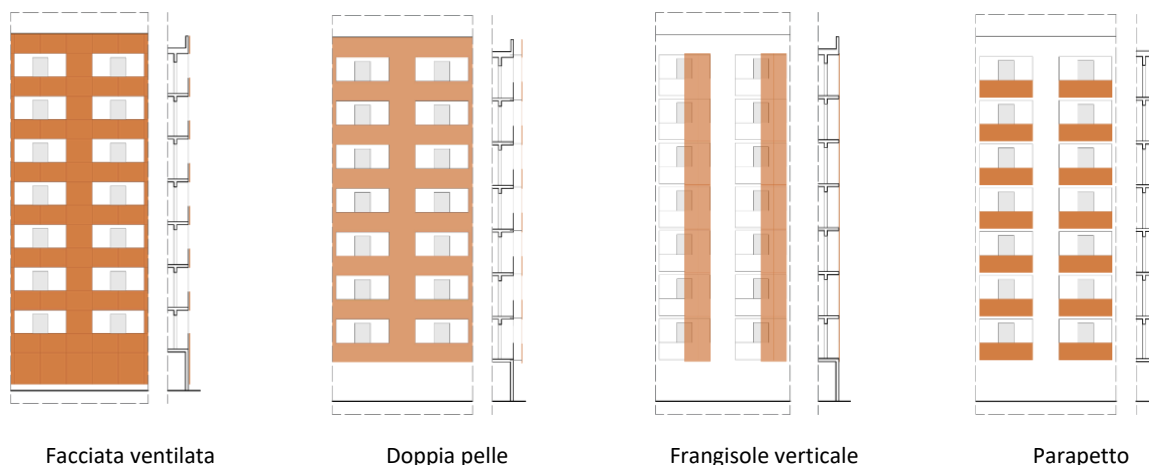
Facciata con balcone alla romana



Nel caso di facciata con balconi alla romana le caratteristiche da considerare ai fini dell'integrazione di sistemi BIPV possono essere considerate simili a quelle con balconi aggettanti. Anche in questo caso, infatti, è

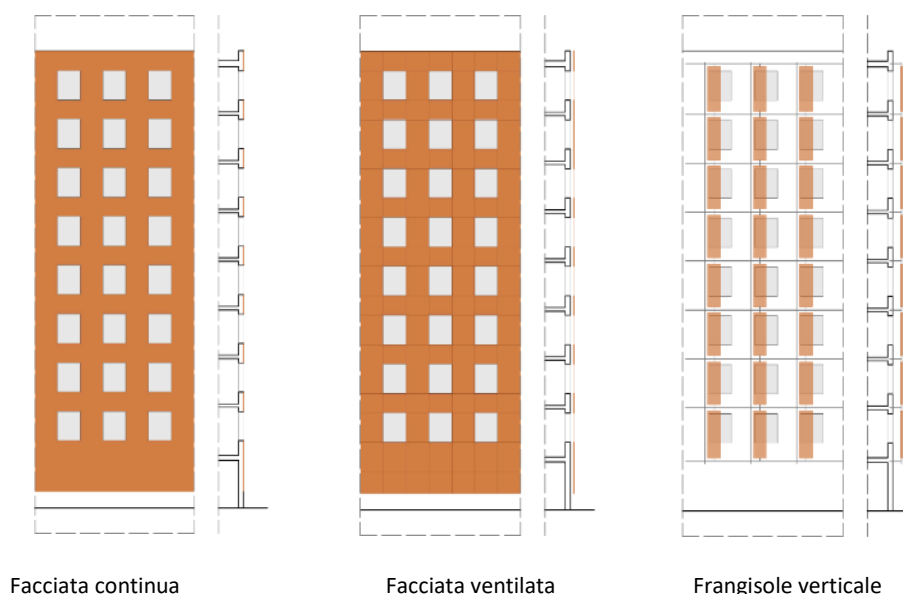
necessario considerare gli elementi sporgenti, seppur minimi, rispetto al resto dell'edificio per poter individuare la parte di facciata più idonea all'integrazione. Le aperture possono diventare punti specifici integrazione sia in termini applicativi che in termini dimensionali, consentendo al progettista di caratterizzare la facciata senza trascurarne gli elementi tipici. I sistemi BIPV nel caso di facciata con balconi alla romana andranno comunque posizionati nelle superfici più esterne dell'edificio per evitare le ombre autoportate.

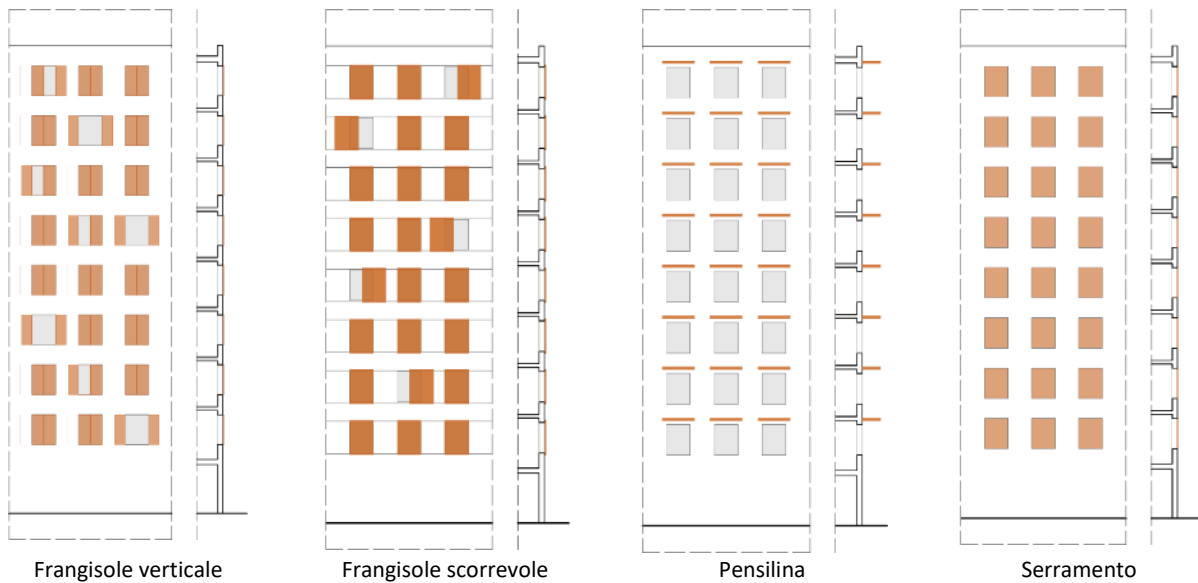
Facciata con logge



La facciata con le logge, non presentando sporgenze ed elementi aggettanti, restituisce una maggiore quantità di superficie destinata all'integrazione di sistemi BIPV. In questo caso gli elementi e le scelte tecniche devono essere opportunamente selezionati in funzione delle caratteristiche della facciata. Infatti, nel caso di facciata con le logge, diventa fondamentale individuare le parti rientranti rispetto al piano della facciata che non saranno oggetto dell'integrazione. Queste però andranno inevitabilmente a condizionare la scelta di una soluzione tecnica poiché consentono una maggiore o minore risposta ad un'integrazione omogenea e continua su tutta la facciata. La selezione di una specifica soluzione tecnica è determinata anche da esigenze di tipo estetico e funzionali del progettista ma anche dalle necessità dell'utenza in termini di condizioni di benessere visivo e luminoso.

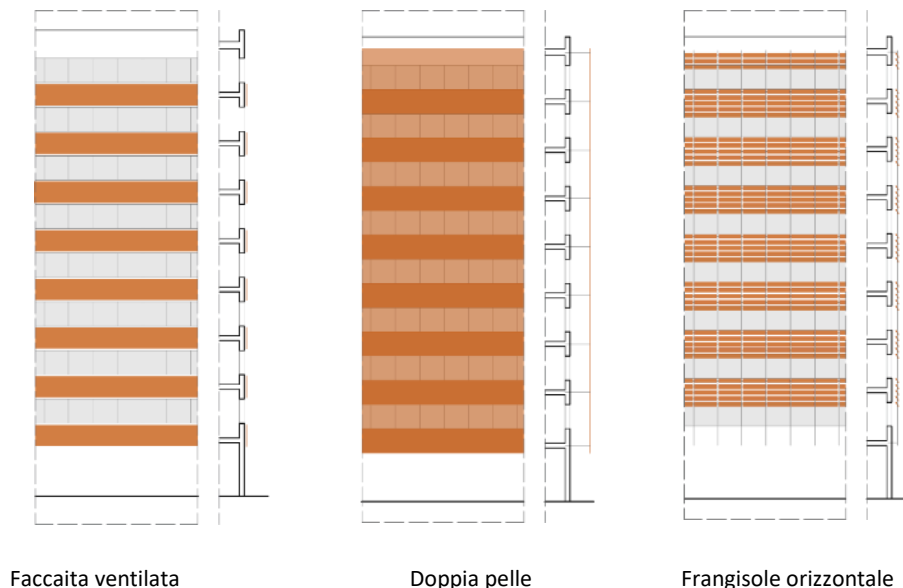
Facciata con finestre in sequenza

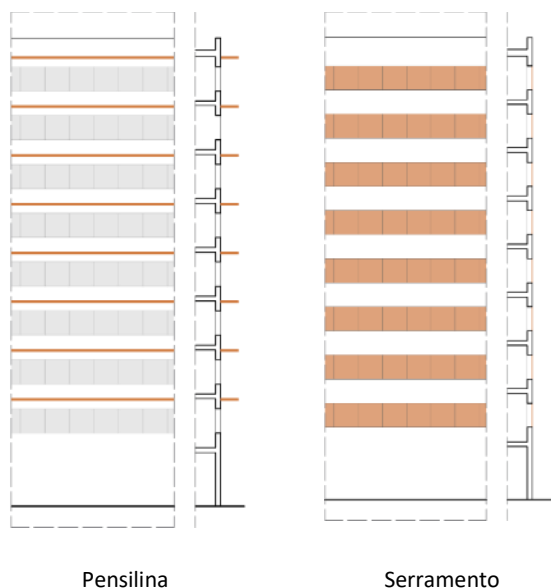




Anche nel caso di facciata con finestre in sequenza non ci sono sporgenze ed elementi aggettanti, quindi è disponibile una maggiore quantità di superficie destinata all'integrazione di sistemi BIPV. Ai fini dell'applicazione di sistemi fotovoltaici è necessario tener conto della superficie vetrata perché anch'essa si presta ad integrazioni specifiche. Il progettista, infatti, ha sia la possibilità di applicare serramenti fotovoltaici attraverso l'utilizzo di moduli trasparenti mantenendo l'alternanza tra superficie opaca e superficie vetrata, sia quella di inserire schermature o pensiline che possono determinare uno specifico carattere architettonico all'intera facciata, svolgendo anche la funzione di attenuazione della radiazione solare negli ambienti interni.

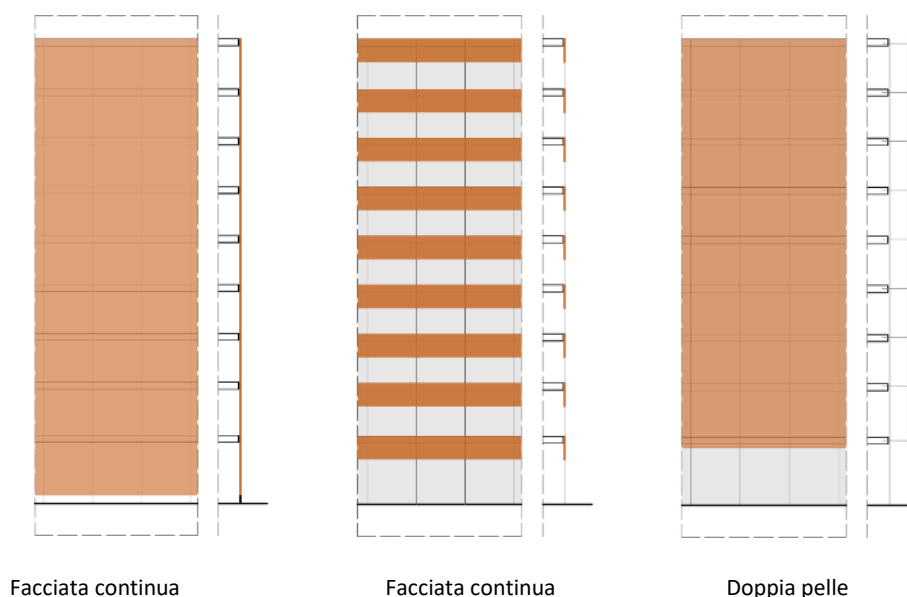
Facciata con finestre a nastro

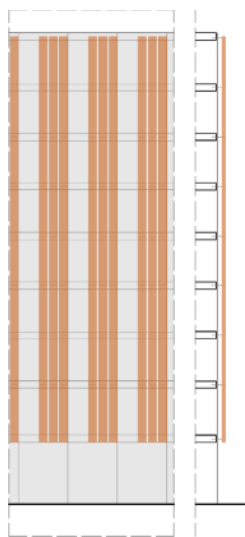




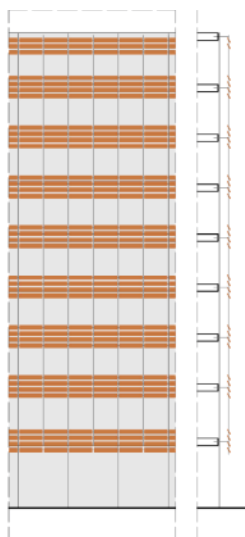
Per quanto riguarda il tipo di facciata con finestre a nastro la caratteristica tipologica è data non solo dalla percentuale di superficie vetrata ma anche dalla forte orizzontalità determinata dalle aperture. In questo caso, infatti, è necessario concepire l'integrazione dei sistemi BIPV in modo da rispettare o anche enfatizzare l'andamento del prospetto grazie all'utilizzo di moduli con dimensioni specifiche, con l'utilizzo di serramenti fotovoltaici le cui proporzioni siano coerenti con quelle esistenti. Sarà compito del progettista studiare la disposizione in strisce continue dei moduli fotovoltaici consentendo quindi di mantenere non solo il carattere architettonico ma anche geometrico della facciata, riducendone al minimo la frammentazione verticale.

Facciata continua

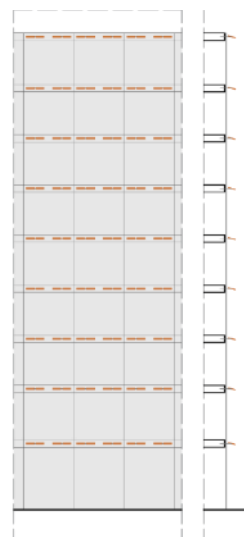




Frangisole verticale



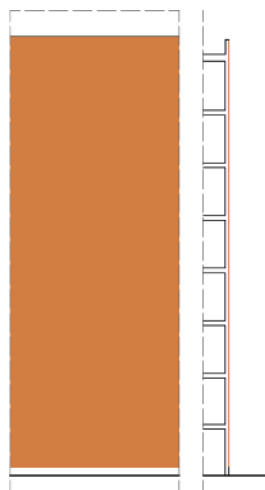
Frangisole orizzontale



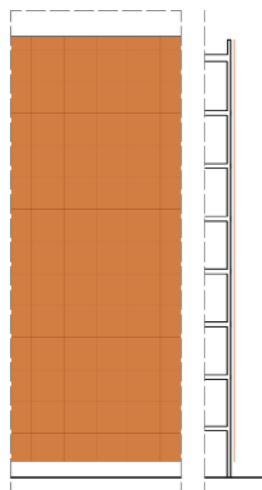
Frangisole orizzontale

Nel caso di facciata continua, le caratteristiche da considerare ai fini dell'integrazione di sistemi BIPV possono essere considerate simili a quella con finestre a nastro in termini di considerazione della superficie vetrata. Anche in questo caso, la disposizione e la scelta di soluzione tecnica devono garantire non solo la funzione e l'efficienza, ma anche mantenere il linguaggio e l'impostazione architettonica di tutto l'edificio. La superficie vetrata, ricoprendo la totalità della facciata, si presta ad applicazioni di fotovoltaico totali o parziali cui scelta può essere condizionata da esigenze funzionali e morfologiche. Sarà comunque oggetto di attenzione la disposizione dei diversi moduli tale da non determinare ombre portate reciproche che induce una riduzione in termini di efficienza.

Facciata cieca



Rivestimento continuo



Parete ventilata

Nel caso di facciata cieca, priva di qualsiasi tipo di aggetto e di elementi vetrati, è possibile sfruttare tutta la superficie per poter integrare sistemi di fotovoltaico in modo continuo su tutto il prospetto, previa analisi dell'esposizione. Solitamente questo tipo di facciata funge da testata dell'edificio e può presentare questioni complesse in termini di linguaggio architettonico. La facciata cieca può assumere diverse conformazioni nella scelta dimensionale e cromatica di moduli fotovoltaici e, soprattutto, si presta ad un duplice impiego di sistemi BIPV in termini di miglioramento dell'isolamento termico dell'edificio e parallelamente in termini di un'alta produzione energetica, soprattutto nella soluzione tecnica della facciata ventilata.

3.3.3 Coronamento

Il coronamento è, ai fini dell'integrazione morfologica dei sistemi BIPV, un elemento rilevante poiché, essendo parte della facciata, impone la necessità di tener conto dei molteplici aspetti complessi che si individuano nel corpo centrale. Per un'adeguata applicazione di sistemi BIPV sul coronamento, infatti, si deve tener conto anche dell'esposizione e dell'orientamento, della ritmicità, della coerenza geometrica e dimensionale che è presente nel corpo centrale, nonché della matericità e del tipo del coronamento stesso. Per le modalità di intervento, il coronamento è stato schematicamente classificato come *linea*, inteso come un segno lineare orizzontale (connotato, ad esempio, da un cornicione o da una cornice sottile), come *superficie*, in cui si può identificare una differenza tipologica e formale rispetto al corpo centrale, e come *volume*, inteso come un elemento autonomo (Figura 7):

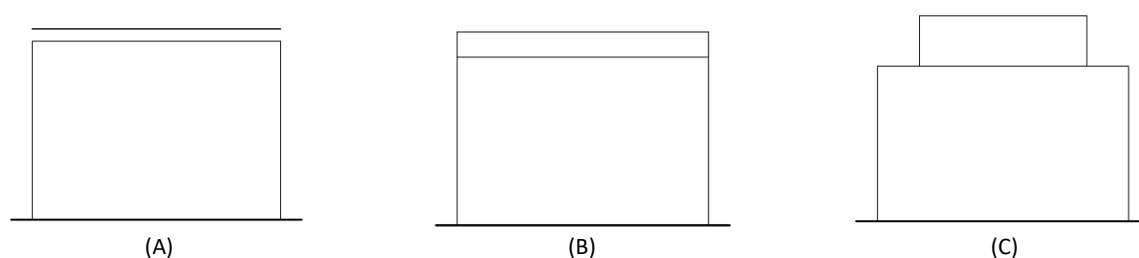


Figura 7. Coronamento come linea (A), coronamento come superficie (B), coronamento come volume (C).

Tale classificazione consente di individuare differenti soluzioni tecniche che possono essere applicate ai diversi tipi di coronamento in modo efficace anche in funzione dell'applicabilità. Le differenti alternative di integrazione tecnica relative al coronamento sono: *rivestimento continuo*, *parete ventilata e doppia pelle*, *pensilina* e *parapetto* (Tabella 10).

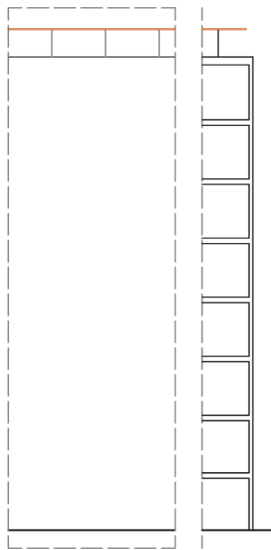
Tabella 10. Tipi di coronamento e soluzioni tecniche alternative per l'integrazione del fotovoltaico.

TIPI DI CORONAMENTO	SOLUZIONI TECNICHE BIPV				
	FACCIATA			DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI	
	Continua	Ventilata	Doppia pelle	Pensilina	Parapetto
Coronamento come linea				•	
Coronamento come superficie		•			•
Coronamento come volume	•	•	•		

Ad un tipo di coronamento, come nel corpo centrale, è possibile integrare più soluzioni tecniche che devono essere opportunamente scelte in funzione dei rapporti architettonici e tecnologici esistenti tra le diverse parti ed elementi. Anche in questo caso, come nel basamento, per intervenire in maniera compiuta e morfologicamente appropriata è necessaria un'attenta analisi dell'edificio per poter applicare la soluzione tecnica più adeguata non solo in termini tecnologici e prestazionali, ma anche rispetto alla qualità architettonica caratteristica dell'intero edificio.

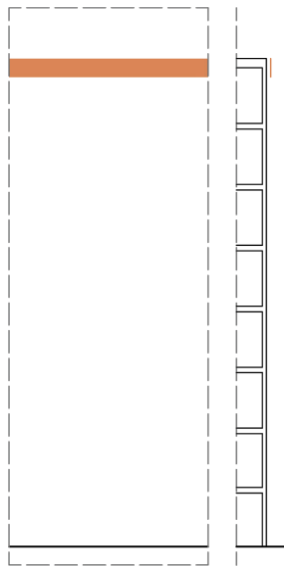
Di seguito sono schematizzate le differenti alternative di integrazione rispetto al tipo di coronamento:

Coronamento come linea

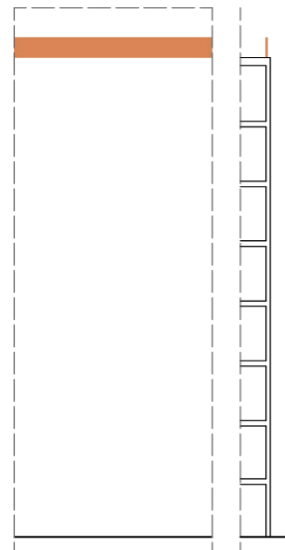


Pensilina

Coronamento come superficie

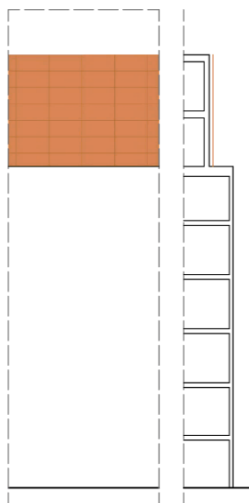


Parete ventilata

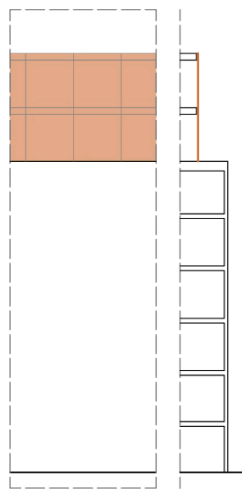


Parapetto

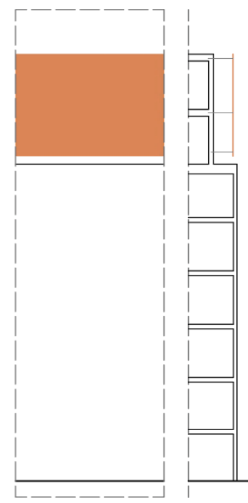
Coronamento come volume



Parete ventilata



Parete continua



Doppia pelle

L'integrazione di sistemi BIPV può essere intesa sia in termini di discontinuità, sia come proseguimento della soluzione adottata nel corpo centrale. Anche il coronamento può essere trattato come parte architettonica che esprime una caratterizzazione formale come parte terminale dell'edificio. La scelta del tipo di integrazione è determinata principalmente dalla lettura interpretativa del carattere architettonico delle facciate e, quindi, dal valore percettivo che si vuole attribuire all'edificio nel suo complesso.

Nel caso di coronamento come linea, l'unica soluzione tecnica è quella relativa alla pensilina. L'integrazione della soluzione tecnica viene intesa in termini di discontinuità rispetto al trattamento del corpo centrale poiché la soluzione opera un vero e proprio "distacco" dall'intero edificio, a differenza del coronamento come superficie in cui le due soluzioni tecniche possono essere scelte in funzione dell'applicazione sul corpo centrale. In questo caso si può prevedere lo stesso rivestimento del resto dell'edificio, determinando l'indistinguibilità dell'elemento su tutti e quattro i prospetti. Il coronamento come volume, invece, può essere separato dal filo della facciata e a seconda delle esigenze estetiche e funzionali; pertanto, l'integrazione BIPV

può essere letta come elemento di accentuazione formale la cui soluzione tecnica può prescindere da quella adottata nel corpo centrale. In generale, nella progettazione di sistemi BIPV nella parte del coronamento bisogna tener conto delle superfici con la migliore esposizione solare e con la possibilità di utilizzare, dove necessario, pannelli *dummies* per garantire la continuità di trattamento su tutti i prospetti, al fine di ottimizzare il rendimento dei moduli PV.

3.3.4 Copertura

La copertura è la parte dell'edificio in cui è possibile integrare in quantità maggiore i sistemi fotovoltaici grazie alla porzione di superficie continua disponibile che consente una migliore flessibilità di installazione. Infatti, l'applicazione di sistemi BIPV in copertura è quella più diffusa indipendentemente dalla destinazione d'uso dell'edificio e dalla sua composizione tipo-morfologica. Nella progettazione di sistemi BIPV in copertura, tuttavia, bisognerà fare particolare attenzione alla presenza di elementi tecnici, quali canne fumarie, antenne, lucernari e parapetti, che potrebbero comportare la formazione di ombre sulla superficie FV e quindi compromettere la potenziale produzione energetica del sistema impiantistico; tali elementi possono peraltro costituire un ostacolo per l'ottimale organizzazione dell'installazione fotovoltaica. Vanno infine considerate la distanza e l'altezza di costruzioni appartenenti al contesto in cui l'edificio si inserisce sempre in termini di ombre portate e di applicabilità.

Per poter attuare le modalità di intervento e gestirne le versatilità applicative, la copertura è stata classificata in base alla sua morfologia (Figura 8):

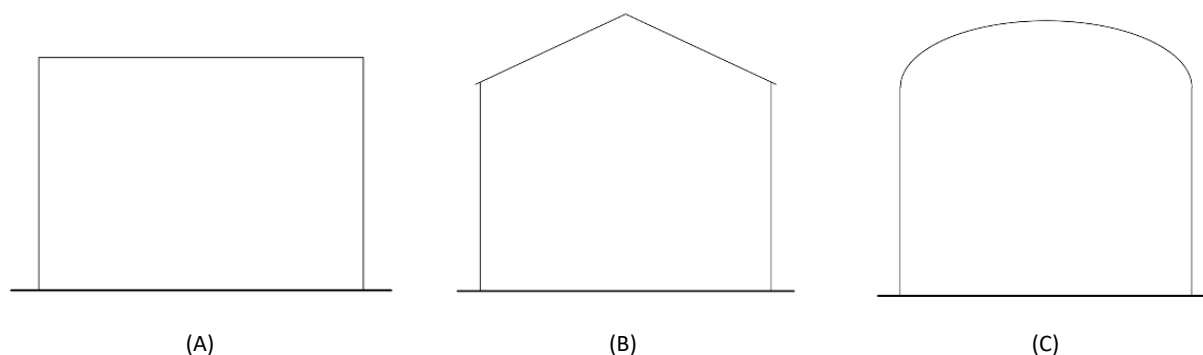


Figura 8. Copertura piana (A), copertura inclinata (B), copertura curva (C).

Questa classificazione permette di mettere in relazione le alternative di soluzioni tecniche con le differenti tipologie di copertura precedentemente individuate: *rivestimento discontinuo, continuo non praticabile, continuo praticabile e vetrato, tettoia, pergola, pensilina orizzontale e lucernario* (Tabella 11).

Tabella 11. Alternative di integrazione fotovoltaica rispetto alla tipo di copertura.

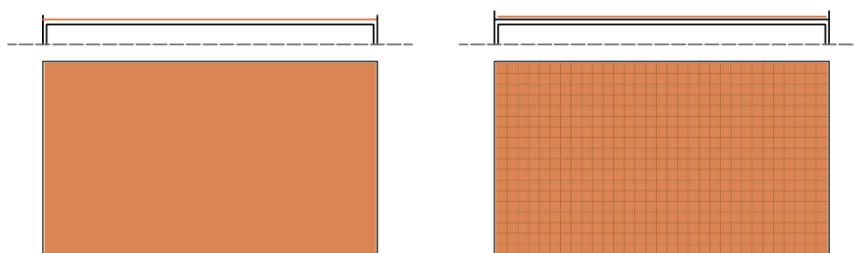
TIPI DI COPERTURA	SOLUZIONI TECNICHE BIPV							
	COPERTURA					DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI		
	Discontinua	Continua non praticabile	Continuo praticabile	Vetrata	Lucernario	Tettoia	Pergola	Pensilina
Piana		•	•	•	•	•	•	•
Inclinata	•	•		•	•			
Curva		•		•				

La possibilità di applicazione di una soluzione tecnica in copertura è determinata dall'integrabilità di questa in funzione non solo dell'orientamento e dell'inclinazione della falda, ma anche dall'eventuale innovazione del disegno architettonico degli elementi dell'involucro e della copertura. È necessario tener conto della possibilità della superficie interna del modulo FV di essere a contatto diretto con la superficie della copertura, della sua accessibilità, facilità di installazione, ma anche della fruibilità della copertura stessa. In generale, al fine di

ottenere una buona integrazione di sistemi BIPV in copertura, è necessario tener conto della complanarità e dell'aderenza dei moduli, rispettando inoltre le linee e i contorni della copertura determinati dalla presenza di colmi, canali e gronde.

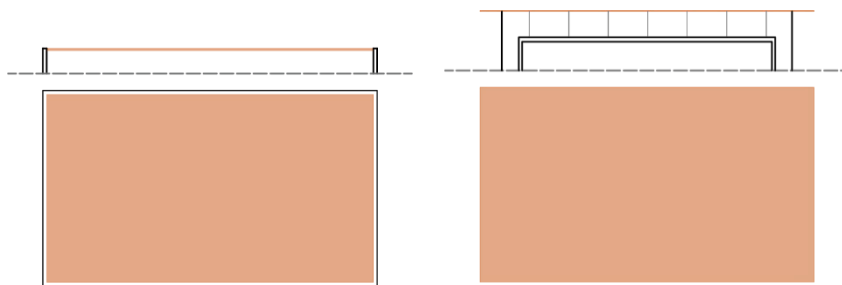
Di seguito sono schematizzate le differenti alternative di integrazione rispetto al tipo di copertura:

Copertura piana



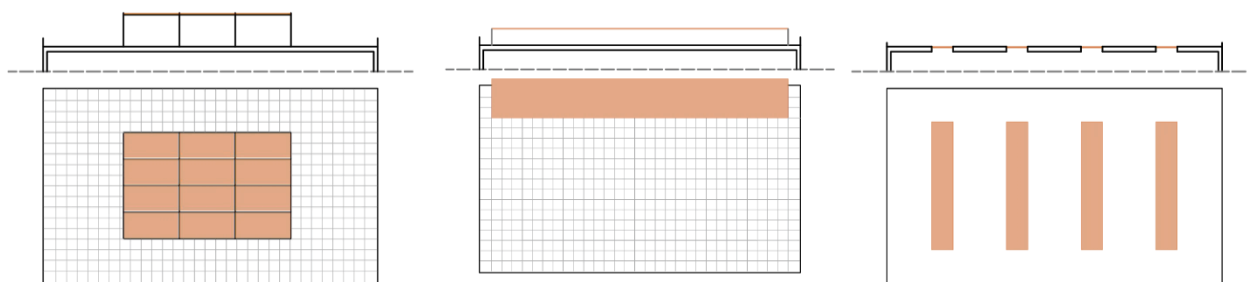
Rivestimento continuo non praticabile

Rivestimento continuo praticabile



Rivestimento vetrato

Tettoia



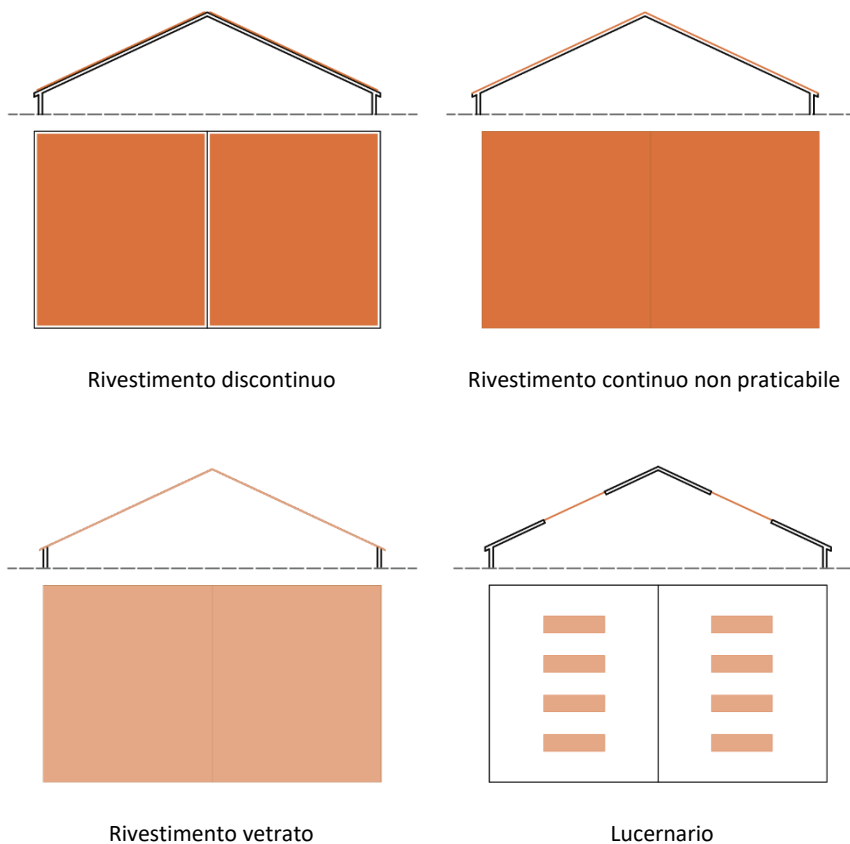
Pergola

Pensilina

Lucernario

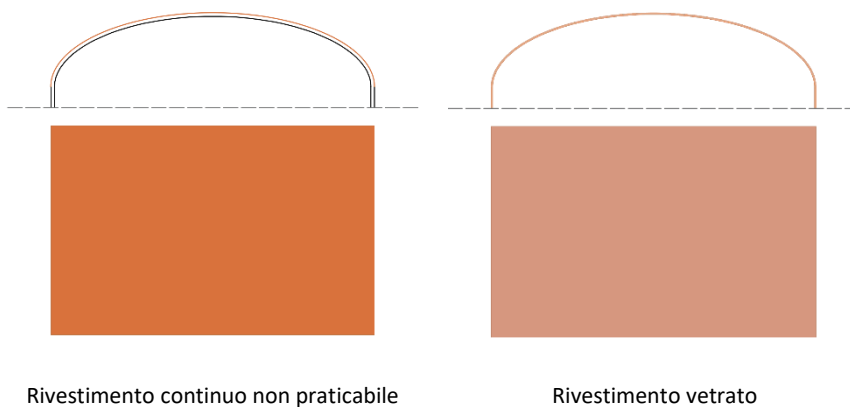
Il tipo di copertura piana si presta a più alternative di integrazione determinate soprattutto dalla possibile fruibilità che può consentire talvolta l'integrazione di più soluzioni tecniche. Infatti, l'applicazione di sistemi BIPV in copertura diventa l'occasione per creare nuovi spazi polifunzionali (con utilizzi privati o collettivi) diventando così un elemento architettonicamente integrato all'intero edificio. Nel caso specifico, l'applicazione di pensiline o pergole fotovoltaiche può essere associata all'utilizzo di una pavimentazione fotovoltaica, consentendo in tal senso l'integrazione di una superficie maggiore, considerando in ogni caso lo studio di eventuali ombre portate. È bene sottolineare che, nel caso della copertura piana orizzontale, il parametro dell'orientamento non determina una sensibile variazione sul potenziale energetico; pertanto, la superficie può essere totalmente impiegata per l'integrazione di sistemi FV, facendo comunque particolare attenzione ad elementi del contesto che possono limitare l'incidenza solare.

Copertura inclinata



Nel caso della copertura inclinata, la selezione di una specifica soluzione tecnica è determinata anche dal linguaggio architettonico e percettivo caratteristici del corpo centrale. In questo caso, infatti, è necessario tener conto della forma e delle proporzioni della falda che condizioneranno la disposizione dei moduli FV, degli elementi tecnici e delle linee di raccordo, nonché della posizione, dell'orientamento e dell'inclinazione del tetto. La copertura inclinata, di fatto, presenta un maggiore potenziale di produzione energetica rispetto ad una superficie orizzontale, tuttavia, la massima produzione è determinata dal suo orientamento. Qualora la disposizione delle falde non presentasse la migliore esposizione, è possibile comunque utilizzare moduli *dummies* per garantire un trattamento superficiale e un linguaggio uniforme con il resto dell'edificio, anche nella possibile continuità tra facciata e copertura.

Copertura curva



Nel caso della copertura curva gli aspetti da considerare sono analoghi rispetto a quelli della copertura inclinata. Anche in questo caso, infatti, il progettista deve tener conto dell'orientamento, della presenza di ombre portate o autoportate, della forma e delle proporzioni della copertura preesistente. Nel caso specifico, la scelta del tipo di integrazione dipende dalle caratteristiche morfologiche dell'intero edificio e la scelta delle soluzioni tecniche deve essere sottoposta ad un processo di customizzazione dei moduli degli elementi FV che devono essere progettati e realizzati caso per caso, in funzione della curvatura della copertura e della compatibilità funzionale e di interfaccia delle tecnologie e dei sistemi edilizi FV utilizzati, al fine di massimizzare la produzione energetica. Per ottenere una migliore integrazione morfologica negli edifici esistenti, la dimensione, la forma e la posizione dei moduli devono essere coerenti sia con la configurazione architettonica d'insieme dell'edificio, sia con le caratteristiche geometriche e dimensionali della parte di edificio in cui si inseriscono.

3.4 Criteri, indicatori e requisiti per gli interventi sull'involucro edilizio

La norma UNI 8290-2:1983 definisce l'integrazione come "attitudine alla connessione funzionale e dimensionale" [26]. Tale definizione risulta parziale, in quanto non considera l'integrabilità architettonica anche nella sua accezione morfologica. L'integrazione architettonica deve essere valutata dal punto di vista funzionale, costruttivo e morfologico, nelle sue caratteristiche geometriche, qualità materiche e cromatiche [27]. Le soluzioni fotovoltaiche devono essere *coerenti* con il concept architettonico e favorire l'armonia relazionale del sistema BIPV con il carattere architettonico dell'edificio, con le caratteristiche tecnologiche e tipo-morfologiche [28]. Per adattarsi a diversi edifici e contesti d'intervento, i sistemi fotovoltaici devono fornire la massima *flessibilità* in relazione ad una serie di parametri di integrazione architettonica; ad una maggiore flessibilità e possibilità di personalizzazione (*customization*) offerta da un prodotto o soluzione, può corrispondere un maggiore livello di coerenza progettuale e integrabilità con l'organismo architettonico [29]. Per individuare l'attitudine all'integrazione architettonica nel progetto di soluzioni fotovoltaiche sono definiti *Criteri* e *Indicatori* di integrabilità architettonica. I *Criteri* di integrabilità architettonica sono finalizzati alla valutazione della coerenza del sistema BIPV impiegato con il manufatto architettonico alla scala di progetto. Gli *Indicatori* rappresentano uno strumento di indirizzo utile ad effettuare una valutazione sulla preferibilità di un prodotto a confronto con altri simili, al fine di operare scelte coerenti con gli obiettivi di intervento, nel rispetto dei criteri di integrabilità individuati. L'utilizzo di *Criteri* e *Indicatori* consente di indagare le relazioni tra alcuni fattori ritenuti significativi per l'integrabilità del fotovoltaico nel progetto e le caratteristiche produttive e tecnologiche peculiari di ciascuna tecnologia o sistema definendo quindi le possibilità di applicazione in architettura in relazione alle potenzialità o ai limiti tecnici di ciascuna di esse. La verifica di soddisfacimento di Criteri e Indicatori viene correlata alla presenza o meno di determinate caratteristiche nel prodotto o soluzione BIPV. Di seguito sono indicati i *Criteri* e gli *Indicatori* di integrabilità architettonica.

Tabella 13. Criteri e indicatori di integrabilità architettonica.

Integrabilità architettonica del fotovoltaico in architettura		
Criteri	Indicatori	
1. Coerenza geometrica	1.1	<i>Personalizzazione geometrica</i>
	1.2	<i>Disponibilità di dummies</i>
2. Coerenza morfologica	2.1a	<i>Personalizzazione del pattern</i>
	2.1b	<i>Non percepibilità del sistema fotovoltaico</i>
	2.2	<i>Personalizzazione della finitura</i>
	2.3	<i>Possibilità di installazione senza cornice</i>
3. Coerenza cromatica	3.1	<i>Personalizzazione cromatica</i>
4. Coerenza di installazione	4.1	<i>Flessibilità di installazione</i>

3.4.1 Coerenza geometrica

Il Criterio di coerenza geometrica è verificato se le dimensioni, la forma e la posizione dei moduli sono coerenti con il carattere architettonico dell'edificio, nonché con le caratteristiche geometrico-dimensionali degli elementi tecnici appartenenti al subsistema tecnologico in cui sono integrati.

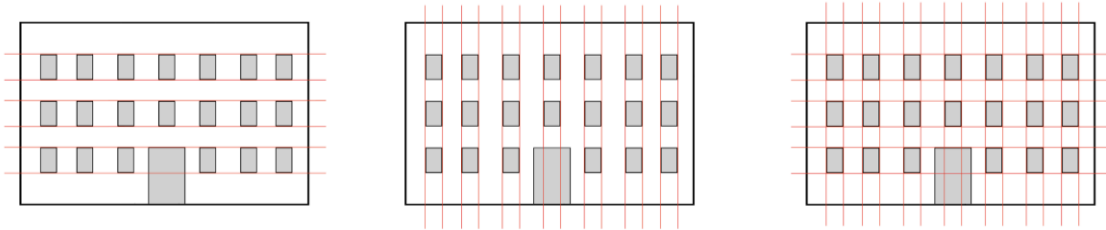


Figura 9. Schema della modularità della facciata secondo cui disporre i moduli.

Gli Indicatori che possono essere utilizzati per la valutazione della rispondenza di prodotti e sistemi BIPV al criterio sono la *Personalizzazione geometrica* e la *Disponibilità di dummies*.

Indicatore 1.1	Personalizzazione geometrica
<i>Verifica di soddisfazione (si/no)</i>	Possibilità di ottenere moduli su misura, capaci di adattarsi perfettamente alle superfici su cui vengono installati, mediante un'offerta variegata dal punto di vista delle forme, geometrie e dimensioni.
<i>Raccomandazioni</i>	I prodotti <i>standard</i> presentano in genere una gamma di produzione costituita da formati prestabiliti o limitatamente personalizzabili. I moduli <i>custom</i> offrono la possibilità di ottenere moduli <i>su misura</i> nella forma, dimensioni, spessori, adattandosi a molteplici esigenze progettuali. Per i prodotti con tecnologie fotovoltaiche in silicio cristallino, il modulo ha dimensioni caratterizzate dal rispetto della regola del multiplo della cella, che a sua volta può essere caratterizzata da forma e dimensioni personalizzabili. I moduli con tecnologia in film sottile, svincolati da dimensioni prestabilite, presentano una maggiore flessibilità geometrico-dimensionale, potendo essere potenzialmente prodotti in qualsiasi formato (purché compatibile con le linee produttive).
Indicatore 1.2	Disponibilità di dummies
<i>Verifica di soddisfazione (si/no)</i>	Possibilità di ottenere elementi passivi (<i>dummies</i>) su misura, con caratteristiche geometriche, formali e cromatiche (struttura, modello, materiale di finitura, colore) identiche a quelle del modulo attivo, al fine di garantire continuità percettiva.
<i>Raccomandazioni</i>	I <i>dummies</i> , elementi fittizi che presentano le stesse caratteristiche tecnologiche (prestazionali) e morfologiche (colore, struttura, modello, materiale di finitura) del modulo attivo, sono utili per risolvere problematiche di tipo geometrico o da prevedere in alcune parti dell'involucro non adatte alla produzione di energia (ad esempio parti dell'involucro ombreggiate o non esposte adeguatamente al sole) [09].



Figura 10. Moduli standard caratterizzati da diverse geometrie e dimensioni e moduli custom con geometrie e dimensioni personalizzabili.

3.4.2 Coerenza morfologica

Il Criterio di coerenza morfologica è verificato se la finitura visibile, la texture superficiale e l'eventuale pattern generato dalle celle solari del modulo sono coerenti e armonici con i materiali di finitura e le texture del sub-sistema tecnologico in cui sono integrati.

Le caratteristiche morfologiche del sistema dipendono fortemente dalla specifica tecnologia solare impiegata [28]. La produzione si attesta su due ipotesi progettuali: mantenere la visibilità/riconoscibilità delle celle fotovoltaiche e utilizzarle come elemento di design, lavorando sul pattern (a) o rendere la cella FV "invisibile", mimetizzandola mediante l'adozione di accorgimenti progettuali e tecnologie in grado di nascondere (b) [89]. In tal senso si individuano i seguenti indicatori.

Indicatore 2.1	Personalizzazione del pattern (celle fotovoltaiche a vista)
<i>Verifica di soddisfazione (si/no)</i>	Possibilità di controllo, progettazione e personalizzazione dei pattern generati dalla composizione delle celle solari come parte integrante e punto di forza del concept dell'involucro edilizio, di modo da favorire la coerenza e l'armonia con il sub-sistema in cui sono integrati.
<i>Raccomandazioni</i>	L'immagine convenzionale del fotovoltaico con celle a vista di colore blu prevede elementi identici (moduli/celle) organizzati in pattern ortogonali. Sono presenti sul mercato geometrie alternative ottenute sostituendo la tipica griglia ortogonale con pattern a strisce orizzontali/verticali, o random/pixelati, sviluppati attraverso processi generativi basati sulla casualità [30]. A ciascun pattern può essere associata una certa densità (o semi-trasparenza), corrispondente alla quantità di celle solari rilevabili per porzione unitaria di superficie (n° celle/m²), e dunque alla potenza nominale del sistema (Wp/m²). Al crescere della semi-trasparenza, aumenta la flessibilità dell'articolazione geometrica, con migliori possibilità in termini estetico-formali; al tempo stesso, sarà osservata una perdita proporzionale di potenza del sistema [31]. Le celle a vista nei moduli semi-trasparenti vetro-vetro costituiscono elementi preposti al controllo del fattore solare e del flusso luminoso, nonché al controllo della privacy, mediante la variazione della loro densità e distribuzione.
Indicatore 2.2a	Non percepibilità del sistema FV (tecnologie fotovoltaiche invisibili)
<i>Verifica di soddisfazione (si/no)</i>	Possibilità di nascondere la tecnologia fotovoltaica mediante l'impiego di accorgimenti tecnico-progettuali tendenti ad occultare le celle in silicio cristallino (film colorati/selettivi, serigrafie, vetri colorati, ecc.) o di tecnologie fotovoltaiche a film sottile.
<i>Raccomandazioni</i>	La non percepibilità del sistema fotovoltaico può dipendere da due fattori: - dalla tecnologia fotovoltaica utilizzata (es. film sottile); - dall'occultamento delle celle solari mediante la personalizzazione della finitura superficiale (indicatore 2.2) o cromatica (indicatore 3.1). I moduli in film sottile sono caratterizzati dalla non riconoscibilità della tecnologia fotovoltaica e da gradi di semitrasparenza personalizzabili; utilizzati per involucri vetrati, presentano il vantaggio di illuminare gli spazi interni, personalizzando il grado di schermatura e protezione dalle radiazioni UV e infrarosse, ma senza presentare alcuna differenza percettiva rispetto ad un vetro comune. La semitrasparenza è ottenuta grazie alla parziale rimozione dello strato attivo [32]. Ad una maggiore trasparenza corrisponde una minore potenza specifica (Wp/m²). Nel caso dei moduli con celle fotovoltaiche organiche (organic photovoltaic - OPV) o di Grätzel (dye-sensitized solar cell - DSSC), la semitrasparenza e la variabilità cromatica

dipendono invece dallo spettro di assorbimento dei materiali specifici utilizzati come strato attivo [93]. A ciascuna tecnologia fotovoltaica corrispondono potenze nominali specifiche (Wp/m^2) variabili, ma in tutti i casi la perdita di efficienza sarà proporzionale rispetto al grado di trasparenza.

Indicatore 2.2b	Personalizzazione della finitura
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di ottenere texture, finiture superficiali e gradi di opacità personalizzabili.
<i>Raccomandazioni</i>	Al fine di ottenere una migliore integrazione morfologica negli edifici esistenti e di avere maggiore scelta compositiva nel caso di nuove costruzioni, è possibile ricorrere alla personalizzazione delle finiture superficiali dei moduli fotovoltaici. Si riportano di seguito le tecniche più diffuse, classificate in base alla posizione dello strato interessato dal trattamento di finitura [32]. Prodotti con interlayer personalizzati. Pellicole graficamente personalizzate possono essere laminate direttamente all'interno del modulo (fungendo anche da incapsulante o da backsheet). È possibile utilizzare le tradizionali tecniche di stampa dell'industria grafica o inchiostri semitrasparenti, che consentono il passaggio della luce. Prodotti con finitura satinata e stampa su vetro. La superficie esterna del vetro subisce un trattamento di satinatura, apparendo matta o satinata; talvolta questa tecnica è abbinata alla serigrafia sul lato interno di immagini, disegni e texture che simulano l'aspetto dei materiali da costruzione tradizionali [33]. Stampa digitale su vetro. Processo che consente di stampare inchiostri speciali sulle superfici in vetro per ottenere un'immagine o una texture personalizzata (anche in HD). Prodotti con vetro frontale strutturato, rigato o testurizzato. Occorre sempre fare attenzione alle possibili implicazioni in termini energetici di tali trattamenti superficiali: l'alterazione del vetro frontale porta a cambiamenti nel comportamento ottico della lastra di vetro, che potrebbe riflettere o assorbire una porzione dello spettro solare, riducendo la produzione energetica [33].
Indicatore 2.3	Possibilità di installazione senza cornice
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di escludere la cornice dalla progettazione e installazione del sistema BIPV (es. moduli vetro-vetro o rotoli flessibili).
<i>Raccomandazioni</i>	La cornice, generalmente in alluminio anodizzato naturale o verniciato, ha la funzione di migliorare la resistenza meccanica, la protezione e il fissaggio del modulo; la maggior parte dei moduli BIPV vetro-vetro sono montati senza cornice e provvisti di sigillatura polimerica in corrispondenza dei bordi, per impedire l'ingresso di umidità dall'esterno; alcuni moduli sono protetti con un telaio in alluminio collegato tramite un adesivo siliconico [09].

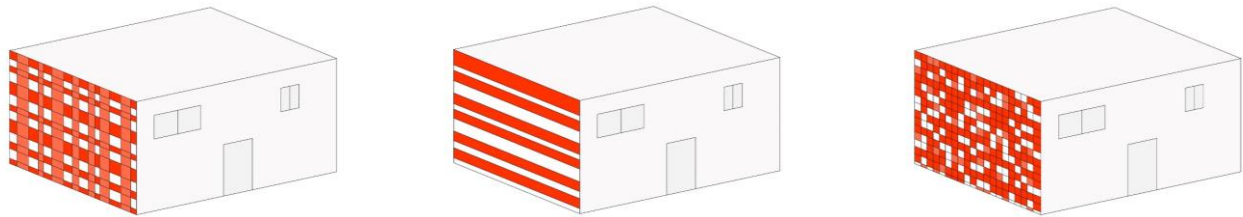
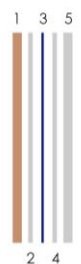
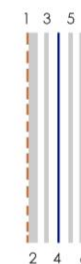
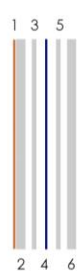
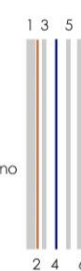


Figura 11. Confronto tra diverse possibilità progettuali dei pattern FV basate sulle geometrie: griglia ortogonale, strisce orizzontali, parallele, random.

3.4.3 Coerenza cromatica

Il Criterio di coerenza cromatica è verificato se i colori dei componenti dei moduli sono coerenti e armonici con i colori del sub-sistema tecnologico in cui sono integrati.

Indicatore 3.1	Personalizzazione cromatica
<i>Verifica di soddisfazione (si/no)</i>	Possibilità di optare tra diversi colori disponibili o di richiedere colorazioni personalizzate; tale indicatore è applicabile a ciascuno dei componenti del modulo fotovoltaico (celle, front cover, back cover, incapsulanti, interlayer, ecc.).
<i>Raccomandazioni</i>	Al fine di ottenere una migliore integrazione cromatica negli edifici esistenti e di avere maggiore scelta compositiva nel caso di nuove costruzioni, è possibile ricorrere alla colorazione dei moduli fotovoltaici. Data la riduzione della luce incidente sulle celle fotovoltaiche dovuta ad una eventuale colorazione, la sfida consiste nell'ottimizzare le prestazioni tecnologiche, morfologiche ed energetiche, senza eccessive perdite di efficienza. Si riportano di seguito le tecniche più diffuse per ottenere prodotti BIPV colorati, classificate in base allo strato del modulo su cui è applicata la colorazione [32]: • Prodotti con rivestimenti antiriflesso colorati sulle celle solari (cella solare, c-Si); • Prodotti con strati attivi colorati (cella solare, film sottile); • Prodotti con interlayer colorati e pellicole solari selettive (interlayer); • Prodotti con film polimerici colorati (incapsulante, backsheet); • Prodotti con vetro frontale stampato o colorato (front glass).
1- vetro anteriore colorato 2 - EVA* 3 - Celle fotovoltaiche 4 - EVA* 5 - Vetro/ foglio posteriore 	1- Stampa digitale di vetro 2 - Vetro 3 - EVA* 4 - Celle fotovoltaiche 5 - EVA* 6 - Vetro/ foglio posteriore  1- Vetro 2 - Filtro colorato - strato esterno 3 - EVA* 4 - Celle fotovoltaiche 5 - EVA* 6 - Vetro/ foglio posteriore  1- Vetro 2 - Filtro colorato - strato interno 3 - EVA* 4 - Celle fotovoltaiche 5 - EVA* 6 - Vetro/ foglio posteriore 

* Acetato di etilene e vinile

Figura 12. Possibili stratificazioni di moduli BIPV colorati, in cui si evidenziano le possibilità tecnologiche relative all'integrazione del colore, evidenziato in rosso.

3.4.4 Coerenza di installazione

Il Criterio di coerenza di installazione è verificato se i sistemi di giunzione e di fissaggio sono attentamente considerati in fase di progettazione e installazione del sistema, e sono coerenti con le sottostrutture, i supporti e con le caratteristiche dimensionali, costruttive e morfologiche del sub-sistema di cui fanno parte.

Indicatore 4.1	Flessibilità di installazione
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di impiegare i moduli in diverse posizioni (inclinati, orizzontali, verticali) e/o parti dell'edificio (facciata, copertura, elemento schermante, etc.), adottando sistemi di fissaggio compatibili con il tipo di applicazione; possibilità di impiegare modalità di posa in opera, montaggio e installazione che prevedano lavorazioni semplificate nel numero e nel grado di complessità; possibilità di impiegare moduli che si adattino a qualsiasi tipo di superficie.
<i>Raccomandazioni</i>	In generale, le modalità di installazione di sistemi e componenti BIPV non presentano particolari difficoltà costruttive rispetto alle soluzioni tecniche previste per la posa di materiali e componenti per l'edilizia di analogo impiego, garantendo in fase d'opera il rispetto dei requisiti di stabilità meccanica, flessibilità, sicurezza, affidabilità, impermeabilità, ecc. Bisogna prestare particolare attenzione all'integrazione tecnologica del cablaggio e dei componenti elettronici (come le scatole di giunzione), e alle eventuali implicazioni relative all'insorgere di criticità costruttive, di tipo estetico o legate alla sicurezza antincendio. Per tutte le categorie di installazione esistono diverse soluzioni per la gestione dei componenti elettrici, adattabili caso per caso [34]. Le possibili interferenze di telai, ganci, zavorrature e fissaggi dei sistemi BIPV con i diversi subsistemi edilizi o la potenziale scarsa efficacia di questi sistemi in particolari contesti (es. aree molto nevose o ventose con carichi elevati) sono solo alcuni esempi rispetto ai quali appare cruciale l'importanza di una corretta informazione a supporto del processo progettuale [35]. Il sistema di fissaggio dei moduli, sia di tipo standard che realizzati ad hoc, gioca un ruolo primario e consiste solitamente in un kit di montaggio/ancoraggio; il produttore fornisce una descrizione del sistema e un manuale di installazione, in cui si riportano informazioni circa l'intero kit di componenti (profili, cornici, ganci, morsetti, ecc.), dettagli costruttivi, la descrizione delle fasi di installazione e le procedure di montaggio. In generale, i moduli flessibili (con tecnologia in cristallino o film sottile) presentano una maggiore flessibilità di installazione e adattabilità a qualsiasi tipo di supporto e superficie.

3.4.5 Requisiti per gli interventi

Il componente o sistema BIPV che sostituisce un elemento tecnico o un raggruppamento di elementi tecnici dell'involucro edilizio deve garantire il soddisfacimento di requisiti tecnologici ad esso correlati [85; 96]. L'integrazione non implica necessariamente che il componente o sistema sostituisca tutti gli strati funzionali, pertanto, la sua complessità (tradotta nel set di requisiti connotanti) è proporzionale alla complessità tecnologica dello strato sostituito [36]. Di seguito la lista dei requisiti connotanti i componenti e sistemi BIPV, rapportati alle corrispondenti esigenze o classi di esigenze e le relative prestazioni attese.

Tabella 14. Esigenze e requisiti tecnologici connotanti i sistemi BIPV.

SICUREZZA	Sicurezza strutturale	Resistenza meccanica e stabilità
	Sicurezza in caso di incendio	Resistenza al fuoco
	Sicurezza nell'impiego	Resistenza dalle cadute
BENESSERE	Benessere microclimatico	Isolamento termico Controllo della condensa Ventilazione Controllo fattore solare, riscaldamento passivo Tenuta all'acqua/resistenza agli agenti atmosferici
	Benessere acustico	Isolamento acustico
	Benessere visivo-luminoso	Controllo del fattore luminoso/luce naturale
	Manutenibilità e durevolezza	Affidabilità, durabilità, riparabilità, sostituibilità
GESTIONE		

Esigenza	SICUREZZA STRUTTURALE
Requisito	Resistenza meccanica e stabilità Idoneità a contrastare efficacemente il prodursi di rotture o deformazioni gravi sotto l'azione di determinate sollecitazioni.
Raccomandazioni per gli interventi	<i>Tutti i BIPV sottoposti ad azione diretta di carichi statici e dinamici o di urti volontari (come atti vandalici) e accidentali non devono subire danni (spostamenti, rotture, crolli totali o parziali, distacchi di parti, ecc.) tali da mettere in pericolo l'incolumità degli utenti.</i>
Esigenza	SICUREZZA IN CASO D'INCENDIO
Requisito	Resistenza al fuoco Attitudine a conservare, entro limiti determinati, per un intervallo di tempo determinato, le prestazioni fornite.
Requisito	Reazione al fuoco Grado di partecipazione di un materiale combustibile ad un fuoco al quale è sottoposto.
Raccomandazioni per gli interventi	<i>I sistemi BIPV devono possedere una limitata infiammabilità e, sotto l'azione del fuoco, non devono emettere sostanze aeriformi, polveri tossiche, fumi, ecc., tali da provocare danni agli utenti o da impedire loro di trovare le vie di fuga. Inoltre, sotto l'azione del fuoco, non devono perdere le prestazioni di sicurezza e stabilità per un periodo di tempo sufficiente affinché gli utenti si possano mettere in salvo.</i>
Esigenza	GESTIONE
Requisito	Affidabilità, durabilità, riparabilità, sostituibilità Attitudine a ripristinare l'integrità, la funzionalità e l'efficienza di parti o di oggetti guasti o, nel caso non siano riparabili, a consentire la collocazione di elementi tecnici al posto di altri.

<i>Raccomandazioni per gli interventi</i>	<i>Il periodo di garanzia tipico per le prestazioni elettriche di un modulo FV standard è compreso tra 20 e 30 anni. I moduli BIPV (compresi i loro componenti di incapsulamento e sigillatura) dovrebbero avere almeno lo stesso livello di durata e affidabilità per ciascuna funzione (ad es. resistenza meccanica, resistenza ai raggi UV, sicurezza, proprietà elettriche, impermeabilità all'acqua e all'aria) dei materiali da costruzione convenzionali equivalenti (materiali senza funzioni di produzione di energia elettrica).</i> <i>I sistemi BIPV devono essere progettati e realizzati in modo da garantire la facile riparazione di quelle parti soggette a rottura, così da aumentare la durata di vita utile dell'impianto nel suo insieme; nel caso di obsolescenza o nel caso in cui non sia possibile la riparazione dovrà essere consentita la facile sostituzione dei moduli danneggiati senza la necessità di eseguire operazioni di adattamento o di ripristino dell'intero sistema.</i> <i>Idealmente, un sistema BIPV dovrebbe funzionare per tutta la vita utile dell'edificio, mantenendo tutte le funzioni sia come componente edilizio che come generatore elettrico.</i>
<i>Requisito</i>	Manutenibilità, pulibilità e limitazione dell'imbrattamento Attitudine a consentire la rimozione di sporcizia e sostanze indesiderate.
<i>Raccomandazioni per gli interventi</i>	<i>La manutenzione deve essere eseguita senza compromettere il comfort o la sicurezza degli abitanti o dell'edificio stesso, con un costo paragonabile al costo di manutenzione di componenti simili dell'involucro edilizio.</i> <i>Devono essere eliminate o limitate le possibili riduzioni di rendimento dei moduli BIPV causate dall'accumulo di sporco o per il deposito di agenti atmosferici e/o inquinanti o di sostanze trasportate dal vento, prevedendo frequenti sistemi di manutenzione e pulizia, o evitando di installare BIPV in aree in cui la probabilità di sporcarsi è alta (ad esempio al piano terra, dove l'accumulo di sporco o possibili atti vandalici potrebbero inficiare il funzionamento dell'intero sistema).</i> <i>Per ottimizzare i costi operativi, i vari problemi di manutenzione dovrebbero essere considerati nelle prime fasi di progettazione. L'ispezione del sistema e la manutenzione dovrebbero essere eseguite almeno una volta all'anno, mentre il monitoraggio delle prestazioni del sistema dovrebbe essere continuo durante l'intera vita utile.</i>

Esigenza	BENESSERE MICRO-CLIMATICO
<i>Requisito</i>	Isolamento termico Attitudine dell'elemento tecnico ad assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore in funzione delle condizioni climatiche, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.
<i>Raccomandazioni per gli interventi</i>	<i>Tutti i BIPV deputati alla separazione tra ambienti interni riscaldati e spazi esterni (es. facciate continue o coperture vetrate) dovranno essere progettati in modo che, attraverso la collaborazione di tutti gli strati componenti, siano garantiti valori di trasmittanza adeguati ad assicurare il necessario contributo al raggiungimento e mantenimento del benessere termico.</i>
<i>Requisito</i>	Controllo della condensazione interstiziale Attitudine dell'elemento tecnico ad evitare la formazione di acqua di condensa.
<i>Raccomandazioni per gli interventi</i>	<i>Occorre prevedere una corretta stratigrafia dell'involucro, al fine di evitare che la presenza del modulo BIPV costituisca un impedimento al passaggio del vapore, contribuendo così alla formazione di fenomeni di condensa.</i>
<i>Requisito</i>	Ventilazione Attitudine dell'elemento tecnico a consentire ricambio d'aria per via naturale o meccanica.
<i>Raccomandazioni per gli interventi</i>	<i>Il rendimento dei moduli BIPV si considera ottimale ad una temperatura operativa di circa 25°C; un eccessivo surriscaldamento può provocare una riduzione fino al 10% della potenza erogata dal sistema (in particolare per i moduli in cristallino). Bisogna quindi prevedere una adeguata ventilazione sul retro del modulo, che ne favorisca il raffrescamento passivo.</i>
<i>Requisito</i>	Controllo del fattore solare, Riscaldamento passivo tramite guadagni solari Attitudine dell'elemento tecnico (opaco/semitrasparente) a regolare l'ingresso di energia termica raggiante in funzione delle condizioni climatiche, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.

Raccomandazioni per gli interventi È opportuno considerare gli aspetti legati al contesto ambientale, dipendenti da posizione, orientamento e condizioni climatiche, al fine di regolare, attraverso una corretta progettazione stratigrafica dell'elemento BIPV (es. inserendo pellicole basso-emissive o selettive all'interno del vetrocamera), la quantità di calore in entrata.

Requisito Controllo del fattore di albedo
Attitudine dell'elemento tecnico a regolare la frazione di radiazione solare incidente riflessa.

Raccomandazioni per gli interventi In fase di progettazione può essere conseguito un incremento della radiazione incidente sul sistema BIPV, e dunque della sua produttività, attraverso l'utilizzo di superfici riflettenti; questo principio si applica in particolar modo per le celle solari bifacciali, la cui produzione potrà essere incrementata mediante utilizzo di superfici aventi un fattore di albedo elevato, più o meno distanziate dai moduli (impiego ottimale per pensiline e tettoie).

Requisito Tenuta all'acqua / Resistenza agli agenti atmosferici
Attitudine dell'elemento tecnico ad impedire l'ingresso dell'acqua, anche in presenza di momentanei ristagni dovuti ad accumuli localizzati di grandine o di neve, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.

Raccomandazioni per gli interventi I BIPV devono assicurare una completa tenuta al passaggio di acqua meteorica, anche in seguito ad accumuli localizzati di neve o grandine, evitando altresì qualsiasi infiltrazione o assorbimento di acqua, in particolare in corrispondenza di giunti verticali o orizzontali.

Esigenza BENESSERE ACUSTICO

Requisito Isolamento acustico
Attitudine dell'elemento tecnico a fornire un'adeguata resistenza al passaggio dei rumori, al fine di garantire il benessere acustico degli utenti.

Raccomandazioni per gli interventi I sistemi BIPV deputati alla separazione tra ambienti interni abitabili e spazi esterni (es. facciate continue, coperture vetrate) dovranno essere progettati e realizzati in modo da controllare e ridurre adeguatamente la trasmissione di rumori aerei.

Esigenza BENESSERE VISIVO E LUMINOSO

Requisito Controllo del flusso luminoso / controllo della luce naturale
Attitudine dell'elemento tecnico a regolare l'ingresso di energia luminosa in funzione delle specifiche esigenze progettuali, al fine di garantire il benessere visivo degli utenti.

Raccomandazioni per gli interventi I moduli BIPV semi-trasparenti (es. facciate continue, serramenti) e le schermature solari BIPV (es. frangisole, pensiline) devono consentire un completo controllo dell'illuminazione naturale, dalla sua captazione alla possibile esclusione parziale o totale, con possibilità di regolazione in funzione delle condizioni esterne, al fine di garantire agli utenti le condizioni di benessere visivo e luminoso.

Esigenza SICUREZZA NELL'IMPIEGO

Requisito Protezione dalle cadute
Attitudine dell'elemento tecnico a consentire un'adeguata protezione alle cadute.

Raccomandazioni per gli interventi I BIPV rispondenti a tale requisito (in particolare i parapetti) devono essere progettati e realizzati in modo tale da consentire un'adeguata protezione alle cadute in funzione alle proprie caratteristiche di: altezza, eventuali forature e di resistenza al carico d'esercizio, al fine di garantire la sicurezza e l'incolumità degli utenti.

3.5 Repertori

3.5.1 Contenuti e criteri di utilizzo

I Repertori tecnici forniscono un quadro di informazioni utili al fine di accrescere la conoscenza sulle modalità di intervento, recuperare informazioni più dettagliate rispetto a soluzioni progettuali, aspetti tecnico-prestazionali e rispetto alla ricaduta architettonica della tecnologia fotovoltaica integrata nell'edificio. Le schede contenute all'interno dei Repertori riportano informazioni approfondite rispetto ai fattori di scelte progettuali descritti nelle Linee Guida. La consultazione dei Repertori è stata concepita come supporto alla fase di progetto, tuttavia, la loro impostazione ne consente un utilizzo e consultazione in qualsiasi fase.

Infatti, i Repertori sono intesi come strumenti di indirizzo per il progetto di architettura, sia esso ex novo o di riqualificazione e la specifica delle indicazioni consente di orientare il processo decisionale verso soluzioni più efficaci ed appropriate. Per permettere una facile lettura comparata, ciascuna scheda è identificata con un codice riferito all'oggetto della schedatura, per cui in fase di consultazione è possibile collegare il caso studio al prodotto BIPV e da quest'ultimo individuare un ulteriore rimando ai corrispondenti dettagli costruttivi contenuti nelle schede di soluzione tecnica.

3.5.2 Casi di successo

Il repertorio Casi di successo (cfr. appendice 1) fornisce un quadro di informazioni per la conoscenza delle principali caratteristiche tipo-morfologiche delle applicazioni dei sistemi BIPV all'interno di organismi edilizi, sia per edifici di nuova costruzione che per interventi di retrofit tecnologico. Raccoglie riferimenti progettuali nazionali e internazionali "esemplari", efficaci dal punto di vista dell'integrazione del BIPV nel concept progettuale dell'edificio e dei risultati conseguiti in termini di integrabilità architettonica, trasferibilità di buone pratiche e di contributi alla riduzione del fabbisogno energetico e degli impatti ambientali; il Repertorio è distinto in schede sintetiche relative a casi di successo di integrazione BIPV ed è costituito da 150 schede, di cui 60 riferite a esempi nazionali e 90 a esempi europei.

Le schede relative al Repertorio di Casi di successo sono classificate a priorità di soluzione tecnica e sono organizzate come segue:

- *Dati di progetto.* Alla prima sezione informativa appartengono i dati generali relativi al manufatto architettonico, ossia la localizzazione, con la posizione geografica fornita dalle coordinate di latitudine e longitudine, la destinazione d'uso, i progettisti, l'anno di completamento dell'intervento, la scala d'intervento e il tipo d'intervento, ex novo/retrofit tecnologico.
- *Dati BIPV.* La seconda sezione informativa è volta ad inquadrare sinteticamente le principali caratteristiche del sistema BIPV impiegato nel progetto, che sarà poi oggetto di approfondimento nelle sezioni successive; sono dunque esplicitate la categoria di applicazione secondo lo standard di riferimento IEC 63092-1:2020, la denominazione commerciale e descrizione del modulo BIPV, l'anagrafica dell'azienda produttrice del modulo e/o del sistema BIPV.
- *Immagini e grafici di dettaglio.* Sezione dedicata ai grafici di dettaglio e alle immagini più significative ed esemplificative dei sistemi installati, utili alla comprensione del funzionamento del sistema BIPV e della sua integrazione nel manufatto architettonico.

3.5.3 Buone pratiche

Le schede relative al Repertorio di Buone Pratiche (cfr. appendice 2) sono articolate in blocchi di informazioni come segue:

- *Dati di progetto.* In questa sezione si riportano la fonte e il riferimento del progetto oggetto della schedatura e si comunicano informazioni generali utili come primi indirizzi per il progettista. Si specifica il tipo di intervento, se ex-novo o riqualificazione, localizzazione e destinazione d'uso.
- *Dati BIPV.* La sezione descrive la soluzione tecnica e il prodotto utilizzato, con riferimento alle relative schedature (cfr. Soluzioni tecniche BIPV e Informazione tecnica). Sono esplicitate le categorie di applicazione, la descrizione del sistema impiegato e i riferimenti dell'azienda produttrice del modulo.
- *Aspetti ambientali e tipo-morfologici relativi all'edificio e al contesto.* Sono riportate informazioni relative alla radiazione globale, l'orientamento, il tipo di tessuto urbano e morfologia dell'edificio e foto esplicative al fine di valutare il potenziale di producibilità energetica di uno specifico sistema BIPV in relazione alle caratteristiche del contesto in cui si inserisce l'intervento.
- *Descrizione del sistema BIPV.* Vi sono informazioni riguardanti le caratteristiche tecnologiche, morfologiche ed energetiche del modulo BIPV e si individua la sua applicazione rispetto all'unità tecnologica e i rispettivi requisiti tecnologici connotanti.
- *Dati energetici.* Specifiche sulla tecnologia fotovoltaica impiegata, la dimensione del sistema ed eventuale producibilità energetica sulla base di parametri quali orientamento, inclinazione, potenza nominale dell'impianto, produzione energetica annua e copertura del fabbisogno energetico.

- *Target raggiunti e fattori di successo.* sono indicati alcuni parametri volti alla comprensione dell'efficacia prestazionale e della potenziale replicabilità delle soluzioni adottate; tali parametri sono stati espressi in termini qualitativi, non assegnando uno specifico punteggio alle diverse soluzioni ma tentando di correlare la qualità architettonica del progetto e dei risultati conseguiti con le peculiarità delle soluzioni progettuali adottate.
- *Immagini e grafici di dettaglio.* Sezione dedicata ai grafici di dettaglio e alle immagini più significative ed esemplificative dei sistemi installati, utili alla comprensione del funzionamento del sistema BIPV e della sua integrazione nel manufatto architettonico.

3.5.4 Soluzioni tecniche BIPV

Il Repertorio delle Soluzioni tecniche BIPV (cfr. appendice 3) è teso a fornire un quadro sintetico di informazioni utili alla conoscenza delle principali caratteristiche tecnologiche delle applicazioni di prodotti e sistemi BIPV all'interno di organismi edilizi, mediante l'illustrazione delle specifiche caratteristiche funzionali delle diverse alternative tecniche, al fine di garantire che le prestazioni del manufatto siano rispondenti al quadro esigenziale espresso in fase metaprogettuale. All'interno delle schede del Repertorio di Soluzioni tecniche BIPV vi è un rimando alle schede dei Repertori di Informazione tecnica e Casi Studio al fine di restituire, anche in termini di integrazione architettonica, un riferimento sui possibili esiti morfologici e linguistico-espressivi.

Le schede sono articolate in blocchi di informazioni uniformi e ricorrenti, che riguardano aspetti e problematiche comuni a tutte le soluzioni individuate.

- *Caratteristiche generali.* Si riporta la descrizione della soluzione tecnica dal punto di vista tecnico-realizzativo, con sintetiche informazioni circa la corretta posa in opera, precedute dall'indicazione della categoria di applicazione secondo lo standard di riferimento IEC 63092-1:2020.
- *Grafici di dettaglio.* Si riportano elaborati grafici rappresentativi di soluzioni generiche rispetto alle molteplici soluzioni analizzate nei casi studio, nodi di connessione con esplicitazione degli strati funzionali che compongono ciascuna soluzione (evidenziati in rosso) nell'ambito del manufatto architettonico; tali grafici non forniscono indicazioni sui materiali che compongono gli strati funzionali né sulle caratteristiche dimensionali, che richiedono di essere definiti in sede di progetto di specifiche soluzioni progettuali realizzate per idonei contesti.
- *Sistemi e moduli BIPV di uso ricorrente.* Si illustra la correlazione della soluzione tecnica con la produzione industrializzata per l'edilizia; per ogni soluzione tecnica si individuano una o più tipologie di moduli e sistemi BIPV di uso corrente che il progettista potrà adottare, indicandone le principali caratteristiche tecnologiche (trasparenza, planarità, rigidità e isolamento), senza tuttavia dare alcuna indicazione in merito alle specifiche di natura morfologica o energetica, dipendendo queste ultime da esigenze progettuali variabili caso per caso, e dunque non generalizzabili; per ciascuna soluzione si fa riferimento, a titolo esemplificativo, a prodotti BIPV presenti sul mercato e contenuti nel Repertorio Informazione tecnica.
- *Esempi di applicazioni.* Sezione dedicata alle applicazioni progettuali esemplificative delle soluzioni descritte, con immagini desunte prevalentemente dai casi studio (cfr. *Repertori dei Casi di successo e Buone pratiche*).

3.5.5 Informazione tecnica

Il Repertorio di Informazione tecnica ((cfr. appendice 4) si riferisce ad una schedatura dell'offerta industriale di sistemi e componenti BIPV presenti sul mercato italiano, rappresentativi di specifiche tipologie merceologiche con informazioni circa le prestazioni e le caratteristiche di integrazione architettonica degli stessi, effettuata attraverso il set di Criteri e indicatori definiti nel paragrafo 3.4 facendo emergere i vantaggi applicativi e i plus prestazionali offerti. Il Repertorio è rappresentativo di categorie di prodotti presenti sul mercato nazionale che risulta in continua evoluzione rispetto a fattori di microinnovazione.

Le schede sono articolate in blocchi di informazioni uniformi e ricorrenti così strutturate:

- *Caratteristiche generali:* la prima sezione è finalizzata alla descrizione degli aspetti generali che definiscono e caratterizzano il prodotto oggetto della scheda. È riportata la denominazione commerciale e la descrizione del prodotto con le caratteristiche specifiche, l'azienda produttrice di riferimento ed eventuali specifiche rispetto alla possibilità di customizzazione del modulo BIPV.
- *Applicazioni consigliate:* si specifica la migliore modalità di integrazione rispetto alla scomposizione del sistema tecnologico, identificando le unità tecnologiche e classi di elementi tecnici in cui si osserva l'integrazione di uno strato funzionale destinato alla produzione di energia elettrica (cfr. paragrafo 3.3). Tali indicazioni non fanno riferimento a specifiche di natura morfologica o architettonica, dipendendo queste dalle esigenze progettuali.
- *Caratteristiche del prodotto:* sono riportate tutte le caratteristiche materiche, dimensionali, tecnico-morfologiche del prodotto, sono specificate le prestazioni energetiche e vengono esplicitati i requisiti tecnologici connotanti che devono essere soddisfatti in fase di progetto esecutivo. Le caratteristiche sono esplicitate mediante una serie di parametri utili ad agevolare una lettura comparata tra diverse alternative.
- *Indicatori di integrabilità architettonica:* in questa sezione sono individuati tutti gli indicatori di integrabilità architettonica (cfr. paragrafo 3.4) per una corretta valutazione dell'idoneità rispetto all'organismo architettonico. Per ciascun prodotto saranno riportati solo gli indicatori per cui la verifica di soddisfacimento abbia dato esito positivo, seguiti da una breve descrizione delle prestazioni offerte. Gli indicatori vengono descritti e specificati rispetto alla gamma di produzione dell'azienda produttrice di riferimento.
- *Esempi di applicazioni:* sezione dedicata alle applicazioni progettuali esemplificative del prodotto descritto, con immagini desunte dai repertori (cfr. Repertori di *Casi di successo* e *Buone pratiche*) e da materiale tecnico-informativo disponibile sui siti web delle aziende.

4 Riferimenti bibliografici

1. EC - European Commission (2020), *A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives*, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM/2020/662 final, Brussels.
2. EC (2022), Remarks of Kadri Simson in the Industry Committee of the European Parliament on the energy situation in Europe,
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_22_1525
3. EC – European Commission (2021), *'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM/2021/550 final, Brussels.
4. EC - European Commission (2022), *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM/2022/108 final, Strasbourg.
5. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), “Summary for Policymakers”, in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
6. IEA PVPS Task 15, Subtask C, “International definitions of BIPV”, Report IEA-PVPS T15-04:2018.
7. EN 50583-1:2016 - Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules.
8. IEC 63092-1:2020 - Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules.
9. IEA PVPS Task 15, Subtask B, “Categorization of BIPV applications”, Report IEA-PVPS T15:2021.
10. Ensuring place-responsive design for solar photovoltaics on buildings. A good practice guide for designers, manufacturers and installers.
<https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents%20Library/BRE/BRE-CPRE-Responsive-Design-Guide.pdf>
11. www.bipv.ch
12. Doni, M. and Keim, C. (2010), “Performances energetiche della morfologia urbana: le tipologie urbane della città di Milano in rapporto al fabbisogno energetico”, in: AISRe Associazione Italiana di Scienze Regionali, *Identità, Qualità e Competitività Territoriale Sviluppo economico e coesione nei Territori alpini XXXI*, Conferenza Scientifica Annuale Aosta, 20-22 Settembre 2010
13. Caja, M., Landsberger, M., Malcovati, S. (eds) (2021), *Tipologia architettonica e morfologia urbana. Il dibattito italiano. Antologia 1960-1980*, Libraccio editore, Milano.
14. Bocchi, R. (2012), “Carlo Aymonino. Per una ricerca di progettazione”, Ciclo di conferenze “4 maestri della Scuola di Venezia” <http://www.iuav.it/Ateneo1/eventi-del/2020/Ricodo-di-/index.htm>
15. Renna, A. (1980), *L'illusione e i cristalli*, Clear, Pescara
16. LEGAMBIENTE (2015), *Il futuro dell'energia passa per i territori. Manifesto per l'autoproduzione da fonti rinnovabili*, [<https://www.comunirinnovabili.it/manifesto-dell'autoproduzione/>]
17. ENEA (2017), *Fotovoltaico e smart grid* [<https://www.enea.it/it/eneaxexpo/fotovoltaico-e-smart-grid>]
18. Balocchi, A. (2020) (Ed.), *Smart Grid. I 5 esempi che mostrano il valore dell'Italia nel mondo*, LUMI4INNOVATION, TECNO, Milano.
19. T. H. Reijenga, “Integrazione edilizia del fotovoltaico in architettura”, in R. Scarano, P. Portoghesi (a curadi), *L'architettura del sole*, 2005, Gangemi, Roma.
20. R. Landolfo, M. Losasso, M. R. Pinto (a cura di), *Innovazione e sostenibilità negli interventi di riqualificazione edilizia. Best practice per il retrofit e la manutenzione*, 2012, Alinea, Firenze.

21. Guidelines on building integration of photovoltaic in the Mediterranean area http://www.enpicbmed.eu/sites/default/files/guidelines_on_building_integration_of_photovoltaic_in_the_mediterranean_area.pdf
22. A. Scognamiglio, P. Bosisio, V. Di Dio (a cura di) *Fotovoltaico negli edifici. Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti*, 2013, Edizioni Ambiente, Milano.
23. R. Scarano, "Introduzione", in R. Scarano, P. Portoghesi (a cura di), *L'architettura del sole*, 2005, Gangemi, Roma.
24. M. Rossetti, "L'involucro architettonico contemporaneo", 2019, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna
25. D'Ambrosio V., Losasso M., Tersigni E., Gifuni S., "Building Integrated Photovoltaics. Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative", Report RdS/PTR2019/2021, Linea di attività LA2.20, 2021.
26. Norma UNI 8290-2:1983 - Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.
27. C. Filagrossi Ambrosino, D. Francese, "Sistemi solari e termofotovoltaici integrati", Progetto SMARTCASE - Soluzioni innovative Multifunzionali per l'ottimizzazione dei Consumi di energia primaria e della vivibilità indoor nel Sistema Edilizio, 2016.
28. IEA SHC Task 41, Subtask A2, "Solar energy systems in architecture - integration criteria and guidelines", 2012.
29. IEA SHC Task 41, Subtask A3-2, "Designing photovoltaic systems for architectural integration – criteria and guidelines for product and system developers", 2013.
30. A. Scognamiglio, G. Graditi, F. Pascarella, C. Privato, "Boogie-Woogie, a photovoltaic glass-glass module "dancing" with the building", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany.
31. A. Scognamiglio, "Photovoltaic landscapes: Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55 (2016), pp. 629-661.
32. IEA PVPS Task 15, Subtask E, "Coloured BIPV. Market, Research and Development", 2019.
33. M. Pelle, E. Lucchi, L. Maturi, A. Astigarraga, F. Causone, "Coloured BIPV Technologies: Methodological and Experimental Assessment for Architecturally Sensitive Areas", *Energies*, n.13 (2020).
34. T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen, D. Holger Neuhaus, "Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)", *Energy & Buildings*, 231 (2021).
35. P. Bonomo, A. Chatzipanagi, F. Frontini, "Overview and analysis of current BIPV products: new criteria for supporting the technological transfer in the building sector", *Vitruvio International journal of Architecture Technology and Sustainability*, Volume 0, 2015.
36. A. Scognamiglio, P. Bosisio, V. Di Dio, "Fotovoltaico negli edifici. Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti", 2013, Edizioni Ambiente.

Sitografia di Riferimento per Casi Studio

- IEA SHC Task 41. Solar Energy and Architecture: Collection of Case Studies. <http://task41casestudies.iea-shc.org>
- IEA SHC Task 41. Solar Energy Systems in Architecture. Integration Criteria and Guidelines. 2012. <https://task41.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March2013.pdf>
- IEA PVPS Task 15, Subtask A. Successful Building-integration of Photovoltaics. A Collection of International Projects. 2020. <https://iea-pvps.org/key-topics/successful-building-integration-of-photovoltaics-a-collection-of-international-projects>

- www.bipv.ch
- www.solarchitecture.ch
- www.solarage.eu
- www.bipv.eurac.edu

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Valeria D'Ambrosio, Dottore di Ricerca, Professore associato in Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Svolge studi sulla progettazione ambientale e sul retrofit tecnologico a scala edilizia e urbana con focus su strategie e soluzioni progettuali per l'adattamento e la mitigazione degli impatti climatici nelle aree urbane. La sua competenza riguarda l'Innovazione Tecnologica applicata alla Sostenibilità dell'Edilizia e dell'Ambiente. Ha sviluppato conoscenze sul Building Technological Retrofit, con particolare attenzione alla riqualificazione energetica e sulle tecnologie sostenibili. Coordina e partecipa a gruppi di lavoro nell'ambito di programmi di ricerca nazionali (MIUR, PONREC, POR) e di Convenzioni stipulate con Enti e Amministrazioni pubbliche con esiti in Convegni nazionali e internazionali e con pubblicazioni a stampa. L'attività didattica di docenza è svolta nell'ambito di Corsi di Laurea universitari e nella didattica post-laurea (Dottorato di Ricerca, Master di 2° livello, Corsi di Perfezionamento, Corsi di Alta formazione). È componente del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e membro di Comitati scientifici nell'ambito di Master dell'Università di Napoli Federico II. È componente del gruppo di lavoro multidisciplinare sulla relazione tra innovazione tecnologica e ambiente Task Force dell'Ateneo Federico II Industria 4.0 dell'Unità di ricerca SET - Smart Environment and Technology; esperto del Gruppo di Lavoro Nazionale "Green City Network", Membro del Gruppo di Lavoro "Adottare misure per la resilienza e l'adattamento ai cambiamenti climatici", Stati Generali della Green Economy (Consiglio Nazionale della Green Economy, in collaborazione con MATTM e MISE). Dal 2017 è Componente del Consiglio Direttivo della SITdA - Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura.

Mario Losasso, architetto, è professore ordinario di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Attualmente è Presidente della SITdA, Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura e, presso il MUR - Ministero dell'Università e della Ricerca, è Componente della Commissione di esperti per il PNR Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027. Per l'Ateneo Federico II di Napoli è Delegato del Rettore all'Edilizia ed è Delegato per le Relazioni Esterne della Scuola Politecnica e delle Scienze di Base, nonché Coordinatore del Master di II livello "PRO-INN - Progettazione e riqualificazione architettonica, urbana e ambientale con l'utilizzo di tecnologie innovative" presso il Dipartimento di Architettura. I principali ambiti di ricerca riguardano la progettazione ambientale, il retrofit tecnologico e i processi di riqualificazione urbana, edilizia e degli spazi pubblici per l'adattamento e la mitigazione climatica.

Enza Tersigni è Architetto, Dottore di Ricerca e Ricercatore di Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Dal 2008 svolge con continuità attività di ricerca presso il DIARC, avendo come obiettivo lo studio degli aspetti metodologici, decisionali e operativi deputati alla conoscenza e al controllo dei processi di trasformazione dell'ambiente costruito, con un focus specifico sui temi della sostenibilità ambientale e della digitalizzazione in campo progettuale e processuale. Dal 2017 è Componente del gruppo di ricerca - "SET - Smart Environment and Technology" del Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, all'interno della Task Force di Ateneo "Industria 4.0 e sviluppo sostenibile". Dal 2018 è membro dell'Urban Climate Change Research Network (UCCRN), rete formata da studiosi ed esperti di Università, Enti di ricerca ed Enti pubblici impegnati sui temi della mitigazione e dell'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano.

Giuseppina Santomartino è dottoranda in Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II - Dottorato PON Ricerca e Innovazione 2014-2020 dal titolo "Natureenergy – Progettazione ambientale per i contesti urbani: strategie integrate e soluzioni tecniche nature-based con sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili". Architetto, laureata con votazione di 110/110 e Lode nel 2019 presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Vincitrice di una borsa di studio nel progetto PON dal titolo "CHERIE – Cultural Heritage Interoperable Environment" (2020). Ha collaborato al progetto PLANNER – Piattaforma per la gestione dei rischi naturali in ambienti urbanizzati (POR FESR Campania 2014-2020) e PER_CENT Periferie al centro (Ricerca di Ateneo Federico II). Le attività di ricerca riguardano temi legati alla progettazione con particolare

riferimento all'adattamento e alla mitigazione degli impatti climatici in ambito urbano e alla riqualificazione edilizia attraverso interventi di retrofit tecnologico su edifici e spazi aperti mediante l'utilizzo di tecnologie innovative

6 Appendici

Appendice 1 - Booklet_Building Integrated Photovoltaics. Linee Guida per il progetto

Appendice 2 - Repertorio Casi di successo

Appendice 3 - Repertorio Buone Pratiche

Appendice 4 - Repertorio Soluzioni tecniche BIPV

Appendice 5 - Repertorio Informazione tecnica