



**POLITECNICO
MILANO 1863**

Scuola di Architettura Urbanistica e Ingegneria delle Costruzioni

Analisi energetica, CBA e LCA di configurazioni carport fotovoltaico con batteria

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DEI SISTEMI EDILIZI

Autore: **Andrea Re**

Matricola: 260186

Relatore: Prof. Rossano Scoccia

Co-relatore: Ing. Davide Dell'Oro, PhD

Anno Accademico: 2025-26

Abstract

Il settore edilizio rappresenta uno dei principali responsabili delle emissioni di gas serra e occupa, pertanto, una posizione centrale negli obiettivi di decarbonizzazione fissati a livello europeo per il 2050. Una valutazione completa non può limitarsi alle emissioni operative, legate all'esercizio dell'edificio, ma deve considerare anche quelle incorporate nei componenti installati, spesso trascurate quando si introducono nuove tecnologie. In questo quadro l'integrazione del fotovoltaico negli edifici esistenti rappresenta una delle strade più immediate per ridurre la dipendenza dalla rete, soprattutto dove i vincoli di tutela limitano gli interventi sull'involucro. Il presente lavoro ha per oggetto la parziale decarbonizzazione del Centro Antonianum della Compagnia di Gesù a Padova, un complesso di valore storico soggetto a vincolo paesaggistico. L'intervento studiato consiste nell'integrazione di un impianto fotovoltaico a carport, realizzato nell'area di parcheggio del complesso, con un sistema di accumulo elettrochimico. L'obiettivo è definire e confrontare un insieme di strategie alternative, valutandone il comportamento sui tre piani, energetico, ambientale ed economico, lungo un orizzonte di venticinque anni. L'analisi segue un percorso a imbuto. Tutte le configurazioni plausibili vengono prima valutate sul solo piano energetico, attraverso simulazioni dinamiche svolte in EnergyPlus e solo quelle che superano questo filtro passano alla valutazione ambientale ed economica di dettaglio. Le configurazioni considerate sono dieci, ottenute combinando cinque taglie di impianto, dalle quattro alle otto unità carport, con le varianti senza e con accumulo. Il modello orario di carica e scarica di quest'ultimo, la contabilità delle emissioni e l'analisi costi-benefici sono implementati in foglio elettronico, così da mantenere trasparenti ipotesi e formule. Le emissioni incorporate sono ricostruite per ogni componente a partire dalle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto, secondo un perimetro cradle to grave, mentre i costi derivano dal Prezzario Regionale del Veneto. Le due letture vengono infine ricomposte attribuendo alla CO₂eq evitata un prezzo ombra ricavato dai valori della Banca Europea per gli Investimenti, da cui discendono un NPV e un PBT unificati, affiancati dagli indicatori di ritorno energetico Energy Payback Time ed Energy Return on Investment. I risultati compongono un quadro coerente nelle sue tre componenti. Sul piano economico l'intervento risulta conveniente in ogni configurazione, con un tasso interno di rendimento sempre superiore al 5.8 % assunto come riferimento; sul piano ambientale l'impianto restituisce la propria impronta di CO₂eq in circa tre anni e l'energia spesa per realizzarlo in circa due, a fronte di una vita utile di venticinque. L'accumulo, pur aggiungendo una quota di emissioni incorporate, innalza la copertura del fabbisogno tramite autoproduzione fino a circa l'84 % e migliora in ogni caso il ritorno economico. Tra le soluzioni prive di incentivo, la configurazione a cinque unità carport con accumulo offre il miglior compromesso tra valore e costo, con un valore attuale netto di 37'602 €, un tempo di ritorno di sedici anni e un costo livellato dell'elettricità di 0.171 €/kWh. La detrazione fiscale per le ristrutturazioni, dove applicabile, riduce quasi della metà i tempi di rientro. La decarbonizzazione così ottenuta è parziale, perché agisce sulla sola domanda elettrica e costituisce la base su cui innestare i passi successivi verso la piena neutralità dell'edificio.

Parole chiave: decarbonizzazione; fotovoltaico; carport; batteria; LCA; CBA.

Abstract in inglese

The building sector represents one of the main contributors to greenhouse gas emissions, and it therefore holds a central position within the decarbonization targets set at the European level for 2050. A complete assessment cannot be limited to operational emissions, related to the building's use, but must also account for the emissions embodied in the installed components, which are often overlooked when new technologies are introduced. Within this framework, integrating photovoltaics into existing buildings is one of the most direct ways to reduce grid dependence, especially where heritage protection constraints limit interventions on the envelope. The present work addresses the partial decarbonization of the Centro Antonianum della Compagnia di Gesù in Padua, a building complex of historical value subject to landscape protection. The intervention under study consists of integrating a photovoltaic carport system, installed in the complex's parking area, with an electrochemical storage system. The aim is to define and compare a set of alternative strategies, assessing their behaviour on the energy, environmental and economic levels over a twenty-five-year horizon. The analysis follows a funnel approach. All plausible configurations are first evaluated on the energy level alone, through dynamic simulations carried out in EnergyPlus, and only those that pass this filter proceed to the detailed environmental and economic assessment. Ten configurations are considered, obtained by combining five plant sizes, from four to eight carport units, with the variants without and with storage. The hourly charge and discharge model of the latter, the emissions accounting and the cost-benefit analysis are implemented in a spreadsheet, so as to keep assumptions and formulas transparent. Embodied emissions are reconstructed for each component starting from the Environmental Product Declarations, within a cradle to grave boundary, while costs are derived from the Regional Price List of the Veneto Region. The two readings are finally combined by assigning the avoided CO₂eq a shadow price taken from the values published by the European Investment Bank, from which a unified NPV and PBT are obtained, alongside the energy return indicators Energy Payback Time and Energy Return on Investment. The results compose a picture that is consistent across its three components. On the economic level the intervention is profitable in every configuration, with an internal rate of return always above the 5.8 % taken as a reference; on the environmental level the system pays back its CO₂eq footprint in about three years and the energy used to build it in about two, against a service life of twenty-five. Storage, although it adds a share of embodied emissions, raises the share of demand covered by self-production up to about 84 % and improves the economic return in every case. Among the options without incentive, the configuration with five carport units and storage offers the best trade-off between value and cost, with a net present value of 37'602 €, a payback time of sixteen years and a levelized cost of electricity of 0.171 €/kWh. The tax deduction for building renovations, where applicable, nearly halves the payback period. The decarbonization thus achieved is partial, since it acts on electricity demand only, and constitutes the basis on which to build further steps towards the full neutrality of the building.

Key-words: decarbonization; photovoltaics; carport; battery; LCA; CBA.

Indice

Abstract	i
Abstract in inglese	ii
Indice	iii
1 Introduzione	1
1.1. Obiettivi sulla decarbonizzazione edifici entro 2050	2
1.2. Importanza della LCA per il calcolo delle emissioni negli edifici.....	2
1.3. Software utilizzati	3
1.4. Obiettivi della tesi	4
2 Metodologia	5
3 Caso studio.....	8
3.1. Descrizione Centro Antonianum Padova	8
3.2. Clima di riferimento	9
3.3. Vincoli paesaggistici e implicazioni progettuali	9
4 Definizione delle strategie e analisi parametrica energetica	11
4.1. Spazi disponibili e scelta dei componenti	11
4.2. Analisi parametrica per scaling	13
4.3. Configurazioni considerate	15
4.4. Dimensionamento dell'accumulo per rendimento marginale	17
4.4.1. Approccio	17
4.4.2. Caso 4 unità.....	19
4.4.3. Caso 5 unità.....	21
4.4.4. Caso 6 unità.....	23
4.4.5. Caso 7 unità.....	25
4.4.6. Caso 8 unità.....	27
5 Risultati simulazioni energetiche	29
5.1. Impostazione delle simulazioni energetiche e grandezze considerate	29
5.2. Risultati delle simulazioni.....	30
5.2.1. Strategia con 4 unità e batteria 30 kWh	30
5.2.2. Strategia con 5 unità e batteria 40 kWh	33
5.2.3. Strategia con 6 unità e batteria 60 kWh	36
5.2.4. Strategia con 7 unità e batteria 60 kWh	39
5.2.5. Strategia con 8 unità e batteria 60 kWh	42
6 Valutazione ambientale	46
6.1. Emissioni operative.....	46
6.2. Emissioni incorporate.....	47

6.3.	Emissioni totali.....	52
6.4.	Carbon Payback Time	54
7	Valutazione economica	56
7.1.	Indicatori economici utilizzati.....	56
7.2.	CAPEX.....	58
7.3.	OPEX	61
7.4.	Analisi costi-benefici.....	62
7.5.	LCOE	64
8	Analisi integrata economico-ambientale e indicatori energetici	65
8.1.	Prezzo ombra della CO ₂ eq	65
8.2.	NPV e PBT unificati	68
8.3.	Energy Payback Time ed EROI	69
9	Risultati complessivi.....	71
9.1.	Risultati energetici.....	71
9.2.	Risultati ambientali	75
9.3.	Risultati economici.....	80
9.4.	Risultati integrati	84
9.5.	Analisi di sensibilità	86
10	Conclusioni.....	90
	Bibliografia.....	95
	Lista delle Figure	99
	Lista delle Tabelle	105
	Lista degli Acronimi	107
	Appendice	109

1 Introduzione

Il settore edilizio è uno dei principali responsabili delle emissioni di gas serra a livello globale. In Europa concorre per circa il 40% al consumo finale di energia e per il 36% alle emissioni di gas serra, mentre a scala globale le emissioni associate al settore costruzioni hanno raggiunto le 10 Gt di CO₂ nel 2022, pari al 37% delle emissioni energetiche e di processo [1]. Tali cifre derivano da due contributi distinti del ciclo di vita dell'edificio: i consumi della fase d'uso, legati a climatizzazione, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria e ventilazione, e le emissioni incorporate nella fase di costruzione, che comprendono l'estrazione, il trasporto e la lavorazione dei materiali.

L'IPCC ha individuato nelle attività antropiche la principale causa del riscaldamento globale ed ha fissato, nel limite di un aumento di 1.5 °C della temperatura media terrestre rispetto ai livelli preindustriali, la soglia oltre la quale gli effetti del cambiamento climatico diventano severi e in larga misura irreversibili [2]. La decarbonizzazione del costruito è pertanto uno degli ambiti su cui la transizione climatica si gioca in modo più diretto e dove il margine di intervento dipende sia dalle scelte tecnologiche adottate sia dalla valutazione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita degli edifici.

Sul fronte della fase d'uso, la riduzione delle emissioni segue di norma due strade, spesso adottate insieme. La prima consiste nel ridurre il fabbisogno di energia con interventi sull'involucro, come l'isolamento termico e la sostituzione degli infissi. La seconda nel sostituire i generatori a combustibile fossile con sistemi a vettore elettrico, fra i quali la pompa di calore è oggi la tecnologia più diffusa per la climatizzazione. Quest'ultima sposta il consumo dal vettore termico a quello elettrico con un'efficienza nettamente superiore. Il beneficio ambientale, tuttavia, dipende da come è composto il mix elettrico nazionale. Se la rete che alimenta l'edificio ha una forte componente fossile, l'elettrificazione non riduce di molto le emissioni complessive, ma si limita a spostarle dal luogo di consumo a quello di produzione dell'energia. Per questa ragione la riqualificazione si accompagna in genere all'installazione di impianti di generazione rinnovabile in loco, principalmente fotovoltaici, integrati sulle coperture o, dove tale soluzione non è praticabile per ragioni tecniche o di tutela paesaggistica, su strutture ausiliarie quali le pensiline a copertura dei parcheggi (carport).

A questa configurazione si aggiunge il problema dello sfasamento temporale fra produzione e domanda. Le ore di massima generazione fotovoltaica non coincidono con quelle di picco del fabbisogno dell'edificio, in particolare nei profili a uso residenziale o comunitario, in cui i carichi serali e notturni rappresentano una quota significativa del consumo annuo. L'integrazione di un sistema di accumulo elettrochimico consente di traslare nel tempo l'energia prodotta in eccesso, rendendola disponibile nelle ore in cui produzione e fabbisogno non si sovrappongono, ed aumenta in questo modo la quota di energia autoprodotta effettivamente consumata in loco.

1.1. Obiettivi sulla decarbonizzazione edifici entro 2050

Il quadro normativo europeo definisce, attraverso una sequenza di direttive e di piani d'azione, una traiettoria precisa per la decarbonizzazione del settore edilizio entro il 2050. Il riferimento principale è la direttiva 2024/1275/UE, nota come EPBD IV (Energy Performance of Buildings Directive) [3], entrata in vigore nel maggio 2024, che fissa l'obiettivo di un parco immobiliare europeo a emissioni zero entro tale orizzonte. Per raggiungerlo, la direttiva stabilisce alcuni step intermedi di rilievo. A partire dal 2030 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno rispondere al requisito di Zero Emission Building, condizione che richiede emissioni operative nulle in fase d'uso, ottenute attraverso un fabbisogno energetico molto basso coperto interamente da fonti rinnovabili. Parallelamente è previsto un percorso di progressiva uscita dei combustibili fossili dai sistemi di riscaldamento, con il blocco degli incentivi alle caldaie autonome a partire dal 2025 e la loro eliminazione attesa per il 2040.

A livello nazionale, l'Italia ha recepito tali obiettivi all'interno del PNIEC 2024 (Piano Nazionale Integrato Energia e Clima) [4], inviato alla Commissione europea nel giugno 2024. Il Piano prevede una riduzione delle emissioni del 32% rispetto ai livelli del 2005, traguardo da conseguire attraverso una serie di misure a carattere settoriale. Per il comparto residenziale, in particolare, sono fissati al 2030 una riduzione del 16% del consumo medio di energia primaria e un ulteriore calo intorno al 22% entro il 2035, accompagnati da un aumento del tasso di ristrutturazione profonda dal valore attuale di 1.9% annuo al 2.7% nel decennio successivo.

1.2. Importanza della LCA per il calcolo delle emissioni negli edifici

L'introduzione del concetto di Zero Emission Building da parte della EPBD IV rappresenta un cambio di prospettiva rispetto al quadro precedente, fondato sulla definizione di NZEB (Nearly Zero Energy Building) introdotta dalla EPBD III [5]. Il criterio NZEB era basato sul bilancio energetico operativo annuo dell'edificio e richiedeva un fabbisogno molto basso coperto in misura significativa da fonti rinnovabili, senza tuttavia entrare nel merito delle emissioni associate alle altre fasi del ciclo di vita. Il passaggio al criterio Zero Emission Building sposta il riferimento dal consumo all'emissione, e allarga così il perimetro di valutazione. Man mano che il fabbisogno operativo scende verso valori prossimi allo zero, le emissioni legate alla produzione dei materiali e alla costruzione dell'edificio pesano sempre di più. Nei casi più rilevanti diventano la voce principale del bilancio. Trascurarle vorrebbe dire ottimizzare un solo termine del ciclo di vita a scapito degli altri. Si rischierebbe in questo modo di ottenere un edificio efficiente in fase d'uso, ma con un bilancio complessivo peggiore di un edificio meno performante e con emissioni incorporate più basse.

Per tenere conto dell'intero ciclo di vita si ricorre alla metodologia LCA (Life Cycle Assessment), che valuta gli impatti ambientali di un sistema dalla fase di estrazione delle materie prime fino al fine vita, secondo lo schema normativo definito dalla ISO 14040:2006 [6] e dalla ISO 14044:2006 [7] e, per gli edifici, dalla UNI EN 15978:2011 [8]. Quest'ultima distingue le emissioni in due categorie principali, da considerare congiuntamente per ricostruire il bilancio complessivo. La prima, Operational Carbon, raggruppa le emissioni di CO₂ associate all'energia consumata in fase d'uso, ovvero quella necessaria per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione ed illuminazione, durante l'intera vita utile dell'edificio. La seconda categoria, Embodied Carbon, raccoglie le emissioni legate ai materiali e alle lavorazioni, distinte a loro volta in tre voci:

- Upfront Carbon: gli impatti generati nell'estrazione e nel trasporto delle materie prime;
- Recurring Embodied Carbon: quelli associati alla manutenzione e alla sostituzione dei componenti durante la vita utile;
- End-of-life Carbon: quelli relativi alla dismissione e allo smaltimento dell'edificio a fine ciclo.

L'obiettivo della decarbonizzazione non è pertanto quello di azzerare il consumo di energia, ma quello di portare a zero le emissioni nette complessive del sistema edificio lungo l'intero ciclo di vita.

1.3. Software utilizzati

La valutazione del comportamento di un sistema che integra involucro edilizio, impianto fotovoltaico e accumulo elettrochimico richiede strumenti di calcolo capaci di rappresentarne le dinamiche con risoluzione oraria o inferiore. Un'analisi stazionaria, basata su bilanci annui o mensili, non è in grado di restituire l'autoconsumo, il surplus immesso in rete ed i prelievi orari, ovvero le grandezze che governano sia la valutazione economica delle strategie sia il loro impatto ambientale. Per questa ragione, il lavoro si è articolato su due ambienti di calcolo complementari: un motore di simulazione energetica dinamica per la ricostruzione dei profili di fabbisogno e di produzione, ed un foglio elettronico per le elaborazioni successive.

Le simulazioni energetiche sono state condotte in EnergyPlus, motore di simulazione whole-building sviluppato dallo United States Department of Energy a partire dal 1997, distribuito come progetto open source ed aggiornato con cadenza semestrale. Il software risolve in regime dinamico i bilanci di massa ed energia dell'edificio. Modella lo scambio termico per conduzione, convezione e radiazione attraverso l'involucro, insieme al comportamento igrometrico dell'aria e agli scambi con il terreno. Tiene conto, inoltre, dell'illuminazione naturale e artificiale e del funzionamento degli impianti di climatizzazione, descritti a livello di singolo componente. Dispone inoltre di moduli dedicati alla generazione fotovoltaica, fra i quali Generator:PVWatts, impiegato in questo lavoro, che ne fanno uno strumento adatto allo studio di sistemi energetici integrati. La risoluzione temporale è configurabile fino al minuto, e la disponibilità del codice sorgente e della documentazione ne facilitano l'interfacciamento con strumenti di pre e post-processing esterni. La versione adottata per le simulazioni della presente tesi è la 25.2.0 [9].

Le elaborazioni successive ai profili energetici sono state invece sviluppate in Microsoft Excel. In questo ambiente sono stati costruiti il modello orario di carica e scarica della batteria, il bilancio fra produzione, autoconsumo, immissione e prelievo, l'analisi costi-benefici e la contabilità delle emissioni lungo il ciclo di vita. La scelta del foglio elettronico risponde a un'esigenza di trasparenza e di continuità: tenere il modello dell'accumulo, l'analisi economica e quella ambientale all'interno di un unico strumento, in cui ipotesi, parametri e formule restano visibili e verificabili passo per passo, semplificando la validazione dei risultati e garantendone la riproducibilità. I profili orari prodotti da EnergyPlus costituiscono il dato di ingresso di questo secondo ambiente, nel quale si sviluppa la maggior parte delle analisi quantitative discusse nei capitoli successivi.

1.4. Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi si propone di definire e confrontare un insieme di strategie di parziale decarbonizzazione applicate al Centro Antonianum della Compagnia di Gesù a Padova, ciascuna basata sull'integrazione di un impianto fotovoltaico a carport con un sistema di accumulo elettrochimico, e di valutarne il comportamento sui piani energetico, economico ed ambientale. Le configurazioni considerate vengono costruite per multipli del numero di unità carport installabili nell'area di parcheggio del complesso e differenziate per la presenza o l'assenza del sistema di accumulo, in modo da coprire uno spettro di taglie significativo sia dal punto di vista del dimensionamento sia dal punto di vista del costo di investimento. Più nel dettaglio, il lavoro punta a individuare quale tra le configurazioni studiate rappresenti la scelta migliore. Ognuna viene valutata lungo un orizzonte di venticinque anni, così da poterle mettere a confronto sulle stesse basi. Il confronto è svolto sia tenendo conto degli incentivi fiscali disponibili sia senza di essi, in modo da distinguere la convenienza propria dell'intervento da quella che dipende dal sostegno pubblico. L'obiettivo finale è riconoscere la configurazione che offre il miglior equilibrio tra indipendenza dalla rete, ritorno economico e beneficio ambientale, oltre a quella che massimizza il ritorno quando la spesa iniziale non rappresenta un vincolo. La struttura dell'elaborato ed il dettaglio metodologico con cui le tre dimensioni di valutazione vengono articolate sono presentati al capitolo successivo.

Studi affini a quello qui presentato sono già stati condotti in letteratura. Analisi che affiancano alla valutazione energetica quella economica e ambientale sono state condotte per impianti fotovoltaici con accumulo in ambito non residenziale [10] e per comunità energetiche al servizio di edifici pubblici [11], mentre alle strutture a carport sono dedicati studi sia sul piano tecnico-economico [12] sia su quello delle emissioni incorporate [13]; agli indicatori di ritorno energetico, Energy Payback Time ed EROI, si riferisce un'ampia rassegna metodologica [14]. Rispetto a questi contributi, il presente lavoro tiene insieme le tre dimensioni su un unico caso studio e le estende a tutte le configurazioni considerate.

2 Metodologia

Il Capitolo 1 ha introdotto tre temi di fondo: la centralità del settore edilizio nella decarbonizzazione, la necessità di affiancare alle emissioni operative quelle incorporate e l'utilità della simulazione dinamica per studiare l'interazione tra involucro, impianto e clima. Questi temi costituiscono il punto di partenza del lavoro presentato in questo elaborato. A partire da tali premesse, il lavoro di tesi si propone di valutare in modo sistematico una serie di strategie di parziale decarbonizzazione del Centro Antonianum di Padova, basate sull'integrazione di un impianto fotovoltaico a carport con un sistema di accumulo elettrochimico. L'orizzonte temporale assunto è di 25 anni, coerente con la vita utile attesa dei principali componenti dell'impianto. Le strategie individuate vengono confrontate su tre piani distinti (energetico, economico e ambientale) ma interconnessi attraverso un insieme di indicatori dedicati, che vengono introdotti progressivamente con lo sviluppo di ciascuna analisi nei capitoli successivi.

La scelta di fondo del lavoro è impostare l'analisi come un imbuto. Tutte le configurazioni vengono prima valutate sul solo piano energetico, e soltanto quelle che superano questa selezione passano alle valutazioni economica e ambientale di dettaglio. Dietro questa impostazione ci sono due ragioni. La prima è evitare di approfondire configurazioni che già sul piano energetico si rivelano inadeguate. La seconda è far capire fin da subito il senso dei numeri che verranno presentati più avanti, affinché il lettore veda che ogni strategia portata avanti è stata scelta con criteri trasparenti.

Il prosieguo della tesi è articolato come segue.

- **Capitolo 3 – Caso studio.** Viene presentato il caso studio. Vengono descritti il complesso del Centro Antonianum dal punto di vista architettonico, geometrico e funzionale, il contesto climatico e i vincoli paesaggistici che hanno condizionato la scelta delle tecnologie applicabili.
- **Capitolo 4 – Definizione delle strategie e analisi parametrica energetica.** Vengono dimensionate le configurazioni da analizzare e ne viene impostata l'analisi parametrica energetica. La definizione parte dal rilievo degli spazi disponibili nel parcheggio del centro, prosegue con la scelta del modulo fotovoltaico e della tipologia di unità carport compatibile con le sue dimensioni (e del parcheggio), e si conclude con la costruzione di un insieme di configurazioni discretizzate per multipli di quindici pannelli, pari al numero di moduli ospitati da ciascuna unità carport. In una prima fase, l'analisi parametrica utilizza un approccio per scaling: la simulazione di un singolo pannello viene moltiplicata per il numero di moduli di ciascuna configurazione, ottenendo un primo quadro delle grandezze energetiche di interesse, ovvero produzione fotovoltaica, autoconsumo elettrico, PV fraction e Self-Consumption, esteso a tutte le combinazioni considerate. Le configurazioni selezionate vengono successivamente sottoposte ad un'analisi di sensibilità rispetto alla taglia dell'accumulo elettrochimico, finalizzata ad individuare per ciascuna la dimensione di batteria più appropriata. La scelta è effettuata sulla base di una valutazione del rendimento marginale dell'accumulo, ovvero a quanto ammonta il guadagno in punti percentuali su indicatori prestazionali chiave al cambiare della taglia, dopo una certa taglia i guadagni si riducono significativamente, suggerendo che ulteriori incrementi della taglia non siano giustificati.

- **Capitolo 5 – Risultati simulazioni energetiche.** Vengono presentati i risultati delle simulazioni dinamiche eseguite in EnergyPlus per le dieci configurazioni definite al capitolo precedente. Le cinque taglie di impianto fotovoltaico selezionate, ciascuna nelle due varianti, senza e con sistema di accumulo, vengono simulate non più per scaling di una simulazione di riferimento ma in modo diretto, modellando ogni configurazione con la sua effettiva dotazione di pannelli. Il modello orario di carica e scarica del sistema di accumulo, già introdotto al Capitolo 4, viene mantenuto in foglio elettronico e applicato ai nuovi profili di produzione. Per ciascuna configurazione si ricavano le grandezze energetiche annue (produzione fotovoltaica, autoconsumo, surplus immesso in rete, prelievi da rete) e i due indicatori prestazionali (PV fraction e Self-Consumption), che costituiscono il punto di partenza delle valutazioni ambientali ed economiche sviluppate ai capitoli successivi
- **Capitolo 6 – Valutazione ambientale.** Viene svolta la valutazione ambientale delle strategie selezionate dal filtro energetico. Le emissioni operative sono calcolate a partire dai consumi simulati, considerando sia uno scenario con fattore di emissione costante sia uno scenario con fattore variabile nel tempo, in modo tale da tenere conto della progressiva decarbonizzazione attesa del mix elettrico italiano. Le emissioni incorporate sono invece ricostruite per ciascun componente sulla base delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) reperite per ciascun elemento dell'impianto: il perimetro di analisi adottato è di tipo cradle to grave, includendo le fasi del ciclo di vita comprese tra A1 e C4 secondo la norma EN 15978:2011 [8], integrate, dove disponibili nelle EPD consultate, dalle fasi B relative all'uso e alle sostituzioni. La somma delle due componenti e il loro confronto con le emissioni annualmente evitate conducono al calcolo del Carbon Payback Time, indicatore che sintetizza il tempo necessario affinché il bilancio ambientale della strategia diventi favorevole.
- **Capitolo 7 – Valutazione economica.** Viene svolta la valutazione economica. Il CAPEX di ciascun componente è ottenuto attraverso un computo metrico estimativo basato sul Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione del Veneto [15], edizione 2025, che consente di considerare in modo dettagliato anche le lavorazioni necessarie alla realizzazione dell'opera. L'OPEX è invece costruito a partire dai prezzi medi delle bollette elettriche del centro, di cui sono stati resi disponibili i dati di consumo. L'analisi costi-benefici è sviluppata in due scenari di incentivazione, con e senza detrazione fiscale, e per ciascuna strategia nelle varianti con e senza accumulo, conducendo al calcolo di NPV, PBT e LCOE; quest'ultimo viene confrontato con il prezzo unitario dell'elettricità acquistata dalla rete, per verificare se l'energia autoprodotta risulta effettivamente competitiva.
- **Capitolo 8 – Analisi integrata economico-ambientale e indicatori energetici.** La valutazione economica e quella ambientale vengono ricomposte in un quadro economico-ambientale integrato. Alla CO₂ embodied e a quella evitata annualmente viene attribuito un prezzo ombra, ricavato dai valori di riferimento pubblicati dalla Banca Europea per gli Investimenti e opportunamente scalato per ogni anno [16], e tale costo viene incorporato nei flussi di cassa dell'analisi costi-benefici. Si ottengono in questo modo un NPV e un PBT "unificati", in cui esiti economici e ambientali sono espressi in un'unica unità di misura. Infine, si passa a valutare gli indicatori energetici, ovvero Energy Payback Time ed EROI, costruiti a partire dall'energia primaria incorporata nei componenti e da quella evitata grazie all'autoconsumo.

- **Capitolo 9 – Risultati complessivi.** Viene proposta una lettura d'insieme dei risultati ottenuti. Le strategie selezionate dal filtro energetico vengono confrontate sull'insieme degli indicatori utilizzati, individuando quelle che offrono la combinazione più favorevole tra autoconsumo, ritorno economico e tempi di rientro ambientale. Lo stesso capitolo ospita anche le analisi di sensibilità, condotte facendo variare il prezzo dell'elettricità, il CAPEX e il tasso di attualizzazione.
- **Capitolo 10 - Conclusioni.**

Sul piano degli strumenti, il flusso di lavoro si appoggia a due ambienti di calcolo. EnergyPlus, già introdotto al Paragrafo 1.3, è il motore impiegato per tutte le simulazioni dinamiche, sia nella fase di analisi parametrica sia in quella di analisi puntuale delle strategie selezionate. Microsoft Excel costituisce invece l'ambiente in cui sono implementate l'analisi costi-benefici, la contabilità delle emissioni e gli indicatori derivati, scelta dettata dalla necessità di mantenere completa trasparenza su ipotesi, parametri e formule. Le fonti dei dati di costo e di impatto ambientale sono dichiarate puntualmente all'interno dei rispettivi capitoli; vale tuttavia la pena anticipare già qui i due riferimenti principali, ovvero il Prezzario Regionale del Veneto per le voci economiche e le EPD dei produttori dei singoli componenti per quelle ambientali. Definito in questi termini il quadro metodologico, il capitolo successivo è dedicato alla descrizione del caso studio.

3 Caso studio

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione del caso studio su cui si basano le analisi sviluppate nel resto dell'elaborato. Vengono in primo luogo presentate le caratteristiche architettoniche e funzionali del Centro Antonianum di Padova, riportandone l'ubicazione, l'articolazione dei corpi di fabbrica e le destinazioni d'uso. Si introducono successivamente le condizioni climatiche del sito, che costituiscono il riferimento per le simulazioni dinamiche presentate nei capitoli successivi. Si discutono, infine, i vincoli paesaggistici che gravano sul complesso e le conseguenze che essi comportano sulla scelta delle tecnologie di decarbonizzazione applicabili.

3.1. Descrizione Centro Antonianum Padova

L'oggetto del presente elaborato è il complesso immobiliare Centro Antonianum, situato nel comune di Padova. L'edificio è orientato principalmente lungo l'asse est-ovest e sorge in una posizione di pregio storico-urbanistico. Si affaccia direttamente su Prato della Valle, una delle piazze più grandi d'Europa, e si trova a poca distanza dalla Basilica di Santa Giustina. Un contesto urbano di questo tipo, ai fini dell'analisi energetica e di fattibilità, impone di fare i conti con precisi vincoli paesaggistici, che influenzano la scelta delle tecnologie di decarbonizzazione applicabili, come il tipo di integrazione fotovoltaica.

Il Centro Antonianum, di proprietà della Compagnia di Gesù, è un complesso monumentale edificato tra il XIX secolo e gli inizi del XX. Nato originariamente come collegio maschile, è caratterizzato da una struttura in muratura mista, con orizzontamenti coerenti con l'epoca di costruzione. Negli ultimi anni è stato oggetto di una parziale riqualificazione e rifunzionalizzazione.

Il complesso si articola su un volume totale di 9'151 m³, di cui 7'600 m³ riscaldati, su una superficie totale di 3'739 m², di cui 2'538 m² destinati ad ambienti riscaldati.



Figura 1 - Vista Centro Antonianum dall'alto. Fonte: Google Maps

Il corpo centrale comprende un'area di circa 667 m² ed è composto al piano terra da sale riunioni e da una sala tv con un bar, mentre al primo piano si trovano una chiesa e delle aule.

Quello a est, invece, ha una forma quadrata, con un cortile interno al centro, e si sviluppa su tre piani, uno dei quali seminterrato. Quest'ultimo, di circa 500 m², ospita alcuni magazzini, una taverna e la sala impianti. Il piano terra, di 49.94 m², accoglie gli alloggi sul lato nord, gli uffici e la direzione a ovest, e la cucina con la sala da pranzo e il soggiorno a est. L'ultimo piano, di 291.39 m², comprende la sacrestia e diverse residenze. Sommando i tre livelli, la superficie complessiva del corpo è di circa 1'282 m².

Per ultimo, il corpo a ovest, con un'area di circa 1'700 m², è caratterizzato al piano terra da un atrio con alcuni uffici e dalla cappella con la sacrestia. Al primo piano, invece, si trova un auditorium e delle residenze per studenti come al secondo piano.

3.2. Clima di riferimento

L'analisi energetica condotta in EnergyPlus richiede un input climatico rappresentativo del sito. Per il presente lavoro è stato utilizzato il file ITA_VN_Padova_AP_160950_TMYx_2009-2023 [17], distribuito da Climate.OneBuilding.org. Il dataset è costruito secondo la metodologia TMYx (Typical Meteorological Year extended), che assembla per ciascun mese dell'anno il mese più rappresentativo all'interno di un periodo di osservazione.

Il periodo di osservazione coperto è il 2009-2023, dal quale sono stati selezionati 13 anni utili per la composizione del TMYx. La stazione meteorologica di riferimento è quella di Padova Aeroporto (WMO 160950), posta a 45.40 °N, 11.85 °E ed a 14 m s.l.m.

Padova ricade in Zona Climatica E, caratterizzata da inverni freddi ed estati calde e da un'escursione termica annua marcata. I dati orari del file evidenziano un fabbisogno termico significativo tanto in regime invernale quanto in regime estivo. Per quanto riguarda la temperatura del suolo, il file riporta i valori medi mensili a tre profondità di riferimento. A 0.5 m di profondità la temperatura varia da un minimo di 5.50 °C a gennaio ad un massimo di 24.75 °C a luglio; a 2 m i valori estremi diventano 8.00 °C a gennaio e 22.21 °C a luglio; a 4 m la variazione si riduce ulteriormente, fra 10.58 °C a gennaio e 19.60 °C a luglio.

3.3. Vincoli paesaggistici e implicazioni progettuali

La posizione del Centro Antonianum su Prato della Valle, in prossimità della Basilica di Santa Giustina e all'interno del centro storico di Padova, comporta un regime di tutela paesaggistica che condiziona in modo sostanziale le possibilità di intervento sull'involucro edilizio. Il complesso è inserito in un contesto sottoposto a vincolo ai sensi del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004) [18], che impone di salvaguardare l'integrità visiva del fronte storico e la continuità delle coperture in coppi tipiche dell'edilizia padovana di pregio.

Tale quadro normativo e di tutela ha comportato due ricadute dirette sulla definizione dell'intervento di decarbonizzazione. In primo luogo, l'installazione di moduli fotovoltaici in copertura, seppur tecnicamente la soluzione più immediata e semplice sotto il profilo energetico, è stata esclusa per ragioni di compatibilità paesaggistica: la presenza dei pannelli sulle falde avrebbe inciso in modo significativo sulla percezione visiva del complesso dal Prato della Valle e dagli spazi pubblici adiacenti. In secondo luogo, è stata scartata anche la possibilità di realizzare un campo fotovoltaico a terra sull'area verde interna al lotto, sia per le medesime ragioni di tutela del contesto, sia per le complicazioni operative e di sicurezza associate alla

posa di una struttura fissa su un'area attualmente usata come prato e parte integrante della corte interna del complesso.

Escluse queste due opzioni, l'attenzione si è concentrata sull'area dei parcheggi esistenti situata sul fronte sud-ovest del complesso. Quest'area, già urbanizzata e funzionalmente destinata alla sosta degli autoveicoli, consente l'installazione di strutture di tipo carport, in grado di ospitare i moduli fotovoltaici al di sopra degli stalli senza compromettere la fruibilità degli spazi e con un impatto visivo contenuto rispetto al contesto storico circostante. La descrizione dei parcheggi disponibili e il dimensionamento delle configurazioni di carport sono trattati nel Capitolo 4.

4 Definizione delle strategie e analisi parametrica energetica

A partire dal caso studio descritto nel Capitolo 3, il presente capitolo definisce le configurazioni di impianto fotovoltaico a carport analizzate in seguito e imposta il metodo per valutarne il comportamento energetico. Si parte dall'individuazione delle aree disponibili e dalla scelta dei componenti, si costruiscono le configurazioni selezionandole con un'analisi parametrica per scaling e si conclude con il dimensionamento dell'accumulo associato a ciascuna di esse.

4.1. Spazi disponibili e scelta dei componenti

Come anticipato al Paragrafo 3.3, i vincoli paesaggistici che gravano sul Centro Antonianum hanno comportato l'individuazione dell'area dei parcheggi situata a sud del lotto come unico ambiente compatibile con l'installazione dell'impianto fotovoltaico. La definizione delle configurazioni da analizzare è partita pertanto dal rilievo geometrico di tale area, eseguito su immagini satellitari di Google Maps [19], ed è proseguita con la selezione dei componenti dell'impianto: il modulo fotovoltaico, la struttura di sostegno a carport e il sistema di accumulo elettrochimico. Il rilievo ha messo in evidenza la presenza di tre aree di parcheggio adiacenti tra loro (Figura 2).



Figura 2 - Misure Parcheggi. Fonte: Elaborazione di foto aerea di Google Maps

La prima, più lunga, misura 41.5 m; la seconda, posta al di sotto, è suddivisa in due segmenti lunghi rispettivamente 35 m e 38 m; la terza, di dimensioni più contenute e collocata in posizione laterale, è lunga 18 m. Tutte le aree presentano una larghezza utile di circa 5.2 m. La prima è risultata l'opzione di riferimento per l'installazione dei carport, sia per la lunghezza sia per l'orientamento favorevole alla captazione solare.

La selezione del modulo fotovoltaico ha privilegiato modelli di taglia elevata, allo scopo di contenere il numero complessivo di pannelli necessari e, di conseguenza, l'incidenza degli oneri associati al Balance of System, ovvero alle componenti accessorie come cablaggi, sezionatori, quadri elettrici e oneri di posa, il cui costo unitario risulta in genere più sensibile al numero che alla potenza dei moduli. La scelta è ricaduta sul pannello monocristallino FuturaSun SilkNova FU 570 MV [20], di produzione italiana, caratterizzato da una potenza nominale di 570 W e da dimensioni unitarie pari a $2'278 \times 1'134 \times 35$ mm. La preferenza per un produttore nazionale ha inoltre garantito la disponibilità di una documentazione ambientale conforme agli standard europei, aspetto rilevante ai fini delle valutazioni LCA presentate nel Capitolo 6.

FuturaSun SilkNova FU 570 MV	
Caratteristiche elettriche (STC)	
Pmax	570 W
Efficienza	22.00 %
Voc	50.72 V
Isc	14.32 A
Vmpp	42.05 V
Impp	13.56 A
Coeff. T di Pmax	-0.29 %/°C
Caratteristiche meccaniche	
Dimensioni	2'278 × 1'134 × 35 mm
Peso	28.2 kg
Celle	144 n-type half-cut
Tens. max sistema	1'500 V

Figura 3 - Pannello SilkNova 570W e scheda tecnica. Fonte: FuturaSun

La struttura di sostegno, individuata nella tipologia carport, è venduta da AZ Solar [21]. Essa è di costruzione interamente in alluminio, caratterizzata da una larghezza di 6.854 m e da una profondità di 5.9 m. La struttura presenta un angolo di inclinazione (tilt) pari a 10° e ospita su ciascuna unità quindici moduli fotovoltaici, per una potenza installata di 8.55 kWp per unità carport. Tale modularità costituisce il riferimento dimensionale di base su cui sono state costruite le configurazioni discusse nel Paragrafo 4.2. Definita la dimensione della singola unità carport, è possibile quantificare la capacità ricettiva delle aree di parcheggio rilevate. La prima area, lunga 41.5 m, consente l'installazione di un massimo di sei unità affiancate, con un'occupazione complessiva di 41.1 m e un margine residuo di circa 40 cm. Le configurazioni a sette e otto unità, considerate nell'analisi parametrica per estendere lo spettro di scenari valutati, presuppongono l'estensione sull'area immediatamente contigua, occupata in parte dal parcheggio da 18 m e in parte da un tratto della viabilità interna, della quale viene ipotizzata una ricollocazione in posizione perimetrale rispetto all'impianto.



Figura 4 - Unità carport. Fonte: AZ Solar Shop

La scelta del sistema di accumulo elettrochimico è stata orientata, oltre che da considerazioni di natura tecnica, dalla disponibilità della documentazione ambientale necessaria all'analisi del ciclo di vita. Il riferimento è stato individuato nelle batterie al litio prodotte da Fox ESS [22], in particolare nella serie ECS2900, sistema modulare costituito da moduli base da 2.88 kWh combinabili in pila nelle configurazioni da H2 a H7, ai quali corrispondono capacità comprese tra 5.76 e 20.16 kWh. La preferenza per questo prodotto è motivata dalla disponibilità di una Dichiarazione Ambientale di Prodotto completa, condizione che ha consentito di costruire LCA dell'accumulo con dati primari forniti dal produttore. Le taglie effettivamente associate a ciascuna configurazione, individuate sulla base di un'analisi di sensibilità, sono discusse al Paragrafo 4.4.



Figura 5 - Batteria H2 e H7. Fonte: Fox ESS

4.2. Analisi parametrica per scaling

Definita la geometria del parcheggio di riferimento e individuate le componenti dell'impianto, il passo successivo consiste nello stabilire quali tra le possibili configurazioni, ottenute aggiungendo unità carport in numero progressivo, meritano di essere approfondite nelle analisi energetiche, economiche e ambientali sviluppate nei capitoli successivi. Per circoscrivere sin da subito lo spettro delle configurazioni utili, separando quelle che possono dare un contributo apprezzabile alla copertura del fabbisogno da quelle in cui il contributo è chiaramente trascurabile, è stata condotta in via preliminare un'analisi parametrica per scaling. Una singola simulazione dinamica in EnergyPlus, riferita a un solo modulo, è stata usata come base per

ricostruire per via moltiplicativa il comportamento energetico annuo delle configurazioni, da una a nove unità carport.

L'utilizzo dello scaling risponde a una motivazione di natura pratica: riservare le simulazioni dinamiche di dettaglio alle sole configurazioni che, già a livello esplorativo, mostrano un comportamento energetico promettente, evitando di investire tempo di modellazione su configurazioni che lo screening segnala come prive di rilevanza ai fini delle analisi successive.

La simulazione di riferimento è stata impostata in EnergyPlus inserendo, nella sezione Generator:PVWatts, le caratteristiche del modulo FuturaSun SilkNova FU 570 MV scelto al Paragrafo 4.1: potenza nominale di 570 W e angolo di inclinazione di 10° rispetto al piano orizzontale. Tra gli output del modello sono state richieste, sul passo orario annuo, le grandezze energetiche di interesse, ovvero la produzione fotovoltaica del singolo modulo e l'autoconsumo che ne deriva sulla base del profilo di fabbisogno dell'edificio.

I risultati della simulazione sono stati successivamente esportati in foglio elettronico, dove sono stati calcolati i due indicatori prestazionali (PV fraction e Self-Consumption) nelle condizioni di riferimento, ovvero con un singolo modulo fotovoltaico. Le grandezze energetiche ricavate sono state poi moltiplicate per multipli di quindici (il numero di moduli ospitati da una singola unità carport), così da ricostruire il comportamento energetico annuo di ciascuna configurazione, da uno a nove unità carport, ovvero da 15 a 135 pannelli. Per ciascuna configurazione sono state ricavate tre grandezze energetiche e due indicatori prestazionali, riportati nella Tabella 1 e qui di seguito definiti.

Le tre grandezze energetiche di base sono il fabbisogno elettrico annuo dell'edificio, costante in tutte le configurazioni e pari a 54'643 kWh, la produzione fotovoltaica annua dell'impianto e l'autoconsumo, ovvero la quota di tale produzione effettivamente utilizzata dall'edificio nelle ore di coincidenza tra produzione e fabbisogno.

A partire da queste grandezze si definiscono i due indicatori prestazionali utilizzati lungo l'intero elaborato.

La PV fraction, rapporto tra autoconsumo e fabbisogno elettrico annuo, misura il grado di indipendenza dell'edificio dalla rete elettrica nazionale, ovvero la quota di fabbisogno coperta direttamente dall'autoproduzione.

La Self-Consumption, rapporto tra autoconsumo e produzione fotovoltaica, misura il grado di utilizzo effettivo dell'impianto installato, ovvero la frazione di energia generata che viene impiegata in loco anziché ceduta alla rete.

I due indicatori, considerati congiuntamente, forniscono una lettura compatta del comportamento energetico di ciascuna configurazione: il primo riflette il punto di vista dell'edificio, il secondo riflette il punto di vista dell'impianto.

I risultati dell'analisi parametrica sono riassunti nella Tabella 1, in cui si riportano, per ciascuna configurazione, le grandezze energetiche e gli indicatori prestazionali.

Tabella 1 - Risultati dell'analisi parametrica per scaling

n° Pannelli	PV Area [m²]	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self consumption [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
1	2.58	54'643	681	611	1%	90%
15	38.7	54'643	10'218	8'683	16%	85%
30	77.5	54'643	20'436	16'070	29%	79%
45	116.2	54'643	30'655	21'106	39%	69%
60	155.0	54'643	40'873	24'427	45%	60%
75	193.7	54'643	51'091	26'647	49%	52%
90	232.5	54'643	61'309	28'075	51%	46%
105	271.2	54'643	71'527	28'979	53%	41%
120	310.0	54'643	81'745	29'637	54%	36%
135	348.7	54'643	91'964	30'126	55%	33%

La lettura della tabella e dei relativi andamenti, sulla base dei quali viene definito l'intervallo di configurazioni da approfondire nelle analisi successive, è sviluppata al Paragrafo seguente.

4.3. Configurazioni considerate

L'osservazione della Tabella 1 presentata al Paragrafo precedente consente già una prima lettura del comportamento energetico delle configurazioni esaminate. Si nota in particolare che, fino a tre unità carport, la PV fraction si mantiene al di sotto del 40% (rispettivamente 16%, 29% e 39%), restituendo un livello di indipendenza dalla rete elettrica nazionale non sufficiente per parlare di una vera strategia di decarbonizzazione dell'edificio. Per leggere in modo più immediato gli andamenti delle grandezze e degli indicatori al variare del numero di pannelli installati, e per individuare con maggiore sicurezza le configurazioni meritevoli di approfondimento, sono stati costruiti due grafici di sintesi, riportati nelle figure qui di seguito.

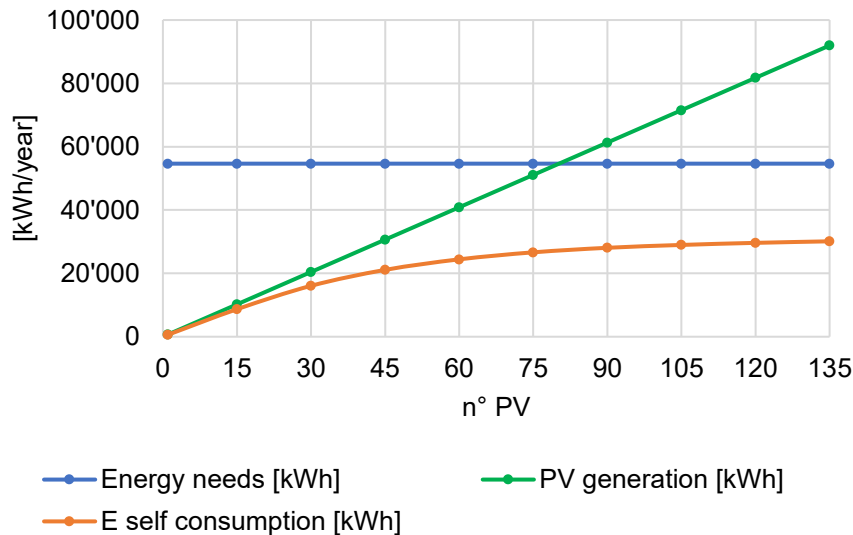


Figura 6 - Andamento dei flussi energetici al variare del numero dei pannelli fotovoltaici

Il primo grafico (Figura 6) mette in relazione il numero di pannelli installati con le tre grandezze energetiche annue: produzione fotovoltaica, fabbisogno elettrico dell'edificio e autoconsumo. La produzione fotovoltaica (linea arancione) presenta un andamento lineare crescente, coerente con la natura moltiplicativa dell'analisi parametrica. Il fabbisogno elettrico (linea grigia),

costante e pari a 54'643 kWh, è rappresentato da una retta orizzontale di riferimento. L'autoconsumo, invece, cresce inizialmente con la stessa pendenza della produzione fotovoltaica, a indicare che, nelle configurazioni più piccole, l'edificio utilizza istantaneamente la quasi totalità dell'energia prodotta. La pendenza diventa progressivamente meno marcata al crescere della taglia, e la curva tende a saturare attorno ai 30'000 kWh annui. La ragione di questo comportamento è fisica. Senza un sistema di accumulo, l'autoconsumo avviene solo nelle ore in cui produzione e fabbisogno si sovrappongono, e questa sovrapposizione pone un tetto strutturale all'autoconsumo. Quel tetto non si supera aggiungendo altri pannelli. Oltre una certa taglia, l'energia in eccesso viene immessa in rete sotto forma di surplus, rappresentato graficamente dalla distanza crescente tra la curva della produzione fotovoltaica e quella dell'autoconsumo. È proprio questo limite che l'introduzione di un sistema di accumulo elettrochimico permette di superare, spostando nel tempo l'energia prodotta in eccesso e rendendola disponibile nelle ore in cui produzione e fabbisogno non coincidono.

L'osservazione di questo grafico permette inoltre di individuare un punto di interesse particolare: l'intersezione tra la curva di produzione fotovoltaica e la retta del fabbisogno, che si colloca tra le configurazioni a cinque e sei unità carport. Tale intersezione rappresenta il punto in cui la produzione annua dell'impianto eguaglia il fabbisogno annuo dell'edificio e individua, in prima approssimazione e in assenza di accumulo, l'intervallo di taglie più equilibrato dal punto di vista del dimensionamento

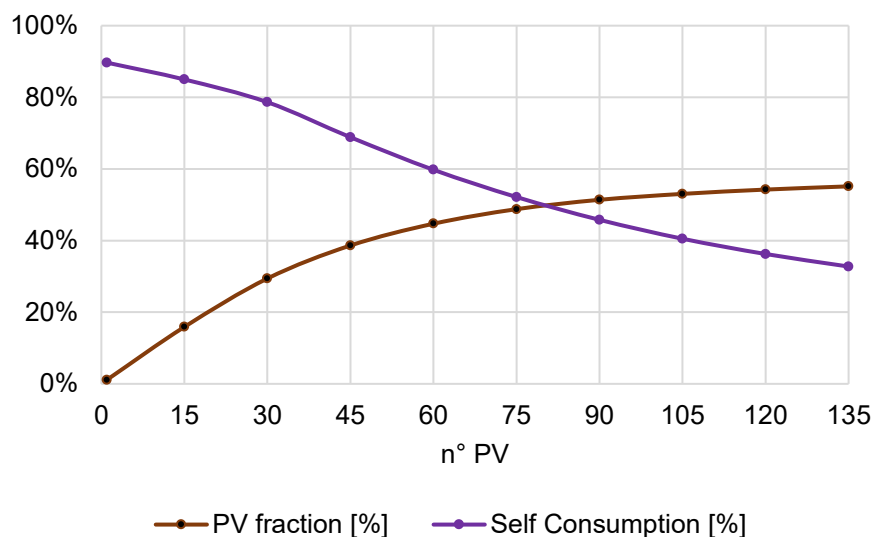


Figura 7 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare del numero di pannelli fotovoltaici

Il secondo grafico (Figura 7) rappresenta invece l'andamento dei due indicatori prestazionali, PV fraction e Self-Consumption, al variare del numero di pannelli installati. La Self-Consumption parte da valori elevati (85% per la singola unità carport) e decresce in modo monotono al crescere della taglia dell'impianto, riflettendo il fatto che l'energia prodotta in eccesso non utilizzabile in autoconsumo aumenta più rapidamente della produzione totale. La PV fraction, all'opposto, cresce monotonamente, ma tende a saturare verso il 55%, coerentemente con quanto già osservato nel primo grafico, proprio perché l'autoconsumo è limitato dal tetto descritto in precedenza. Anche in questo grafico le due curve si incrociano in corrispondenza dell'intervallo tra cinque e sei unità carport, individuando lo stesso punto di equilibrio già emerso dalla lettura delle grandezze energetiche.

Alla luce della Tabella 1 del Paragrafo precedente e delle considerazioni emerse dai due grafici, l'analisi è stata circoscritta alle configurazioni comprese tra quattro e otto unità carport. Le due configurazioni inferiori sono state escluse perché restituiscono livelli di indipendenza dalla rete troppo modesti per giustificare l'intervento come strategia di decarbonizzazione, indipendentemente dall'eventuale aggiunta di un sistema di accumulo. La configurazione a nove unità carport è stata anch'essa esclusa, per due ragioni concorrenti. Sul piano energetico, il passaggio da otto a nove unità carport produce un guadagno di PV fraction di un solo punto percentuale (dal 54% al 55%), a fronte di un incremento di produzione fotovoltaica di oltre 10'000 kWh annui, di cui meno di 500 kWh contribuiscono all'autoconsumo, mentre la parte restante si riversa in rete come surplus, valorizzato economicamente a un prezzo unitario sensibilmente inferiore rispetto a quello dell'energia autoconsumata.

Ciascuna delle cinque configurazioni selezionate viene successivamente considerata in due varianti: una prima variante in cui l'impianto fotovoltaico opera senza sistema di accumulo, immettendo in rete l'energia in eccesso, e una seconda variante in cui all'impianto è associato un accumulo elettrochimico, dimensionato secondo i criteri discussi al Paragrafo successivo. Si ottengono in questo modo dieci configurazioni complessive, oggetto delle analisi sviluppate nei capitoli successivi.

4.4. Dimensionamento dell'accumulo per rendimento marginale

Il paragrafo si apre con la descrizione dell'approccio seguito per individuare la taglia di batteria più appropriata, a cui fa seguito l'analisi dei cinque casi considerati, uno per ciascuna configurazione.

4.4.1. Approccio

Individuate le configurazioni di impianto fotovoltaico oggetto delle analisi successive, lo step conclusivo della definizione dell'impianto consiste nell'assegnare a ciascuna di esse la taglia di accumulo elettrochimico più appropriata. A differenza del numero di unità carport, la cui scelta dipende direttamente da considerazioni geometriche e dalla modularità del prodotto, la taglia dell'accumulo non è vincolata da un criterio fisico univoco: aumentare la capacità installata produce sempre un incremento dell'autoconsumo, ma con guadagni progressivamente decrescenti. Esiste pertanto, per ciascuna configurazione, una soglia di capacità oltre la quale il beneficio marginale di un'ulteriore espansione diventa modesto e non più coerente con l'onere economico associato. L'obiettivo del presente paragrafo è individuare tale soglia, applicando un criterio di rendimento marginale alle simulazioni condotte al variare della capacità del sistema di accumulo.

L'analisi è stata condotta in foglio elettronico, sviluppando ulteriormente la stessa elaborazione introdotta al Paragrafo 4.2. Ai profili orari annui già ricavati per ciascuna configurazione viene applicato un modello orario semplificato del sistema di accumulo, in cui a ciascuna ora dell'anno la batteria viene caricata con la quota di produzione fotovoltaica eccedente il fabbisogno istantaneo dell'edificio e scaricata, viceversa, nelle ore in cui il fabbisogno supera la produzione, tenendo conto delle efficienze di conversione e dello stato di carica al passo precedente. Il modello è stato applicato in modo iterativo facendo variare la capacità nominale dell'accumulo, in modo da ricavare, per ciascuna taglia testata, le grandezze energetiche annue (autoconsumo, surplus immesso in rete, prelievo dalla rete) e i due indicatori prestazionali.

La scelta di sviluppare l'analisi in foglio elettronico, anziché eseguire una simulazione dinamica dedicata in EnergyPlus per ciascuna delle taglie di accumulo testate, è stata dettata da ragioni di efficienza computazionale: la fase di dimensionamento richiede l'esplorazione di un numero elevato di taglie per ciascuna delle cinque configurazioni, operazione che diventerebbe lunga se eseguita ogni volta ricaricando e rieseguendo il modello dinamico. Le configurazioni effettivamente selezionate al termine di questa fase, ovvero le cinque configurazioni con la taglia di accumulo individuata come ottimale, sono successivamente sottoposte a una simulazione nativa in EnergyPlus, come descritto al Capitolo 5, in cui il sistema fotovoltaico viene modellato con la sua effettiva configurazione di pannelli. Il modello orario di carica e scarica del sistema di accumulo viene mantenuto in foglio elettronico anche nel Capitolo 5, ma viene applicato a un profilo di produzione fotovoltaica più accurato rispetto a quello ottenuto per scaling al presente paragrafo, in modo che le analisi economiche e ambientali si appoggino su valori energetici di maggiore precisione.

Le taglie di accumulo testate variano tra 0 e 80 kWh con passo costante di 10 kWh, esteso fino a 140 kWh per le tre configurazioni più grandi (sei, sette e otto unità carport), nelle quali la curva di autoconsumo non si era ancora stabilizzata a 80 kWh. Tali taglie nominali non corrispondono esattamente alle taglie commerciali del sistema FoxESS ECS2900 introdotto al Paragrafo 4.1, costruito per armadi modulari delle versioni H2-H7 con capacità unitarie comprese tra 5.76 e 20.16 kWh: in fase di realizzazione, le taglie individuate dall'analisi verranno arrotondate alle taglie commerciali installabili più prossime, ottenute affiancando un numero intero di armadi H7 da 20.16 kWh, eventualmente integrati da un armadio di taglia inferiore per le configurazioni più piccole

Il rendimento marginale del sistema di accumulo è stato valutato osservando la variazione degli indicatori prestazionali al passaggio da una taglia di accumulo alla successiva. Per ogni step di 10 kWh di capacità aggiunta si è quantificato di quanti punti percentuali si incrementa la PV fraction, e specularmente di quanto cresce la Self-Consumption. La taglia individuata come ottimale per ciascuna configurazione corrisponde al valore oltre il quale tale guadagno si riduce rispetto allo step immediatamente precedente: la riduzione è assunta come segnale che la curva si sta avvicinando alla saturazione e che il beneficio aggiuntivo derivante da ulteriori incrementi di capacità non giustifica più l'investimento.

I risultati ottenuti per le cinque configurazioni vengono presentati di seguito. Per ciascuna di esse si riportano una tabella con i valori delle grandezze energetiche e degli indicatori al variare della taglia di accumulo testata, e una coppia di grafici, in cui sono rappresentati rispettivamente l'andamento delle grandezze energetiche annue (Energy Flows) e l'andamento dei due indicatori prestazionali (Performance Indicators) al variare della capacità dell'accumulo.

4.4.2. Caso 4 unità

Tabella 2 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport

Taglia Batteria	PV Area [m ²]	Energy needs [kWh]	E Self consumption [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
0	155.0	54'643	24'427	16'446	30'216	45%	60%
10	155.0	54'643	27'246	13'478	27'397	50%	67%
20	155.0	54'643	29'230	11'390	25'413	53%	72%
30	155.0	54'643	30'933	9'597	23'710	57%	76%
40	155.0	54'643	32'304	8'154	22'339	59%	79%
50	155.0	54'643	33'232	7'177	21'410	61%	81%
60	155.0	54'643	33'809	6'569	20'833	62%	83%
70	155.0	54'643	34'140	6'221	20'502	62%	84%
80	155.0	54'643	34'306	6'047	20'337	63%	84%

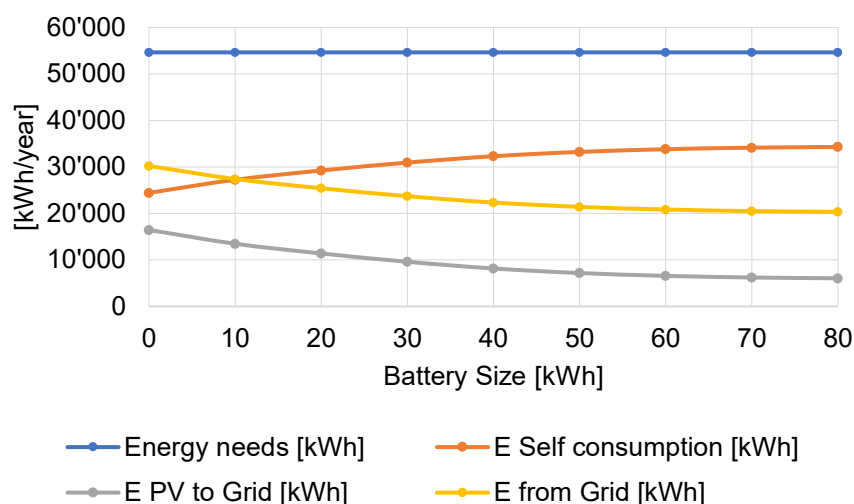


Figura 8 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport

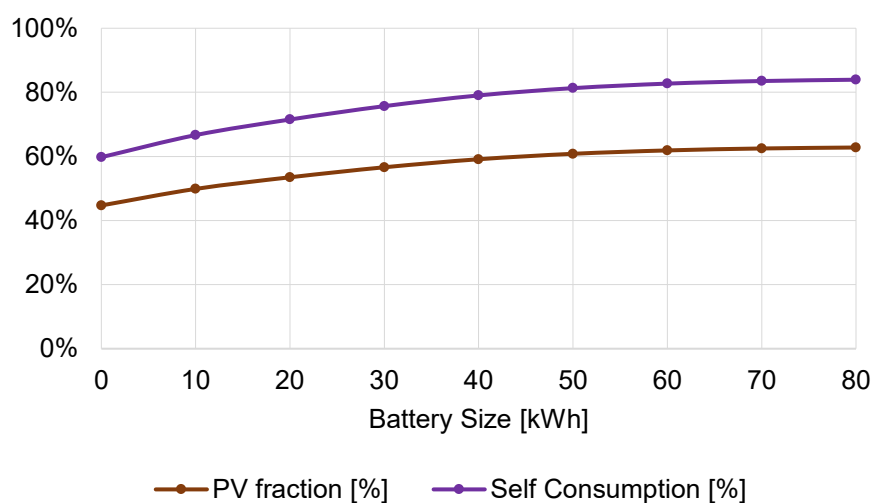


Figura 9 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport

Senza alcun sistema di accumulo, la configurazione a quattro unità carport restituisce un autoconsumo annuo di 24'427 kWh, pari al 45% del fabbisogno elettrico dell'edificio, e un surplus immesso in rete di 16'445 kWh. L'introduzione progressiva dell'accumulo elettrochimico, riportata nella Tabella 2, produce un incremento dell'autoconsumo via via meno marcato al crescere della capacità installata. Il grafico dei flussi energetici (Figura 8) evidenzia con chiarezza tale comportamento: la curva dell'autoconsumo cresce rapidamente nei primi step di accumulo, fino a stabilizzarsi attorno ai 34'000 kWh; specularmente, la curva del surplus in rete decresce, mentre il prelievo dalla rete si attenua progressivamente. Il grafico degli indicatori prestazionali (Figura 9) mostra che la PV fraction sale dal 45% al 63% portando l'accumulo a 80 kWh, mentre la Self-Consumption cresce dal 60% all'84% nel medesimo intervallo.

L'osservazione dei guadagni in punti percentuali della PV fraction tra taglie successive consente di individuare il punto di rallentamento della curva: tra 20 e 30 kWh la PV fraction guadagna ancora 4 punti percentuali (dal 53% al 57%), mentre tra 30 e 40 kWh il guadagno si dimezza a 2 punti (dal 57% al 59%) e si mantiene a questo ritmo o addirittura si riduce ancora per tutti gli step successivi. Lo stesso accade per la Self-Consumption che passa da un guadagno di 4 punti percentuali (tra 20 e 30 kWh) a un guadagno di 3 punti e dopo a uno di 2 punti.

Si individua pertanto in 30 kWh la taglia di accumulo più appropriata per questa configurazione a quattro unità carport: la PV fraction conseguente è del 57%, la Self-Consumption a 76% e l'autoconsumo di 30'933 kWh.

4.4.3. Caso 5 unità

Tabella 3 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport

Taglia Batteria	PV Area [m ²]	Energy needs [kWh]	E Self consumption [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
0	193.7	54'643	26'647	24'444	27'996	49%	52%
10	193.7	54'643	29'772	21'154	24'871	54%	58%
20	193.7	54'643	32'150	18'652	22'493	59%	63%
30	193.7	54'643	34'299	16'389	20'344	63%	67%
40	193.7	54'643	36'174	14'416	18'469	66%	71%
50	193.7	54'643	37'679	12'831	16'964	69%	74%
60	193.7	54'643	38'691	11'766	15'952	71%	76%
70	193.7	54'643	39'277	11'149	15'366	72%	77%
80	193.7	54'643	39'531	10'882	15'112	72%	77%

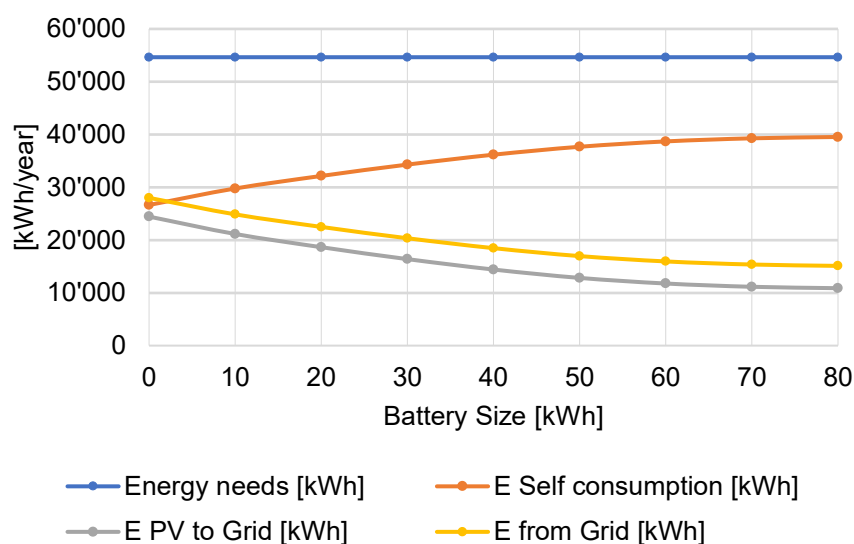


Figura 10 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport

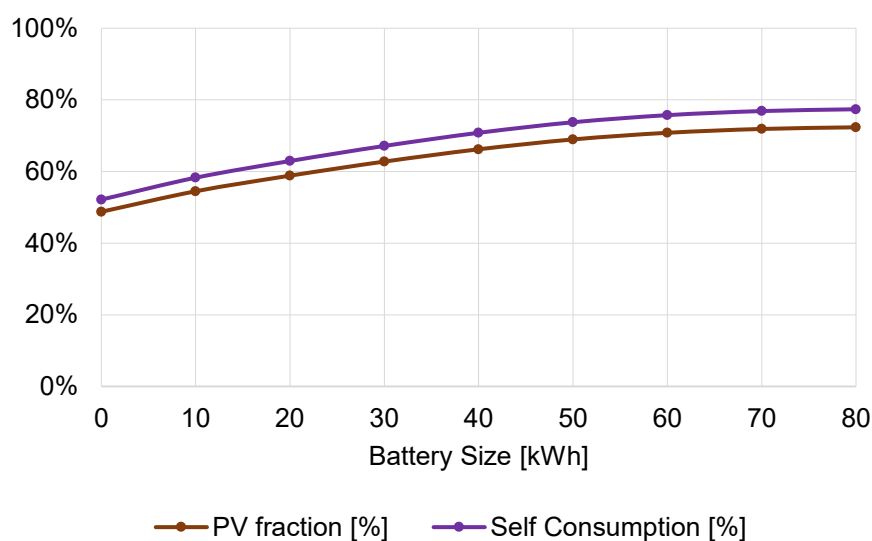


Figura 11 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport

Senza accumulo, la configurazione a cinque unità carport raggiunge un autoconsumo di 26'647 kWh, pari al 49% del fabbisogno, con un surplus di 24'444 kWh. La maggior produzione fotovoltaica rispetto alla configurazione precedente offre più energia da intercettare con l'accumulo e di conseguenza l'effetto della batteria si manifesta su un intervallo di capacità più ampio.

Il grafico dei flussi energetici (Figura 10) mostra una curva di autoconsumo che cresce in modo significativo fino a 40-50 kWh di accumulo, raggiungendo valori prossimi ai 39'000 kWh, prima di rallentare; specularmente la curva del surplus si abbassa con ritmo continuo.

Il grafico degli indicatori prestazionali (Figura 11) evidenzia che la PV fraction sale dal 49% al 72% nell'intervallo testato, mentre la Self-Consumption cresce dal 52% al 77%.

L'esame dei guadagni in punti percentuali della PV fraction restituisce il punto di rallentamento in corrispondenza dei 40 kWh: tra 30 e 40 kWh la PV fraction guadagna ancora 3-4 punti, mentre tra 50 e 60 kWh il guadagno si riduce a 2 punti e prosegue calando negli step successivi. Per la Self-Consumption invece si passa da un guadagno di 4 punti, poi 3 ed infine 2.

La taglia individuata come ottimale è pertanto di 40 kWh: la PV fraction conseguente è del 66%, la Self-Consumption del 71% e l'autoconsumo di 36'174 kWh.

4.4.4. Caso 6 unità

Tabella 4 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport

Taglia Batteria	PV Area [m ²]	Energy needs [kWh]	E Self consumption [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
0	232.5	54'643	28'075	33'234	26'567	51%	46%
10	232.5	54'643	31'354	29'783	23'289	57%	51%
20	232.5	54'643	34'068	26'926	20'575	62%	56%
30	232.5	54'643	36'528	24'336	18'115	67%	60%
40	232.5	54'643	38'787	21'958	15'855	71%	63%
50	232.5	54'643	40'682	19'964	13'961	74%	66%
60	232.5	54'643	42'074	18'498	12'568	77%	69%
70	232.5	54'643	42'865	17'666	11'778	78%	70%
80	232.5	54'643	43'309	17'198	11'334	79%	71%
100	232.5	54'643	43'811	16'670	10'832	80%	71%
120	232.5	54'643	44'075	16'392	10'567	81%	72%
140	232.5	54'643	44'259	16'199	10'384	81%	72%

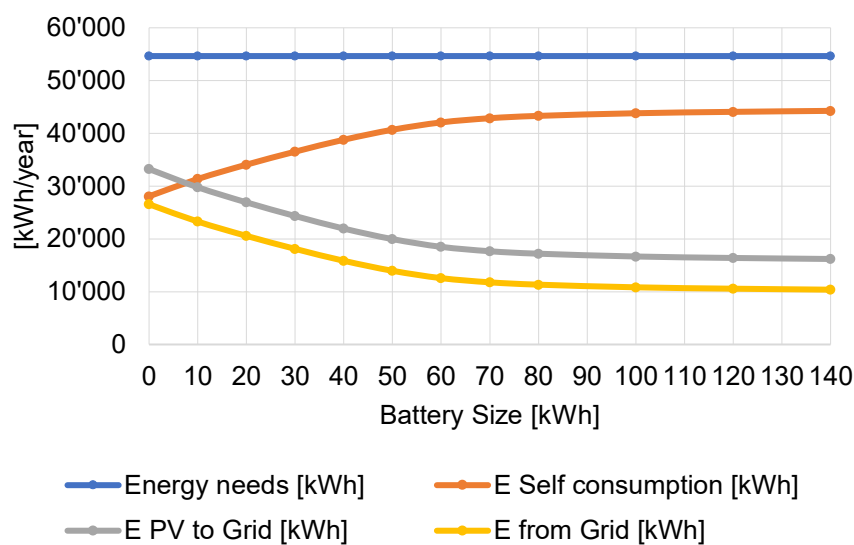


Figura 12 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport

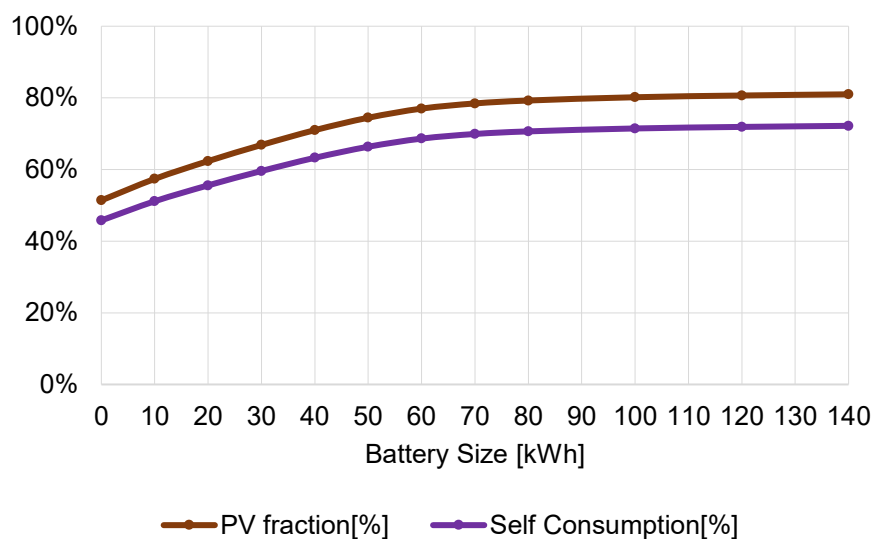


Figura 13 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport

Per la configurazione a sei unità carport l'esplorazione delle taglie di accumulo è stata estesa fino a 140 kWh, in quanto a 80 kWh la curva di autoconsumo non si era ancora stabilizzata. Senza accumulo, l'autoconsumo è di 28'075 kWh (51% del fabbisogno) e il surplus di 33'234 kWh.

Il grafico dei flussi energetici (Figura 12) mostra una curva di autoconsumo che cresce con ritmo via via decrescente, attestandosi attorno ai 44'000 kWh a 140 kWh di accumulo.

Il grafico degli indicatori prestazionali (Figura 13) evidenzia una PV fraction che sale fino all'81% e una Self-Consumption che raggiunge il 72% nel medesimo intervallo.

L'analisi della variazione della PV fraction tra step successivi colloca il punto di rallentamento a 60 kWh: tra 50 e 60 kWh la PV fraction guadagna ancora 3 punti, mentre tra 60 e 70 kWh il guadagno scende a 1 punto come per tutti gli step successivi. Lo stesso si verifica per la Self-Consumption.

La taglia individuata come ottimale è pertanto di 60 kWh: la PV fraction conseguente è del 77%, la Self-Consumption del 69% e l'autoconsumo di 42'074 kWh.

4.4.5. Caso 7 unità

Tabella 5 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport

Taglia Batteria	PV Area [m²]	Energy needs [kWh]	E Self consumption [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
0	271.2	54'643	28'979	42'548	25'663	53%	41%
10	271.2	54'643	32'308	39'044	22'335	59%	45%
20	271.2	54'643	35'190	36'010	19'453	64%	49%
30	271.2	54'643	37'928	33'128	16'714	69%	53%
40	271.2	54'643	40'482	30'440	14'161	74%	57%
50	271.2	54'643	42'655	28'147	11'988	78%	60%
60	271.2	54'643	44'269	26'447	10'373	81%	62%
70	271.2	54'643	45'247	25'418	9'395	83%	63%
80	271.2	54'643	45'839	24'795	8'804	84%	64%
100	271.2	54'643	46'572	24'024	8'071	85%	65%
120	271.2	54'643	46'988	23'585	7'655	86%	66%
140	271.2	54'643	47'281	23'277	7'361	87%	66%

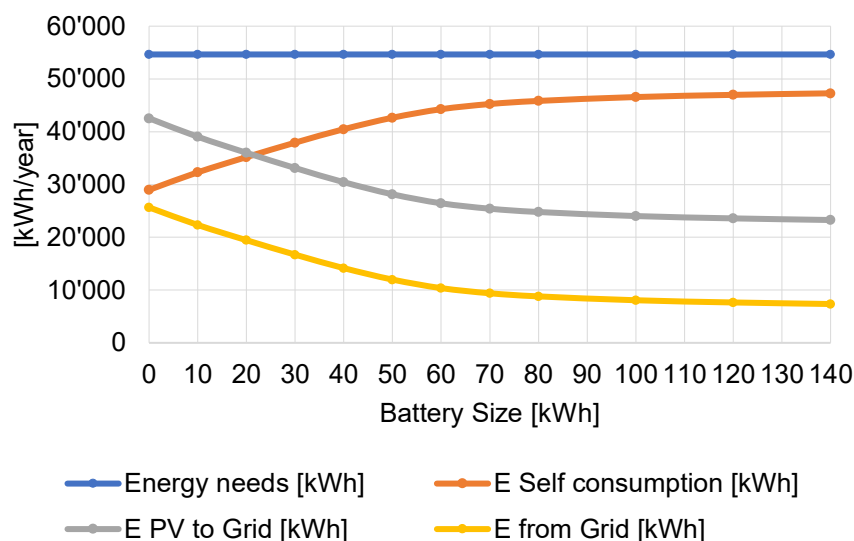


Figura 14 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport

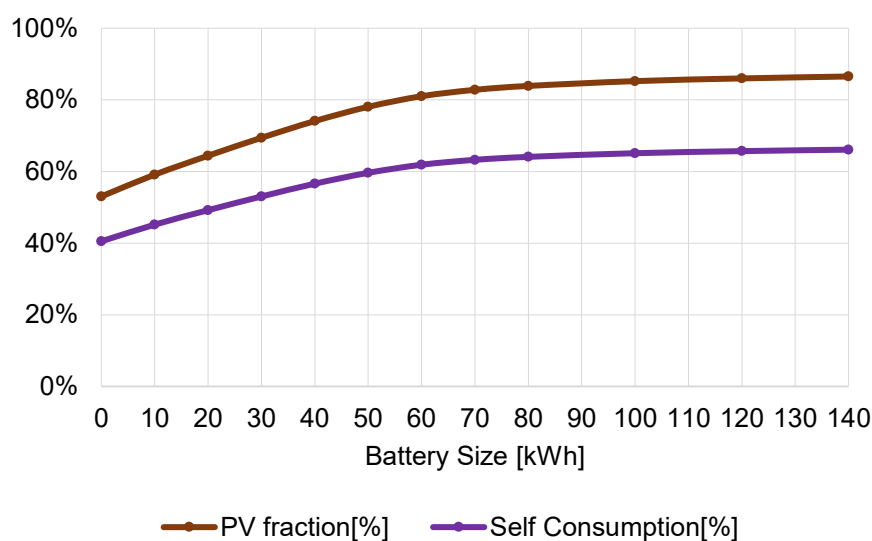


Figura 15 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport

Anche per la configurazione a sette unità carport l'esplorazione si è estesa fino a 140 kWh. Senza accumulo, l'autoconsumo è di 28'979 kWh (53% del fabbisogno) e il surplus di 42'548 kWh, l'incremento maggiore rispetto alla configurazione precedente.

Il grafico dei flussi energetici (Figura 14) evidenzia una curva di autoconsumo che cresce in modo significativo fino a circa 60-70 kWh di accumulo e si attesta poi attorno ai 47'000 kWh.

Il grafico degli indicatori prestazionali (Figura 15) mostra una PV fraction che sale all'87% e una Self-Consumption che raggiunge il 66%.

L'analisi della variazione della PV fraction colloca anche in questo caso il punto di rallentamento in corrispondenza dei 60 kWh: tra 50 e 60 kWh la PV fraction guadagna ancora 3 punti, mentre tra 60 e 70 kWh il guadagno scende a 2 punti e prosegue calando. Lo stesso accade con la Self-Consumption che passa da un guadagno di 2 ad 1.

La taglia individuata come ottimale è pertanto di 60 kWh: la PV fraction conseguente è dell'81%, la Self-Consumption 62% e l'autoconsumo di 44'269 kWh.

4.4.6. Caso 8 unità

Tabella 6 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport

Taglia Batteria	PV Area [m ²]	Energy needs [kWh]	E Self consumption [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	PV fraction [%]	Self - Consumption [%]
0	310.0	54'643	29'637	52'109	25'006	54%	36%
10	310.0	54'643	32'987	48'582	21'655	60%	40%
20	310.0	54'643	35'942	45'472	18'701	66%	44%
30	310.0	54'643	38'799	42'464	15'843	71%	47%
40	310.0	54'643	41'510	39'611	13'133	76%	51%
50	310.0	54'643	43'874	37'116	10'769	80%	54%
60	310.0	54'643	45'666	35'219	8'977	84%	56%
70	310.0	54'643	46'780	34'042	7'863	86%	57%
80	310.0	54'643	47'487	33'298	7'156	87%	58%
100	310.0	54'643	48'456	32'278	6'186	89%	59%
120	310.0	54'643	49'146	31'551	5'496	90%	60%
140	310.0	54'643	49'550	31'127	5'093	91%	61%

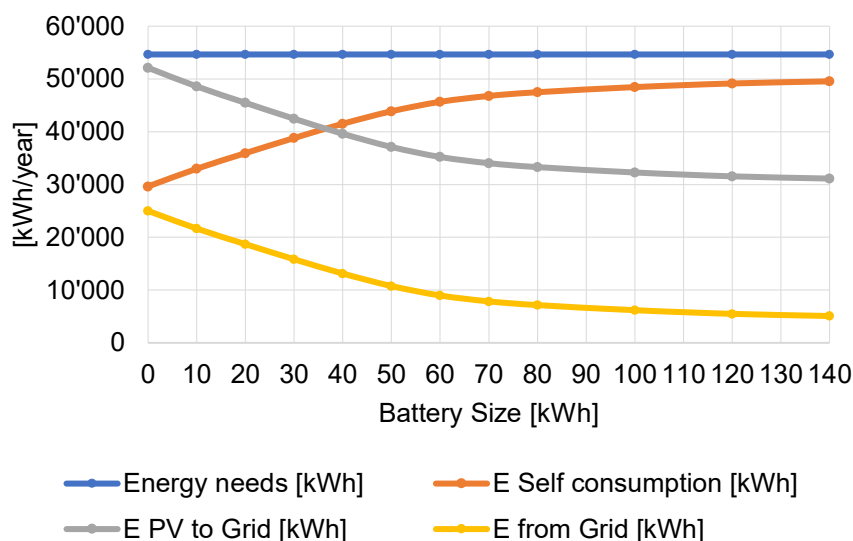


Figura 16 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport

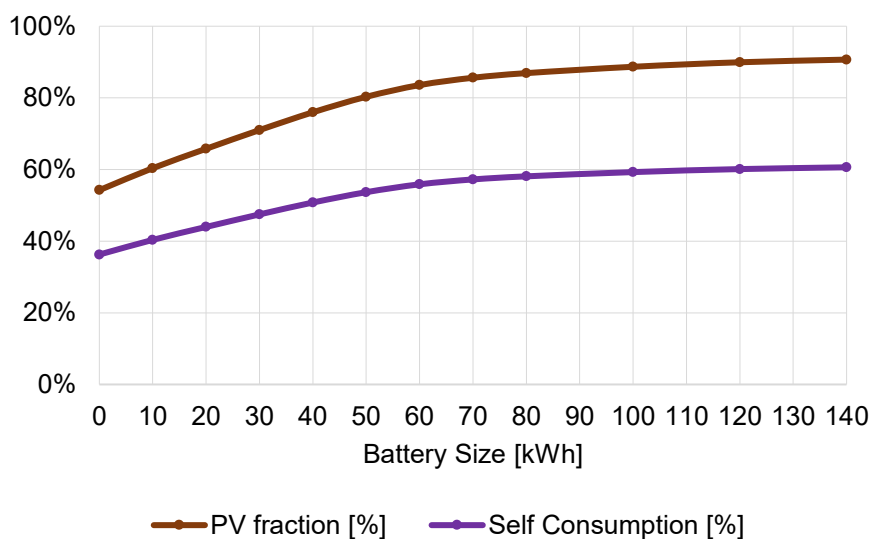


Figura 17 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport

La configurazione a otto unità carport, esaminata anch'essa fino a 140 kWh di accumulo, parte da un autoconsumo senza batteria di 29'637 kWh (54% del fabbisogno) e un surplus di 52'109 kWh.

Il grafico dei flussi energetici (Figura 16) mostra una curva di autoconsumo che continua a crescere in modo apprezzabile anche oltre i 60 kWh, attestandosi attorno ai 49'500 kWh a 140 kWh di accumulo; il grafico degli indicatori prestazionali (Figura 17) mostra una PV fraction che arriva al 91%.

L'analisi della variazione della PV fraction evidenzia che la curva, in questa configurazione, presenta un rallentamento meno marcato rispetto alle precedenti: tra 50 e 60 kWh la PV fraction guadagna ancora 4 punti, tra 60 e 70 kWh ne guadagna 2, tra 70 e 80 kWh ne guadagna 1. La Self-Consumption, invece, passa da un guadagno di 3, successivamente 2 e poi passa all'1.

La taglia individuata come ottimale è di 60 kWh, in coerenza con la scelta operata per le configurazioni a sei e sette unità carport: l'adozione di una taglia maggiore per un guadagno in percentuale così modesto non varrebbe il costo per installare una taglia maggiore. La PV fraction conseguente è dell'84%, la Self-Consumption del 56% e l'autoconsumo di 45'666 kWh.

Le scelte operate per le cinque configurazioni rivelano un comportamento del sistema interessante: per le configurazioni più piccole la taglia di accumulo ottimale scala con la dimensione del fotovoltaico (30 kWh per 60 pannelli, 40 kWh per 75 pannelli), mentre per le configurazioni più grandi la taglia ottimale si stabilizza a 60 kWh (per 90, 105 e 120 pannelli). La spiegazione del fenomeno è di natura fisica: oltre una certa dimensione del fotovoltaico, il limite all'autoconsumo non è più costituito dalla produzione, ormai abbondante, ma dal profilo di carico notturno e serale dell'edificio. La batteria deve essere dimensionata per coprire tale profilo, non per immagazzinare tutto il surplus, e il profilo di carico è invariante rispetto alla taglia dell'impianto: 60 kWh rappresentano la capacità sufficiente per assorbire il consumo serale-notturno tipico dell'edificio in esame, oltre la quale ulteriori incrementi di capacità non trovano più una corrispondente quota di fabbisogno da coprire.

5 Risultati simulazioni energetiche

In questo capitolo viene trattata la simulazione energetica nativa delle cinque configurazioni selezionate al capitolo precedente, condotta modellando ciascuna con la sua effettiva dotazione di pannelli anziché per scaling di un singolo modulo. Per ciascuna strategia vengono esposti, in un paragrafo dedicato, i risultati di tale simulazione.

5.1. Impostazione delle simulazioni energetiche e grandezze considerate

A differenza del Capitolo 4, dove l'analisi energetica serviva ancora ad uno screening e veniva condotta per scaling a partire da un singolo modulo, in questo capitolo si compie il passo successivo. Ciascuna strategia viene analizzata direttamente in EnergyPlus, modellandone l'effettivo numero di pannelli. Tutte le analisi energetiche svolte all'interno di questo elaborato si basano sui modelli di simulazione sviluppati dall'ing. Dell'Oro nella ricerca che sta portando avanti al VeluxLab del Politecnico di Milano sulla decarbonizzazione del patrimonio immobiliare della Compagnia di Gesù.

All'interno di EnergyPlus la simulazione di un impianto fotovoltaico non è affidata ad un unico oggetto, ma ad un insieme di elementi che collaborano tra loro, ciascuno dedicato a una parte del sistema. La produzione dei moduli è descritta dall'oggetto `Generator:PWatts` che, anziché richiedere la caratterizzazione elettrica di dettaglio delle celle, riassume il comportamento dell'impianto in pochi parametri aggregati, ovvero la potenza nominale installata in corrente continua, il tipo di modulo, la tipologia di struttura di montaggio, le perdite di sistema e l'orientamento dell'impianto, quest'ultimo definito tramite angolo di inclinazione e azimuth oppure riferendosi a una superficie dell'edificio. A partire da questi dati e dal file climatico del sito, il modello restituisce l'energia prodotta sul passo orario.

La conversione della corrente continua in corrente alternata è affidata all'oggetto `ElectricLoadCenter:Inverter:PWatts`, l'inverter associato al modello `PWatts`, che richiede due soli parametri, il rapporto tra la potenza continua e quella alternata e il rendimento di conversione. I generatori presenti nel modello vengono poi raccolti in una lista attraverso l'oggetto `ElectricLoadCenter:Generators`, che per ciascun generatore ne specifica il nome, il tipo e la potenza nominale. A chiudere lo schema interviene `ElectricLoadCenter:Distribution`, l'oggetto che definisce la rete elettrica interna e ne governa il funzionamento: stabilisce il tipo di bus elettrico, in corrente alternata oppure in corrente continua con inverter, collega tra loro la lista dei generatori e l'inverter, fissa lo schema di dispacciamento dei generatori e, quando previsto, gestisce l'eventuale sistema di accumulo con i relativi limiti di carica, scarica e stato di carica.

Il procedimento seguito è lo stesso per tutte le configurazioni. Nella sezione `Generator:PWatts` è stato inserito il valore di potenza corrispondente alla strategia in esame, mantenendo l'angolo di inclinazione di 10° già usato in precedenza, e si è poi eseguita la simulazione dinamica sull'intero anno. Le grandezze orarie ottenute sono state riportate in un foglio elettronico. Qui le stesse grandezze sono state rielaborate tenendo conto della batteria, applicando il modello orario di carica e scarica già descritto al Paragrafo 4.4.1 con la taglia individuata per quella

configurazione. Rispetto al capitolo precedente cambia quindi soltanto il profilo di produzione, ora più accurato, mentre il modello dell'accumulo resta invariato.

I valori orari sono stati infine aggregati in una tabella mensile, chiusa dalla somma annua. Per ogni mese la tabella riporta il fabbisogno dell'edificio, la produzione fotovoltaica, l'autoconsumo, il surplus e il prelievo, prima senza accumulo e poi con. In coda compaiono gli indicatori prestazionali della strategia, la PV fraction e la Self-Consumption nelle due varianti, insieme alla riduzione di prelievo e di surplus che la batteria consente di ottenere.

Accanto a questa lettura su base mensile, il comportamento del sistema viene illustrato anche su scala giornaliera. Per ciascuna strategia si riportano due giornate contrapposte: il 25 gennaio e il 25 luglio, scelte come rappresentative del regime invernale e di quello estivo. In questo modo si vede in concreto come si distribuiscono nell'arco delle ventiquattro ore la produzione, il fabbisogno e i flussi di carica e scarica della batteria.

Un'ultima precisazione riguarda il fabbisogno, utile per leggere correttamente tutte le tabelle che seguono. Il consumo elettrico del centro è pari a 54'643 kWh l'anno ed è lo stesso in ogni strategia, perché da una configurazione all'altra cambia l'impianto e non l'edificio. La sua distribuzione nei mesi però non è uniforme. Nei mesi estivi il fabbisogno cresce per effetto del raffrescamento, fino a raddoppiare a luglio rispetto alla media, mentre crolla ad agosto, quando il centro è chiuso e restano accesi i soli carichi di base. Non si tratta di un'anomalia ma del reale regime d'uso del complesso e va tenuto presente nella lettura dei dati.

5.2. Risultati delle simulazioni

5.2.1. Strategia con 4 unità e batteria 30 kWh

SENZA BATTERIA						CON BATTERIA		
Mese	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]
Gen	4'360	1'657	1'445	212	2'915	1'636	1	2'724
Feb	3'943	2'330	1'714	616	2'229	2'228	46	1'715
Mar	4'352	3'567	2'089	1'478	2'264	2'811	678	1'541
Apr	3'997	4'312	2'210	2'102	1'787	2'994	1'233	1'003
Mag	4'924	5'009	2'882	2'127	2'043	3'764	1'149	1'161
Giu	8'454	5'056	4'319	737	4'135	4'853	145	3'601
Lug	11'350	5'218	4'909	308	6'441	5'133	61	6'217
Ago	318	4'738	12	4'726	306	313	4'366	5
Set	4'725	3'473	2'051	1'422	2'674	2'765	657	1'960
Ott	2'562	2'507	977	1'531	1'585	1'726	700	836
Nov	2'755	1'571	844	727	1'911	1'364	151	1'391
Dic	2'902	1'436	840	597	2'063	1'309	76	1'593
ANNO	54'643	40'873	24'292	16'581	30'351	30'895	9'264	23'747

PV fraction (senza batt)	44%
Self Consumption (senza batt)	59%
PV fraction (con batt)	57%
Self consumption (con batt)	76%
Riduzione prelievo con batt [kWh/anno]	6'604
Riduzione surplus con batt [kWh/anno]	7'317

Tabella 7 - Risultato simulazione energetica per quattro unità carport

La prima configurazione analizzata è quella più contenuta, costituita da quattro unità carport sulle quali si trovano sessanta moduli. Con una potenza unitaria di 570 W per modulo, la potenza nominale dell'impianto risulta pari a 34.2 kWp. Su un anno di funzionamento questa taglia produce 40'873 kWh, un valore che resta al di sotto del fabbisogno elettrico del centro, fermo a 54'643 kWh. Già da questo confronto si intuisce un limite della configurazione: anche utilizzando tutta l'energia prodotta, l'edificio non potrebbe comunque coprire per intero il proprio consumo.

In assenza di accumulo, dei 40'873 kWh prodotti soltanto 24'292 vengono autoconsumati, mentre i restanti 16'581 vengono immessi in rete. Il prelievo dalla rete si attesta a 30'351 kWh. Ne derivano una PV fraction del 44% e una Self-Consumption del 59%, a indicare che l'edificio copre con il fotovoltaico poco meno della metà del proprio fabbisogno e che oltre un terzo della produzione, non potendo essere usata nel momento in cui viene generata, viene ceduta alla rete.

L'introduzione della batteria da 30 kWh modifica sensibilmente questo quadro. L'autoconsumo sale a 30'895 kWh, il surplus si riduce a 9'264 kWh e il prelievo scende a 23'747 kWh. La batteria recupera quindi circa 6'600 kWh che prima andavano in rete, restituendoli all'edificio nelle ore serali. La PV fraction passa al 57% e la Self-Consumption al 76%. Resta però evidente il limite di partenza: poiché la produzione annua è inferiore al fabbisogno, neppure con l'accumulo l'edificio raggiunge l'autosufficienza, e una quota di prelievo dalla rete permane in tutti i mesi.

La lettura della Tabella 7 mostra come questi valori si distribuiscano lungo l'anno. Nei mesi invernali la produzione è bassa, tra i 1'400 e i 2'300 kWh, e il prelievo resta elevato anche con la batteria. La situazione migliore si registra nei mesi di mezza stagione, da marzo a maggio e in settembre e ottobre, quando la produzione è abbondante e il fabbisogno contenuto: è qui che la batteria lavora meglio e il prelievo si riduce in misura marcata. I mesi estivi presentano invece un comportamento particolare, già anticipato. A luglio il fabbisogno raddoppia per effetto del raffrescamento e, nonostante la buona produzione, il prelievo resta il più alto dell'anno. Ad agosto, con il centro chiuso, quasi tutta la produzione viene ceduta alla rete e l'autoconsumo si annulla.

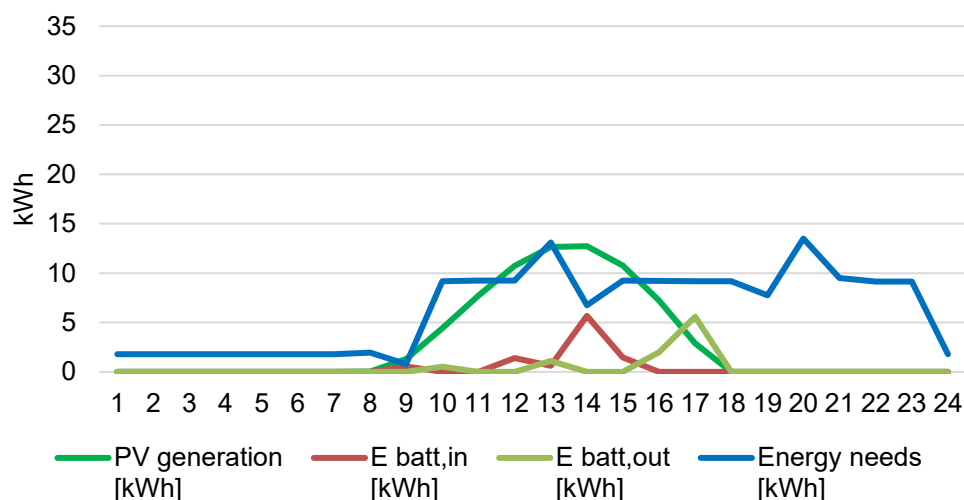


Figura 18 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per quattro unità carport con batteria 30 kWh

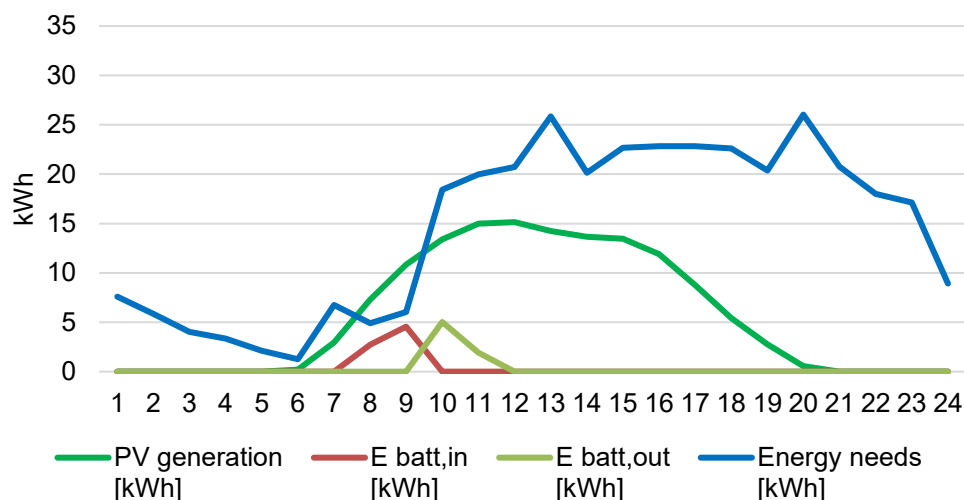


Figura 19 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per quattro unità carport con batteria 30 kWh

L'andamento giornaliero aiuta a comprendere questa dinamica nel dettaglio delle ore. Nella giornata invernale del 25 gennaio la produzione resta modesta, con un picco di poco superiore ai 12 kWh nelle prime ore del pomeriggio, e supera il consumo solo per un breve intervallo. In quelle ore la batteria si carica, con valori contenuti che non raggiungono i 6 kWh orari, per poi restituire l'energia tra le sedici e le diciassette, quando la produzione si esaurisce e il consumo serale riprende. Nella giornata estiva del 25 luglio il comportamento è diverso. La produzione è più alta, intorno ai 15 kWh di picco, ma il consumo estivo è molto maggiore e nel pomeriggio supera abbondantemente i 20 kWh per effetto del raffrescamento. La batteria, di conseguenza, riesce a caricarsi solo nelle prime ore del mattino e si esaurisce già verso le dieci, restando poi inattiva: tutta l'energia prodotta nel pomeriggio viene assorbita direttamente dai carichi, senza che resti nulla da immagazzinare. In estate, quindi, è l'autoconsumo diretto a farla da padrone, mentre il contributo della batteria si concentra nelle mezze stagioni.

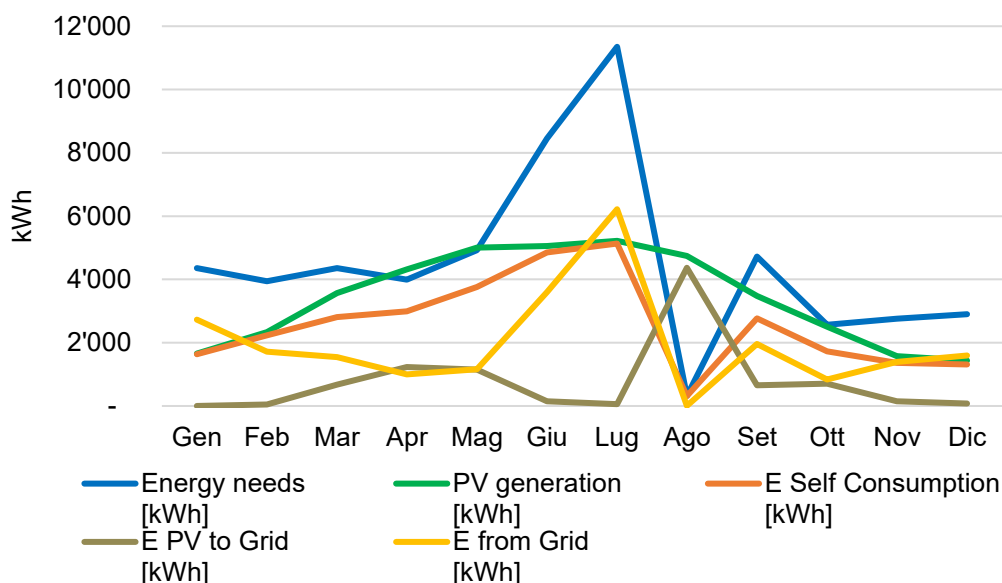


Figura 20 - Andamento annuale dell'energia per quattro unità carport con batteria 30 kWh

Nel grafico dell'andamento annuale, costruito sullo scenario con batteria, si riconosce con immediatezza la stagionalità del sistema. La produzione disegna una curva a campana che culmina tra maggio e luglio e si abbassa nei mesi invernali, mentre il fabbisogno segue un andamento quasi opposto, con il picco estivo di giugno-luglio dovuto al raffrescamento e la caduta di agosto legata alla chiusura. L'autoconsumo resta schiacciato sotto la produzione per buona parte dell'anno, segno che, con questa taglia ridotta, l'edificio riesce a sfruttare quasi tutta l'energia generata. Il prelievo dalla rete, infine, non si annulla mai del tutto e torna a crescere nei mesi freddi e a luglio, a conferma che la configurazione a quattro unità carport, pur con l'accumulo, non porta l'edificio all'autosufficienza in alcun mese dell'anno.

5.2.2. Strategia con 5 unità e batteria 40 kWh

SENZA BATTERIA						CON BATTERIA		
Mese	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]
Gen	4'360	2'072	1'614	458	2'746	2'017	11	2'343
Feb	3'943	2'912	1'820	1'092	2'123	2'626	199	1'317
Mar	4'352	4'458	2'176	2'283	2'177	3'176	1'175	1'176
Apr	3'997	5'390	2'289	3'100	1'707	3'345	1'925	652
Mag	4'924	6'261	2'985	3'276	1'939	4'171	1'968	754
Giu	8'454	6'320	4'843	1'477	3'611	5'729	496	2'725
Lug	11'350	6'522	5'761	761	5'589	6'287	178	5'063
Ago	318	5'923	12	5'910	306	313	5'540	5
Set	4'725	4'341	2'202	2'139	2'524	3'203	1'066	1'522
Ott	2'562	3'134	1'007	2'127	1'555	2'030	993	532
Nov	2'755	1'963	885	1'078	1'870	1'645	236	1'110
Dic	2'902	1'795	897	898	2'005	1'588	133	1'314
ANNO	54'643	51'091	26'491	24'600	28'152	36'130	13'919	18'512

PV fraction (senza batt)	48%
Self consumption (senza batt)	52%
PV fraction (con batt)	66%
Self consumption (con batt)	71%
Riduzione prelievo con batt [kWh/anno]	9'639
Riduzione surplus con batt [kWh/anno]	10'681

Tabella 8 - Risultato simulazione energetica per cinque unità carport

Salendo a cinque unità carport il numero di moduli passa a settantacinque e la potenza nominale a 42.75 kWp. Si tratta della prima configurazione la cui produzione annua, pari a 51'091 kWh, si avvicina al fabbisogno del centro senza però raggiungerlo. L'edificio resta quindi ancora in leggero deficit di energia su base annua, ma il margine rispetto alla taglia precedente è netto.

Senza accumulo, l'autoconsumo è di 26'491 kWh, a fronte di 24'600 kWh ceduti alla rete e di 28'152 kWh prelevati. La PV fraction si ferma al 48% e la Self-Consumption al 52%. Rispetto alla configurazione a quattro unità carport, l'indipendenza dell'edificio cresce di pochi punti, mentre la Self-Consumption cala: l'impianto produce di più, ma una quota maggiore di questa produzione finisce in rete perché eccede il consumo istantaneo.

Con la batteria da 40 kWh il quadro migliora in modo sensibile. L'autoconsumo sale a 36'130 kWh, il surplus scende a 13'919 kWh e il prelievo a 18'512 kWh. La PV fraction raggiunge il 66% e la Self-Consumption il 71%. L'accumulo recupera in questo caso quasi 9'640 kWh di prelievo evitato, un valore già molto superiore a quello della taglia precedente (Tabella 7), segno che con una produzione più abbondante la batteria trova più energia da immagazzinare.

Sul piano mensile si riconosce lo stesso andamento già descritto, con i mesi di mezza stagione che restituiscono il miglior bilanciamento e i mesi estivi penalizzati dal raffrescamento a luglio e dalla chiusura ad agosto. Rispetto al caso precedente, però, i mesi primaverili mostrano un surplus più consistente già prima dell'accumulo, perché la maggiore potenza installata produce in eccesso per più ore al giorno.

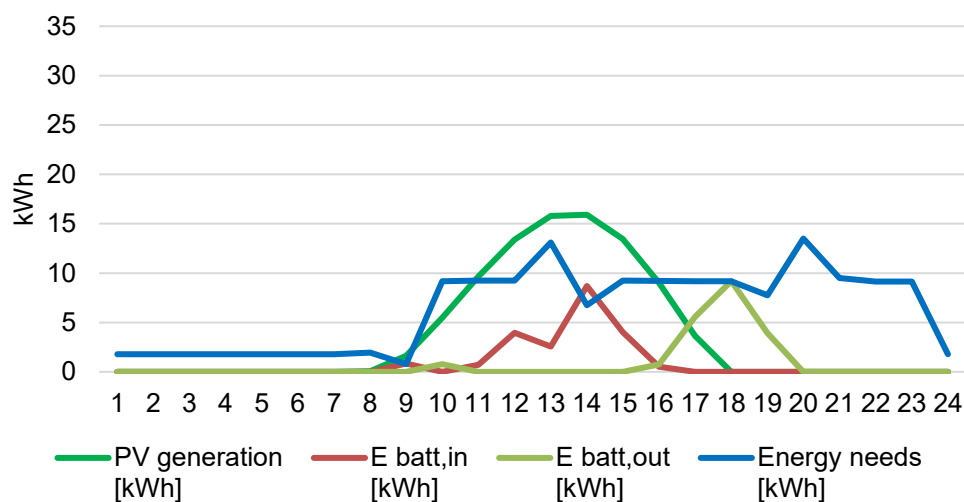


Figura 21 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per cinque unità carport con batteria 40 kWh

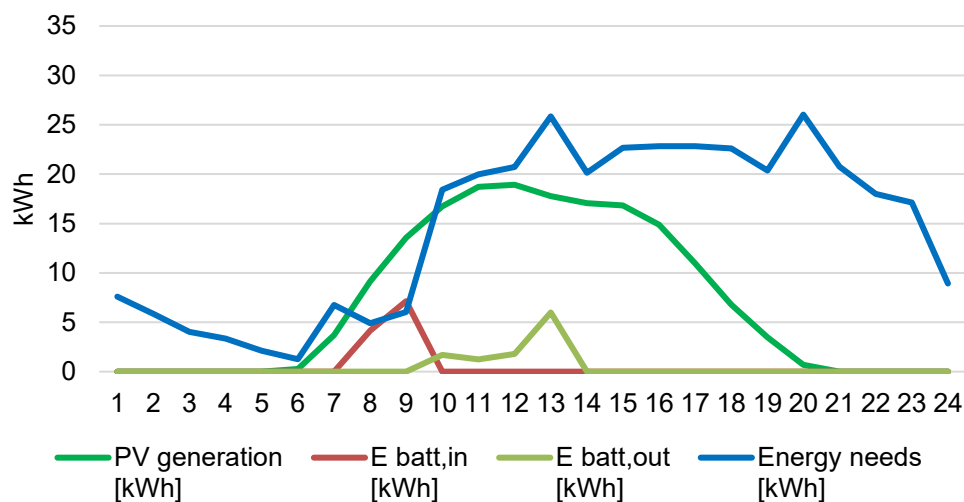


Figura 22 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per cinque unità carport con batteria 40 kWh

Sul piano giornaliero la batteria mostra di lavorare con un margine maggiore rispetto alla taglia precedente. Nella giornata del 25 gennaio la produzione tocca i 16 kWh nelle ore centrali e l'eccesso rispetto al consumo alimenta una carica, che arriva a quasi 9 kWh orari; la scarica accompagna poi l'edificio fino a sera inoltrata, prolungandosi ben oltre le diciotto. Nella giornata del 25 luglio si ripresenta invece il limite estivo già osservato. La produzione raggiunge i 19 kWh, ma il consumo pomeridiano resta più alto e costringe la batteria a caricarsi soltanto al mattino, per poi cedere la sua energia nelle prime ore del pomeriggio. Anche con questa taglia, l'estate si conferma la stagione in cui l'accumulo incide meno.

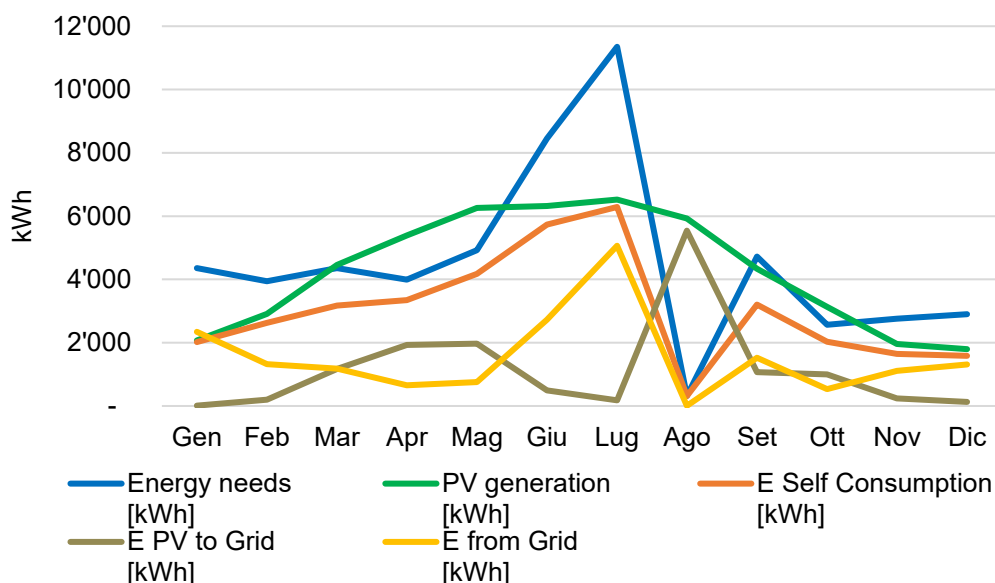


Figura 23 - Andamento annuale dell'energia per cinque unità carport con batteria 40 kWh

Il grafico dell'andamento annuale con batteria restituisce un quadro più favorevole. La curva della produzione si alza rispetto alla configurazione precedente e per alcuni mesi arriva a superare il fabbisogno, mentre l'autoconsumo riesce a tenersi vicino al consumo dell'edificio per gran parte dell'anno. Il prelievo dalla rete, già contenuto in primavera e in autunno, si riduce a valori modesti proprio nei mesi di mezza stagione, dove la batteria trova energia in abbondanza da accumulare. Restano visibili due elementi di criticità, il prelievo invernale e quello di luglio, e una prima quota di surplus nei mesi primaverili, quando la produzione comincia a eccedere ciò che l'edificio e la batteria riescono insieme ad assorbire.

5.2.3. Strategia con 6 unità e batteria 60 kWh

SENZA BATTERIA						CON BATTERIA		
Mese	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]
Gen	4'360	2'486	1'732	754	2'628	2'402	12	1'958
Feb	3'943	3'494	1'885	1'609	2'057	3'113	248	829
Mar	4'352	5'350	2'239	3'112	2'114	3'698	1'486	655
Apr	3'997	6'467	2'341	4'127	1'656	3'778	2'516	219
Mag	4'924	7'513	3'056	4'457	1'868	4'744	2'604	181
Giu	8'454	7'584	5'154	2'430	3'300	6'634	801	1'820
Lug	11'350	7'827	6'308	1'519	5'042	7'410	298	3'940
Ago	318	7'107	12	7'095	306	313	6'704	5
Set	4'725	5'209	2'298	2'912	2'427	3'799	1'303	926
Ott	2'562	3'761	1'026	2'735	1'536	2'336	1'286	226
Nov	2'755	2'356	915	1'441	1'840	2'022	202	733
Dic	2'902	2'154	937	1'217	1'965	1'976	78	926
ANNO	54'643	61'309	27'902	33'407	26'740	42'225	17'537	12'418

PV fraction (senza batt)	51%
Self consumption (senza batt)	46%
PV fraction (con batt)	77%
Self consumption (con batt)	69%
Riduzione prelievo con batt [kWh/anno]	14'323
Riduzione surplus con batt [kWh/anno]	15'870

Tabella 9 - Risultato simulazione energetica per sei unità carport

Con sei unità carport, novanta moduli e una potenza di 51.3 kWp, la produzione annua sale a 61'309 kWh e supera per la prima volta il fabbisogno del centro. Da questa taglia in avanti l'impianto genera, nell'arco dell'anno, più energia di quanta l'edificio ne consumi. Resta però il problema di fondo del fotovoltaico, ossia lo sfasamento tra il momento in cui l'energia viene prodotta e quello in cui serve.

In assenza di batteria, l'autoconsumo si attesta a 27'902 kWh, ma il surplus immesso in rete sale a 33'407 kWh e il prelievo resta elevato, a 26'740 kWh. La PV fraction è del 51% e la Self-Consumption scende al 46%. Il dato è significativo: pur producendo più di quanto consuma, l'edificio senza accumulo utilizza direttamente meno della metà dell'energia generata, perché gran parte della produzione si concentra nelle ore centrali della giornata, quando il consumo non basta ad assorbirla.

È in questa configurazione che la batteria, qui da 60 kWh, mostra l'effetto più marcato tra le taglie fin qui considerate. L'autoconsumo sale a 42'225 kWh, il surplus si riduce a 17'537 kWh e il prelievo crolla a 12'418 kWh. La PV fraction raggiunge il 77% e la Self-Consumption torna a salire al 69%. La riduzione del prelievo supera i 14'320 kWh, oltre il doppio di quanto ottenuto con la configurazione a quattro unità carport (Tabella 7). Questa è la prima taglia in cui l'accumulo riesce a trasformare un surplus abbondante in un guadagno consistente di autoconsumo.

L'esame della tabella mensile conferma il salto di qualità. Nei mesi di mezza stagione, e in parte anche in quelli primaverili, il prelievo con batteria scende a poche centinaia di kWh, segno che in quei mesi l'edificio diventa quasi autonomo. Restano critici i soli mesi invernali e il mese di luglio, dove il fabbisogno di raffrescamento mantiene alto il ricorso alla rete.

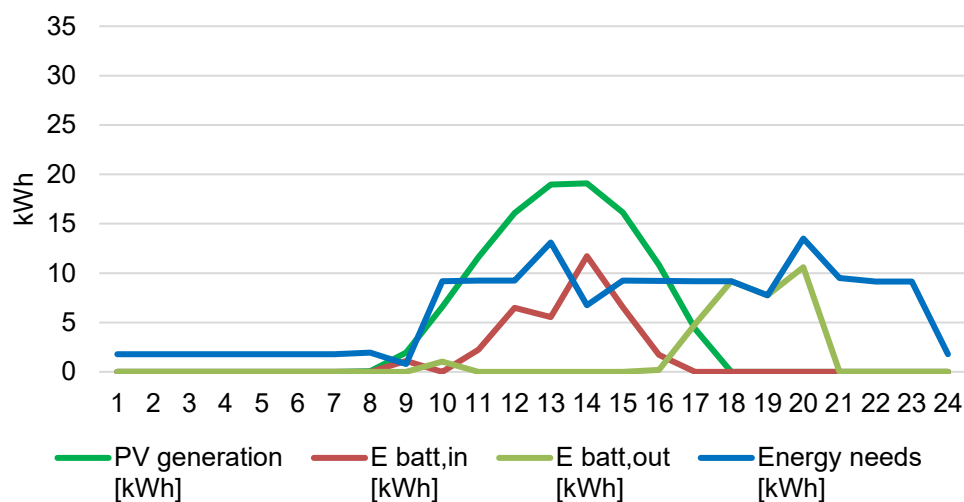


Figura 24 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per sei unità carport con batteria 60 kWh

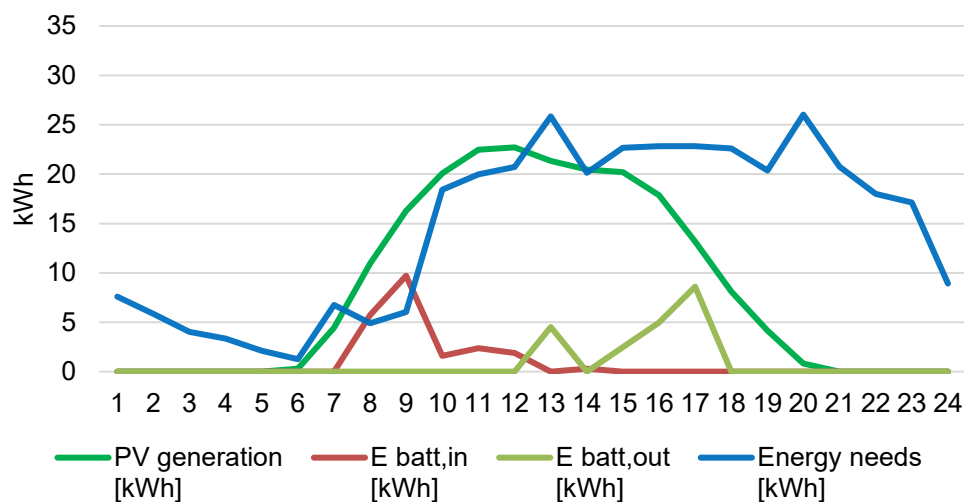


Figura 25 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per sei unità carport con batteria 60 kWh

Le due giornate rappresentative mostrano una batteria che inizia a lavorare a pieno regime. Il 25 gennaio la produzione sale fino a circa 19 kWh nel primo pomeriggio e alimenta una carica vivace, con un picco vicino ai 12 kWh orari intorno alle quattordici; la scarica subentra dal tardo pomeriggio e copre il consumo serale fino alle venti. Il 25 luglio il comportamento cambia rispetto alle taglie minori. La maggiore produzione, che sfiora i 23 kWh, consente alla batteria di caricarsi non solo all'alba ma anche nelle prime ore del mattino, accumulando energia prima che i carichi di raffrescamento entrino in funzione; dalle prime ore del pomeriggio la batteria comincia a scaricarsi per sostenere un consumo che supera ormai stabilmente la produzione. Il contributo estivo dell'accumulo, pur restando inferiore a quello primaverile, comincia a farsi sentire.

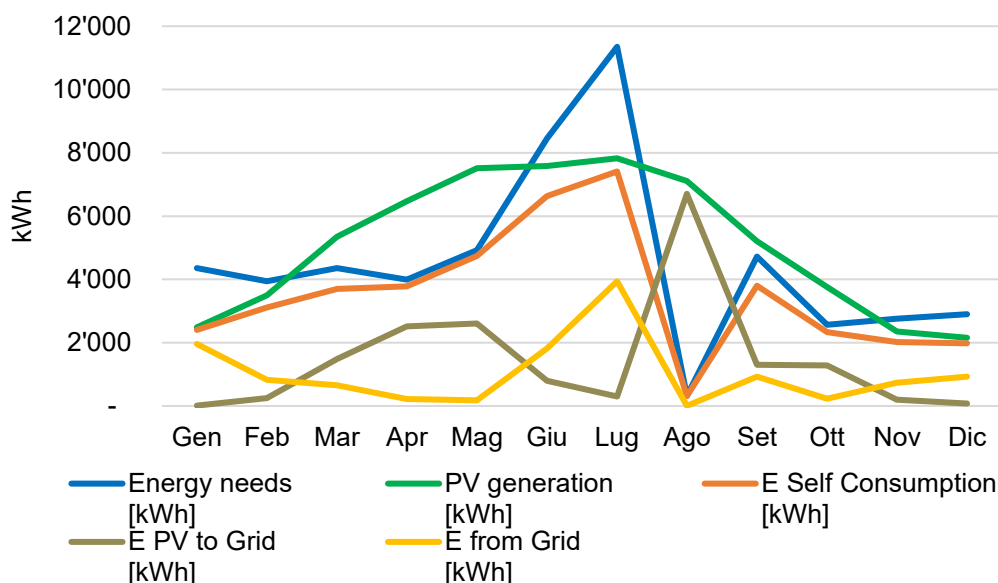


Figura 26 - Andamento annuale dell'energia per sei unità carport con batteria 60 kWh

Il grafico dell'andamento annuale con batteria evidenzia la trasformazione resa possibile da questa taglia. Per gran parte dell'anno la curva dell'autoconsumo si mantiene molto vicina a quella del fabbisogno e il prelievo dalla rete si riduce a poche centinaia di kWh nei mesi di mezza stagione, in cui l'edificio si avvicina alla piena autonomia. Allo stesso tempo, la curva del surplus comincia a sollevarsi nei mesi centrali: la produzione supera ormai stabilmente il fabbisogno e una parte dell'energia generata resta inutilizzata anche dopo l'intervento della batteria. È il primo segnale visibile che, da questa configurazione in poi, il problema non è più la scarsità di produzione ma la difficoltà di valorizzarne l'eccesso.

5.2.4. Strategia con 7 unità e batteria 60 kWh

SENZA BATTERIA						CON BATTERIA		
Mese	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]
Gen	4'360	2'900	1'811	1'089	2'549	2'735	66	1'625
Feb	3'943	4'077	1'930	2'147	2'013	3'281	650	662
Mar	4'352	6'242	2'284	3'957	2'068	3'778	2'292	574
Apr	3'997	7'545	2'376	5'169	1'621	3'835	3'534	162
Mag	4'924	8'765	3'109	5'656	1'815	4'784	3'816	140
Giu	8'454	8'848	5'344	3'504	3'110	6'985	1'698	1'470
Lug	11'350	9'131	6'624	2'507	4'726	8'102	869	3'248
Ago	318	8'292	12	8'279	306	313	7'888	5
Set	4'725	6'077	2'364	3'714	2'361	3'955	2'003	770
Ott	2'562	4'388	1'041	3'347	1'521	2'375	1'874	187
Nov	2'755	2'748	936	1'813	1'819	2'153	452	602
Dic	2'902	2'514	967	1'547	1'936	2'141	253	761
ANNO	54'643	71'527	28'799	42'728	25'844	44'438	25'396	10'205

PV fraction (senza batt)	53%
Self consumption (senza batt)	40%
PV fraction (con batt)	81%
Self consumption (con batt)	62%
Riduzione prelievo con batt [kWh/anno]	15'639
Riduzione surplus con batt [kWh/anno]	17'333

Tabella 10 - Risultato simulazione energetica per sette unità carport

La configurazione a sette unità carport porta i moduli a centocinque e la potenza a 59.85 kWp, per una produzione annua di 71'527 kWh. L'impianto supera ormai largamente il fabbisogno del centro e proprio questa abbondanza fa emergere con maggiore evidenza il limite dell'autoconsumo diretto.

Senza accumulo, infatti, l'autoconsumo si ferma a 28'799 kWh, un valore di poco superiore a quello della taglia precedente nonostante la produzione sia cresciuta di oltre 10'000 kWh. Il surplus, invece, esplode a 42'728 kWh, mentre il prelievo si attesta a 25'844 kWh. La PV fraction sale al 53%, ma la Self-Consumption scende al 40%. Il significato è chiaro: aggiungere pannelli a questo punto aumenta soprattutto l'energia ceduta alla rete, non quella effettivamente utilizzata dall'edificio nel momento della produzione.

La batteria da 60 kWh, la stessa adottata per la configurazione precedente, porta l'autoconsumo a 44'438 kWh, riduce il surplus a 25'396 kWh e abbate il prelievo a 10'205 kWh. La PV fraction tocca l'81% e la Self-Consumption risale al 62%. La riduzione del prelievo, pari a 15'639 kWh, è la più alta tra le configurazioni fin qui esaminate, ma il guadagno rispetto al caso a sei unità carport si fa più contenuto. Si intravede qui il fenomeno della saturazione: la batteria è già pienamente sfruttata, e l'energia prodotta in più rispetto alla taglia precedente non trova spazio né nell'autoconsumo né nell'accumulo, finendo parte in rete.

La tabella mensile rende leggibile questo squilibrio. Nei mesi centrali dell'anno il surplus senza batteria raggiunge valori molto elevati, e anche con l'accumulo resta una quota importante di energia ceduta. Il prelievo con batteria, per contro, si riduce a poche decine di kWh in primavera e in autunno, a conferma che in quei periodi l'edificio raggiunge una condizione di quasi totale autonomia.

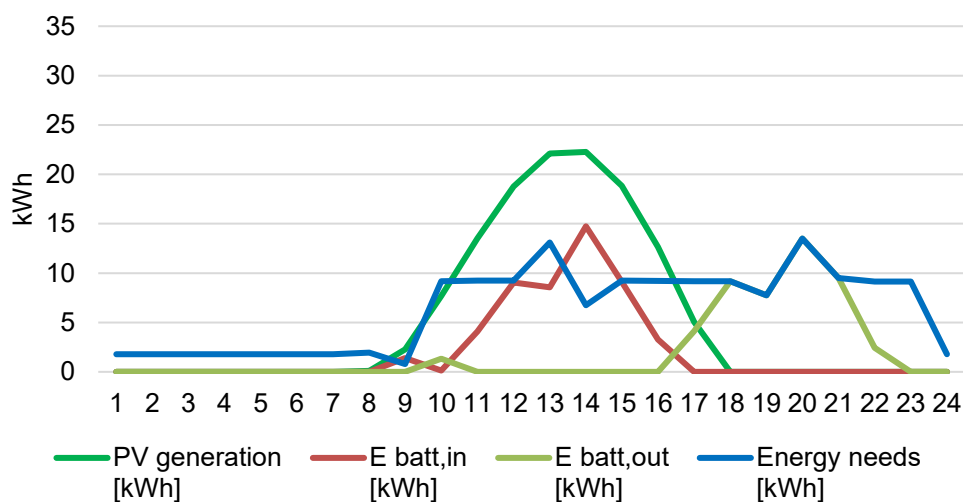


Figura 27 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per sette unità carport con batteria 60 kWh

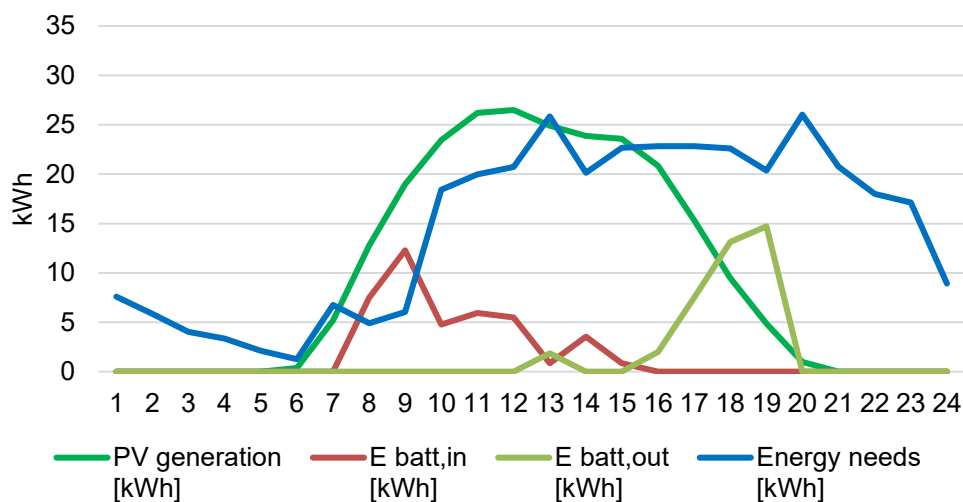


Figura 28 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per sette unità carport con batteria 60 kWh

Nelle giornate rappresentative la batteria appare ormai impegnata al massimo. Il 25 gennaio la produzione raggiunge i 22 kWh nelle ore centrali e la carica tocca quasi 15 kWh orari; la scarica si distribuisce poi su tutta la sera, prolungandosi fino alle ore notturne. Il 25 luglio la produzione arriva a superare i 26 kWh, ma il consumo pomeridiano dovuto al raffrescamento si mantiene altrettanto elevato: la batteria si carica al mattino e nelle prime ore centrali, per poi scaricarsi con continuità dal primo pomeriggio fino a sera. La maggiore potenza disponibile riesce così a sostenere l'accumulo anche nelle giornate di forte carico estivo, ma una parte crescente della produzione di mezzogiorno eccede sia il consumo sia la possibilità di immagazzinamento.

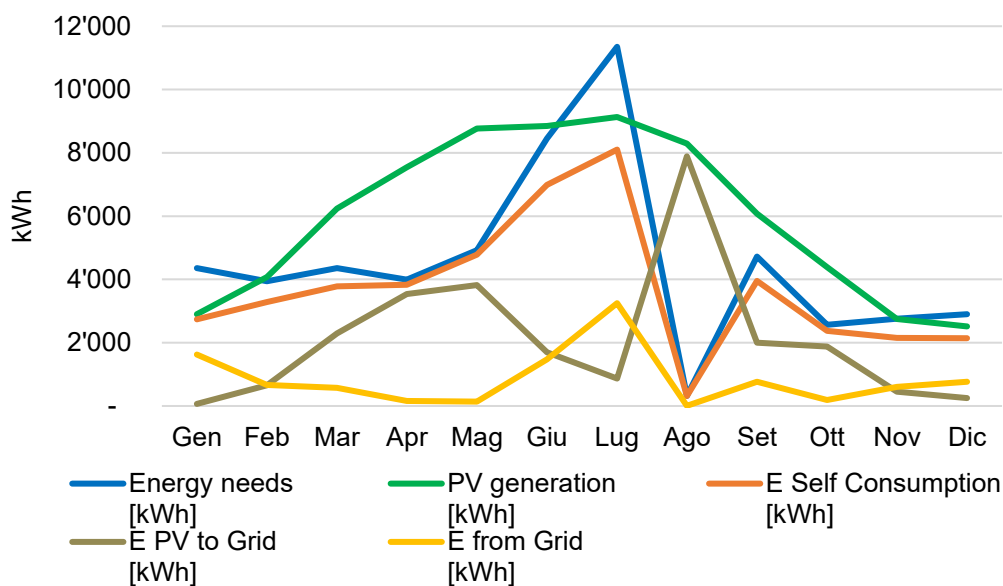


Figura 29 - Andamento annuale dell'energia per sette unità carport con batteria 60 kWh

Il grafico dell'andamento annuale con batteria mostra con chiarezza la doppia natura di questa configurazione. Da un lato l'autoconsumo resta elevato e prossimo al fabbisogno per quasi tutto l'anno, e il prelievo dalla rete si annulla quasi del tutto nei mesi primaverili e autunnali. Dall'altro la curva del surplus si fa ampia e persistente, soprattutto tra marzo e settembre, dove l'energia prodotta supera largamente il consumo. Il grafico fotografa così un impianto generoso nella produzione, ma la cui energia in eccesso comincia a eccedere in modo stabile la capacità di utilizzo del sistema edificio-batteria.

5.2.5. Strategia con 8 unità e batteria 60 kWh

SENZA BATTERIA						CON BATTERIA		
Mese	Energy needs [kWh]	PV generation [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]	E Self Cons. [kWh]	E PV to Grid [kWh]	E from Grid [kWh]
Gen	4'360	3'315	1'870	1'445	2'490	2'987	207	1'373
Feb	3'943	4'659	1'962	2'697	1'981	3'380	1'125	562
Mar	4'352	7'134	2'319	4'815	2'033	3'852	3'105	500
Apr	3'997	8'623	2'402	6'221	1'595	3'860	4'588	137
Mag	4'924	10'017	3'150	6'867	1'774	4'816	5'037	109
Giu	8'454	10'112	5'474	4'638	2'980	7'158	2'786	1'296
Lug	11'350	10'435	6'834	3'601	4'516	8'521	1'732	2'829
Ago	318	9'476	12	9'464	306	313	9'073	5
Set	4'725	6'946	2'413	4'533	2'312	4'053	2'766	672
Ott	2'562	5'015	1'052	3'963	1'510	2'402	2'473	160
Nov	2'755	3'141	953	2'188	1'802	2'240	750	515
Dic	2'902	2'873	990	1'883	1'912	2'257	477	646
ANNO	54'643	81'745	29'431	52'315	25'212	45'839	34'119	8'804

PV fraction (senza batt)	54%
Self consumption (senza batt)	36%
PV fraction (con batt)	84%
Self consumption (con batt)	56%
Riduzione prelievo con batt [kWh/anno]	16'408
Riduzione surplus con batt [kWh/anno]	18'195

Tabella 11 - Risultato simulazione energetica per otto unità carport

L'ultima configurazione, con otto unità carport, centoventi moduli e una potenza di 68.4 kWp, rappresenta la taglia massima considerata. La produzione annua raggiunge 81'745 kWh, una quantità pari a circa una volta e mezza il fabbisogno del centro. È la configurazione che spinge all'estremo la logica dell'autoproduzione e proprio per questo ne mostra con la massima evidenza sia i pregi sia i limiti.

Senza accumulo, l'autoconsumo si ferma a 29'431 kWh, mentre il surplus immesso in rete raggiunge il valore record di 52'315 kWh, quasi oltre il fabbisogno annuo dell'edificio. Il prelievo resta a 25'212 kWh. La PV fraction sale al 54%, valore più alto tra tutte le configurazioni senza batteria, ma la Self-Consumption precipita al 36%. In altri termini, l'edificio utilizza direttamente poco più di un terzo dell'energia che produce, e tutto il resto viene ceduto alla rete a un valore di norma molto inferiore al costo dell'energia acquistata.

L'introduzione della batteria da 60 kWh porta l'autoconsumo a 45'839 kWh, riduce il surplus a 34'119 kWh e abbassa il prelievo a 8'804 kWh. La PV fraction raggiunge l'84%, il massimo tra tutte le strategie e la Self-Consumption risale al 56%. La riduzione del prelievo, pari a 16'408 kWh, è la più elevata in assoluto, ma l'incremento rispetto alla configurazione a sette unità carport è ormai minimo. La batteria, della stessa taglia delle due configurazioni precedenti, è giunta al limite della propria capacità di immagazzinamento: per quanto grande sia la produzione, l'accumulo non può restituire all'edificio più energia di quanta riesca a contenere.

La tabella mensile fotografa con nettezza questa condizione. Per gran parte dell'anno il surplus senza batteria assume valori imponenti e neppure l'accumulo riesce a contenerlo entro limiti modesti. Il prelievo con batteria, invece, si annulla quasi del tutto nei mesi di mezza stagione, dove l'edificio raggiunge la piena autonomia. Il contrasto tra un surplus enorme e un prelievo quasi nullo nei mesi centrali riassume bene il paradosso di questa taglia: si produce molta più energia di quanta se ne possa utilizzare.

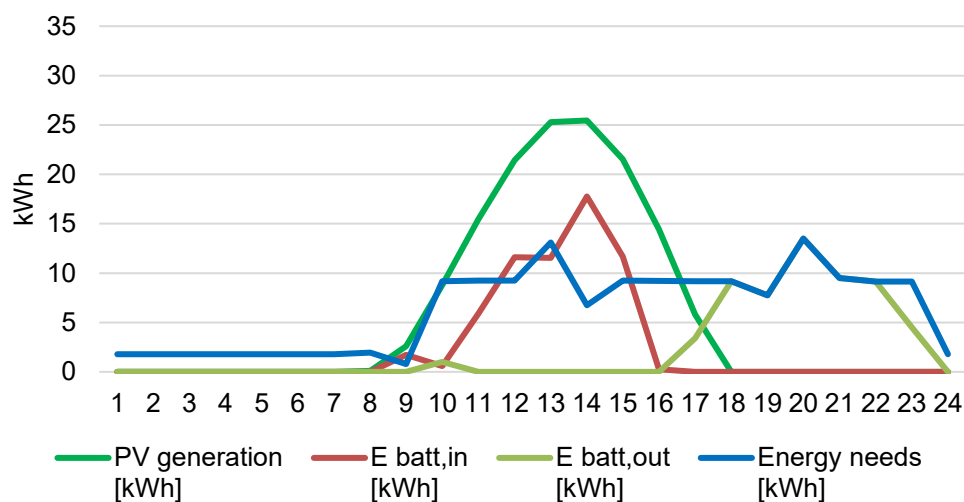


Figura 30 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per otto unità carport con batteria 60 kWh

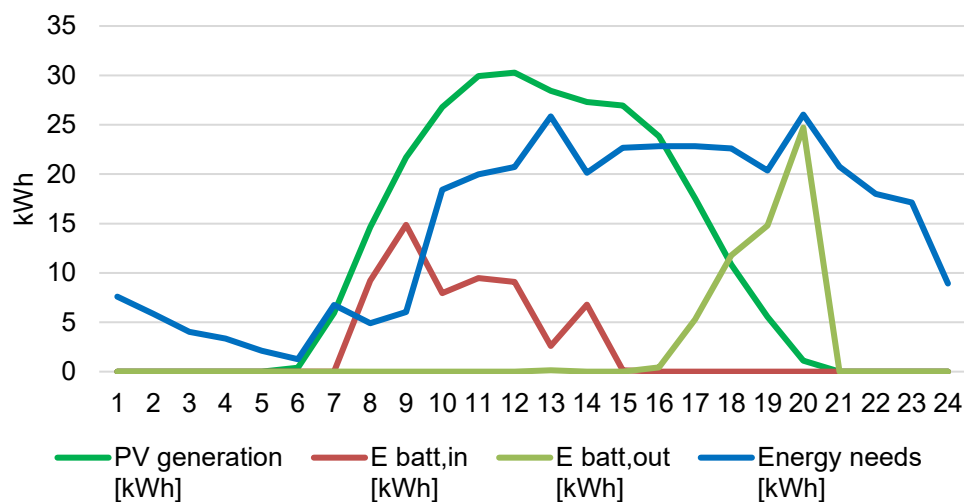


Figura 31 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per otto unità carport con batteria 60 kWh

Le giornate rappresentative confermano che con questa taglia la batteria lavora costantemente al limite della propria capacità. Il 25 gennaio la produzione raggiunge i 25 kWh nelle ore centrali e alimenta la carica più intensa tra tutte le configurazioni, prossima ai 18 kWh orari; la scarica si prolunga poi fino a notte fonda, a coprire l'intera fascia serale. Il 25 luglio la produzione tocca i 30 kWh, il valore più alto dell'analisi, e il consumo pomeridiano resta su livelli altrettanto elevati: la batteria si carica al mattino e cede poi la sua energia con continuità per tutto il pomeriggio e la sera. In entrambe le giornate, tuttavia, la quantità di energia prodotta nelle ore centrali è tale che, una volta sostenuto il consumo e completata la carica, una parte consistente non trova altra destinazione che la rete.

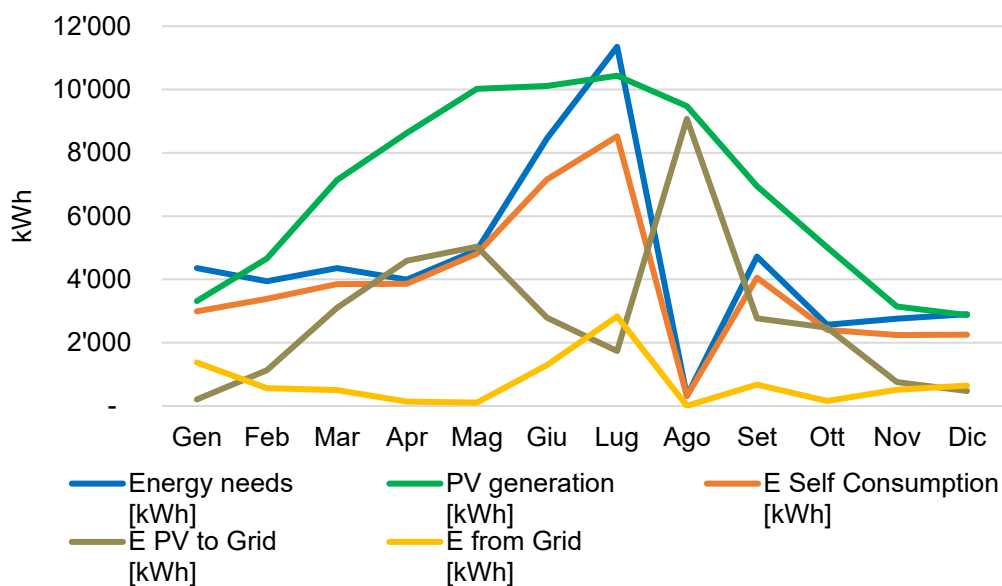


Figura 32 - Andamento annuale dell'energia per otto unità carport con batteria 60 kWh

Il grafico dell'andamento annuale con batteria chiude la rassegna mostrando, più che in ogni altra configurazione, l'ampiezza della curva di surplus che permane lungo quasi tutto l'anno. L'autoconsumo si mantiene sui valori più alti dell'intera analisi e il prelievo dalla rete è ormai ridotto al minimo nei mesi centrali, dove l'edificio raggiunge la piena autonomia. Tuttavia, la produzione si colloca stabilmente al di sopra del fabbisogno per gran parte dell'anno e il divario tra ciò che si genera e ciò che si riesce effettivamente a utilizzare è il più marcato tra tutte le strategie. Il grafico anticipa così la domanda che le valutazioni economiche e ambientali dovranno affrontare, ovvero se convenga installare una potenza che produce un surplus tanto ampio e difficile da valorizzare.

6 Valutazione ambientale

Dopo aver ricostruito al capitolo precedente il comportamento energetico delle dieci configurazioni, il presente capitolo ne valuta la dimensione ambientale, con l'obiettivo di stabilire se e in quanto tempo il beneficio in termini di emissioni evitate superi il debito di gas serra contratto per realizzare l'impianto. Si parte dalle emissioni operative, si prosegue con quelle incorporate nei componenti e, dalla loro somma sulla vita utile confrontata con la baseline, si ricava il bilancio complessivo e il relativo Carbon Payback Time.

6.1. Emissioni operative

Le emissioni operative sono state calcolate a partire dai risultati della simulazione energetica nativa svolta in EnergyPlus, ai quali si aggiunge il consumo annuo di gas naturale dell'edificio. Su tali flussi le emissioni operative annue sono state stimate con il metodo descritto nello standard ANSI/ASHRAE 228-2023 [23], nella forma proposta da D. Dell'Oro, V. Bazjanac e T. Maile [24], considerando nulli i termini relativi ai carbon credits e all'acquisto di energia rinnovabile off-site:

$$GHG_{OP} = (E_{from\ grid} - E_{surplus}) \times f_{em,el} + (E_{gas} \times f_{em,fuel}) + \sum (REF_{leak,i} \times GWP_{ref}) \quad Eq.1$$

Dove:

GHG_{OP} sono le emissioni operative annue [kgCO₂eq];

$E_{from\ grid}$ è l'energia elettrica prelevata dalla rete nell'anno [kWh];

$f_{em,el}$ è il fattore di emissione dell'energia elettrica [kgCO₂eq/kWh];

E_{gas} è l'energia da gas naturale consumata nell'anno [kWh];

$f_{em,fuel}$ è il fattore di emissione del gas naturale [kgCO₂eq/kWh];

$REF_{leak,i}$ è la massa di refrigerante dispersa nell'anno dal condizionatore i-esimo [kg], ottenuta moltiplicando la carica dell'unità per il suo tasso di perdita annuo;

GWP_{ref} è il potenziale di riscaldamento globale del refrigerante [kgCO₂eq/kg];

$E_{surplus}$ è l'energia elettrica in surplus immessa in rete nell'anno [kWh].

Tra i termini merita una nota quello in sottrazione. Il fotovoltaico che eccede il fabbisogno istantaneo viene immesso in rete e sostituisce altrove energia prelevata dal sistema elettrico, evitando le relative emissioni: per questo l'energia in surplus viene valorizzata con lo stesso fattore del prelievo e portata in detrazione.

I fattori di emissione adottati sono quelli dell'Allegato 2-Prospetto III della Regione Lombardia [25], pari a 0.4332 kgCO₂eq/kWh per l'energia elettrica e a 0.1998 kgCO₂eq/kWh per il gas naturale.

L'ultimo contributo operativo riguarda le perdite di gas refrigerante. L'edificio è climatizzato da due condizionatori che contengono al loro interno una carica di gas R410a, pari rispettivamente a 11.8 e 2.5 kg. Ogni anno una piccola frazione di tale carica sfugge a causa delle perdite fisiologiche dei circuiti, qui assunta pari al 2%. Va però considerato che il R410a è un gas serra molto più aggressivo dell'anidride carbonica. Il suo potenziale di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential) vale 1920 kgCO₂eq/kg. Le emissioni si ricavano moltiplicando la massa che fuoriesce ogni anno per tale valore. Nel caso in esame la dispersione annua è pari a $(11.8 + 2.5) \cdot 2\% = 0.286$ kg, che per un GWP di 1920 kgCO₂eq/kg corrisponde a circa 549 kgCO₂eq all'anno. Trattandosi di un contributo legato all'edificio e non al fotovoltaico, esso resta invariato in tutte le configurazioni.

Il calcolo è stato applicato a tutte le configurazioni, sia nella variante con che senza accumulo. La sua presenza non altera il metodo, ma solo i flussi in ingresso, riducendo l'energia prelevata dalla rete e quella immessa in surplus. A titolo illustrativo si riporta di seguito il caso a sei unità carport senza accumulo in Tabella 12, mentre il confronto esteso a tutte le configurazioni è raccolto nel capitolo dei risultati finale.

Tabella 12 - Calcolo delle emissioni operative per il caso a sei unità carport

Configurazione: 90 moduli PV		
Energy from grid	96.3 GJ	26'740 kWh
Energy gas used	691.0 GJ	191'938 kWh
Energy Surplus	120.3 GJ	33'407 kWh
Perdite		549 kgCO ₂ eq
GHG operational 2025	36'010	kgCO ₂ eq

I valori riportati mostrano come, in questa configurazione priva di accumulo, l'energia immessa in rete superi quella prelevata: a fronte di 26'740 kWh acquistati dalla rete il fotovoltaico ne cede 33'407 in surplus. Il termine elettrico dell'Equazione 1, dato dalla differenza fra i due, assume quindi segno negativo e si traduce in un credito di emissioni, mentre il contributo prevalente resta quello del gas naturale, legato ai 191'938 kWh consumati per il riscaldamento e non toccati dall'intervento. A questi si aggiungono i 549 kgCO₂eq delle perdite di refrigerante, anch'essi indipendenti dalla configurazione. Il bilancio operativo del primo anno si attesta così a 36'010 kgCO₂eq, valore che costituisce il punto di partenza per le proiezioni sulla vita utile sviluppate ai paragrafi successivi.

6.2. Emissioni incorporate

Una volta determinate le emissioni operative, l'analisi prosegue valutando le emissioni incorporate, intese come quelle generate per la realizzazione di ciascun componente dell'impianto nel momento in cui esso entra a far parte del sistema. Il riferimento normativo è quello già richiamato al Paragrafo 1.2, ossia le ISO 14040:2006 [6] e ISO 14044:2006 [7], alle quali si affianca per il quadro applicato agli edifici la UNI EN 15978:2011 [8]. Coerentemente con queste norme, per ogni componente sono considerate le fasi:

- A1-A3: fase di produzione, include tutti i processi necessari per creare.
- A4-A5: fase di costruzione, riguarda le attività necessarie per portare i materiali in cantiere.
- B1-B7: fase d'uso, copre l'intero periodo in cui l'edificio è in funzione.

- C1-C4: fase di fine vita, quando edificio o componente giunge al termine del suo ciclo di vita utile.

La fonte numerica per ciascun componente è la sua Dichiarazione Ambientale di Prodotto. Per ogni voce è stata individuata l'EPD specifica, dalla quale è stato estratto il valore di GWP (Global Warming Potential) totale relativo a ciascuna fase considerata. Tale valore è espresso in rapporto a un'unità di riferimento, che varia a seconda del prodotto e può essere il metro quadro, il watt, il chilogrammo o il chilowattora. Per ottenere l'impronta del componente nella configurazione di progetto il GWP unitario è stato moltiplicato per la quantità effettivamente installata e la somma dei contributi di tutti i componenti restituisce l'impronta incorporata complessiva.

Per i moduli fotovoltaici è stata consultata l'EPD del modello selezionato [26]. La dichiarazione fornisce i valori di GWP riferiti sia al metro quadro di superficie attiva, sia al watt di potenza nominale. I due valori non sono perfettamente equivalenti per via delle tolleranze sulla densità di potenza e in ottica prudenziale è stato adottato il riferimento più gravoso. Il calcolo è stato impostato sui moduli effettivamente installati in ciascuna configurazione, e in Tabella 13 si riporta a titolo esemplificativo il dettaglio relativo ai 90 moduli del caso a sei unità carport.

Tabella 13 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per sei unità carport

Numero pannelli pv: 90		
Area totale pv	232	m ²
Valori unitari da EPD:		
GWP tot. A1-A3	133	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. A4	4.54	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. A5	1.22	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. B1-B7	0	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. C1	0	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. C2	0.056	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. C3	0.756	kgCO ₂ eq /m ²
GWP tot. C4	0.134	kgCO ₂ eq /m ²
Valori calcolati:		
GHG emb A1-A3	30'922	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	1'056	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	284	kgCO ₂ eq
GHG emb B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	13	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	176	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	31	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb pv tot.	32'481	kgCO ₂ eq

Il passaggio più articolato ha riguardato l'unità carport, scomposta in tre famiglie di voci. Vengono valutate per prime le opere a terra necessarie alla messa in opera, ipotizzando che la pavimentazione esistente venga demolita e rifatta in corrispondenza dell'area occupata da ciascuna unità. La stratigrafia ipotizzata prevede una sezione complessiva di 35 cm, articolata in 20 cm di sottofondo, 5 cm di letto di posa e 10 cm di masselli autobloccanti di chiusura. Per ciascuno di questi strati l'impronta è stata calcolata moltiplicando il peso o il volume, ottenuto come prodotto fra spessore e area del singolo carport, per il GWP riportato nella rispettiva EPD [27] [28] [29]. Sono stati poi quantificati i quattro plinti di fondazione di ciascuna unità carport, modellati come blocchi di calcestruzzo armato di volume noto: il contributo del calcestruzzo è stato dimensionato sui metri cubi gettati e moltiplicato per il GWP della relativa EPD [30], mentre quello dell'armatura in barre B450C è stato riferito alla massa in tonnellate, anch'essa

moltiplicata per il GWP della rispettiva EPD [31]. La terza famiglia è il telaio in alluminio. Note le lunghezze e le sezioni delle travi e dei tubi del modello adottato, è stata ricavata la massa complessiva di alluminio del singolo carport, da moltiplicare per il GWP per tonnellata dichiarato nell'EPD del profilato [32]. La somma di opere a terra, fondazioni e telaio restituisce l'impronta di un singolo carport, che viene poi proporzionata al numero di unità della configurazione esaminata. In Tabella 14 è riportato il prospetto di calcolo per la singola unità.

Tabella 14 - Calcolo delle emissioni incorporate della singola unità carport

carport singolo		
Fondazioni		
GWP tot. calcestruzzo da EPD	287	kgCO ₂ eq /m ³
Volume calcestruzzo	3.36	m ³
GHG emb calcestruzzo	964	kgCO₂eq
GWP tot. sottofondo da EPD	76.8	kgCO ₂ eq /t
Volume sottofondo	8.09	m ³
Densità	2.65	t/ m ³
Peso	21.4	t
GHG emb sottofondo	1'645	kgCO₂eq
GWP tot. letto di posa da EPD	5.31	kgCO ₂ eq /t
Volume letto di posa	2.02	m ³
Densità	1.60	t/m ³
Peso	3.24	t
GHG emb letto di posa	17.18	kgCO₂eq
GWP tot. massello autobloccante da EPD	135	kgCO ₂ eq /t
Volume	4.04	m ³
Densità	2.25	t/m ³
Peso	9.10	t
GHG emb autobloccanti	1'228	kgCO₂eq
Armatura		
GWP tot. Acciaio barre da EPD	781	kgCO ₂ eq /t
L. tot. barre	10.4	m
Area tot.barre	0.0005	m ²
Densità acciaio	7.85	t/m ³
Volume tot.barre	0.005	m ³
Peso tot barre	0.037	t
GHG emb armat.	29	kgCO₂eq
Telaio		
GWP tot. alluminio da EPD	9.35	kgCO ₂ eq /kg
Densità alluminio	2'700	kg/m ³
Tubi	24.37	m
Sezione	40x40	
	sp.5mm	
Area	0.0004	m ²
Densità lin. tubi	1.01	kg/m
Peso tubi	24.67	kg
GHG emb tubi	231	kgCO₂eq
Travi	100x40	
	sp.5mm	
Lunghezza	55.65	m
Area	0.0007	m ²
Densità lin. travi	1.82	kg/m
Peso travi	101	kg
GHG emb travi	948	kgCO₂eq
Totale:		
GHG emb carp.sing	5'062	kgCO₂eq

Sono state poi determinate le emissioni dell'inverter. L'analisi prevede due architetture distinte, scelte in funzione della presenza dell'accumulo. Nelle configurazioni prive di batteria si adotta un inverter trifase dedicato per ciascuna unità carport, da circa 10 kW, dimensionato sulla potenza fotovoltaica di poco superiore agli 8.5 kW della singola unità. Nelle configurazioni con accumulo si rinuncia a questa soluzione e la conversione viene concentrata in un unico apparecchio, un inverter ibrido trifase che gestisce contemporaneamente l'ingresso del fotovoltaico in continua e la carica/scarica della batteria. La scelta dell'ibrido permette di evitare la doppia conversione che si avrebbe collegando un accumulo a valle di un inverter di sola corrente alternata, e nello stesso tempo evita di acquistare due apparecchi distinti quando la funzione può essere centralizzata. La taglia dell'ibrido varia con la configurazione: per i casi più piccoli è sufficiente una singola unità di media potenza, mentre per le configurazioni più estese se ne impiegano due in parallelo (da 29.9 kW a 54.9 kW). L'EPD dell'inverter fornisce il GWP in funzione della potenza nominale in kilowatt, il che semplifica il calcolo [33]. In Tabella 15 si riporta il dettaglio per il caso a sei unità carport con batteria.

Tabella 15 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter per sei unità carport con batteria

INVERTER		50 kW
Valori unitari da EPD:		
GWP tot. A1-A3	110	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. A4	1.31	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. A5	0.31	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. B1-B7	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. C1	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. C2	0.03	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. C3	0.16	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot. C4	0.40	kgCO ₂ eq/kW
Valori calcolati:		
GHG emb A1-A3	5'509	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	65.5	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	15.5	kgCO ₂ eq
GHG emb B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	1.49	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	8	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	20.2	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb inv. tot	5'620	kgCO ₂ eq

Per le configurazioni dotate di accumulo si aggiunge infine il contributo della batteria, contato all'interno delle emissioni incorporate totali due volte per tenere conto anche della sua sostituzione dopo 15 anni di attività. L'EPD del modello selezionato esprime il GWP in funzione della capacità nominale in chilowattora, e l'impronta è stata ricavata moltiplicando il GWP unitario per la capacità effettivamente installata nella configurazione [34].

Tabella 16 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per sei unità carport con batteria

BESS n batterie: 3 3 - H7 da 20.16 kWh	
BESS capacity	60 kWh
Valori unitari da EPD:	
GWP tot. A1	184 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. A2	2.53 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. A3	5.56 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. A4	3.96 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. A5	0.66 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. B6	72.2 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. C2	0.11 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. C3	0.59 kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot. C4	7.31 kgCO ₂ eq/kWh
Valori calcolati:	
GHG emb A1	11'040 kgCO ₂ eq
GHG emb A2	152 kgCO ₂ eq
GHG emb A3	334 kgCO ₂ eq
GHG emb A4	238 kgCO ₂ eq
GHG emb A5	39.3 kgCO ₂ eq
GHG emb B6	4'332 kgCO ₂ eq
GHG emb C2	6.6 kgCO ₂ eq
GHG emb C3	35.5 kgCO ₂ eq
GHG emb C4	439 kgCO ₂ eq
Valore totale:	
GHG emb bess tot	12'283 kgCO ₂ eq

Per ciascuna configurazione è stato infine costruito un grafico a torta che ripartisce l'impronta incorporata complessiva fra le voci appena descritte. La rappresentazione consente di leggere a colpo d'occhio il peso relativo di ogni componente e di individuare le voci dominanti, sulle quali si concentra l'impatto. In Figura 33 è riportato a titolo esemplificativo il grafico a torta della configurazione a sei unità carport con accumulo.

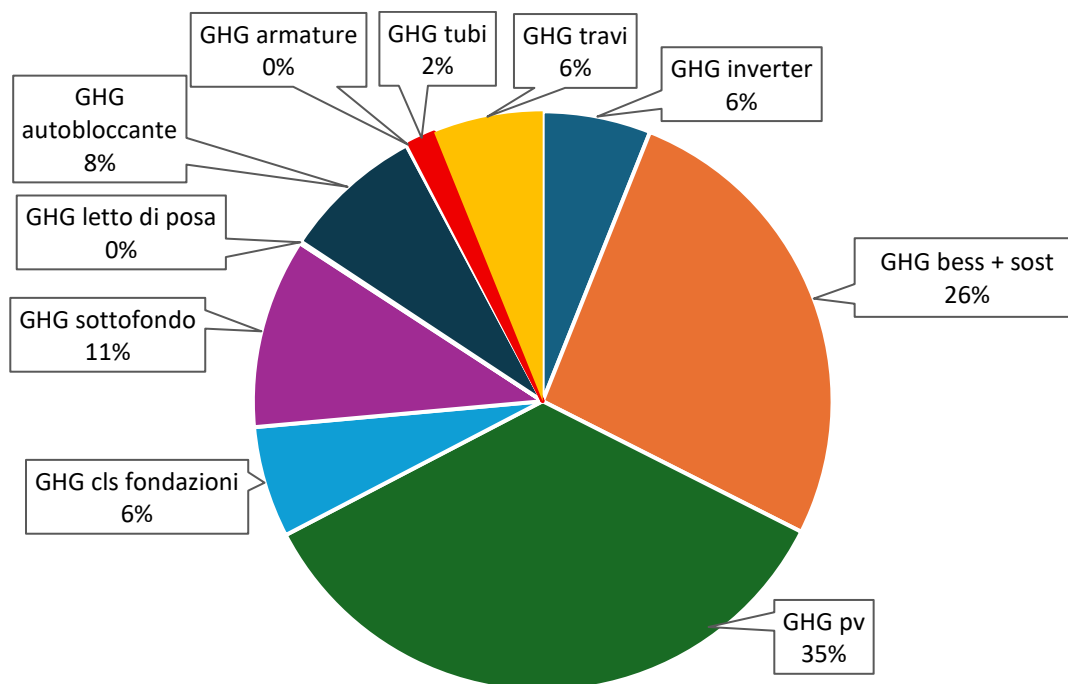


Figura 33 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport con batteria

La rappresentazione mette in evidenza come l'impronta incorporata sia concentrata in poche voci. Le due fette di gran lunga maggiori sono quelle dei moduli fotovoltaici e della batteria, che da sole pesano circa il 61% del totale, con il fotovoltaico attorno al 35% e l'accumulo, considerato comprensivo della sostituzione a metà vita, attorno al 26%. Le lavorazioni e i materiali dell'unità carport, pur rappresentando nel loro insieme una quota analoga, si distribuiscono su più voci di minore entità, fra cui il sottofondo, i masselli autobloccanti, il calcestruzzo delle fondazioni e il telaio in alluminio. L'inverter contribuisce per una frazione contenuta, mentre le armature e il letto di posa, per via delle quantità ridotte rispetto agli altri elementi, risultano trascurabili e prossimi allo zero.

6.3. Emissioni totali

Una volta calcolate le emissioni operative annue e quelle incorporate, si passa a valutare l'impatto ambientale complessivo dell'impianto sulla sua vita utile, qui assunta pari a 25 anni, e a confrontarlo con quello che caratterizza l'edificio in assenza di intervento, cioè con la baseline. Il confronto permette di leggere il beneficio dell'intervento in termini di emissioni complessivamente evitate.

Il calcolo è stato impostato seguendo due metodi, che differiscono nel modo in cui il fattore di emissione elettrico $f_{em,el}$ viene proiettato nel tempo. Nel primo metodo si assume il fattore costante per tutta la vita utile, pari al valore della Regione Lombardia [25] di 0.4332 kgCO₂eq/kWh già impiegato per il calcolo dell'operativa annua al Paragrafo 6.1. In questa ipotesi le emissioni operative annue sono identiche in ciascun anno, e l'impronta totale dell'impianto si ottiene moltiplicando il valore annuo calcolato dall'Equazione 1 per i 25 anni e sommando le emissioni incorporate dei vari componenti, come la seguente equazione mostra.

$$GHG_{TOT} = GHG_{OPER} \times n_{anni} + GHG_{emb} \quad \text{Eq.2}$$

Lo stesso schema è stato applicato alla baseline, in modo da poter confrontare due grandezze omogenee. La differenza fra le due restituisce la riduzione di impronta su tutto il periodo. Qui di seguito si riporta il confronto per la configurazione a sei unità carport con batteria.

Tabella 17 - Risultato del calcolo delle emissioni totali considerando fattore emissivo elettrico costante per sei unità carport con batteria

GHG 2049 $f_{em,el}$ fisso baseline	1'564'372	kgCO ₂ eq
GHG 2049 $f_{em,el}$ fisso impianto	1'010'058	kgCO ₂ eq
Risparmio	554'314	kgCO ₂ eq

Per questa configurazione il metodo a fattore emissivo fisso restituisce un'impronta complessiva di 1'010'058 kgCO₂eq sull'intera vita utile, a fronte degli 1'564'372 kgCO₂eq della baseline. La differenza, pari a 554'314 kgCO₂eq, rappresenta il risparmio di gas serra che l'intervento consente di ottenere in venticinque anni sotto l'ipotesi di una rete a fattore di emissione costante.

Il secondo metodo introduce una variazione del fattore di emissione lungo la vita utile, per tener conto del fatto che la rete elettrica nazionale si sta progressivamente decarbonizzando. In coerenza con l'obiettivo europeo di neutralità climatica al 2050, ribadito anche dal Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima [4], si è ipotizzato che $f_{em,el}$ decresca linearmente dal valore attuale di 0.4332 fino a zero nel 2050. Tale traiettoria è stata adottata come semplificazione, in mancanza di una curva codificata da norma tecnica e in attesa di proiezioni più articolate del mix elettrico nazionale. Il valore di $f_{em,el}$ è stato quindi ricalcolato anno per anno, l'Equazione 1 è stata applicata in ciascun anno con il proprio fattore, e i venticinque risultati sono stati sommati e aggiunti alle emissioni incorporate per ottenere l'impronta totale. Lo stesso procedimento è stato esteso alla baseline. In Tabella 18 si riportano, per la configurazione a sei unità carport con batteria, l'impronta totale dell'impianto e quella della baseline ottenute con questo metodo, in analogia con quanto presentato per il metodo a fattore fisso.

Tabella 18 - Risultato del calcolo delle emissioni totali considerando fattore emissivo elettrico variabile per sei unità carport con batteria

GHG 2049 $f_{em,el}$ variabile baseline	1'280'545	kgCO ₂ eq
GHG 2049 $f_{em,el}$ variabile impianto	1'036'669	kgCO ₂ eq
Risparmio	243'877	kgCO ₂ eq

Confrontando le due tabelle si osserva che, a parità di configurazione, il secondo metodo restituisce un risparmio cumulato di emissioni rispetto alla baseline più contenuto del primo. Per le sei unità carport il risparmio passa dai circa 554'314 kgCO₂eq del metodo a fattore fisso ai circa 243'877 kgCO₂eq del metodo a fattore variabile, cioè meno della metà.

Il motivo è insito nel modo in cui Equazione 1 tratta il surplus immesso in rete. Questa frazione di energia produce una quota di emissioni evitate, ottenuta moltiplicando i chilowattora ceduti per il fattore elettrico, che nello scenario a fattore fisso compensa buona parte delle emissioni dovute al consumo di gas naturale. Quando invece il fattore cala anno dopo anno fino ad annullarsi nel 2050, anche il credito sul surplus si riduce nella stessa misura, fino a sparire del tutto. Il consumo di gas naturale, che nella formulazione qui adottata mantiene il proprio fattore costante, continua nel frattempo a pesare invariato, e l'impronta operativa cumulata si avvicina al solo contributo termico e dei refrigeranti.

A complemento, in Figura 34 si riporta l'andamento delle emissioni operative annue dell'impianto nei due scenari, sempre per la configurazione a sei unità carport con batteria. Le due serie partono dallo stesso valore, perché nel primo anno il fattore di emissione elettrico è in entrambi i casi pari a 0.4332 kgCO₂eq/kWh. Da lì in avanti la serie a fattore fisso si mantiene costante per tutta la vita utile, mentre quella a fattore variabile cresce progressivamente fino ad arrivare, nel 2049, a circa 2'100 kgCO₂eq in più. La pendenza ascendente delle colonne variabili è la traduzione visiva di quanto appena descritto: man mano che il fattore elettrico cala, il credito sul surplus si dissolve e non sottrae più la quota di emissioni che nello scenario fisso compensava il consumo di gas. Il cumulato sui 25 anni della serie variabile, ossia l'area complessiva sotto la curva, risulta dunque maggiore di quello della serie fissa, ed è la lettura grafica del minor risparmio osservato nella Tabella 17 e Tabella 18 rispetto alla baseline.

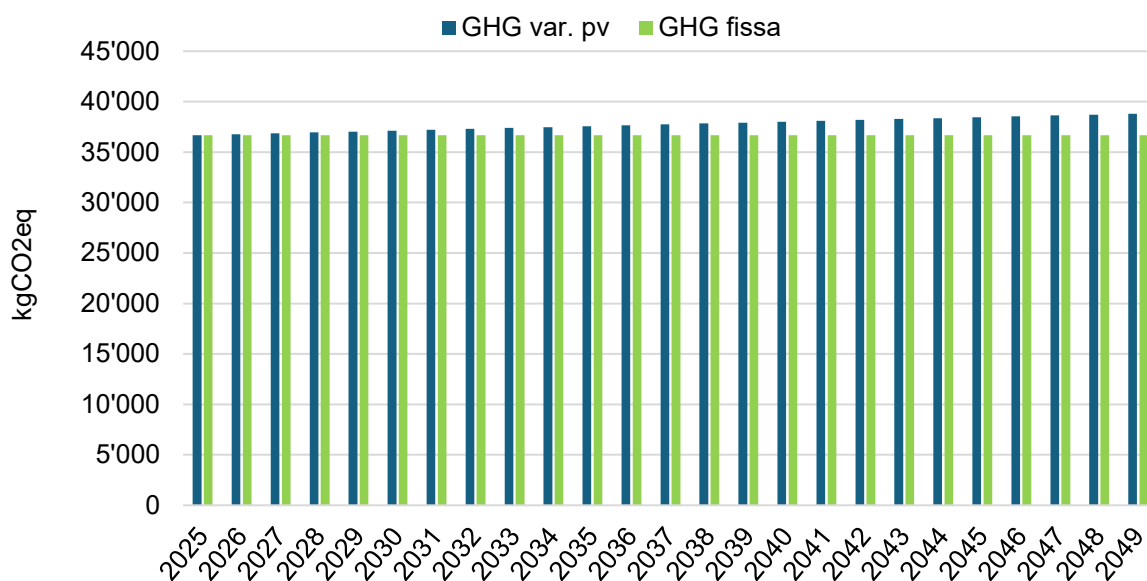


Figura 34 - Confronto delle emissioni operative con fattore emissivo elettrico fisso e variabile per sei unità carport con batteria

6.4. Carbon Payback Time

Una volta determinata l'impronta totale dell'impianto sulla vita utile, l'analisi si conclude con la valutazione del Carbon Payback Time, ovvero del numero di anni necessari affinché le emissioni evitate dall'intervento ripaghino il debito di CO₂ generato per la sua realizzazione. Il ragionamento è in tutto analogo a quello di un investimento finanziario: al momento della messa in opera l'impianto contrae un debito di emissioni pari a quelle incorporate dei suoi componenti, debito che viene poi ripagato anno dopo anno grazie alla quota di emissioni operative evitate rispetto alla baseline. Il Carbon Payback Time corrisponde all'anno in cui il saldo cumulato cambia di segno e da quel momento in poi l'impianto comincia a produrre un beneficio netto in termini di gas serra.

Per costruire l'indicatore si è impostato un confronto cumulato fra due grandezze. La prima è il debito incorporato. Nelle configurazioni senza accumulo è concentrato interamente all'anno zero ed è pari alla somma delle emissioni dei moduli fotovoltaici, del carport e dell'inverter. Nelle configurazioni con accumulo si aggiunge, all'anno quindici, un secondo impulso pari all'impronta della sola sostituzione della batteria, in coerenza con la durata utile di un sistema agli ioni di litio inferiore a quella del modulo fotovoltaico. L'inverter non viene invece sostituito

nel corso della vita utile e dunque non contribuisce a ulteriori impulsi nel tempo. La seconda grandezza è la somma cumulata anno per anno delle emissioni operative evitate rispetto alla baseline, calcolata coerentemente con il metodo a fattore di emissione variabile presentato al Paragrafo 6.3. Di conseguenza il beneficio annuo non è costante ma decresce progressivamente al calare del fattore elettrico, rispecchiando il fatto che con il passare del tempo la rete che il fotovoltaico va a sostituire diventa più pulita e produce un risparmio marginale via via inferiore.

Il Carbon Payback Time corrisponde all'anno in cui la curva cumulata delle emissioni evitate raggiunge il livello del debito incorporato. In Figura 35 si riporta il grafico per la configurazione a sei unità carport con accumulo, esempio rappresentativo del metodo. La colonna verde del debito mostra il salto iniziale all'anno zero e un secondo gradino in negativo all'anno quindici, dovuto alla sostituzione della batteria. La curva delle emissioni evitate cumulate, dapprima inferiore, cresce con pendenza decrescente e finisce per intersecare l'asse delle ascisse in corrispondenza dell'anno di payback, fra il terzo e il quarto anno per la configurazione mostrata. Da quel punto in poi il saldo resta positivo per tutto il resto della vita utile, e il piccolo gradino in negativo dovuto alla sostituzione della batteria nel quindicesimo anno non basta a riportare il bilancio in territorio negativo. Lo stesso procedimento è stato applicato a tutte le configurazioni considerate, con e senza accumulo, i cui valori complessivi vengono raccolti nel capitolo dedicato ai risultati comparativi.

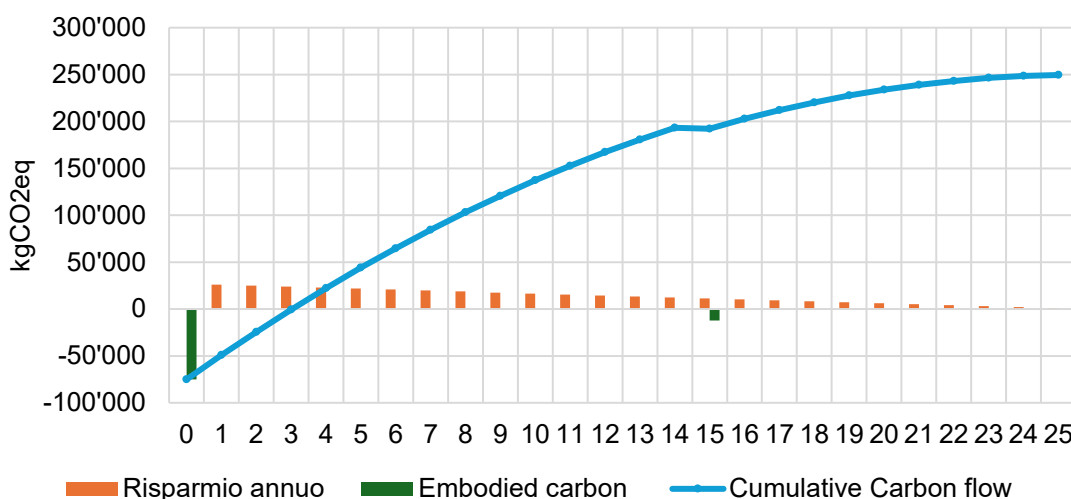


Figura 35 - Analisi del Carbon Payback per sei unità carport con batteria

7 Valutazione economica

Dopo aver valutato le configurazioni dal punto di vista energetico e ambientale, il presente capitolo ne analizza la dimensione economica, con l'obiettivo di stabilire se la spesa necessaria a realizzare l'impianto venga ripagata dai risparmi che esso produce lungo la sua vita utile. Si parte dalla definizione degli indicatori impiegati per giudicare la convenienza dell'investimento, si descrivono poi le voci di costo iniziali e quelle ricorrenti, raccolte rispettivamente sotto le voci CAPEX e OPEX, e si procede con l'analisi costi-benefici vera e propria. Il capitolo si chiude con il calcolo del LCOE, che esprime il costo dell'energia prodotta dall'impianto lungo l'intero periodo considerato.

7.1. Indicatori economici utilizzati

Per valutare la convenienza dell'intervento, l'impianto è stato trattato come un investimento, descritto da un esborso iniziale e da una successione di flussi di cassa annuali che si manifestano lungo la sua vita utile, qui assunta pari a 25 anni, come nella valutazione ambientale. Poiché tali flussi non si verificano nello stesso istante, prima di poterli confrontare occorre riportarli a un riferimento comune, cioè al momento dell'investimento. Questa operazione, detta attualizzazione, tiene conto del fatto che una somma disponibile oggi vale più della stessa somma disponibile in futuro, e consiste nel dividere ciascun flusso per un fattore che cresce con l'anno in cui esso si presenta.

Due ipotesi governano questo passaggio. La prima riguarda l'inflazione, assunta pari al 2% annuo e applicata ai flussi che si ripetono di anno in anno, vale a dire il risparmio in bolletta e i costi di gestione dell'impianto, in modo da farli crescere nel tempo. Il valore corrisponde all'obiettivo di stabilità dei prezzi di medio termine fissato dalla Banca Centrale Europea [35]. La seconda riguarda il tasso di attualizzazione, assunto in termini nominali pari al 5.8%, con cui ogni flusso futuro viene riportato al valore presente. Tale valore corrisponde al tasso di remunerazione del capitale investito riconosciuto da ARERA per il 2024 per il servizio di trasmissione dell'energia elettrica [36]. L'impiego di un tasso nominale è coerente con flussi anch'essi espressi in termini nominali, già comprensivi della crescita dovuta all'inflazione.

A queste si aggiunge un'ipotesi relativa alla produzione fotovoltaica. I moduli perdono efficienza nel tempo, e di questo si è tenuto conto riducendo l'energia generata: nel primo anno la produzione è stata abbattuta dell'1% per effetto del degrado iniziale dichiarato nella scheda tecnica, mentre dal secondo anno in poi si è applicato un calo dello 0.4% annuo [20]. La riduzione non incide sui costi di gestione, bensì sull'energia prodotta e quindi sull'autoconsumo e sul risparmio in bolletta che ne deriva.

Definito il quadro, il primo indicatore considerato è il valore attuale netto, indicato nel seguito con la sigla inglese NPV (Net Present Value), che somma tutti i flussi di cassa attualizzati e li confronta con l'investimento iniziale, restituendo il guadagno complessivo dell'operazione sull'intero orizzonte.

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+r)^t} \quad \text{Eq.3}$$

Dove:

I_0 è l'investimento iniziale [€];

F_t è il flusso di cassa netto dell'anno t-esimo [€];

r è il tasso di attualizzazione nominale, pari a 5.8%;

N è l'orizzonte temporale, pari a 25 anni;

t è l'anno di riferimento.

Un NPV positivo indica che i risparmi generati superano la spesa sostenuta e che l'investimento crea valore; un NPV negativo segnala invece che l'intervento non si ripaga nell'arco considerato.

Al valore attuale netto si affianca il tempo di ritorno dell'investimento, indicato con la sigla PBT (Payback Time), che misura dopo quanti anni i benefici accumulati pareggiano l'investimento. Esso è stato calcolato come il primo anno in cui il flusso di cassa cumulato, valutato in forma attualizzata, diventa positivo; si tratta quindi di un ritorno scontato, più prudente di quello che si otterrebbe sommando i flussi senza attualizzarli [16].

Per completare il quadro sono stati calcolati altri due indicatori. Il primo è il costo livellato dell'elettricità, noto come LCOE (Levelized Cost Of Electricity), che esprime il costo medio di un kWh prodotto dall'impianto lungo tutta la sua vita, ottenuto rapportando i costi complessivi attualizzati all'energia complessivamente generata, anch'essa attualizzata [37].

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq.4}$$

Dove:

C_t sono i costi di gestione dell'anno t-esimo [€];

E_t è l'energia prodotta nell'anno t-esimo [kWh], al netto del degrado;

gli altri simboli mantengono il significato già introdotto.

Confrontando il LCOE con la tariffa pagata in bolletta per l'energia prelevata dalla rete si stabilisce se l'autoproduzione risulti più conveniente del prelievo: quanto più il LCOE è inferiore a tale tariffa, tanto maggiore è il vantaggio.

Il secondo è il tasso interno di rendimento, indicato con la sigla IRR (Internal Rate of Return), definito come il tasso di attualizzazione che annulla il NPV [16]. Esso rappresenta il rendimento intrinseco dell'investimento e va letto per confronto con il tasso di attualizzazione adottato: se

l'IRR risulta superiore al 5.8%, l'operazione rende più del costo del capitale assunto come riferimento e il margine fra i due valori dà la misura della convenienza.

L'insieme di questi indicatori è stato determinato per quattro situazioni distinte, ottenute combinando la presenza o l'assenza dell'accumulo con la presenza o l'assenza della detrazione fiscale del 50% sull'investimento, recuperata in dieci quote annuali.

7.2. CAPEX

Il primo passo dell'analisi economica è consistito nel definire il CAPEX, ossia l'investimento iniziale necessario a realizzare l'impianto. Tale importo è dato dalla somma del costo di tutti i componenti impiegati, comprese le opere per la realizzazione delle unità carport e i costi dei moduli fotovoltaici, della batteria e degli inverter. Per stimarlo sono stati ripresi gli stessi elementi già considerati nella valutazione ambientale, ai quali è stato associato un prezzo. Per le lavorazioni si è fatto riferimento al Prezzario Regionale del Veneto [15], che fornisce il prezzo per unità di misura: moltiplicando ciascun prezzo unitario per le quantità necessarie si è ottenuto il costo della singola voce.

La prima parte riguarda il carport. Sono state innanzitutto individuate, all'interno del prezzario, le lavorazioni necessarie a realizzarlo, ossia la demolizione della pavimentazione esterna esistente, lo scavo di sbancamento, la posa del misto granulare stabilizzato, la posa della sabbia, la posa dei masselli autobloccanti e infine il trasporto a discarica del materiale demolito. Per ciascuna di queste voci il prezzo unitario è stato moltiplicato per le quantità considerate. Successivamente, sempre attingendo al prezzario, sono state quantificate le lavorazioni relative ai plinti di fondazione, vale a dire lo scavo a sezione obbligata, la casseratura, l'armatura e il getto di calcestruzzo. Lo scavo a sezione obbligata è stato computato a partire dalla quota raggiunta con lo scavo di sbancamento, così da non conteggiare due volte lo stesso volume di terreno. Il prezzo della struttura del carport è stato invece reperito come valore unitario, ed è quindi bastato moltiplicarlo per il numero di unità considerate [38]. Allo stesso prezzario appartiene anche il costo dell'inverter di stringa da 10 kW, previsto per ciascuna unità carport nelle configurazioni prive di accumulo. A completare la voce è stata aggiunta la manodopera, costituita da un operaio edile specializzato e da uno qualificato, per i quali si è assunta una giornata lavorativa per ogni unità carport.

Per i moduli fotovoltaici non è stato possibile accedere al listino del produttore. Il prezzo unitario è stato quindi assunto dal prezzario, in corrispondenza della voce relativa a un modulo monocristallino da 330 W, che ne rappresenta la taglia maggiore disponibile. Pur riferendosi a una potenza inferiore rispetto a quella dei moduli effettivamente impiegati, tale valore è stato mantenuto in quanto risultato coerente con i prezzi di mercato rilevati online per moduli fotovoltaici della stessa tipologia e fascia di potenza, così da disporre di un riferimento di costo al tempo stesso autorevole e allineato al mercato.

Nelle configurazioni dotate di accumulo si è proceduto in modo analogo, assumendo per la batteria il prezzo effettivo reperito online. Il sistema di accumulo adottato, della serie FoxESS ECS2900, è di tipo modulare e si compone di armadi disponibili in più taglie: nel presente lavoro sono stati impiegati l'armadio da 20.16 kWh, indicato dal produttore con la sigla H7 [39], e quello da 11.52 kWh, indicato con la sigla H4 [40]. La capacità richiesta da ciascuna configurazione è stata ottenuta combinando il numero opportuno di armadi, e il costo complessivo della batteria è dato dalla somma dei prezzi dei singoli armadi impiegati. La taglia

da 30 kWh è stata realizzata con un armadio H7 affiancato da uno H4, quella da 40 kWh con due armadi H7 e quella da 60 kWh con tre armadi H7.

Per l'inverter ibrido associato all'accumulo si è adottato lo stesso criterio fondato sui prezzi reali. Nelle configurazioni con batteria gli inverter di stringa, previsti in ragione di uno per unità carport, lasciano il posto a un unico inverter ibrido centralizzato, accoppiato in corrente continua, che gestisce in un solo stadio di conversione sia la produzione fotovoltaica sia i flussi da e verso la batteria. Anche in questo caso si è fatto ricorso alla serie FoxESS H3-PRO, disponibile in più taglie di potenza, impiegando i modelli da 29.9 kW e da 25 kW [41] [42]. La potenza dell'inverter è stata scelta in modo da coprire il fabbisogno di ciascuna configurazione, per cui il numero e la combinazione dei modelli crescono al crescere della taglia dell'impianto. Le configurazioni da quattro e cinque unità carport sono servite da un singolo inverter da 29.9 kW, quelle da sei e sette unità carport da due inverter da 25 kW, e quella da otto unità carport da un inverter da 29.9 kW affiancato da uno da 25 kW. Il costo complessivo è dato, come per la batteria, dalla somma dei prezzi dei modelli effettivamente impiegati.

Sommando tutte le voci si è ottenuto il CAPEX dell'impianto. Poiché le due tipologie impiantistiche differiscono, ne derivano due valori distinti: uno per la configurazione priva di accumulo, comprensivo degli inverter di stringa, e uno per la configurazione con accumulo, nella quale i moduli sono affiancati dal blocco batteria e dal relativo inverter ibrido al posto degli inverter di stringa. I due valori sono stati impiegati separatamente nei rispettivi casi dell'analisi costi-benefici.

Di seguito si riporta, a titolo di esempio, il calcolo del CAPEX relativo alla configurazione a sei unità carport dotata di accumulo, insieme al grafico che ne illustra il peso dei singoli componenti.

Tabella 19 - Calcolo del capex per il caso a sei unità carport con batteria

Voce	Descrizione	Prezzo unitario [€]	Per carport [€]	Totale [€]
CAPEX CARPORT (N = 6)				
	Struttura carport (prezzo fisso, IVA inclusa)	—	3'904	23'424
VEN25-01.05.04.00	Demolizione di pavimentazioni esterne (m ²)	31.1	1'258	7'548
VEN25-01.02.03.00	Scavo di sbancamento (m ³)	7.99	113	678
VEN25-01.03.11.00	Fornitura e stesa di misto granulare stabilizzato (m ³)	39.6	320	1'922
VEN25-01.03.08.00	Fornitura e stesa di sabbia (m ³)	48.9	99.1	594
VEN25-01.14.16.00	Fornitura e posa di pavimento in masselli autobloccanti (m ²)	42.2	1'708	10'253
VEN25-AT.20.045.01	Trasporto a discarica del materiale di risulta (m ³)	65.2	922	5'536
VEN25-01.02.04.a	Scavo a sezione obbligata eseguito a macchina (m ³)	11.6	27.75	166
VEN25-01.08.02.b	Calcestruzzo preconfezionato XC1 C25/30 (m ³)	163	549	3'295
VEN25-01.08.06.a	Casseforme per opere di fondazione (m ²)	28.9	472	2'836

VEN25-01.08.04.00	Acciaio in barre tipo B450C (kg)	2.21	0.08	0.49
VEN25-RU.01.02.a	Operaio specializzato edile (h)	33.0	264	1'585
VEN25-RU.01.03.a	Operaio qualificato edile (h)	30.5	244	1'467
CAPEX CARPORT			9'884	59'310
CAPEX PV (15 moduli per carport)				
VEN25-10.05.06.03	Pannello monocristallino 330 Wp (cad)	392	5'885	35'313
VEN25-10.05.02.10	Inverter di stringa per fotovoltaico, P = 10 kW (cad)	2'558	2'558	15'352
CAPEX PV			8'444	50'666
CAPEX PV (soli moduli, per configurazione con accumulo)			5'885	35'313
CAPEX BESS				
	FoxESS ECS2900-H7 CUBE 20.16 kWh (n. 3)	5'248	—	15'745
VEN25-RU.04.02.a	Operaio specializzato elettricista (24 h)	34.0	—	817
VEN25-RU.04.03.a	Operaio qualificato elettricista (24 h)	28.9	—	695
	Inverter FoxESS 2×25 kW ibrido trifase	—	—	7'057
CAPEX BESS			—	24'316

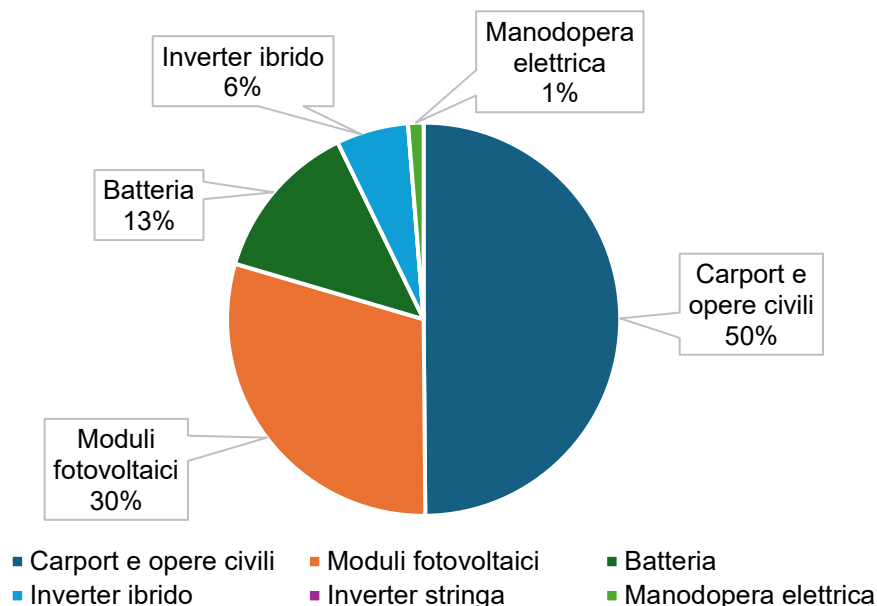


Figura 36 - Peso relativo dei vari componenti all'interno del capex per il caso a sei unità carport con batteria

Si può notare, dalla Figura 36, che circa il 50% del capex è dato dal carport e dalla sua realizzazione, il peso dei pannelli è il 30%, mentre quello relativo alla batteria, inverter ibrido e manodopera per realizzarli è del 20%.

7.3. OPEX

Calcolati i CAPEX, si è passati a valutare i costi operativi annui, ossia gli OPEX. Con questo termine si intende l'insieme dei costi che si ripetono ogni anno lungo la vita dell'impianto. Nel caso in esame essi comprendono la bolletta energetica, la manutenzione del sistema e, a metà della vita utile, la sostituzione della batteria.

La prima voce considerata è la bolletta energetica. Per quantificarla sono stati impiegati due valori di costo dell'energia ricavati dalle utenze reali della struttura relative al 2025, comprensivi di tutte le componenti tariffarie, vale a dire la quota fissa, la quota variabile, le accise e l'IVA. Il ricorso a valori già comprensivi di ogni componente permette di valutare il risparmio sulla base del prezzo effettivamente sostenuto, e non di un valore depurato. I due valori adottati sono pari a 0.2259 €/kWh per l'energia elettrica e a 1.5619 €/Smc per il gas.

La bolletta è stata quindi calcolata moltiplicando il costo medio dell'energia elettrica per l'energia prelevata dalla rete e sommando a tale prodotto quello tra il costo medio del gas e il gas consumato, come da equazione seguente:

$$\text{Costo bolletta} = E_{\text{from grid}} \times 0.2259 + E_{\text{gas}} \times 1.5619 \quad \text{Eq.5}$$

Il calcolo è stato eseguito sia per la configurazione priva di accumulo sia per quella dotata di accumulo, e in entrambi i casi è stato confrontato con la bolletta dello scenario di partenza. Nella Tabella 20 e nella Figura 37 si riportano, a titolo di esempio, i valori della bolletta energetica annua e la loro differenza tra le tre situazioni a confronto, ossia lo scenario di partenza, la configurazione senza accumulo e quella con accumulo, per il caso a sei unità carport.

Tabella 20 - Calcolo della bolletta energetica per il caso a sei unità carport

	Costo gas [€]	Costo energia elett. [€]	Totale [€]
Baseline	27'439	12'334	39'773
No bess	27'421	6'041	33'462
Con bess	27'421	2'805	30'226

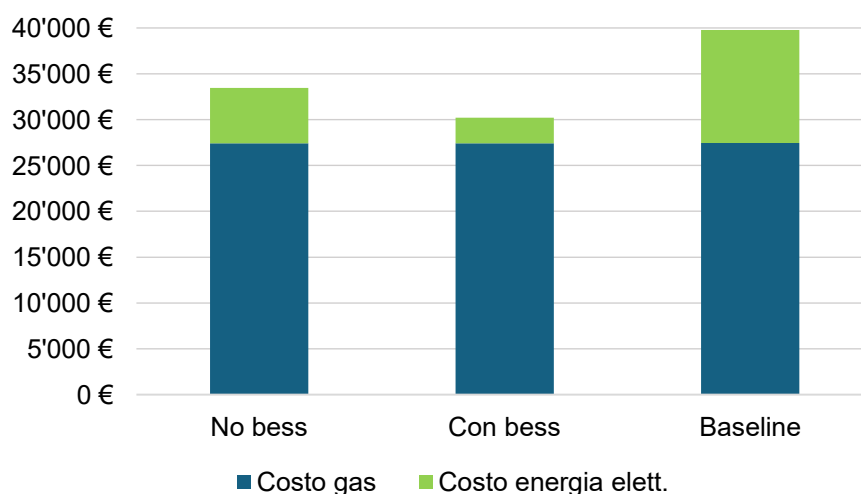


Figura 37 - Confronto della bolletta energetica per il caso a sei unità carport

La spesa per il gas si mantiene sostanzialmente invariata nelle tre situazioni, attorno ai 27'400 €, a conferma del fatto che l'intervento non incide sui consumi termici. A variare è la sola componente elettrica: nello scenario di partenza essa ammonta a 12'334 €, scende a 6'041 € con la sola configurazione fotovoltaica e si riduce ulteriormente a 2'805 € con l'aggiunta dell'accumulo. Il fotovoltaico dimezza quindi la spesa elettrica, mentre la batteria la abbatta fino a meno di un quarto del valore iniziale, grazie al maggiore autoconsumo che consente di prelevare meno energia dalla rete. Tale andamento si riflette sul totale della bolletta, che passa dai 39'773 € dello scenario di partenza ai 33'462 € della configurazione senza accumulo e ai 30'226 € di quella con accumulo. La differenza rispetto allo scenario di partenza, interamente imputabile alla componente elettrica, costituisce il risparmio annuo che alimenta l'analisi costi-benefici del paragrafo successivo.

La bolletta energetica è stata calcolata per intero, comprendendo sia la spesa per l'energia elettrica sia quella per il gas, così da rappresentare il costo energetico complessivo della struttura. L'intervento agisce tuttavia sulla sola energia elettrica, mentre il consumo di gas, legato al riscaldamento, resta invariato tra lo scenario di partenza e quello dotato di impianto. Nel confronto da cui scaturisce il risparmio la componente relativa al gas compare quindi con lo stesso valore in entrambi gli scenari e si elide, cosicché il beneficio economico coincide con la sola riduzione della bolletta elettrica. Per questa ragione, nell'analisi costi-benefici sviluppata nel paragrafo successivo, della spesa in bolletta viene portata la sola componente elettrica, che è l'unica a variare per effetto dell'impianto.

Definita la bolletta, si è passati al costo della manutenzione, stimato pari all'1.5% annuo del costo di investimento dei pannelli fotovoltaici, che per la configurazione a sei unità carport corrisponde a circa 760 € annui. Questo valore è stato adottato in coerenza con la letteratura tecnico-economica e con le buone pratiche di gestione e manutenzione degli impianti fotovoltaici [43], [44].

Infine, come anticipato, al quindicesimo anno è stato inserito il costo per la sostituzione della batteria, comprensivo degli armadi di accumulo e della manodopera elettrica necessaria all'intervento.

Tutti questi costi operativi sono stati infine considerati anno per anno, facendoli crescere del 2% annuo secondo il tasso di inflazione introdotto nel paragrafo precedente [35].

7.4. Analisi costi-benefici

Definiti i costi di investimento e i costi operativi, si è proceduto con l'analisi costi-benefici vera e propria. Per svilupparla si è costruito un flusso di cassa esteso ai venticinque anni di vita utile, dal 2025 al 2049. L'anno zero coincide con il 2025 e accoglie la sola voce di investimento iniziale, ossia il CAPEX definito nel paragrafo 7.2. A partire dall'anno successivo il flusso registra, per ciascun anno, i benefici e i costi prodotti dall'impianto, fino al 2049, anno in cui si valuta il valore attuale netto complessivo.

Le voci che alimentano il flusso sono quattro, suddivise tra benefici e costi. Il primo beneficio è il risparmio in bolletta. Esso corrisponde alla differenza tra la spesa elettrica dello scenario di partenza (baseline) e il costo netto dell'energia elettrica nella configurazione dotata di impianto. Tale costo netto è dato dall'energia prelevata dalla rete, valorizzata alla tariffa elettrica, diminuita del ricavo derivante dalla vendita del surplus immesso in rete. Quest'ultimo è valorizzato al prezzo zonale medio del 2024 per la zona Nord, pari a 0.1074 €/kWh, secondo il dato fornito dal GME [45]. Il risparmio così ottenuto cresce di anno in anno con l'inflazione e

si riduce leggermente per effetto del degrado dei moduli, che diminuisce la produzione disponibile.

Il secondo beneficio è la detrazione fiscale per ristrutturazioni edilizie, pari al 50% del costo di investimento e recuperata in dieci quote annuali di pari importo. Si precisa che l'aliquota del 50% rappresenta il livello massimo dell'agevolazione, riconosciuto dalla normativa vigente per gli interventi sull'abitazione principale del proprietario; per le altre tipologie di immobile la detrazione si riduce al 36%. Nel presente lavoro si è scelto di adottare il valore del 50% così da rappresentare lo scenario incentivante più favorevole. Essa è presente solo negli scenari che prevedono l'incentivo e compare nel flusso di cassa limitatamente ai primi dieci anni [46].

Sul fronte dei costi si trovano invece il CAPEX iniziale, già richiamato nel Paragrafo 7.2, e i costi operativi descritti nel Paragrafo 7.3, tra cui la manutenzione annua, anch'essa rivalutata con l'inflazione e la sostituzione della batteria al quindicesimo anno.

Definite le quattro voci, per ciascun anno si è calcolato il flusso netto, dato dalla somma algebrica di benefici e costi. Ogni flusso annuo è stato poi attualizzato al tasso del 5.8% e i valori così ottenuti sono stati accumulati anno dopo anno. Il valore raggiunto dal flusso cumulato attualizzato al termine dei venticinque anni costituisce il valore attuale netto dell'investimento, mentre l'anno in cui tale flusso cambia segno e diventa positivo individua il tempo di ritorno. Il tasso interno di rendimento, infine, è stato ricavato dalla stessa serie dei flussi netti, come il tasso che ne annulla il valore attuale netto.

Per agevolare la lettura dei risultati si è infine costruito un grafico del flusso di cassa cumulato attualizzato, in analogia con quello impiegato per il tempo di ritorno delle emissioni di CO₂ nel capitolo precedente. La curva parte in territorio negativo, in corrispondenza dell'esborso iniziale, e risale progressivamente man mano che i benefici annui si accumulano. Il punto in cui essa interseca l'asse orizzontale individua il tempo di ritorno, mentre il valore raggiunto all'ultimo anno corrisponde al valore attuale netto.

L'intera analisi è stata condotta per quattro scenari, ottenuti incrociando la presenza o l'assenza dell'accumulo con la presenza o l'assenza dell'incentivo fiscale, così da distinguere l'effetto della batteria da quello della detrazione. Di seguito si riporta, a titolo di esempio, il grafico relativo alla configurazione a sei unità carport dotata di accumulo, nello scenario privo di incentivo.

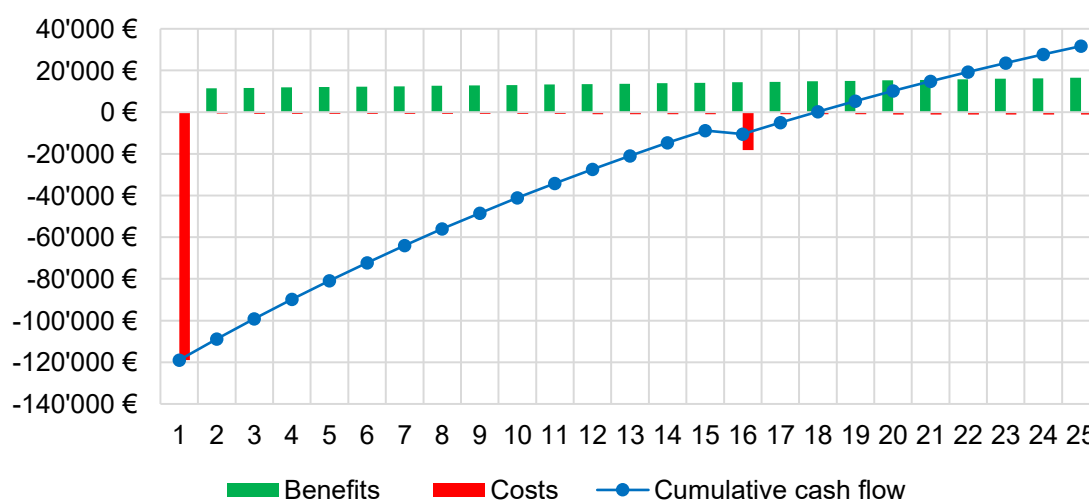


Figura 38 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo

La curva mostra come il flusso cumulato attualizzato parta dal valore negativo dell'investimento iniziale, pari a 118'940 €, e risalga progressivamente per effetto dei risparmi annui. L'intersezione con l'asse avviene al diciassettesimo anno, che rappresenta quindi il tempo di ritorno dell'investimento, mentre al termine dei venticinque anni la curva raggiunge un valore attuale netto positivo di 35'466 €. Il fatto che il valore attuale netto sia positivo indica che, anche in assenza di incentivo, l'intervento ripaga la spesa sostenuta e genera un guadagno lungo la vita utile. Il tasso interno di rendimento si attesta all'8.58%, valore superiore al tasso di attualizzazione del 5.8% assunto come riferimento: l'investimento rende dunque più di quanto costi reperire il capitale necessario a realizzarlo, a conferma della sua convenienza.

7.5. LCOE

Tra gli indicatori definiti in apertura del capitolo, il costo livellato dell'elettricità occupa una posizione a sé, poiché non rientra nella costruzione del flusso di cassa illustrata nel paragrafo precedente ma deriva da un calcolo autonomo. La sua formula è già stata introdotta nel paragrafo 7.1 nell'Equazione 4; in questa sede si descrivono le scelte adottate per popolarne le due parti.

Al numeratore sono stati considerati i soli costi, vale a dire l'investimento iniziale e i costi di gestione attualizzati lungo i venticinque anni, comprensivi della sostituzione della batteria al quindicesimo anno. Non vi rientrano invece il risparmio in bolletta e la detrazione fiscale. Il costo livellato esprime infatti quanto costa produrre un chilowattora con l'impianto e tale valore è stato mantenuto indipendente sia dal prezzo attribuito all'energia prodotta sia dalle forme di sostegno, che incidono sulla convenienza dell'intervento ma non sul suo costo di produzione e che sono già considerate dagli altri indicatori.

Al denominatore è stata posta l'energia complessivamente prodotta dall'impianto lungo la sua vita utile, ridotta per tenere conto del degrado dei moduli, pari all'1% nel primo anno e allo 0.4% negli anni successivi. A tale energia è stata applicata la stessa attualizzazione impiegata per i costi, così da mantenere la coerenza tra le due grandezze poste a rapporto.

Da questa impostazione discende una conseguenza utile alla lettura dei risultati. Poiché la detrazione non interviene nel calcolo, il costo livellato non dipende dalla presenza o meno dell'incentivo e assume, a parità di configurazione, lo stesso valore nei due scenari con e senza incentivo. Esso è stato pertanto calcolato una sola volta per ciascuna configurazione, e non per ognuno dei quattro scenari considerati nell'analisi costi-benefici. Il valore ottenuto è stato infine confrontato con la tariffa pagata in bolletta per stabilire la convenienza dell'autoproduzione, mentre il confronto del costo livellato tra tutte le configurazioni è riportato nel capitolo dei risultati.

8 Analisi integrata economico-ambientale e indicatori energetici

Dopo aver valutato le configurazioni dal punto di vista energetico, ambientale ed economico considerati separatamente, il presente capitolo li riunisce in un'unica lettura, con l'obiettivo di verificare quanto i risultati reggano una volta che alle emissioni operative evitate viene attribuito un valore monetario. Si parte dall'introduzione di un prezzo ombra per la CO₂ e dalla ricostruzione su questa base degli indicatori di redditività, per chiudere con due indicatori energetici, l'Energy Payback Time e l'EROI, che misurano in quanto tempo e quante volte l'impianto restituisce l'energia spesa per realizzarlo.

8.1. Prezzo ombra della CO₂eq

Le analisi svolte nei capitoli precedenti hanno trattato la dimensione ambientale e quella economica come due piani distinti, misurati con grandezze fra loro non confrontabili: le tonnellate di anidride carbonica da un lato e gli euro dall'altro. Per riunirle in un'unica valutazione serve un criterio che traduca le emissioni in termini monetari, così da poterle sommare ai risparmi conseguiti in bolletta. A questo scopo è stato impiegato il prezzo ombra del carbonio, ossia il valore che l'analisi economica pubblica attribuisce a una tonnellata di CO₂eq affinché l'effetto climatico di un investimento entri in modo esplicito nel calcolo costi-benefici.

Questo valore indica il costo marginale di abbattimento necessario per portare l'economia mondiale a emissioni nette nulle entro il 2050, in coerenza con la traiettoria di contenimento del riscaldamento entro 1.5 °C indicata dall'IPCC [2]. Si tratta dunque di un riferimento per la valutazione e non di un costo realmente sostenuto sul mercato. I valori adottati provengono dalla Banca Europea per gli Investimenti, che ne pubblica una traiettoria di riferimento pari a 250 €/t al 2030 e a 800 €/t al 2050 [16].

Poiché i valori di riferimento riguardano solo il 2030 e il 2050, per avere un prezzo in ogni anno i due punti sono stati congiunti con una retta. Il prezzo è stato così ricavato anno per anno lungo tutto l'orizzonte di analisi, dal 2025 al 2049, crescendo in modo regolare da 112.5 €/t nel primo anno fino a 772.5 €/t nell'ultimo.

Definito il prezzo per ogni anno, il calcolo è stato condotto in due passaggi. Per prima cosa sono state valorizzate le emissioni incorporate nei componenti, che si manifestano una sola volta. Queste sono state moltiplicate per il prezzo del 2025, sia per la configurazione con il solo impianto fotovoltaico e carport, sia per quella che comprende anche l'accumulo. A queste si è aggiunta la sostituzione della batteria, prevista al quindicesimo anno di esercizio e perciò collocata nel 2039, le cui emissioni incorporate sono state valorizzate con il prezzo ombra di quell'anno. Nella Tabella 21 sono riportati i risultati per il caso a sei unità carport.

Tabella 21 - Calcolo del prezzo ombra delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport

Sistema	GHG emb (tCO ₂ eq)	P_CO ₂ del 2025 e 2039 (€/t)	Costo clima (€)
PV + carport	62.9	112.5	7'071
PV + carport + bess	75.1	112.5	8'453
Sost bess	12.3	497.5	6'111

Le emissioni incorporate della configurazione con accumulo superano quelle della sola parte fotovoltaica di 12.3 tCO₂eq, differenza che corrisponde per intero al modulo della batteria. Valorizzate al prezzo del primo anno, queste quantità si traducono in un costo climatico di 7'071 € per l'impianto senza accumulo e di 8'453 € per quello con accumulo. La sostituzione della batteria, pur riguardando la stessa quantità fisica di emissioni incorporate, comporta un onere di 6'111 €, quasi pari a quello dell'intero accumulo iniziale. La ragione sta nel prezzo ombra, che nel 2039 ha già raggiunto i 497.5 €/t, oltre quattro volte il valore del 2025. Le emissioni rinviate nel tempo pesano quindi molto più di quelle sostenute all'inizio.

In un secondo momento sono state prezzate le emissioni operative evitate. Per questa parte si è fatto riferimento alle sole emissioni calcolate con il fattore di emissione elettrico variabile, e non con quello fisso. Questa scelta dipende dalla natura del prezzo ombra adottato. La traiettoria crescente fino a 800 €/t presuppone un sistema che raggiunge la neutralità al 2050, e in quello stesso scenario la rete elettrica si decarbonizza progressivamente. Il fattore variabile descrive tale diminuzione dell'intensità carbonica del mix nazionale, mentre il fattore fisso manterrebbe costante l'intensità attuale per venticinque anni. L'impiego del fattore fisso insieme a un prezzo che cresce proprio in ragione della decarbonizzazione risulterebbe pertanto incoerente. Per ciascun anno la quantità di emissioni operative evitate è stata moltiplicata per il prezzo ombra corrispondente, ottenendo il beneficio climatico annuo nelle due configurazioni, con e senza accumulo. Nella Tabella 22 è riportato il calcolo per il caso a sei unità.

Tabella 22 - Calcolo del beneficio climatico riguardo le emissioni operative evitate per il caso a sei unità carport

Anno	P_CO ₂ (€/t)	GHG oper. evitate senza bess (tCO ₂ eq/anno)	GHG oper. evitate con bess (tCO ₂ eq/anno)	Benefic. clim. senza bess (€/anno)	Benefic. clim. con bess (€/anno)
2025	112.5	26.6	25.9	2'989	2'913
2026	140.0	25.5	24.9	3'570	3'480
2027	167.5	24.4	23.8	4'094	3'991
2028	195.0	23.4	22.8	4'559	4'444
2029	222.5	22.3	21.8	4'966	4'840
2030	250.0	21.3	20.7	5'314	5'180
2031	277.5	20.2	19.7	5'604	5'463
2032	305.0	19.1	18.7	5'836	5'688
2033	332.5	18.1	17.6	6'009	5'857
2034	360.0	17.0	16.6	6'124	5'969
2035	387.5	15.9	15.5	6'180	6'024
2036	415.0	14.9	14.5	6'178	6'022
2037	442.5	13.8	13.5	6'118	5'963
2038	470.0	12.8	12.4	5'999	5'848
2039	497.5	11.7	11.4	5'822	5'675
2040	525.0	10.6	10.4	5'586	5'445
2041	552.5	9.58	9.34	5'292	5'159
2042	580.0	8.52	8.30	4'940	4'816
2043	607.5	7.46	7.27	4'529	4'415
2044	635.0	6.39	6.23	4'060	3'958
2045	662.5	5.33	5.20	3'533	3'444
2046	690.0	4.27	4.16	2'947	2'873
2047	717.5	3.21	3.13	2'303	2'245
2048	745.0	2.15	2.09	1'600	1'560
2049	772.5	1.09	1.06	839	818
TOTALE 25 anni:		345.6	336.9	114'989	112'092

Le emissioni operative evitate diminuiscono di anno in anno, passando per la configurazione senza accumulo da circa 26.6 tCO₂eq nel 2025 a poco più di 1.09 tCO₂eq nel 2049. Questa discesa riflette il fattore di emissione variabile: man mano che la rete si decarbonizza, ogni chilowattora prelevato in meno dalla rete evita una quantità sempre minore di emissioni. Il prezzo ombra segue l'andamento opposto e cresce da 112.5 a 772.5 €/t. Il beneficio climatico annuo, prodotto delle due grandezze, non è monotono: aumenta nei primi anni, raggiunge un massimo attorno al 2035 con circa 6'180 € per la configurazione senza accumulo e si riduce in seguito, quando il calo delle emissioni evitate prevale sull'aumento del prezzo. Sull'intero orizzonte le emissioni operative evitate ammontano a circa 345.6 tCO₂eq senza accumulo e a 336.9 tCO₂eq con accumulo, cui corrisponde un beneficio climatico complessivo di 114'989 € e 112'092 € rispettivamente. La configurazione con accumulo evita quindi un quantitativo lievemente inferiore di emissioni operative, risultato coerente con quanto osservato al Capitolo 6: le perdite di ciclo della batteria riducono di poco l'energia pulita netta resa disponibile, mentre

il vantaggio dell'accumulo si manifesta sul piano economico ed energetico attraverso il maggiore autoconsumo.

8.2. NPV e PBT unificati

Definito il valore economico delle emissioni, si è passati all'analisi costi-benefici integrata, che riprende per intero l'impianto metodologico del Paragrafo 7.4 e lo estende alla componente ambientale. La struttura del flusso di cassa, l'orizzonte di venticinque anni dal 2025 al 2049 e il criterio di attualizzazione restano quelli già impiegati per l'analisi economica. A cambiare è l'insieme delle voci che alimentano il flusso, ora ampliato così da accogliere i costi e i benefici legati alla CO₂. L'obiettivo non è più stabilire la sola convenienza economica dell'investimento, ma valutare il valore attuale netto e il tempo di ritorno una volta che alle grandezze monetarie si sommano quelle ambientali, espresse in euro attraverso il prezzo ombra ricavato nel paragrafo precedente.

Rispetto all'analisi economica le voci aggiunte sono tre, distribuite tra costi e benefici. Sul fronte dei costi, all'anno zero si affianca al CAPEX il costo climatico delle emissioni incorporate nell'impianto, valorizzato al prezzo ombra del 2025. Al quindicesimo anno, accanto alla sostituzione della batteria già prevista nell'analisi economica, compare il costo climatico delle emissioni incorporate necessarie a produrre il nuovo accumulo, valorizzato al prezzo ombra dell'anno in cui la sostituzione ricade. Sul fronte dei benefici, alle voci dell'analisi economica, ossia il risparmio in bolletta e, nei soli scenari che lo prevedono, la detrazione fiscale, si aggiunge il beneficio climatico annuo. Esso corrisponde al valore monetario delle emissioni operative evitate, calcolato nel Paragrafo 8.1 moltiplicando anno per anno le emissioni risparmiate per il prezzo ombra corrispondente. Per coerenza con quanto già discusso, tale beneficio è quello ottenuto con il fattore di emissione variabile, l'unico compatibile con un prezzo che cresce in ragione della progressiva decarbonizzazione della rete.

Definite le voci, per ciascun anno si è calcolato il flusso netto come somma algebrica di costi e benefici, economici e ambientali, e lo si è attualizzato al medesimo tasso del 5.8% adottato nell'analisi economica [36]. L'impiego di un unico tasso per entrambe le componenti discende dalla loro natura: una volta tradotte in euro per mezzo del prezzo ombra, le emissioni diventano una grandezza monetaria omogenea a quelle finanziarie, e come tali vanno riportate al valore presente sulla stessa base. Vale la pena precisare che la crescita del prezzo ombra nel tempo e l'attualizzazione agiscono su piani distinti e non si sovrappongono. La prima riflette l'aumento del costo marginale di abbattimento, ovvero la crescente difficoltà di ridurre le emissioni via via che ci si avvicina alla neutralità, mentre la seconda esprime il valore finanziario del tempo. Far crescere il prezzo dell'anidride carbonica e al contempo attualizzare i flussi non costituisce pertanto un doppio conteggio del fattore temporale, ma la combinazione di due effetti indipendenti.

Il valore raggiunto dal flusso cumulato attualizzato al termine dei venticinque anni costituisce il valore attuale netto unificato, mentre l'anno in cui tale flusso cambia segno e diventa positivo individua il tempo di ritorno unificato. Per costruzione, l'uno e l'altro si possono leggere come la somma della componente finanziaria, già ottenuta al Capitolo 7, e di quella ambientale qui introdotta. Come nell'analisi economica, per agevolare la lettura dei risultati si è costruito per ciascun caso un grafico del flusso cumulato attualizzato, analogo a quello impiegato per il tempo di ritorno dell'investimento. L'analisi è stata ripetuta per i quattro scenari di ogni configurazione, ottenuti incrociando la presenza o l'assenza dell'accumulo con quella dell'incentivo fiscale. Di seguito si riporta, a titolo di esempio, il grafico relativo alla

configurazione a sei unità carport dotata di accumulo nello scenario privo di incentivo, lo stesso già presentato per l'analisi economica nella Figura 38.

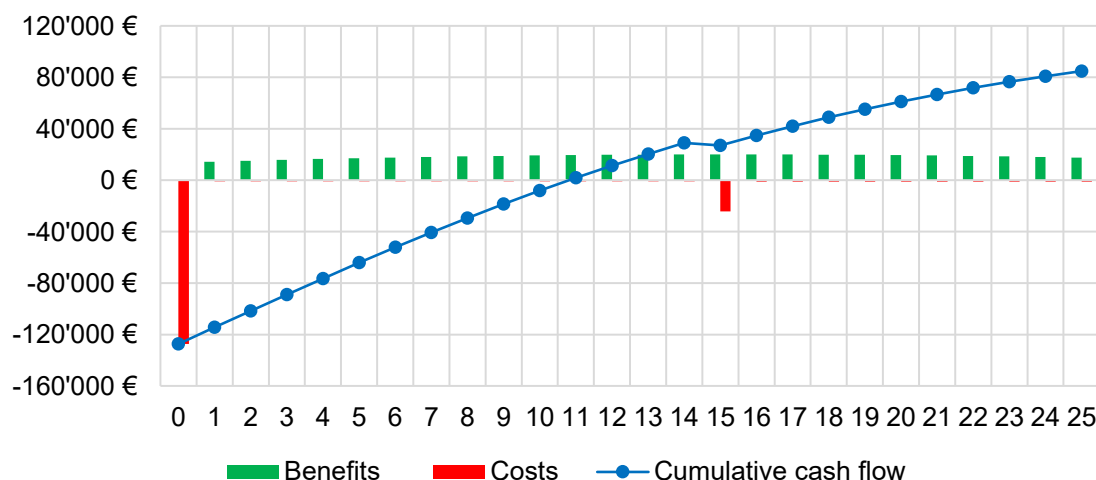


Figura 39 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo

La curva parte da un valore negativo più profondo di quello dell'analisi puramente economica, pari a 127'393 €, poiché all'investimento iniziale di 118'940 € si aggiungono gli 8'453 € di costo climatico delle emissioni incorporate. Da questo livello essa risale più rapidamente, perché a ogni anno il risparmio in bolletta si somma al beneficio climatico delle emissioni evitate. Al quindicesimo anno la curva mostra una battuta d'arresto, riconducibile alla sostituzione della batteria e al relativo costo climatico, dopo la quale riprende a salire. L'intersezione con l'asse orizzontale avviene all'undicesimo anno, contro il diciassettesimo dell'analisi economica, e al termine della vita utile il valore attuale netto unificato raggiunge gli 84'830 €, a fronte dei 35'466 € della sola valutazione economica. L'internalizzazione del prezzo ombra anticipa quindi di sei anni il ritorno dell'investimento e porta il valore attuale netto a più del doppio, segno che il contributo ambientale dell'intervento, una volta espresso in termini monetari, incide in misura tutt'altro che marginale sul giudizio di convenienza.

Il medesimo procedimento è stato applicato a tutte le configurazioni e ai rispettivi scenari, con e senza accumulo e con e senza incentivo. Il confronto degli indicatori unificati tra le diverse configurazioni, insieme alla lettura d'insieme dei risultati, è riportato nel Capitolo 9.

8.3. Energy Payback Time ed EROI

L'ultima parte del capitolo abbandona il piano monetario per tornare a quello fisico e misura l'impianto in termini di energia. Due indicatori riassumono questo aspetto. Il primo è l'Energy Payback Time (EPBT), ovvero il tempo necessario perché l'impianto produca tanta energia quanta ne è servita per realizzarlo. Il secondo è l'Energy Return on Investment, o EROI, che esprime quante volte, lungo l'intera vita utile, l'energia restituita supera quella spesa. Il calcolo segue le indicazioni metodologiche della Task 12 del programma fotovoltaico dell'Agenzia Internazionale per l'Energia [47], che costituiscono il riferimento condiviso per la valutazione del ciclo di vita degli impianti fotovoltaici.

Entrambi gli indicatori si fondano sul confronto tra due quantità di energia primaria. Per energia primaria si intende l'energia contenuta nelle fonti così come si trovano in natura, prima di

qualunque processo di conversione o trasformazione, come il combustibile fossile prima di essere impiegato in centrale per produrre elettricità. La prima quantità è l'energia incorporata, ossia l'energia primaria spesa per produrre i materiali e i componenti dell'impianto. Essa è stata ricavata dalle medesime dichiarazioni ambientali di prodotto impiegate per il calcolo delle emissioni incorporate al Capitolo 6, prendendo per ciascun componente il valore di energia primaria dichiarato. Concorrono a questa voce i moduli fotovoltaici, la struttura in alluminio del carport, il calcestruzzo e l'acciaio delle fondazioni, il sottofondo, il pietrisco e i masselli autobloccanti della pavimentazione, e nelle configurazioni dotate di accumulo anche la batteria.

La seconda quantità è l'energia primaria evitata ogni anno. Poiché ogni chilowattora generato dall'impianto sostituisce un chilowattora che la rete avrebbe altrimenti dovuto produrre, sia esso autoconsumato o immesso in rete, l'impianto fa risparmiare l'energia primaria che la rete avrebbe impiegato per generarlo. Tale energia primaria evitata si ricava moltiplicando l'energia elettrica prodotta dall'impianto nel primo anno per il fattore di conversione in energia primaria della rete elettrica italiana, ed esprimendo il risultato in megajoule. Questo fattore, indicato con la sigla PEF, rappresenta il rapporto tra l'energia primaria impiegata e l'energia elettrica effettivamente consegnata, e incorpora le perdite di generazione e di trasmissione. Il valore adottato è 1.95, ovvero il fattore relativo alla sola quota non rinnovabile fissato dal decreto interministeriale del 26 giugno 2015 [48], per cui l'energia evitata rappresenta il risparmio di energia primaria non rinnovabile che l'impianto consente sostituendo la produzione di rete.

L'Energy Payback Time si ottiene dividendo l'energia primaria incorporata per l'energia primaria evitata in un anno di esercizio, secondo la relazione:

$$EPBT = \frac{E_{INC}}{PE_{EVIT}} \quad \text{Eq.6}$$

Dove:

EPBT è l'Energy Payback Time, espresso in anni;

E_{INC} è l'energia primaria incorporata nei componenti dell'impianto, in MJ;

PE_{EVIT} è l'energia primaria evitata in un anno di esercizio, in MJ all'anno.

L'EROI esprime invece quante volte, lungo l'intera vita utile, l'energia restituita dall'impianto supera quella spesa per realizzarlo, e si ricava dividendo la vita utile per l'Energy Payback Time:

$$EROI = \frac{T}{EPBT} \quad \text{Eq.7}$$

Dove:

EROI è l'Energy Return on Investment, grandezza adimensionale;

T è la vita utile dell'impianto, pari a venticinque anni;

EPBT è l'Energy Payback Time definito sopra.

I valori dei due indicatori per tutte le configurazioni sono riportati nel Capitolo 9.

9 Risultati complessivi

Dopo aver sviluppato nei capitoli precedenti l'analisi energetica, ambientale ed economica di ciascuna soluzione, il presente capitolo ne raccoglie i risultati e li mette a confronto su tutte e dieci le configurazioni considerate. La trattazione segue lo stesso ordine dei capitoli da cui i dati provengono, esaminando nell'ordine il piano energetico, quello ambientale e quello economico, riunendo poi i due ultimi in una valutazione integrata che affianca al risultato economico il beneficio ambientale monetizzato, e chiudendo con l'analisi di sensibilità, con cui si verifica quanto i risultati dipendano dalle principali ipotesi adottate.

9.1. Risultati energetici

Il quadro energetico delle dieci configurazioni è riassunto nella Tabella 23, che affianca per ciascuna taglia i risultati ottenuti senza e con l'accumulo. Le colonne procedono dalla configurazione più piccola, a quattro unità carport, fino a quella più grande, a otto, mentre le righe riportano nell'ordine la produzione, l'autoconsumo, il surplus e il prelievo, chiusi dai due indicatori prestazionali, la PV fraction e la Self-Consumption. Il fabbisogno elettrico dell'edificio, pari a 54'643 kWh l'anno, compare in testa alla tabella ed è lo stesso in ogni colonna, perché da una configurazione all'altra cambia l'impianto e non l'edificio: è quindi il termine di paragone fisso rispetto al quale vanno letti tutti gli altri valori.

Tabella 23 - Risultati energetici delle dieci configurazioni, senza e con accumulo

Indicatore	Unità	4 un. carport	5 un. carport	6 un. carport	7 un. carport	8 un. carport
Energia consumata edificio	kWh/anno	54'643	54'643	54'643	54'643	54'643
Energia PV prodotta (anno 1)	kWh/anno	40'873	51'091	61'309	71'527	81'745
Autoconsumo (no bess)	kWh/anno	24'292	26'491	27'902	28'799	29'431
Surplus venduto in rete (no bess)	kWh/anno	16'581	24'600	33'407	42'728	52'315
Energia prelevata rete (no bess)	kWh/anno	30'351	28'152	26'740	25'844	25'212
Autoconsumo (con bess)	kWh/anno	30'895	36'130	42'225	44'438	45'839
Surplus venduto in rete (con bess)	kWh/anno	9'264	13'919	17'537	25'396	34'119
Energia prelevata rete (con bess)	kWh/anno	23'747	18'512	12'418	10'205	8'804
PV-fraction no bess	%	44.5%	48.5%	51.1%	52.7%	53.9%
Self-Consumption no bess	%	59.4%	51.9%	45.5%	40.3%	36.0%
PV-fraction con bess	%	56.5%	66.1%	77.3%	81.3%	83.9%
Self-Consumption con bess	%	75.6%	70.7%	68.9%	62.1%	56.1%

La prima grandezza, la produzione fotovoltaica annua, cresce in modo regolare con il numero di unità. Ogni unità carport aggiunge quindici moduli e quindi una potenza di 8.55 kWp, e a questo incremento costante di potenza corrisponde un incremento altrettanto costante di energia prodotta, pari a 10'218 kWh per ogni unità aggiunta. Si passa così dai 40'873 kWh della configurazione a quattro unità carport agli 81'745 kWh di quella a otto, con un raddoppio esatto della produzione tra la taglia minore e quella maggiore. Il confronto con il fabbisogno individua un punto di passaggio: la configurazione a cinque unità carport, con 51'091 kWh, resta ancora al di sotto del consumo del centro, mentre quella a sei, con 61'309 kWh, lo supera per la prima volta. Da sei unità in avanti, dunque, l'impianto genera nell'arco dell'anno più energia di quanta l'edificio ne richieda, pur senza che questo basti a renderlo autosufficiente, per via dello sfasamento tra le ore di produzione e quelle di consumo.

L'autoconsumo in assenza di accumulo racconta proprio questo sfasamento. A fronte di una produzione che raddoppia, l'energia utilizzata direttamente dall'edificio cresce molto poco, passando dai 24'292 kWh della taglia minore ai 29'431 kWh di quella maggiore. Soprattutto, l'incremento si fa via via più esiguo: si guadagnano 2'199 kWh nel passaggio da quattro a cinque unità carport, ma soltanto 632 kWh in quello da sette a otto. Il motivo è che l'autoconsumo diretto è limitato da ciò che l'edificio consuma nelle ore diurne, quando il fotovoltaico produce. Una volta saturate quelle ore, i pannelli aggiuntivi generano in momenti in cui il consumo è già coperto e la loro energia non può essere autoconsumata. Si tratta del classico effetto di saturazione dell'autoconsumo, tanto più marcato quanto più la potenza installata supera il fabbisogno istantaneo.

La stessa energia che non viene autoconsumata si ritrova nella riga del surplus. Senza accumulo, il surplus immesso in rete cresce quasi linearmente con la potenza, dai 16'581 kWh della configurazione a quattro unità carport ai 52'315 kWh di quella a otto. Mentre l'autoconsumo si appiattisce, è il surplus ad assorbire quasi per intero la produzione aggiuntiva: nel passaggio da sette a otto unità carport, dei 10'218 kWh prodotti in più ben 9'587 kWh finiscono in rete. Nella configurazione più grande il surplus arriva a sfiorare il fabbisogno annuo dell'intero edificio, segno che, oltre una certa taglia, ampliare l'impianto significa soprattutto produrre energia destinata alla cessione.

Il prelievo dalla rete è l'immagine rovesciata dell'autoconsumo, dal momento che è pari alla parte di fabbisogno che il fotovoltaico non riesce a coprire. Senza accumulo esso scende dai 30'351 kWh della taglia minore ai 25'212 kWh di quella maggiore, ma anche in questo caso la riduzione si esaurisce in fretta: la quasi totalità del calo si concentra nelle prime taglie, mentre tra sette e otto carport il prelievo diminuisce di appena 632 kWh. In assenza di accumulo, dunque, aggiungere pannelli oltre le prime configurazioni quasi non incide sull'energia che l'edificio è costretto ad acquistare dalla rete.

I due indicatori prestazionali riassumono questo comportamento e si muovono in direzioni opposte. La PV fraction, che misura la quota di fabbisogno coperta dal fotovoltaico, sale dal 45% al 54% passando dalla configurazione più piccola alla più grande, ma con incrementi sempre più piccoli, a conferma della saturazione già descritta. La Self-Consumption, che misura invece la quota di produzione effettivamente utilizzata dall'edificio, segue l'andamento inverso e cala dal 59% al 36%. Il loro divario è significativo: nella configurazione a otto unità carport l'edificio copre con il fotovoltaico poco più della metà del proprio fabbisogno, ma utilizza direttamente appena un terzo dell'energia che produce, cedendo il resto alla rete a un valore inferiore al costo dell'energia acquistata. Senza accumulo, in altre parole, le configurazioni più grandi migliorano di poco l'indipendenza dell'edificio e ne peggiorano sensibilmente l'efficienza con cui l'energia generata viene impiegata.

L'introduzione della batteria modifica in profondità questo quadro, perché sposta nelle ore serali una parte dell'energia che altrimenti finirebbe in rete. L'autoconsumo con accumulo è in ogni configurazione superiore a quello senza e il guadagno cresce con la taglia fino a un certo punto. Si passa dai 30'895 kWh della configurazione a quattro unità carport, dotata di una batteria da 30 kWh, ai 42'225 kWh di quella a sei, dotata di una batteria da 60 kWh. Proprio nel passaggio da cinque a sei unità si registra l'incremento maggiore, pari a 6'095 kWh, perché in quella configurazione si sommano due effetti, una produzione che supera per la prima volta il fabbisogno e un accumulo cresciuto da 40 a 60 kWh. Dalla configurazione a sei in avanti, però, la batteria resta fissata a 60 kWh, e il suo contributo si appiattisce: l'autoconsumo con accumulo sale ancora, ma di soli 2'213 kWh verso la taglia a sette e di 1'401 kWh verso quella a otto. La batteria, della stessa capacità per le tre configurazioni più grandi, non può restituire all'edificio

più energia di quanta riesca a immagazzinare e oltre le sei unità si avvicina al limite della propria capacità. Il fenomeno della saturazione dell'autoconsumo è visibile nella Figura 40, che affianca alla produzione fotovoltaica annua, in costante crescita, le due colonne dell'autoconsumo senza e con accumulo. Mentre la produzione cresce in modo lineare con il numero di unità carport, le colonne dell'autoconsumo si appiattiscono progressivamente, e il divario tra l'energia prodotta e quella effettivamente utilizzata si allarga al crescere della taglia.

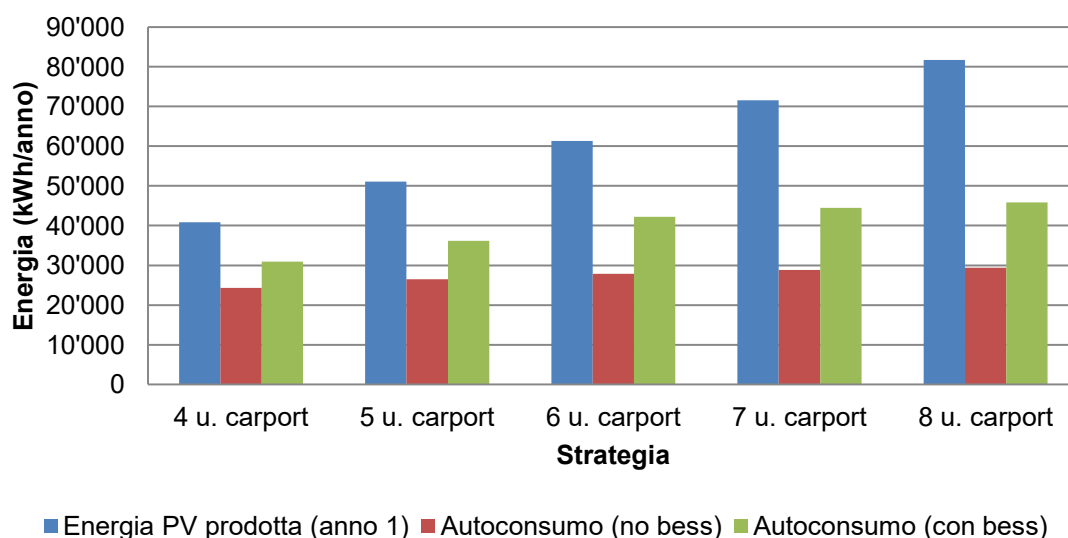


Figura 40 - Produzione fotovoltaica annua e autoconsumo, senza e con accumulo, al variare della configurazione

Le righe del surplus e del prelievo con accumulo confermano questa lettura da due punti di vista complementari. Il prelievo dalla rete crolla rispetto al caso senza batteria, scendendo dai 23'747 kWh della configurazione a quattro unità carport agli 8'804 kWh di quella a otto, con il calo più netto proprio in corrispondenza della taglia a sei unità. La riduzione di prelievo che l'accumulo consente di ottenere, ricavata dal confronto fra le due varianti, cresce dai 6'604 kWh della configurazione minore ai 16'408 kWh di quella maggiore, ma anche questo guadagno tende a stabilizzarsi una volta che la batteria è satura. Il surplus con accumulo, dal canto suo, resta sempre inferiore a quello senza, perché parte dell'energia eccedente viene immagazzinata anziché ceduta. Conviene però notare come questo surplus torni a crescere rapidamente nelle ultime due configurazioni: contenuto a 17'537 kWh con sei unità carport, risale a 25'396 kWh con sette unità e a 34'119 kWh con otto. Il motivo è la capacità fissa dell'accumulo, pari a 60 kWh per le tre configurazioni più grandi. È bene precisare che questa non è una limitazione subita, ma la scelta di dimensionamento più sensata, già motivata al Paragrafo 4.4: oltre una certa dimensione dell'impianto il limite all'autoconsumo non dipende più dalla produzione, ormai abbondante, ma dal profilo di consumo serale e notturno dell'edificio, che resta il medesimo al crescere del numero di unità carport. Una batteria da 60 kWh è sufficiente a coprire quel profilo, e una taglia maggiore resterebbe in buona parte inutilizzata, non trovando un corrispondente fabbisogno da soddisfare. Con l'accumulo così dimensionato, l'energia prodotta in più dalle configurazioni a sette e otto unità non trova spazio né nell'autoconsumo né nell'immagazzinamento e si riversa nuovamente in rete.

La Figura 41 raccoglie in un unico confronto il bilancio energetico annuo delle cinque configurazioni, scomposto nelle tre voci di autoconsumo, surplus immesso in rete e prelievo dalla rete, per le varianti senza e con accumulo. Le tonalità più intense indicano la variante con accumulo, quelle più chiare la variante di solo fotovoltaico, così che per ciascuna grandezza si

colga a colpo d'occhio l'effetto della batteria: l'autoconsumo che si alza, il prelievo che si abbassa e il surplus che si riduce, salvo poi tornare a crescere nelle ultime due configurazioni.

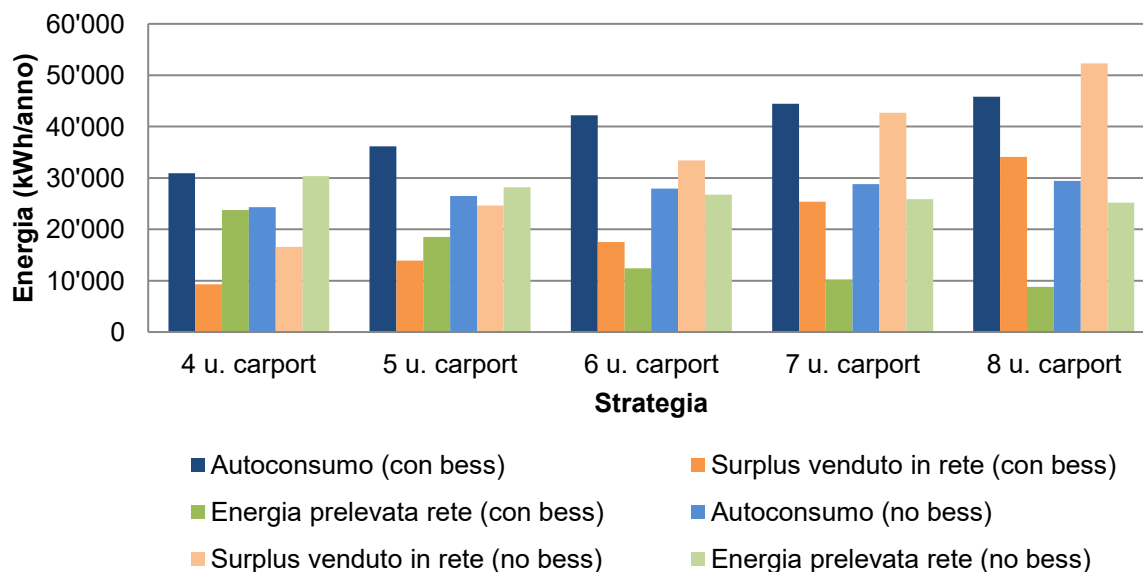


Figura 41 - Bilancio energetico annuo (autoconsumo, surplus, prelievo) delle cinque configurazioni, confronto tra le varianti senza e con accumulo

Anche con l'accumulo i due indicatori prestazionali si muovono in senso contrario, ma su livelli più alti. La PV fraction con batteria sale dal 57% della configurazione a quattro unità carport fino all'84% di quella a otto, il valore più elevato dell'intera analisi: con l'impianto più grande e l'accumulo, l'edificio copre con il proprio fotovoltaico oltre quattro quinti del fabbisogno annuo. La Self-Consumption con batteria, invece, dopo essere salita rispetto al caso senza accumulo, torna a calare al crescere della taglia, dal 76% della configurazione minore al 56% di quella maggiore. La ragione è la medesima già vista: nelle configurazioni più grandi la produzione eccede stabilmente ciò che l'edificio e la batteria riescono insieme ad assorbire, e una quota crescente di energia, per quanto la PV fraction sia elevata, resta inutilizzata e viene ceduta alla rete. L'andamento dei due indicatori è riassunto nella Figura 42, che riporta per ciascuna configurazione la PV fraction e la Self-Consumption nelle varianti senza e con accumulo. Il grafico rende immediato il loro movimento opposto: le colonne della PV fraction salgono con la taglia, quelle della Self-Consumption scendono e l'accumulo sposta entrambe verso l'alto rispetto al solo fotovoltaico.

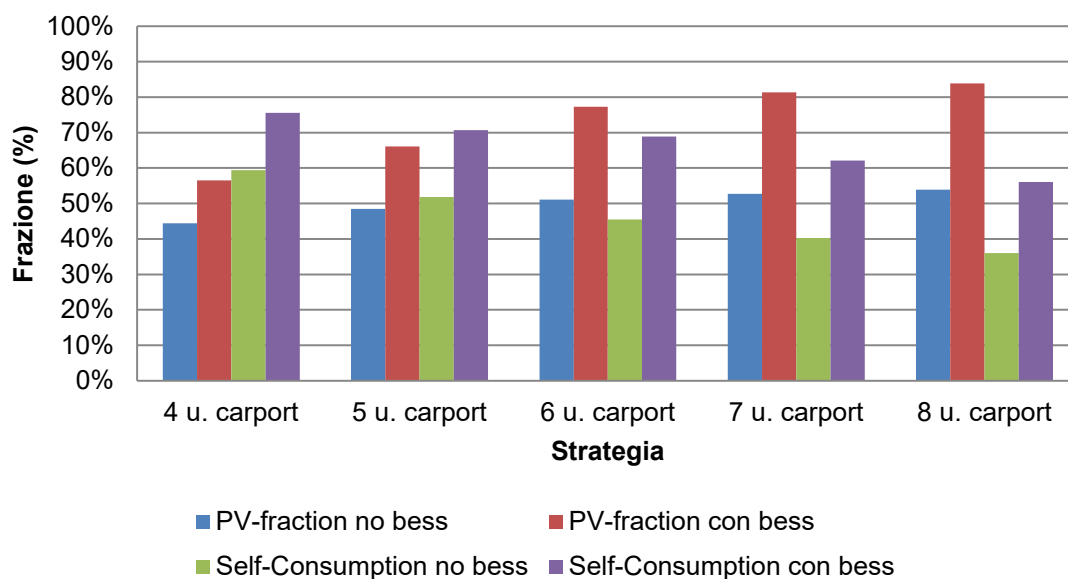


Figura 42 - PV fraction e Self-Consumption delle dieci configurazioni, confronto tra le varianti senza e con accumulo

La lettura del solo piano energetico, dunque, non individua una configurazione ottimale ma mette in luce un compromesso. Le taglie più grandi massimizzano l'indipendenza dell'edificio, con una PV fraction che con l'accumulo si avvicina all'autosufficienza, ma lo fanno a costo di un surplus crescente e di una Self-Consumption in calo, ossia di una quota sempre maggiore di energia prodotta e non utilizzata. Le taglie intermedie, e in particolare quella a sei unità carport, in cui la produzione supera per la prima volta il fabbisogno e l'accumulo lavora ancora a piena efficacia, sembrano offrire il punto di migliore equilibrio fra le grandezze in gioco. Resta però evidente che una scelta non può essere compiuta sul solo terreno energetico: il valore dell'energia autoconsumata, di quella ceduta alla rete e di quella prelevata è diverso, così come diversi sono il costo e l'impatto ambientale di ogni componente aggiunto. Sono questi gli elementi che le valutazioni ambientale ed economica, riprese nei paragrafi successivi, dovranno mettere in luce per trasformare il compromesso energetico in una decisione motivata.

9.2. Risultati ambientali

Dopo aver descritto il comportamento energetico delle dieci configurazioni, il presente paragrafo ne raccoglie i risultati ambientali, ottenuti applicando l'analisi del ciclo di vita descritta al Capitolo 6. La Tabella 24 affianca, per ciascuna taglia e per le due varianti senza e con accumulo, le emissioni incorporate dei componenti, le emissioni operative annue, i totali cumulati al 2049 e la CO₂ evitata lungo i venticinque anni.

Tabella 24 - Risultati ambientali delle dieci configurazioni, senza e con accumulo

Indicatore	Unità	4 un. carport	5 un. carport	6 un. carport	7 un. carport	8 un. carport
GHG embodied PV (moduli)	kgCO ₂ eq	21'654	27'067	32'481	37'894	43'308
GHG embodied carport (struttura)	kgCO ₂ eq	20'249	25'311	30'373	35'435	40'498
GHG embodied inverter PV	kgCO ₂ eq	4'496	5'620	6'744	7'868	8'993
GHG embodied inverter bess	kgCO ₂ eq	3'361	3'361	5'620	5'620	6'171
GHG embodied bess (incl. sostit.)	kgCO ₂ eq	12'346	16'378	24'566	24'566	24'566
GHG embodied pv + carport+inv	kgCO ₂ eq	46'399	57'998	69'598	81'197	92'799
GHG embodied PV+carport+bess+inv ibrido	kgCO ₂ eq	57'610	72'117	93'040	103'515	114'543
GHG operational baseline (anno 1)	kgCO ₂ eq	62'575	62'575	62'575	62'575	62'575
GHG operational no bess (anno 1)	kgCO ₂ eq	44'863	40'437	36'010	31'584	27'157
GHG operational con bess (anno 1)	kgCO ₂ eq	45'172	40'888	36'681	32'318	27'932
GHG 2049 fem,el fissa baseline	kgCO ₂ eq	1'564'372	1'564'372	1'564'372	1'564'372	1'564'372
GHG 2049 fem,el fissa impianto no bess	kgCO ₂ eq	1'167'985	1'068'922	969'859	870'795	771'732
GHG 2049 fem,el fissa impianto con bess	kgCO ₂ eq	1'186'922	1'094'318	1'010'058	911'457	812'830
GHG 2049 fem,el variabile baseline	kgCO ₂ eq	1'280'545	1'280'545	1'280'545	1'280'545	1'280'545
GHG 2049 fem,el variabile impianto no bess	kgCO ₂ eq	1'096'403	1'050'458	1'004'513	958'568	912'623
GHG 2049 fem,el variabile impianto con bess	kgCO ₂ eq	1'111'631	1'070'440	1'036'669	990'425	944'431
CO ₂ tot. evitata in 25 anni no bess (fem,el fisso)	kgCO ₂ eq	396'387	495'450	594'513	693'576	792'640
CO ₂ tot. evitata in 25 anni con bess (fem,el fisso)	kgCO ₂ eq	377'450	470'054	554'314	652'914	751'541
CO ₂ tot. evitata in 25 anni no bess (fem,el var.)	kgCO ₂ eq	184'143	230'088	276'033	321'978	367'923
CO ₂ tot. evitata in 25 anni con bess (fem,el var.)	kgCO ₂ eq	168'914	210'105	243'877	290'121	336'114
CPBT no bess	anni	3	3	3	3	3
CPBT con bess	anni	3	3	4	3	3

Le prime righe della tabella riportano le emissioni incorporate. Le tre voci del fotovoltaico, della struttura carport e dell'inverter crescono tutte in modo regolare con il numero di unità, dal momento che ogni unità aggiunge quindici moduli, una porzione di struttura e il proprio inverter. I moduli passano dai 21'654 kgCO₂eq della configurazione a quattro unità ai 43'308 di quella a otto, la struttura dai 20'249 kgCO₂eq ai 40'498 kgCO₂eq, l'inverter di stringa dai 4'496 kgCO₂eq agli 8'993 kgCO₂eq. Sommando queste voci si ottiene il totale incorporato della variante di solo fotovoltaico, che sale dai 46'399 kgCO₂eq della taglia minore ai 92'799 kgCO₂eq della maggiore.

Il totale incorporato della variante con accumulo, riportato nella riga successiva, segue una logica diversa e non è la semplice somma delle voci precedenti. Nelle configurazioni con batteria gli inverter di stringa di ciascun carport lasciano il posto a un unico inverter ibrido, le cui emissioni incorporate sono riportate a parte, e si aggiunge la batteria vera e propria. A questo si somma il fatto che la batteria, con una vita utile inferiore ai venticinque anni dell'analisi, viene sostituita una volta a circa metà periodo, e il suo contributo incorporato è perciò conteggiato due volte, come già discusso nel Capitolo 6. Ne risulta un totale che, per la configurazione a sei unità carport, ad esempio, raggiunge i 93'040 kgCO₂eq, contro i 69'598 kgCO₂eq della corrispondente variante di solo fotovoltaico.

La Figura 43 scompone il totale incorporato nei singoli componenti e il quadro si ripete in modo simile in tutte le configurazioni. Nella variante di solo fotovoltaico le due voci di gran lunga più pesanti sono i moduli e la struttura carport, che insieme coprono la quasi totalità delle emissioni incorporate, mentre all'inverter di stringa resta una quota marginale. Quando si aggiunge l'accumulo il quadro cambia: i moduli e la struttura restano le voci maggiori, ma la batteria, conteggiata due volte per via della sostituzione di metà vita, diventa la terza componente di rilievo e arriva a pesare all'incirca per un quarto del totale incorporato, mentre l'inverter ibrido continua a incidere in misura ridotta. Il confronto mette in evidenza due aspetti. Da un lato la struttura carport non è affatto un elemento secondario, ma una componente di primo piano, paragonabile ai moduli; dall'altro la batteria, quando presente, aggiunge una quota di emissioni di costruzione tutt'altro che trascurabile, ed è la ragione principale del divario tra i totali incorporati delle due varianti.

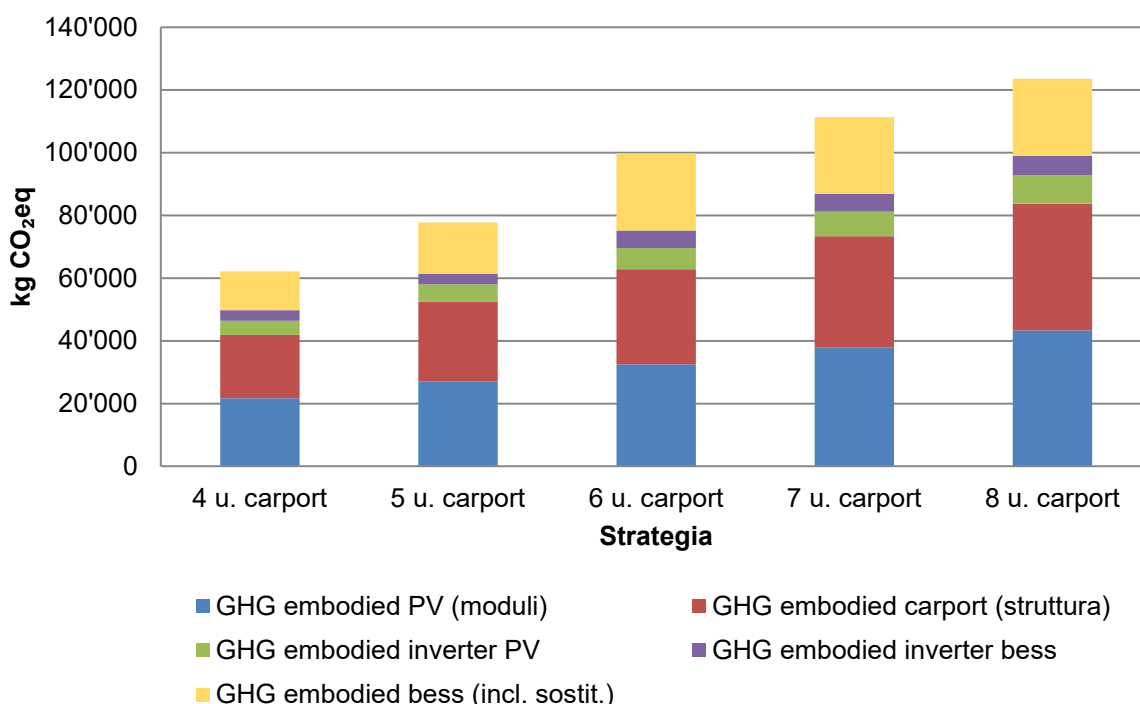


Figura 43 - Emissioni incorporate disaggregate per componente, per le cinque configurazioni

Le righe seguenti riportano le emissioni operative del primo anno, ossia la CO₂ associata al funzionamento dell'edificio. Il termine di riferimento è la baseline, pari a 62'575 kgCO₂eq l'anno e identica per tutte le configurazioni, perché descrive l'edificio nello stato attuale, senza impianto. Con il fotovoltaico le emissioni operative scendono in misura proporzionale alla taglia, dai 44'863 kgCO₂eq della configurazione a quattro unità ai 27'157 kgCO₂eq di quella a otto, con una riduzione costante di circa 4'426 kgCO₂eq per ogni unità carport aggiunta. Un

dato merita attenzione: le emissioni operative della variante con accumulo non sono inferiori a quelle della variante senza, ma leggermente superiori e lo scarto cresce con la taglia, dai 45'172 kgCO₂eq contro 44'863 kgCO₂eq della taglia a quattro unità ai 27'932 kgCO₂eq contro 27'157 kgCO₂eq di quella a otto. La ragione sta nel modo in cui si compone il bilancio: l'energia ceduta alla rete viene accreditata con lo stesso fattore con cui si contabilizza l'energia prelevata. La batteria riduce sia il prelievo sia il surplus, e poiché al surplus è associato un credito di pari valore, il guadagno sul prelievo viene quasi interamente compensato dalla perdita di quel credito e le inefficienze di carica e scarica spostano il saldo di poco verso l'alto. Sul piano delle sole emissioni annue, dunque, l'accumulo non costituisce un vantaggio ambientale. La Figura 44 confronta le emissioni operative del primo anno delle due varianti con la baseline, e ne rende evidente la sostanziale coincidenza, oltre alla distanza ben maggiore che entrambe mantengono rispetto alla baseline.

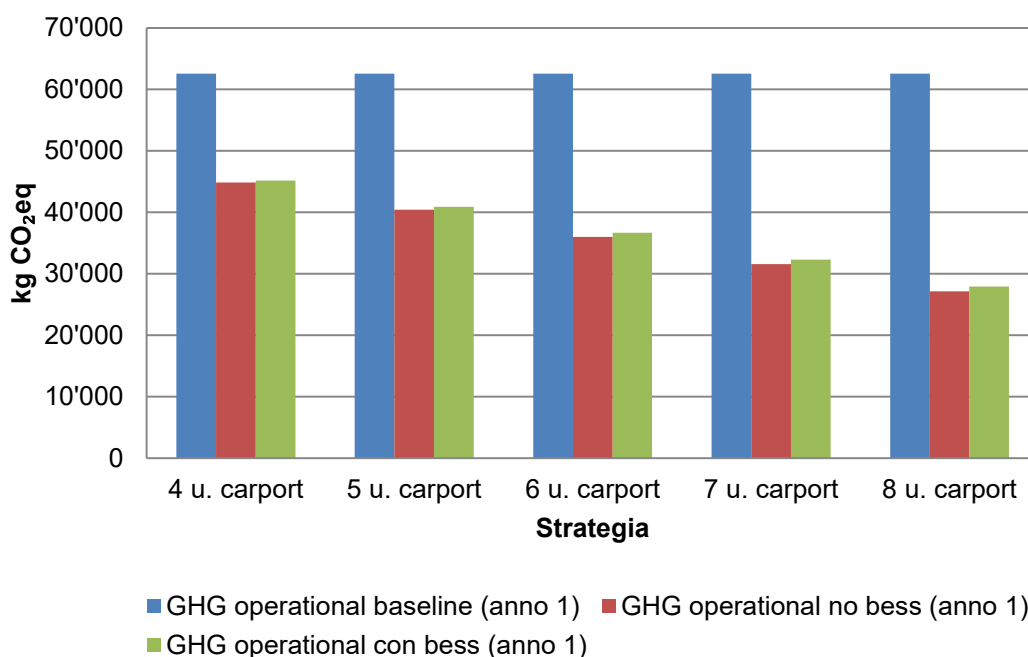


Figura 44 - Emissioni operative del primo anno: baseline, variante senza accumulo e variante con accumulo, per le cinque configurazioni

Le emissioni totali cumulate al 2049, date dalla somma delle operative totali nei 25 anni e le incorporate, traducono questo comportamento sull'intero orizzonte temporale, e lo fanno nei due scenari distinti: fattore elettrico emissivo fisso e variabile, trattati nel Capitolo 6. La baseline cumulata vale 1'564'372 kgCO₂eq nello scenario a fattore emissivo fisso e 1'280'545 in quello variabile. Per quanto riguarda le emissioni cumulate in assenza di batteria, considerando un fattore elettrico emissivo fisso, si passa da 1'167'985 kgCO₂eq per il caso a quattro unità carport a 771'732 kgCO₂eq per quello a otto, una diminuzione di circa 99'000 kgCO₂eq ad unità aggiunta. Mentre nel caso con la batteria si passa da 1'186'922 kgCO₂eq per quattro unità a 812'830 kgCO₂eq per quella a otto, anche in questo caso la variante con accumulo presenta emissioni leggermente maggiori. Stesso discorso per il caso con il fattore emissivo variabile, in cui c'è una differenza che va da circa 15'000 kgCO₂eq a 32'000 kgCO₂eq a sfavore della configurazione con accumulo (1'111'631 kgCO₂eq contro 1'096'403 kgCO₂eq per il caso a quattro unità, ad esempio).

Le quattro righe successive riportano la CO₂ totale evitata lungo i venticinque anni, calcolata con entrambi i fattori e sempre in assenza o presenza di batteria. Questo risparmio è dato dalla differenza tra le emissioni cumulate nella situazione baseline e quelle nella configurazione considerata, in base a fattore emissivo e presenza o meno di batteria. Si può notare come il risparmio, con fattore emissivo fisso, aumenti di circa 100'000 kgCO₂eq ogni unità aggiunta, sia in presenza che assenza di batteria: da 594'513 kgCO₂eq a 693'576 kgCO₂eq per il passaggio da sei a sette unità in assenza di accumulo, e da 554'314 kgCO₂eq a 652'914 kgCO₂eq in presenza di esso. Nel caso di fattore emissivo variabile invece, l'aumento è di circa 45'000 kgCO₂eq senza batteria, per esempio, da 276'033 kgCO₂eq a 321'978 kgCO₂eq per lo stesso passaggio di unità. Mentre considerando l'accumulo, l'aumento oscilla tra i 30'000 kgCO₂eq e i 45'000 kgCO₂eq. Nella Figura 45 si può notare questa differenza di CO₂ risparmiata, considerando il fattore emissivo fisso e variabile.

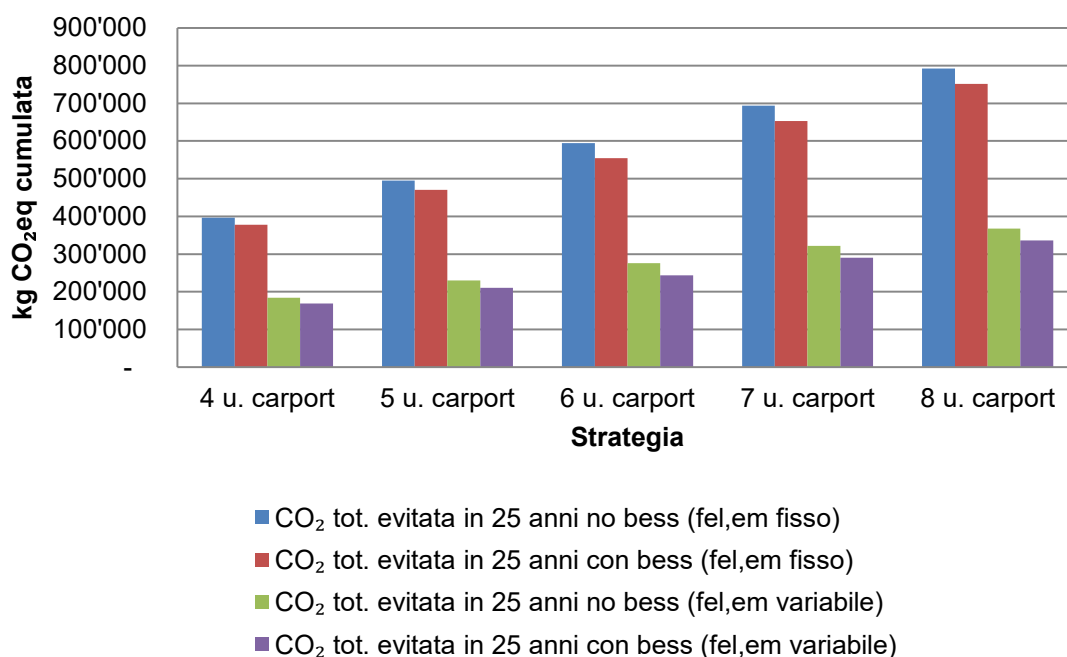


Figura 45 - CO₂ evitata cumulata lungo i venticinque anni, confronto tra le varianti senza e con accumulo in base a fattore emissivo

La rapidità con cui l'impianto restituisce la propria CO₂ di costruzione è confermata dal CPBT, di circa tre anni per tutte le configurazioni, tranne per la configurazione a sei unità carport con batteria che è quattro.

La lettura ambientale, nel complesso, restituisce un messaggio chiaro. L'impianto fotovoltaico recupera la propria impronta di carbonio in circa tre anni e, lungo la vita utile, evita quantità di CO₂ crescenti con la taglia, tanto maggiori quanto più grande è la configurazione; sul solo piano del clima, dunque, le taglie più grandi risultano preferibili, con l'avvertenza che il beneficio dipende fortemente dall'ipotesi sulla decarbonizzazione della rete. La batteria, al contrario, peggiora il bilancio ambientale, perché aggiunge emissioni incorporate rilevanti senza migliorare, e anzi riducendo di poco, la CO₂ evitata. La sua giustificazione va cercata altrove, sul piano energetico dell'indipendenza dalla rete e su quello economico del diverso valore attribuito all'energia autoconsumata e a quella ceduta, che i paragrafi successivi metteranno a confronto.

9.3. Risultati economici

Dopo aver valutato le configurazioni sul piano energetico e ambientale, il presente paragrafo ne raccoglie i risultati economici, ricavati dall'analisi costi-benefici descritta al Capitolo 7. La Tabella 25 riporta, per ciascuna taglia e per le due varianti senza e con accumulo, il costo di investimento (CAPEX) e i quattro indicatori finanziari, il valore attuale netto (NPV), il tempo di ritorno (PBT), il tasso interno di rendimento (IRR) e il costo livellato dell'elettricità (LCOE), ciascuno calcolato nei due scenari con e senza l'incentivo fiscale (ecobonus).

Tabella 25 - Risultati economici delle dieci configurazioni, senza e con accumulo

Indicatore	Unità	4 u. carport	5 u. carport	6 u. carport	7 u. carport	8 u. carport
CAPEX no bess	€	€ 73'317	€ 91'647	€ 109'976	€ 128'305	€ 146'635
CAPEX con bess	€	€ 75'762	€ 93'763	€ 118'940	€ 134'710	€ 149'852
NPV no bess + ECO	€	€ 54'941	€ 61'792	€ 67'244	€ 71'780	€ 75'846
NPV no bess senza incentivo	€	€ 27'703	€ 27'744	€ 26'386	€ 24'112	€ 21'369
NPV con bess + ECO	€	€ 60'942	€ 72'437	€ 79'654	€ 88'137	€ 95'575
NPV con bess senza incentivo	€	€ 32'795	€ 37'602	€ 35'466	€ 38'090	€ 39'902
PBT no bess + ECO	anni	9	10	10	11	11
PBT no bess senza incentivo	anni	16	17	18	19	21
PBT con bess + ECO	anni	9	9	10	10	10
PBT con bess senza incentivo	anni	14	16	17	18	18
IRR no bess + ECO	%	13.20%	12.60%	12.00%	11.50%	11.20%
IRR no bess senza incentivo	%	9.20%	8.60%	8.00%	7.50%	7.20%
IRR con bess + ECO	%	13.80%	13.60%	12.70%	12.50%	12.40%
IRR con bess senza incentivo	%	9.70%	9.50%	8.60%	8.40%	8.30%
LCOE no bess	€/kWh	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159
LCOE con bess	€/kWh	0.173	0.171	0.181	0.175	0.170

Le prime righe riportano il costo di investimento. Nella variante di solo fotovoltaico esso cresce in modo lineare con la taglia, dai 73'317 € della configurazione a quattro unità carport ai 146'635 € di quella a otto, con un incremento costante di circa 18'330 € per ogni unità aggiunta, dovuto al fatto che ognuna comporta la stessa spesa di struttura, moduli e inverter. La variante con accumulo costa sempre di più, ma il sovrapprezzo non è costante. Esso vale poco più di 2'000 € nelle prime due taglie, dotate di batterie da 30 kWh e 40 kWh, ma sale bruscamente a quasi 9'000 € nella configurazione a sei unità, dove la batteria passa a 60 kWh. Da quella taglia in avanti il sovrapprezzo torna a ridursi, fino a poco più di 3'000 € nella configurazione a otto unità, perché la batteria resta la stessa mentre cresce il numero di inverter di stringa che la variante con accumulo, servendosi di un solo inverter ibrido, riesce a risparmiare. La Figura 46 riporta il costo di investimento delle due varianti con e senza accumulo, e ne rende visibile la diversa natura, la crescita lineare del solo fotovoltaico e lo scalino della variante con accumulo.

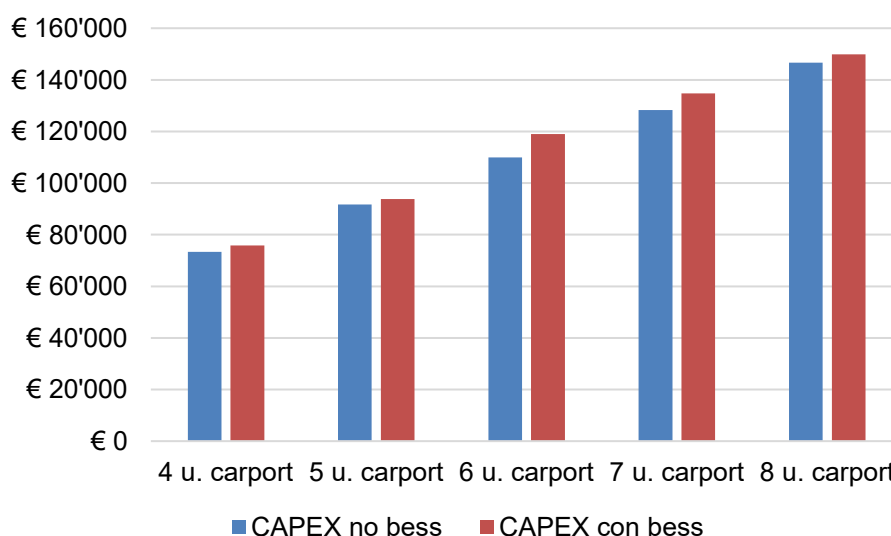


Figura 46 - Costo di investimento (CAPEX) delle varianti senza e con accumulo, per le cinque configurazioni

Gli indicatori finanziari sono calcolati in due scenari, distinti dalla presenza o meno dell'incentivo. Lo scenario con incentivo prevede la detrazione fiscale del 50% sulle spese di ristrutturazione, ripartita in dieci quote annuali [46], mentre quello senza incentivo considera il solo risparmio in bolletta. Tale risparmio nasce dalla differenza tra il prezzo di prelievo e quello di cessione definiti al Capitolo 7, pari rispettivamente a 0.2259 e 0.1074 €/kWh, cioè ogni kilowattora ceduto vale circa la metà del prezzo di acquisto.

Il valore attuale netto, che misura il guadagno complessivo del progetto una volta attualizzati i flussi futuri, racconta una storia precisa. Nello scenario con incentivo cresce con la taglia in entrambe le varianti, dai 54'941 € della configurazione a quattro unità ai 75'846 € di quella a otto nel solo fotovoltaico, e dai 60'942 € ai 95'575 € nella variante con accumulo. Senza incentivo il quadro si abbassa nettamente e cambia forma. Nel solo fotovoltaico il valore attuale netto resta intorno ai 27'000 € nelle prime taglie e poi diminuisce, fino ai 21'369 € della configurazione a otto unità, perché oltre una certa dimensione la produzione aggiuntiva finisce in gran parte ceduta alla rete a un prezzo basso e i ricavi non bastano a giustificare la spesa ulteriore. Nella variante con accumulo, sempre senza incentivo, si osserva un andamento particolare: il valore attuale netto sale da 32'795 a 37'602 € tra la configurazione a quattro e a cinque unità, scende a 35'466 € in quella a sei, per poi risalire a 39'902 € in quella a otto. Quella flessione in corrispondenza delle sei unità non è un'anomalia di calcolo, ma il riflesso del salto della batteria da 40 kWh a 60 kWh, il cui maggior costo, in quella taglia, non è ancora pienamente ripagato dal risparmio che consente.

In ogni configurazione e in entrambi gli scenari la variante con accumulo presenta un valore attuale netto superiore a quella di solo fotovoltaico. Il motivo risiede proprio nell'asimmetria dei prezzi appena richiamata: la batteria sottrae energia alla cessione, remunerata poco, per destinarla all'autoconsumo, che vale quanto un prelievo evitato. Ogni kilowattora spostato dalla rete all'autoconsumo frutta dunque la differenza tra i due prezzi, ed è questo recupero a rendere conveniente l'investimento aggiuntivo nell'accumulo, nonostante il suo costo e nonostante, come si è visto al paragrafo precedente, il suo bilancio ambientale sfavorevole. I quattro valori del NPV sono confrontati nella Figura 47, che ne mostra a colpo d'occhio i tratti salienti, il divario aperto dall'incentivo tra le coppie di colonne, la costante superiorità della variante con

accumulo, il calo del solo fotovoltaico senza incentivo al crescere della taglia e la flessione della variante con accumulo, sempre senza incentivo, in corrispondenza delle sei unità.

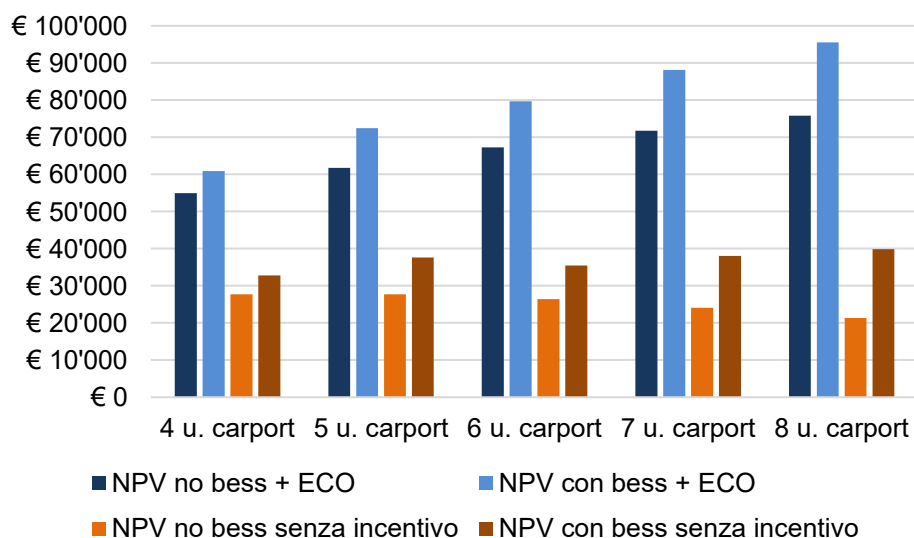


Figura 47 - Valore attuale netto nei quattro scenari (senza e con accumulo, con e senza incentivo), per le cinque configurazioni

Il tempo di ritorno conferma la stessa lettura da un'altra angolazione. Con l'incentivo l'investimento rientra in circa nove-undici anni nel solo fotovoltaico e in nove-dieci nella variante con accumulo; senza incentivo i tempi si allungano sensibilmente, dai sedici-ventuno anni del solo fotovoltaico ai quattordici-diciotto della variante con accumulo. Due aspetti emergono con chiarezza. L'incentivo dimezza quasi il tempo di ritorno, riportandolo entro la prima metà della vita utile dell'impianto, e la variante con accumulo, a parità di scenario, rientra prima di quella di solo fotovoltaico, ancora una volta grazie al maggior valore dell'energia autoconsumata. Si nota inoltre che, senza incentivo, il tempo di ritorno del solo fotovoltaico si allunga al crescere della taglia, in coerenza con il valore attuale netto in calo già descritto.

Il tasso interno di rendimento, ossia il tasso di attualizzazione che annullerebbe il valore attuale netto, fornisce una misura percentuale della redditività. Tutti i valori della tabella si collocano al di sopra del tasso di attualizzazione adottato, pari al 5.8% definito al Capitolo 7, il che indica che ogni configurazione, in ogni scenario, è economicamente conveniente. Con l'incentivo il rendimento parte dal 13.2% della configurazione a quattro unità nel solo fotovoltaico e dal 13.8% in quella con accumulo; senza incentivo si attesta su valori più bassi, attorno al 9% nelle prime taglie. In tutti i casi il tasso diminuisce al crescere della dimensione, dal momento che le configurazioni più grandi, pur producendo un guadagno assoluto maggiore, lo ottengono a fronte di un investimento proporzionalmente più oneroso. Anche in questo caso la variante con accumulo mantiene, a parità di condizioni, un rendimento superiore a quella di solo fotovoltaico.

L'ultima riga riporta il costo livellato dell'elettricità, cioè il costo medio di ogni kilowattora prodotto dall'impianto lungo la sua vita, comprensivo dell'investimento e della gestione. Nel solo fotovoltaico esso resta praticamente costante al variare della taglia, intorno a 0.159 €/kWh, perché costo ed energia prodotta crescono nella stessa proporzione. Nella variante con accumulo è sempre più alto, compreso tra 0.170 e 0.181 €/kWh, e raggiunge il valore massimo proprio nella configurazione a sei unità, dove pesa il salto della batteria, che aggiunge costo senza aggiungere produzione. In entrambe le varianti, tuttavia, il costo livellato resta nettamente

inferiore al prezzo di prelievo dalla rete (0.2259 €/kWh), segno che l'energia autoprodotta costa meno di quella acquistata, mentre supera il prezzo di cessione, a conferma che vendere il surplus rende meno di quanto costi generarlo.

La Figura 48 riporta il costo livellato dell'elettricità delle due varianti, posto a confronto con il prezzo di prelievo e con quello di cessione. Si riconosce come entrambe le curve restino al di sotto del primo e al di sopra del secondo, e come quella della variante con accumulo, oltre a collocarsi più in alto, raggiunga il proprio massimo nella configurazione a sei unità.

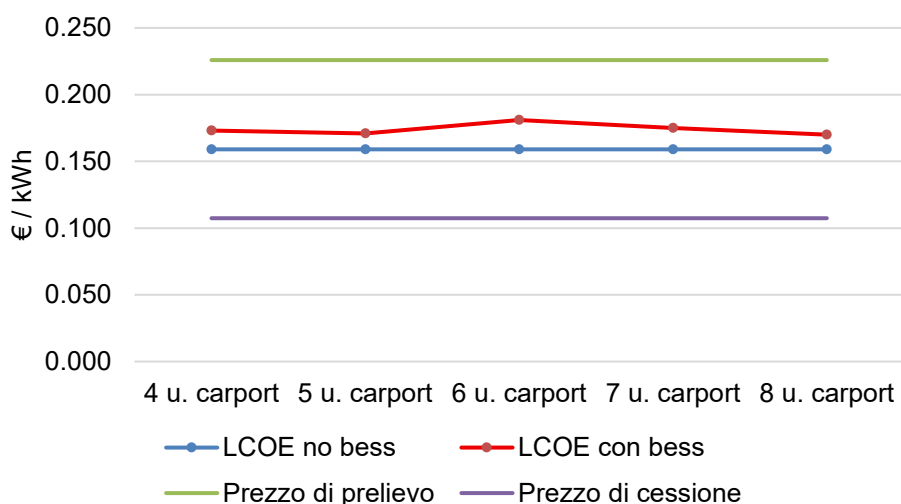


Figura 48 - Costo livellato dell'elettricità delle varianti senza e con accumulo, confrontato con il prezzo di prelievo e di cessione, per le cinque configurazioni

La lettura economica ribalta, per certi versi, quella ambientale. Mentre sul piano del clima l'accumulo rappresentava un costo, su quello economico è un vantaggio, perché in ogni configurazione migliora il valore attuale netto, accorcia il tempo di ritorno e innalza il tasso di rendimento, pur facendo salire il costo livellato. Determinante è l'incentivo, che quasi dimezza i tempi di ritorno e raddoppia il valore attuale netto, spostando la convenienza da accettabile a netta. Quanto alla taglia, le configurazioni più grandi producono il guadagno assoluto maggiore quando si dispone dell'incentivo, ma a una redditività percentuale via via inferiore, e senza incentivo la loro convenienza diminuisce, fino al caso del solo fotovoltaico, in cui ampliare l'impianto oltre le prime taglie ne riduce il valore attuale netto. Sono questi i termini, accanto a quelli ambientali, che il paragrafo conclusivo riunirà per individuare la configurazione di migliore compromesso.

9.4. Risultati integrati

I paragrafi precedenti hanno esaminato, una alla volta, le prestazioni energetiche, ambientali ed economiche delle dieci configurazioni. Il presente paragrafo raccoglie i risultati dell'analisi integrata, che monetizza il beneficio ambientale e lo affianca a quello economico, e degli indici di ritorno energetico e di CO₂, secondo i metodi descritti al Capitolo 8.

Tabella 26 - Risultati integrati delle dieci configurazioni, senza e con accumulo

Indicatore	Unità	4 u. carport	5 u. carport	6 u. carport	7 u. carport	8 u. carport
CO ₂ operativa evitata cumulata 25y no bess	kgCO ₂ eq	230'542	288'086	345'631	403'176	460'720
CO ₂ operativa evitata cumulata 25y con bess	kgCO ₂ eq	226'524	282'222	336'917	393'637	450'657
Beneficio CO ₂ monetizzato 25y no bess	€	76'722	95'856	114'989	134'123	153'257
Beneficio CO ₂ monetizzato 25y con bess	€	75'386	93'906	112'092	130'951	149'910
NPV unificato no bess + ECO	€	91'586	107'580	122'175	135'855	149'064
NPV unificato con bess + ECO	€	94'853	114'503	129'018	146'496	162'983
NPV unificato no bess senza incentivo	€	64'347	73'532	81'317	88'187	94'587
NPV unificato con bess senza incentivo	€	66'706	79'669	84'830	96'449	107'311
PBT unificato no bess + ECO	anni	8	8	8	8	8
PBT unificato con bess + ECO	anni	8	8	8	8	8
PBT unificato no bess senza incentivo	anni	11	11	12	12	12
PBT unificato con bess senza incentivo	anni	10	11	11	11	11
EPBT no bess	anni	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
EPBT con bess	anni	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99
CPBT no bess	anni	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
CPBT con bess	anni	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0
EROI no bess		12.70	12.70	12.70	12.70	12.70
EROI con bess		12.50	12.60	12.50	12.60	12.60

Valorizzando la CO₂ operativa evitata con il prezzo ombra definito al Capitolo 8, si ottiene il beneficio climatico monetizzato, riportato nelle prime righe della Tabella 26. Esso cresce con la taglia, dai 76'722 € della configurazione a quattro unità carport ai 153'257 € di quella a otto nella variante di solo fotovoltaico, e risulta in ogni caso leggermente inferiore per la variante con accumulo, che evita meno CO₂. L'ordine di grandezza è significativo, perché per molte configurazioni questo valore è paragonabile, e in alcuni casi superiore, al valore attuale netto puramente finanziario.

Il valore attuale netto unificato, che somma al risultato finanziario il beneficio climatico attualizzato, nello scenario con incentivo cresce con la taglia in entrambe le varianti, dai 91'586 € della configurazione a quattro unità ai 149'064 € di quella a otto nel solo fotovoltaico, e dai 94'853 € ai 162'983 € nella variante con accumulo. L'incremento rispetto al solo dato finanziario è notevole: per la configurazione a sei unità senza accumulo si passa dai 67'244 € finanziari ai 122'175 € unificati, quasi raddoppia.

È nello scenario senza incentivo che il risultato cambia di più. Il valore attuale netto unificato resta ampiamente positivo, dai 64'347 € ai 94'587 € nel solo fotovoltaico e dai 66'706 € ai 107'311 € nella variante con accumulo, e soprattutto torna a crescere con la taglia, al contrario del dato puramente finanziario, perché il beneficio climatico aumenta con la dimensione dell'impianto. Una volta dato un valore alla CO₂, dunque, le configurazioni più grandi tornano

a essere le più convenienti e anche la flessione a sei unità carport, che il dato finanziario presentava nella variante con accumulo, scompare, assorbita dal beneficio climatico crescente.

Il tempo di ritorno unificato conferma la stessa direzione, attestandosi su circa otto anni in tutte le configurazioni con l'incentivo e su dieci-dodici anni senza. Rispetto ai tempi puramente finanziari del paragrafo precedente, la valorizzazione della CO₂ li accorcia sensibilmente, riportando entro i dodici anni anche i casi senza incentivo, che sul solo piano finanziario superavano i quindici.

Gli indici di ritorno raccolti confermano la convenienza dell'impianto. Il tempo di ritorno energetico è di circa due anni e quello di carbonio di circa tre, a fronte dei venticinque di vita utile, mentre il tasso di ritorno energetico si attesta intorno a dodici volte e mezza. La batteria peggiora i tre indici solo in misura marginale, allungando di poco il tempo di ritorno energetico, da 1.97 a 1.99 anni, e abbassando lievemente il tasso di ritorno, da 12.7 a circa 12.5, una penalizzazione contenuta e coerente con il suo bilancio ambientale. Il contrasto tra la lettura finanziaria e quella unificata è riassunto nella Figura 49, che affianca per ciascuna configurazione il valore attuale netto finanziario e quello unificato.

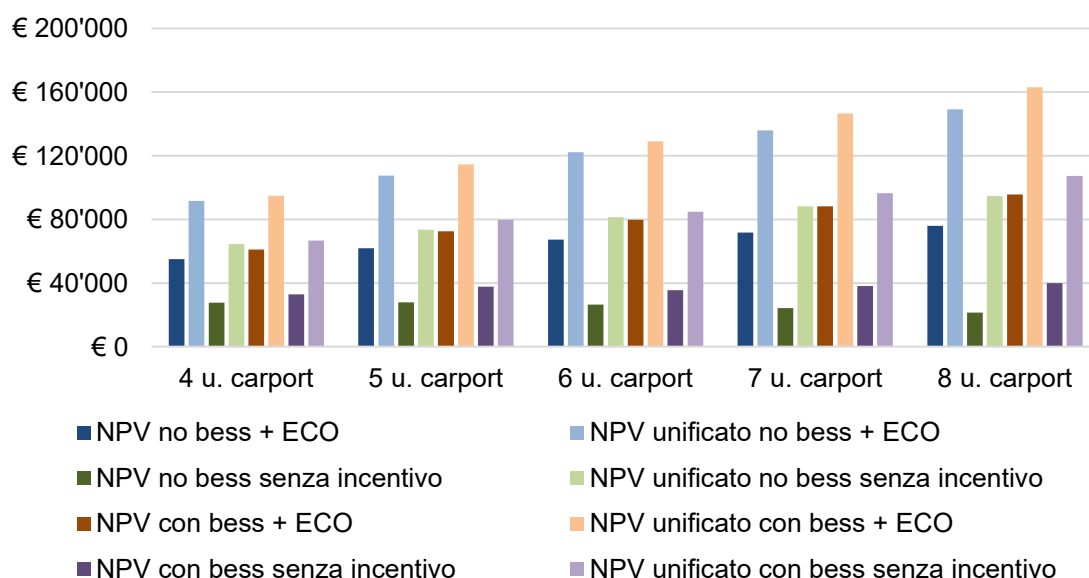


Figura 49 - Confronto NPV finanziario e NPV unificato per le dieci configurazioni con e senza accumulo

Riunendo le tre dimensioni il quadro è coerente. Sul piano finanziario l'intervento è conveniente in ogni configurazione e la batteria aggiunge valore; su quello ambientale la batteria è un costo; su quello energetico e di carbonio l'impianto si ripaga in pochi anni con una penalizzazione modesta dell'accumulo. Una volta monetizzato e sommato il beneficio climatico le letture si compongono: l'intervento risulta nettamente vantaggioso anche senza incentivo, le configurazioni più grandi tornano preferibili e la convenienza dell'accumulo non viene compromessa dal suo modesto svantaggio ambientale. Restano da saggiare la robustezza di queste conclusioni, con l'analisi di sensibilità, e la scelta della configurazione di migliore compromesso, affidata al paragrafo conclusivo.

9.5. Analisi di sensibilità

I vari risultati presentati nei paragrafi precedenti poggiano su un insieme di ipotesi, alcune delle quali soggette a incertezza. Per misurare quanto questi reggano al variare di tali ipotesi si è condotta un'analisi di sensibilità. Si tratta di un approfondimento che non incide sul dimensionamento né sulle conclusioni del lavoro, ma che permette di capire in quali condizioni la convenienza dell'intervento verrebbe meno e con quale margine. La prova è stata condotta sul valore attuale netto della sola analisi economica, e non su quello unificato, per una ragione prudenziale: il beneficio climatico introdotto in precedenza è una voce sempre positiva che si somma ai flussi finanziari, per cui una configurazione che risulta solida sul piano economico lo è a maggior ragione una volta considerata anche la componente ambientale. I parametri esaminati sono tre, ossia il tasso di attualizzazione, il prezzo dell'energia elettrica e il costo di investimento iniziale, e ciascuno è stato fatto variare attorno al proprio valore di riferimento.

Il primo parametro è il tasso di attualizzazione, che governa il peso attribuito ai flussi degli anni futuri. Esso è stato fatto variare tra il 3% e il 9%, mantenendo al centro il valore di riferimento del 5.8%. Nella Tabella 27 si riporta il valore attuale netto delle diverse configurazioni al variare del tasso.

Tabella 27 - Sensibilità del valore attuale netto al tasso di attualizzazione (valori in €)

Config.	Scenario	3%	4%	5%	5.8% (base)	7%	8%	9%
4 unità	No bess + ECO	95'783	79'133	64'887	54'941	42'033	32'818	24'766
4 unità	No bess senza incentivo	64'512	49'400	36'581	27'703	16'286	8'220	1'239
4 unità	Bess + ECO	104'122	86'509	71'450	60'942	47'310	37'580	29'078
4 unità	Bess senza incentivo	71'809	55'784	42'200	32'795	20'704	12'161	4'767
5 unità	No bess + ECO	110'331	90'551	73'619	61'792	46'436	35'468	25'878
5 unità	No bess senza incentivo	71'243	53'384	38'235	27'744	14'252	4'720	-3'530
5 unità	Bess + ECO	124'791	103'439	85'180	72'437	55'902	44'098	33'781
5 unità	Bess senza incentivo	84'801	65'414	48'980	37'602	22'974	12'640	3'694
6 unità	No bess + ECO	122'971	100'269	80'828	67'244	49'599	36'989	25'959
6 unità	No bess senza incentivo	76'065	55'669	38'368	26'386	10'977	91	-9'330
6 unità	Bess + ECO	141'494	116'285	94'716	79'654	60'099	46'129	33'910
6 unità	Bess senza incentivo	90'765	68'049	48'795	35'466	18'330	6'224	-4'256
7 unità	No bess + ECO	134'360	108'874	87'041	71'780	51'949	37'770	25'364
7 unità	No bess senza incentivo	79'636	56'840	37'504	24'112	6'891	-5'277	-15'807
7 unità	Bess + ECO	157'543	129'253	105'044	88'137	66'184	50'498	36'778
7 unità	Bess senza incentivo	100'088	74'622	53'035	38'090	18'876	5'302	-6'448
8 unità	No bess + ECO	145'108	116'908	92'743	75'846	53'882	38'173	24'422
8 unità	No bess senza incentivo	82'566	57'441	36'129	21'369	2'387	-11'023	-22'630
8 unità	Bess + ECO	171'986	140'844	114'191	95'575	71'399	54'123	39'010
8 unità	Bess senza incentivo	108'073	80'072	56'336	39'902	18'774	3'847	-9'075

All'aumentare del tasso il valore attuale netto si riduce, poiché i benefici prodotti negli anni successivi vengono scontati più pesantemente. Il comportamento dei due gruppi di scenari, relativi alla detrazione fiscale, è però nettamente diverso. Gli scenari che ne beneficiano conservano un valore attuale netto ampiamente positivo per tutto l'intervallo esaminato, e

restano convenienti anche al 9%, dove mantengono valori dell'ordine delle decine di migliaia di euro. Per queste configurazioni le condizioni di finanziamento non rappresentano un fattore critico, poiché nessun tasso realistico riesce ad azzerarne il beneficio. Gli scenari privi di incentivo, pur partendo da un valore positivo al tasso di riferimento, mostrano una sensibilità più marcata e perdono convenienza all'interno dell'intervallo testato. Emerge in questo una regolarità legata alla taglia dell'impianto: le configurazioni più piccole conservano un valore attuale netto positivo quasi fino al 9%, mentre quelle più grandi prive di incentivo passano in negativo già attorno all'8%. La ragione sta nel fatto che le unità aggiunte producono un'energia che viene in misura crescente immessa in rete, dove è valorizzata al prezzo zonale, più basso della tariffa di acquisto risparmiata con l'autoconsumo, e contribuiscono quindi al beneficio in misura decrescente. Resta il fatto che si tratta di costi del capitale ben superiori al 5.8% assunto come riferimento, valore al quale tutte le configurazioni risultano convenienti.

Il secondo parametro è il prezzo dell'energia elettrica, da cui dipende il risparmio in bolletta e quindi il principale beneficio dell'impianto. Il prezzo è stato fatto variare tra una riduzione del 30% e un aumento del 50% rispetto al valore di base, così da rappresentare sia scenari di forte penetrazione delle rinnovabili, che tendono a deprimere i prezzi, sia situazioni di tensione sui mercati energetici. La Tabella 28 raccoglie i risultati.

Tabella 28 - Sensibilità del valore attuale netto al prezzo dell'energia elettrica (valori in €)

Config	Scenario	-30%	-20%	-10%	base	+10%	+20%	+30%	+50%
4 unità	No bess + ECO	22'238	33'139	44'040	54'941	65'842	76'743	87'644	109'446
4 unità	No bess senza incentivo	-5'000	5'901	16'802	27'703	38'604	49'505	60'406	82'208
4 unità	Bess + ECO	24'718	36'793	48'867	60'942	73'016	85'091	97'165	121'314
4 unità	Bess senza incentivo	-3'429	8'646	20'720	32'795	44'870	56'944	69'019	93'168
5 unità	No bess + ECO	22'978	35'916	48'854	61'792	74'730	87'667	100'605	126'481
5 unità	No bess senza incentivo	-11'070	1'868	14'806	27'744	40'681	53'619	66'557	92'432
5 unità	Bess + ECO	28'484	43'135	57'786	72'437	87'088	101'738	116'389	145'691
5 unità	Bess senza incentivo	-6'350	8'301	22'952	37'602	52'253	66'904	81'555	110'856
6 unità	No bess + ECO	22'740	37'574	52'409	67'244	82'079	96'913	111'748	141'417
6 unità	No bess senza incentivo	-18'118	-3'283	11'551	26'386	41'221	56'055	70'890	100'559
6 unità	Bess + ECO	27'514	44'894	62'274	79'654	97'034	114'414	131'794	166'554
6 unità	Bess senza incentivo	-16'674	706	18'086	35'466	52'846	70'226	87'606	122'366
7 unità	No bess + ECO	21'860	38'500	55'140	71'780	88'420	105'060	121'700	154'980
7 unità	No bess senza incentivo	-25'808	-9'168	7'472	24'112	40'752	57'392	74'032	107'312
7 unità	Bess + ECO	29'880	49'299	68'718	88'137	107'556	126'975	146'395	185'233
7 unità	Bess senza incentivo	-20'167	-748	18'671	38'090	57'509	76'928	96'347	135'186
8 unità	No bess + ECO	20'651	39'049	57'448	75'846	94'245	112'643	131'041	167'838
8 unità	No bess senza incentivo	-33'826	-15'428	2'971	21'369	39'767	58'166	76'564	113'361
8 unità	Bess + ECO	31'632	52'946	74'261	95'575	116'889	138'203	159'518	202'146
8 unità	Bess senza incentivo	-24'040	-2'726	18'588	39'902	61'217	82'531	103'845	146'474

Il valore attuale netto cresce in misura pressoché proporzionale al prezzo dell'energia, poiché a un prezzo più alto corrisponde un risparmio maggiore per ogni chilowattora autoconsumato o immesso in rete. Nelle ipotesi di rincaro tutte le configurazioni vedono crescere sensibilmente il proprio valore attuale netto, e le più grandi dotate di accumulo e incentivo arrivano a superare i 160'000 €. Sul versante opposto, gli scenari con incentivo restano convenienti anche con un prezzo ridotto del trenta per cento. Quelli privi di incentivo perdono convenienza soltanto in presenza di cali consistenti: con un prezzo ridotto del dieci per cento tutte le configurazioni mantengono un valore positivo, con una riduzione del venti per cento restano positive solo le configurazioni più piccole mentre le più grandi entrano in perdita, e con una riduzione del trenta per cento il valore attuale netto diventa negativo in tutti i casi senza incentivo. Le configurazioni più grandi sono quindi le prime a cedere, perché mettono in gioco una quantità di energia maggiore e il loro valore attuale netto varia più rapidamente al variare del prezzo. A parità di taglia, infine, le configurazioni dotate di accumulo risultano leggermente più resistenti a un calo dei prezzi, poiché il maggiore autoconsumo riduce la quota di energia venduta in rete e rende il beneficio meno dipendente dal prezzo di mercato.

Il terzo parametro è il costo di investimento iniziale, fatto variare tra una riduzione del 30% e un aumento del 30%. Trattandosi di una spesa interamente sostenuta all'anno zero, la sua variazione si riflette sul valore attuale netto in misura esattamente pari e di segno opposto, senza attualizzazione. La Tabella 29 riporta i valori ottenuti.

Tabella 29 - Sensibilità del valore attuale netto al costo di investimento iniziale (valori in €)

Config.	Scenario	-30%	-20%	-10%	base	+10%	+20%	+30%
4 unità	No bess + ECO	76'936	69'605	62'273	54'941	47'610	40'278	32'946
4 unità	No bess senza incentivo	49'698	42'366	35'034	27'703	20'371	13'039	5'707
4 unità	Bess + ECO	83'670	76'094	68'518	60'942	53'366	45'789	38'213
4 unità	Bess senza incentivo	55'524	47'947	40'371	32'795	25'219	17'643	10'066
5 unità	No bess + ECO	89'286	80'121	70'956	61'792	52'627	43'462	34'298
5 unità	No bess senza incentivo	55'238	46'073	36'908	27'744	18'579	9'414	250
5 unità	Bess + ECO	100'565	91'189	81'813	72'437	63'060	53'684	44'308
5 unità	Bess senza incentivo	65'731	56'355	46'979	37'602	28'226	18'850	9'474
6 unità	No bess + ECO	100'237	89'239	78'241	67'244	56'246	45'249	34'251
6 unità	No bess senza incentivo	59'379	48'381	37'384	26'386	15'388	4'391	-6'607
6 unità	Bess + ECO	115'336	103'442	91'548	79'654	67'760	55'866	43'972
6 unità	Bess senza incentivo	71'148	59'254	47'360	35'466	23'572	11'678	-216
7 unità	No bess + ECO	110'271	97'441	84'610	71'780	58'949	46'119	33'288
7 unità	No bess senza incentivo	62'604	49'773	36'943	24'112	11'282	-1'549	-14'379
7 unità	Bess + ECO	128'550	115'079	101'608	88'137	74'666	61'195	47'724
7 unità	Bess senza incentivo	78'503	65'032	51'561	38'090	24'619	11'148	-2'323
8 unità	No bess + ECO	119'837	105'173	90'510	75'846	61'183	46'519	31'856
8 unità	No bess senza incentivo	65'359	50'696	36'033	21'369	6'706	-7'958	-22'621
8 unità	Bess + ECO	140'530	125'545	110'560	95'575	80'590	65'604	50'619
8 unità	Bess senza incentivo	84'858	69'873	54'888	39'902	24'917	9'932	-5'053

Il costo di investimento è interamente sostenuto all'inizio, nell'anno zero, e per questo non viene attualizzato, dato che l'attualizzazione riguarda solo i flussi degli anni successivi. Ne consegue che il legame tra costo iniziale e valore attuale netto è diretto e lineare, perché ogni euro speso in più all'avvio riduce il valore attuale netto esattamente di un euro. Gli scenari con incentivo conservano un margine ampio e restano convenienti anche con un costo iniziale superiore del trenta per cento. Quelli privi di incentivo restano positivi fino a un aumento del dieci per cento in tutte le configurazioni; con un aumento del venti per cento perdono convenienza le configurazioni più grandi senza accumulo, e con un aumento del trenta per cento il valore attuale netto resta positivo solo nelle configurazioni più piccole. Anche in questo caso le versioni dotate di accumulo, pur partendo da un costo iniziale più alto, dispongono di un valore attuale netto di base maggiore e mostrano una tenuta analoga o superiore a quella delle corrispondenti configurazioni senza batteria. L'intervallo considerato, fino a un aumento del trenta per cento, costituisce in ogni caso un'ipotesi prudentiale, scelta per verificare la tenuta dei risultati anche in condizioni di mercato sfavorevoli.

Nel complesso l'analisi conferma la solidità economica dell'intervento. Le configurazioni con incentivo restano convenienti in tutte le condizioni esaminate, mentre quelle senza incentivo, pur convenienti ai valori di riferimento, perdono questa caratteristica solo quando più fattori si muovono insieme in senso sfavorevole. Nei tre parametri si ripresenta inoltre lo stesso comportamento: le configurazioni più piccole sopportano variazioni più ampie prima di entrare in perdita, mentre quelle più grandi, pur sempre convenienti al valore di base, dispongono di un margine più ridotto. Va infine ricordato che l'intera analisi è stata svolta sul solo valore economico, e che il beneficio ambientale, lasciato volutamente fuori dal calcolo, sposterebbe ogni risultato verso una maggiore convenienza, per cui i margini reali sono ancora più ampi di quelli qui rappresentati.

10 Conclusioni

Il lavoro presentato in questa tesi ha affrontato la parziale decarbonizzazione del Centro Antonianum di Padova attraverso l'integrazione di un impianto fotovoltaico a carport con un sistema di accumulo elettrochimico, valutandone il comportamento su un orizzonte di venticinque anni e su tre piani distinti ma collegati, quello energetico, quello ambientale e quello economico. Le dieci configurazioni considerate, ottenute combinando cinque taglie di impianto, dalle quattro alle otto unità carport, con le due varianti senza e con accumulo, sono state confrontate sull'insieme degli indicatori introdotti nei capitoli di metodo e raccolti, in forma comparativa, nel Capitolo 9 dedicato ai risultati. Il quadro che ne emerge è coerente nelle sue tre componenti. Sul piano economico l'intervento risulta conveniente in ogni configurazione e in ogni scenario, con un tasso interno di rendimento sempre superiore al 5.8% assunto come riferimento. Sul piano ambientale l'impianto restituisce la propria impronta di carbonio in circa tre anni e l'energia spesa per realizzarlo in circa due, a fronte di una vita utile di venticinque. La decarbonizzazione parziale del complesso, in altre parole, si dimostra solida prima ancora di stabilire quale configurazione adottare.

Prima di arrivare a questo confronto vale la pena ripercorrere i passaggi che lo hanno reso possibile. L'intervento, da un punto di vista energetico, parte da un margine d'azione ristretto. I vincoli paesaggistici che gravano sul complesso impediscono di agire sulle coperture storiche e non consentono di occupare il prato del giardino, così che l'unico spazio realmente disponibile resta il parcheggio. È da qui che nasce la scelta della struttura a carport, capace di produrre energia senza alterare l'aspetto degli edifici. Le configurazioni analizzate partono da quattro e arrivano fino a otto unità carport, non per un limite fisico dello spazio, che ne consentirebbe un numero maggiore, ma poiché oltre questa taglia il contributo energetico aggiuntivo non giustifica più l'ampliamento dell'impianto. Le simulazioni dinamiche hanno fornito la base su cui poggia tutto il resto. È emerso che la produzione cresce in proporzione diretta con il numero di unità carport, passando da circa 40'873 kWh all'anno per la configurazione più piccola a oltre 81'745 kWh per la più grande, mentre la quota di questa energia, che l'edificio riesce a utilizzare nell'istante in cui viene prodotta, non segue lo stesso ritmo. Senza accumulo la PV fraction si ferma al 44.5 % per la taglia minore e arriva solo al 53.9 % per quella maggiore, perché oltre una certa dimensione l'impianto produce molto più di quanto il complesso consumi durante il giorno. Lo si vede ancora meglio nella Self-Consumption, che scende dal 59.4 % al 36.0 % al crescere della taglia, segno di una quota via via maggiore di energia generata e non utilizzata in loco. L'accumulo modifica in modo netto questo quadro: spostando nelle ore serali e notturne l'energia prodotta di giorno, porta la PV fraction dal 56.5 % della configurazione a quattro unità fino all'83.9 % di quella a otto. È in questa fase che è apparso chiaro il ruolo della batteria, non tanto nell'aumentare la produzione quanto nel renderla utile.

La valutazione ambientale ha collocato l'intervento nel suo contesto di emissioni. Quelle incorporate nei componenti, dai moduli fotovoltaici alle strutture in alluminio fino alle batterie, crescono con la dimensione dell'impianto, ma restano contenute rispetto alle emissioni evitate lungo i venticinque anni grazie all'energia pulita prodotta in loco. Il tempo di ritorno energetico si attesta intorno ai due anni per tutte le configurazioni e quello legato alle emissioni a circa tre, valori bassi a fronte di una vita utile di venticinque, e l'introduzione del sistema di accumulo lo modifica solo in misura trascurabile. Il bilancio ambientale dell'opera risulta quindi ampiamente positivo, a prescindere dalla taglia scelta.

La valutazione economica, infine, ha messo a confronto il costo dell'intervento con i benefici che è in grado di generare. Il computo metrico estimativo, basato sul prezzario regionale, ha quantificato l'investimento iniziale, che va da circa 75'762 € per la configurazione a quattro unità con accumulo fino a quasi 149'852 € per quella a otto. A fronte di questa spesa, il risparmio in bolletta e la valorizzazione del surplus immesso in rete restituiscono in tutte le configurazioni un valore attuale netto positivo già nello scenario privo di incentivi, con tempi di ritorno che restano sotto la vita utile dell'impianto. È su questa base economica che si innesta la lettura integrata.

Le tre letture, prese una alla volta, restituiscono però indicazioni differenti, ed è dal loro confronto che nasce la scelta della configurazione migliore. Sul piano energetico la produzione cresce in modo regolare con il numero di unità carport, ma l'autoconsumo tende a saturare, perché l'edificio può utilizzare direttamente solo l'energia prodotta nelle ore in cui consuma. L'accumulo sposta nel tempo una parte di quell'energia e alza la copertura del fabbisogno, fino a circa l'84% della configurazione a otto unità, la più elevata dell'intera analisi; oltre una certa taglia, però, la batteria si avvicina al proprio limite e la quota di energia ceduta alla rete torna a crescere. Sul piano ambientale la rapidità del ritorno è la stessa per tutte le configurazioni, mentre la quantità CO₂ evitata aumenta con la dimensione dell'impianto, a vantaggio delle taglie maggiori; l'accumulo, al contrario, aggiunge una quota di emissioni incorporate senza migliorare il bilancio operativo e rappresenta perciò un costo ambientale, per quanto contenuto. Sul piano economico la prospettiva si rovescia, perché la batteria, sottraendo energia alla cessione poco remunerata per destinarla all'autoconsumo, migliora in ogni caso il valore attuale netto, accorcia il tempo di ritorno e innalza il tasso di rendimento. È questa l'asimmetria di fondo che governa l'intera valutazione, e che la lettura integrata, attribuendo un valore monetario alla CO₂ evitata, ricompone in un unico quadro favorevole.

Un ruolo determinante, all'interno di questo quadro, è svolto dall'incentivo fiscale [46]. La detrazione sulle spese di ristrutturazione, ripartita in dieci quote annuali, riduce quasi della metà il tempo di ritorno dell'investimento, riportandolo entro la prima metà della vita utile dell'impianto e porta il valore attuale netto a circa il doppio di quello ottenibile con il solo risparmio in bolletta. Senza incentivo i tempi di rientro si collocano tra i quattordici e i ventuno anni a seconda della configurazione, mentre con l'incentivo scendono a circa nove-undici anni. Per una realtà come il Centro Antonianum, un'istituzione senza scopo di lucro che dispone di risorse limitate, questa differenza è ciò che rende l'intervento effettivamente accessibile, perché trasforma un investimento dal ritorno lento in uno che si ripaga in tempi compatibili con la programmazione ordinaria. In contesti di questo tipo l'incentivo non si limita dunque a migliorare un indicatore, ma abilita la decisione stessa di intervenire. Va però precisato che lo scenario con incentivo rappresenta un'ipotesi di massimo beneficio, poiché la detrazione del 50% si applica nella sua interezza alle sole abitazioni principali, mentre per edifici di altra destinazione la quota detraibile scende al 36%. Per questa ragione, e in accordo con quanto richiesto dalla committenza, l'individuazione delle configurazioni migliori viene condotta in via prudenziale sui soli scenari privi di incentivo, i cui esiti restano validi indipendentemente dal quadro fiscale applicabile.

Sui risultati senza incentivo la prima indicazione è netta. In ogni configurazione la variante con accumulo presenta un valore attuale netto superiore a quella di solo fotovoltaico, nonostante il suo modesto svantaggio ambientale che viene però riassorbito non appena alla CO₂ evitata si attribuisce un prezzo. Stabilito questo, la scelta della taglia dipende dal vincolo che si pone sull'investimento iniziale. Qualora la spesa iniziale non costituisse un vincolo, la configurazione preferibile sarebbe quella a otto unità carport con accumulo, che senza incentivo raggiunge il valore attuale netto più alto, pari a 39'902 €, e che resta la migliore anche nella lettura integrata,

con un valore attuale netto unificato di 107'311 €. La stessa configurazione offre inoltre la maggiore indipendenza dalla rete, con una copertura del fabbisogno prossima all'84%, e il costo livellato dell'elettricità più basso, pari a 0.170 €/kWh. Il suo unico punto debole, ovvero le maggiori emissioni incorporate dell'impianto più grande e della batteria, è ampiamente compensato dal beneficio climatico, come mostra proprio il valore unificato. A risorse illimitate, dunque, e valutando tutti e tre gli ambiti, la configurazione a otto unità con accumulo costituisce l'ottimo assoluto.

Nella pratica, tuttavia, la spesa iniziale è un vincolo concreto, e la lettura cambia. Il guadagno aggiunto da ogni unità in più si riduce rapidamente. La configurazione a sei unità presenta addirittura un valore attuale netto inferiore a quella a cinque, per effetto del salto della batteria da 40 kWh a 60 kWh, e le configurazioni a sette e otto unità carport richiedono decine di migliaia di euro di investimento aggiuntivo per poche migliaia di euro di valore attuale netto in più. La configurazione a cinque unità carport con accumulo recupera quasi per intero il valore della taglia più grande, con un valore attuale netto di 37'602 € contro i 39'902 € della configurazione a otto, uno scarto di circa 2'300 €, a fronte di un costo di investimento di 93'763 € contro 149'852 €, ossia circa 56'000 € in meno. A questo si aggiungono un tempo di ritorno più breve, sedici anni contro diciotto, un tasso interno di rendimento più alto e il secondo costo livellato più basso dell'intera analisi, pari a 0.171 €/kWh. Anche sul piano energetico la configurazione si comporta bene, perché utilizza direttamente circa il 71% dell'energia prodotta, il secondo valore più alto, e copre due terzi del fabbisogno con un surplus contenuto. Per una committenza che deve tenere in considerazione sia il tempo di ritorno che l'esborso, la configurazione a cinque unità con accumulo rappresenta perciò la scelta di migliore compromesso, il punto in cui il valore ottenuto per ogni euro investito è massimo. Qualora invece l'obiettivo fosse contenere al minimo la spesa, la configurazione a quattro unità con accumulo offrirebbe il tempo di ritorno più rapido, pari a quattordici anni, e l'investimento più basso, pur con un valore attuale netto inferiore, circa 32'795 €.

Le tre indicazioni non sono in contraddizione, ma rispondono a domande diverse. Se l'obiettivo è massimizzare il ritorno e l'indipendenza energetica, senza un limite di spesa, la configurazione a otto unità con accumulo è la più conveniente. Se invece l'obiettivo è ottenere il miglior rapporto tra beneficio e costo, la configurazione a cinque unità con accumulo è la più ragionevole, mentre se l'obiettivo è avere un ritorno minimizzando la spesa iniziale, la configurazione a quattro unità con accumulo è la scelta migliore. Tutte e tre poggiano sugli scenari privi di incentivo; con l'incentivo diventerebbero nettamente più vantaggiose.

L'intervento qui studiato agisce sulla sola domanda elettrica del complesso, mentre il fabbisogno termico, ovvero il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, continua a essere coperto dalla caldaia a gas. La decarbonizzazione realizzata è perciò, per costruzione, parziale. Il passo successivo verso una decarbonizzazione completa dell'edificio consisterebbe nella sostituzione della caldaia con una pompa di calore, così da elettrificare anche gli usi termici. Un intervento di questo tipo non eliminerebbe soltanto le emissioni dirette residue legate alla combustione del gas, ma agirebbe anche sul bilancio dell'impianto fotovoltaico, perché l'aumento della domanda elettrica, concentrato soprattutto nei mesi invernali, incrementerebbe l'autoconsumo e il valore dell'energia accumulata, dato che una parte del surplus oggi ceduto alla rete a basso prezzo verrebbe impiegata per alimentare la pompa di calore. In quello scenario il punto di ottimo si sposterebbe verso le configurazioni più grandi e la convenienza dell'accumulo risulterebbe ulteriormente rafforzata. Il presente lavoro va quindi letto come un primo passo, di per sé compiuto e giustificato, lungo un percorso la cui conclusione passa per l'elettificazione del sistema di climatizzazione.

I risultati ottenuti dipendono, come ogni analisi di questo tipo, da un insieme di ipotesi. La più rilevante riguarda la traiettoria di decarbonizzazione della rete elettrica [4], riflessa nel fattore di emissione variabile, e il suo effetto è stato saggiato nell'analisi di sensibilità, insieme a quello del prezzo dell'energia e del tasso di attualizzazione. Sviluppi futuri del lavoro potrebbero affinare lo scenario di evoluzione del mix elettrico, integrare nel bilancio energetico l'elettrificazione del riscaldamento appena richiamata e valutare assetti di autoconsumo più articolati, come la costituzione di una comunità energetica che coinvolga le diverse utenze del complesso, qualora ce ne fossero.

In conclusione, l'analisi mostra che un intervento contenuto e poco invasivo, compatibile con i vincoli paesaggistici che gravano su un complesso di valore storico, è in grado di produrre fin da subito un ritorno economico e ambientale solido, indipendente dagli incentivi fiscali e ancora più marcato in loro presenza. La configurazione a cinque unità carport con accumulo si conferma la soluzione di migliore equilibrio per il caso studio, mentre quella a otto unità rappresenta l'opzione di massimo ritorno qualora le risorse lo consentano e quella da quattro unità rappresenta l'opzione di minimo ritorno con le risorse più limitate. In tutti e tre i casi la decarbonizzazione parziale del Centro Antonianum non costituisce un punto d'arrivo, ma la base su cui innestare i passi successivi verso la piena neutralità dell'edificio.

Bibliografia

- [1] A. Palomar-Torres, J. M. Rey-Hernández, A. Rey-Hernández, e F. J. Rey-Martínez, «Decarbonizing Near-Zero-Energy Buildings to Zero-Emission Buildings: A Holistic Life Cycle Approach to Minimize Embodied and Operational Emissions Through Circular Economy Strategies», *Applied Sciences*, vol. 15, n. 5, pag. 2670, 2025, doi: 10.3390/app15052670.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Summary for Policymakers», 2018. [Online]. Disponibile su: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf
- [3] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *DIRETTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia*. 2024. [Online]. Disponibile su: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401275
- [4] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, «PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA (PNIEC)», 2024. [Online]. Disponibile su: https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-pdf
- [5] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO sulla prestazione energetica nell'edilizia*. 2010. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>
- [6] International Organization for Standardization, «ISO 14040:2006 — Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework», 2006. [Online]. Disponibile su: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [7] International Organization for Standardization, «ISO 14044:2006 — Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines», 2006. [Online]. Disponibile su: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [8] Ente Italiano di Normazione, «UNI EN 15978:2011 — Sostenibilità delle costruzioni — Valutazione della prestazione ambientale degli edifici — Metodo di calcolo », 2011. [Online]. Disponibile su: <https://store.uni.com/uni-en-15978-2011>
- [9] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus», 2025, 25.2.0. [Online]. Disponibile su: <https://energyplus.net/>
- [10] G. Antonini, I. D'Adamo, S. Di Leo, M. Gastaldi, e M. Scarcelli, «Advancing Sustainable Development Through Integrated Photovoltaic and Battery Energy Storage Systems in Commercial Buildings: A Strategic, Economic, and Environmental Perspective», *Sustainable Development*, vol. 33, n. 6, pagg. 9144–9164, dic. 2025, doi: 10.1002/sd.70148.
- [11] D. Cirone, R. Bruno, P. Bevilacqua, S. Perrella, e N. Arcuri, «Techno-Economic Analysis of an Energy Community Based on PV and Electric Storage Systems in a Small Mountain Locality of South Italy: A Case Study», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, n. 21, nov. 2022, doi: 10.3390/su142113877.

- [12] S. Habib, M. Tamoor, M. A. Zaka, e Y. Jia, «Assessment and optimization of carport structures for photovoltaic systems: A path to sustainable energy development», *Energy Convers. Manag.*, vol. 295, nov. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117617.
- [13] S. Ranta, E. Akulenko, H. Huerta, S. Wang, S. Jouttijärvi, e K. Miettunen, «Feasibility and greenhouse gas emissions of timber structures in solar photovoltaic carport construction», *Front. Built Environ.*, vol. 10, 2024, doi: 10.3389/fbuil.2024.1379956.
- [14] K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, e D. S. Apul, «Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis», 2015, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.
- [15] Regione Veneto, «Lavori Pubblici - Elenco dei prezzi». [Online]. Disponibile su: <https://prezzario.regione.veneto.it/>
- [16] European Investment Bank, «The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB - Second Edition», 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.eib.org/en/publications/20220169-the-economic-appraisal-of-investment-projects-at-the-eib>
- [17] Climate.OneBuilding.org, «TMYx weather data for Padova Aeroporto, Italia — WMO Station 160950 (45,40 °N, 11,85 °E, 14 m s.l.m.), period of record 2009-2023, NCEI ISD/ERA5». [Online]. Disponibile su: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/ITA_Italy/index.html
- [18] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n.42 - Codice dei beni culturali e del paesaggio*. 2004. [Online]. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2004-01-22;42>
- [19] Google LLC, «Google Maps». [Online]. Disponibile su: <https://www.google.com/maps>
- [20] FuturaSun, «Silk® Nova». [Online]. Disponibile su: https://www.futurasun.com/wp-content/uploads/2024/04/FuturaSun_144_570-590W_Silk-Nova_IT.pdf
- [21] AZ Solar Shop, «INSTALLATION MANUAL Aluminium Carport». [Online]. Disponibile su: <https://impiantofotovoltaico.shop/wp-content/uploads/2024/10/Carport-Manual-Installation-AZ-Solar.pdf>
- [22] Fox ESS, «ECS Fox ESS SISTEMA DI ACCUMULO DELLA BATTERIA». [Online]. Disponibile su: <https://it.fox-ess.com/wp-content/uploads/2024/09/ITA-ECS2900-Datasheet-V1.7-12.01.pdf>
- [23] ANSI/ASHRAE, «Standard Method of Evaluating Zero Net Energy and Zero Net Carbon Building Performance», 2023, *Atlanta*. [Online]. Disponibile su: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ansi-ashrae-standard-228-standard-method-of-evaluating-zero-net-energy-and-zero-net-carbon-building-performance>
- [24] D. Dell'Oro, V. Bazjanac, e T. Maile, «Reducing GHG Emissions in Catholic Church Buildings: The Case of Saint Joseph Hall in Los Altos, California», in *Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress - CLIMA 2025*, 2026. [Online]. Disponibile su: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-06810-1_107
- [25] Regione Lombardia, *D.G.R. 15 giugno 2007, n. VIII/4916 e s.m.i. - Piano di Azione per l'Energia (Allegato 2, Prospetto 3: Fattori di emissione per il calcolo della CO2eq)*.

- Milano, Italia, 2007. [Online]. Disponibile su: https://www.gazzettaufficiale.it/ricercaArchivioCompleto/serie_generale/2007
- [26] FuturaSun, «Environmental Product Declaration», 2024. [Online]. Disponibile su: https://www.futurasun.com/wp-content/uploads/2024/06/NEPD-6641-5880_FUxxxM-Silk-Nova-FUxxxMV-Silk-Nova.pdf
- [27] Acciaieria Arvedi S.p.A., «Environmental Product Declaration», 2022. [Online]. Disponibile su: <https://www.environdec.com/library/epd5261>
- [28] Nuova Demi e Cava Suriana, «Dichiarazione Ambientale di Prodotto», 2022. [Online]. Disponibile su: https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/220824_FINDO_EPD_aggregati-naturali_rev03-1.pdf
- [29] Paver, «Environmental Product Declaration», 2021. [Online]. Disponibile su: https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/PDFsam_2021.10.22-Dichiarazione-EPD-PT-Rev.-01.pdf
- [30] Colabeton S.p.A., «EPD - Dichiarazione Ambientale di Prodotto», 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.colabeton.it/sostenibilita>
- [31] Acciaierie di Sicilia, «Dichiarazione Ambientale di Prodotto», 2024. [Online]. Disponibile su: https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPD_ADS_HotRolled_EPDItaly_2024_tondo_ITA_v6.pdf
- [32] Profilati S.p.A., «Environmental Product Declaration», 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPDItaly0779.pdf>
- [33] Fox ESS, «Environmental Product Declaration - Inverter ibrido trifase serie H3», 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPD-of-FoxESS-H3-inverter-0416.pdf>
- [34] Fox ESS, «Environmental Product Declaration - Sistema di accumulo ECS2900», 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPD-of-FOXESS-ECS2900-0617.pdf>
- [35] European Central Bank, «Two per cent inflation target». [Online]. Disponibile su: <https://www.ecb.europa.eu/mopo/strategy/pricestab/html/index.it.html>
- [36] Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA), «Deliberazione 28 novembre 2023, 556/2023/R/COM – Aggiornamento per l'anno 2024 del tasso di remunerazione del capitale investito per i servizi infrastrutturali dei settori elettrico e gas», 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.arera.it/fileadmin/allegati/docs/23/556-23.pdf>
- [37] K. Branker, M. J. M. Pathak, e J. M. Pearce, «A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 9, pagg. 4470–4482, dic. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.104.
- [38] AZ Solar Shop, «Carport In Alluminio – Pensilina Per 2 Posti Auto». Consultato: 2 marzo 2026. [Online]. Disponibile su: <https://impiantofotovoltaico.shop/prodotto/carport-in-alluminio-pensilina-per-2-posti-auto/>
- [39] Senetic, «FoxESS ECS2900-H7 CUBE 20.16 kWh sistema di accumulo energetico». Consultato: 2 marzo 2026. [Online]. Disponibile su:

- https://www.senetic.it/product/ECS2900-H7?tduid=5552034e8fcd1885726c00bc7f2b6e4b&utm_source=tradedoubler&utm_medium=cps&utm_term=3328845
- [40] Senetic, «FoxESS ECS2900-H4 Energy Storage CUBE 11.52 kWh». Consultato: 2 marzo 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.senetic.it/product/ECS2900-H4>
 - [41] Senetic, «Inverter Foxess 29.9 kW Ibrido Tri-Fase». Consultato: 2 marzo 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.senetic.it/product/H3-PRO-299>
 - [42] Senetic, «Inverter FOXESS 25kW Ibrido Trifase». Consultato: 2 marzo 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.senetic.it/product/H3-PRO-250>
 - [43] L. Sens, U. Neuling, e M. Kaltschmitt, «Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines – Development by 2050», *Renew. Energy*, vol. 185, pagg. 525–537, feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.042.
 - [44] T. 13 IEA PVPS (International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme), «Guidelines for Operation and Maintenance of Photovoltaic Power Plants in Different Climates», 2022. [Online]. Disponibile su: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/11/IEA-PVPS-Report-T13-25-2022-OandM-Guidelines.pdf>
 - [45] GME – Gestore dei Mercati Energetici S.p.A., «Esiti dei mercati elettrici – Prezzi zonali e PUN». [Online]. Disponibile su: <https://gme.mercatoelettrico.org/it-it/Home/Esiti/Elettricit/MGP/Esiti/PUN>
 - [46] Agenzia delle Entrate, «Ristrutturazioni edilizie: le agevolazioni fiscali». [Online]. Disponibile su: <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/schede/agevolazioni/detriristredil36/schinfodeiristredil36>
 - [47] R. Frischknecht, P. Stolz, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha, e M. de Wild-Scholten, «Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity», 2020. [Online]. Disponibile su: <https://iea-pvps.org/key-topics/methodology-guidelines-on-life-cycle-assessment-of-photovoltaic-2020/>
 - [48] Ministero dello Sviluppo Economico, *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 — Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*. Italia: Gazzetta Ufficiale, 2015. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>

Lista delle Figure

Figura 1 - Vista Centro Antonianum dall'alto. Fonte: Google Maps	8
Figura 2 - Misure Parcheggio. Fonte: Elaborazione di foto aerea di Google Maps.....	11
Figura 3 - Pannello SilkNova 570W e scheda tecnica. Fonte: FuturaSun	12
Figura 4 - Unità carport. Fonte: AZ Solar Shop.....	13
Figura 5 - Batteria H2 e H7. Fonte: Fox ESS.....	13
Figura 6 - Andamento dei flussi energetici al variare del numero dei pannelli fotovoltaici....	15
Figura 7 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare del numero di pannelli fotovoltaici	16
Figura 8 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport	19
Figura 9 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport	19
Figura 10 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport.....	21
Figura 11 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport.....	22
Figura 12 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport	23
Figura 13 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport	24
Figura 14 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport	25
Figura 15 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport	26
Figura 16 - Andamento dei flussi energetici al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport	27
Figura 17 - Andamento degli indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport	28
Figura 18 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per quattro unità carport con batteria 30 kWh	32
Figura 19 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per quattro unità carport con batteria 30 kWh.....	32
Figura 20 - Andamento annuale dell'energia per quattro unità carport con batteria 30 kWh ..	33
Figura 21 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per cinque unità carport con batteria 40 kWh	35

Figura 22 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per cinque unità carport con batteria 40 kWh	35
Figura 23 - Andamento annuale dell'energia per cinque unità carport con batteria 40 kWh ...	36
Figura 24 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per sei unità carport con batteria 60 kWh	38
Figura 25 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per sei unità carport con batteria 60 kWh	38
Figura 26 - Andamento annuale dell'energia per sei unità carport con batteria 60 kWh	39
Figura 27 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per sette unità carport con batteria 60 kWh	41
Figura 28 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per sette unità carport con batteria 60 kWh	41
Figura 29 - Andamento annuale dell'energia per sette unità carport con batteria 60 kWh	42
Figura 30 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 gennaio per otto unità carport con batteria 60 kWh	44
Figura 31 - Andamento giornaliero dell'energia il 25 luglio per otto unità carport con batteria 60 kWh	44
Figura 32 - Andamento annuale dell'energia per otto unità carport con batteria 60 kWh	45
Figura 33 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport con batteria.....	52
Figura 34 - Confronto delle emissioni operative con fattore emissivo elettrico fisso e variabile per sei unità carport con batteria	54
Figura 35 - Analisi del Carbon Payback per sei unità carport con batteria.....	55
Figura 36 - Peso relativo dei vari componenti all'interno del capex per il caso a sei unità carport con batteria	60
Figura 37 - Confronto della bolletta energetica per il caso a sei unità carport	61
Figura 38 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo	63
Figura 39 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo	69
Figura 40 - Produzione fotovoltaica annua e autoconsumo, senza e con accumulo, al variare della configurazione	73
Figura 41 - Bilancio energetico annuo (autoconsumo, surplus, prelievo) delle cinque configurazioni, confronto tra le varianti senza e con accumulo.....	74
Figura 42 - PV fraction e Self-Consumption delle dieci configurazioni, confronto tra le varianti senza e con accumulo	75
Figura 43 - Emissioni incorporate disaggregate per componente, per le cinque configurazioni	77
Figura 44 - Emissioni operative del primo anno: baseline, variante senza accumulo e variante con accumulo, per le cinque configurazioni.....	78

Figura 45 - CO ₂ evitata cumulata lungo i venticinque anni, confronto tra le varianti senza e con accumulo in base a fattore emissivo.....	79
Figura 46 - Costo di investimento (CAPEX) delle varianti senza e con accumulo, per le cinque configurazioni.....	81
Figura 47 - Valore attuale netto nei quattro scenari (senza e con accumulo, con e senza incentivo), per le cinque configurazioni.....	82
Figura 48 - Costo livellato dell'elettricità delle varianti senza e con accumulo, confrontato con il prezzo di prelievo e di cessione, per le cinque configurazioni	83
Figura 49 - Confronto NPV finanziario e NPV unificato per le dieci configurazioni con e senza accumulo	85

Di seguito si riporta quella dell'Appendice:

Figura A. 1 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a quattro unità carport	111
Figura A. 2 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a quattro unità carport con batteria.....	111
Figura A. 3 - Analisi del Carbon Payback per quattro unità carport.....	112
Figura A. 4 - Analisi del Carbon Payback per quattro unità carport con batteria.....	112
Figura A. 5 - Confronto della bolletta energetica per il caso a quattro unità carport.....	112
Figura A. 6 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con incentivo	113
Figura A. 7 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport senza incentivo	113
Figura A. 8 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con batteria e incentivo	113
Figura A. 9 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con batteria senza incentivo	114
Figura A. 10 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con incentivo	114
Figura A. 11 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport senza incentivo.....	114
Figura A. 12 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con batteria e incentivo	115
Figura A. 13 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con batteria senza incentivo	115
Figura A. 14 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a cinque unità carport.....	117
Figura A. 15 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a cinque unità carport con batteria	117

Figura A. 16 - Analisi del Carbon Payback per cinque unità carport	118
Figura A. 17 - Analisi del Carbon Payback per cinque unità carport con batteria.....	118
Figura A. 18 - Confronto della bolletta energetica per il caso a cinque unità carport	118
Figura A. 19 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con incentivo	119
Figura A. 20 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport senza incentivo	119
Figura A. 21 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con batteria e incentivo	119
Figura A. 22 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con batteria senza incentivo	120
Figura A. 23 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con incentivo	120
Figura A. 24 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport senza incentivo	120
Figura A. 25 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con batteria e incentivo	121
Figura A. 26 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con batteria senza incentivo	121
Figura A. 27 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport	122
Figura A. 28 - Analisi del Carbon Payback per sei unità carport.....	122
Figura A. 29 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con incentivo	123
Figura A. 30 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport senza incentivo	123
Figura A. 31 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con batteria e incentivo	123
Figura A. 32 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con incentivo	124
Figura A. 33 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport senza incentivo	124
Figura A. 34 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria e incentivo	125
Figura A. 35 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo	125
Figura A. 36 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sette unità carport	126
Figura A. 37 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sette unità carport con batteria.....	126
Figura A. 38 - Analisi del Carbon Payback per sette unità carport.....	127
Figura A. 39 - Analisi del Carbon Payback per sette unità carport con batteria.....	127
Figura A. 40 - Confronto della bolletta energetica per il caso a sette unità carport.....	127

Figura A. 41 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con incentivo	128
Figura A. 42 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport senza incentivo	128
Figura A. 43 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con batteria e incentivo	128
Figura A. 44 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con batteria senza incentivo	129
Figura A. 45 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con incentivo	129
Figura A. 46 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport senza incentivo	129
Figura A. 47 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con batteria e incentivo	130
Figura A. 48 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con batteria senza incentivo	130
Figura A. 49 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a otto unità carport	132
Figura A. 50 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a otto unità carport con batteria.....	132
Figura A. 51 - Analisi del Carbon Payback per otto unità carport.....	133
Figura A. 52 - Analisi del Carbon Payback per otto unità carport con batteria	133
Figura A. 53 - Confronto della bolletta energetica per il caso a otto unità carport.....	133
Figura A. 54 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con incentivo	134
Figura A. 55 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport senza incentivo	134
Figura A. 56 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con batteria e incentivo	134
Figura A. 57 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con batteria senza incentivo	135
Figura A. 58 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con incentivo	135
Figura A. 59 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport senza incentivo.....	135
Figura A. 60 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con batteria e incentivo	136
Figura A. 61 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con batteria senza incentivo	136

Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Risultati dell'analisi parametrica per scaling	15
Tabella 2 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a quattro unità carport	19
Tabella 3 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a cinque unità carport.....	21
Tabella 4 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sei unità carport.....	23
Tabella 5 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a sette unità carport	25
Tabella 6 - Grandezze energetiche e indicatori prestazionali al variare della taglia dell'accumulo per il caso a otto unità carport	27
Tabella 7 - Risultato simulazione energetica per quattro unità carport.....	31
Tabella 8 - Risultato simulazione energetica per cinque unità carport	34
Tabella 9 - Risultato simulazione energetica per sei unità carport	37
Tabella 10 - Risultato simulazione energetica per sette unità carport.....	40
Tabella 11 - Risultato simulazione energetica per otto unità carport.....	43
Tabella 12 - Calcolo delle emissioni operative per il caso a sei unità carport	47
Tabella 13 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per sei unità carport	48
Tabella 14 - Calcolo delle emissioni incorporate della singola unità carport	49
Tabella 15 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter per sei unità carport con batteria	50
Tabella 16 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per sei unità carport con batteria	51
Tabella 17 - Risultato del calcolo delle emissioni totali considerando fattore emissivo elettrico costante per sei unità carport con batteria	53
Tabella 18 - Risultato del calcolo delle emissioni totali considerando fattore emissivo elettrico variabile per sei unità carport con batteria	53
Tabella 19 - Calcolo del capex per il caso a sei unità carport con batteria	59
Tabella 20 - Calcolo della bolletta energetica per il caso a sei unità carport	61
Tabella 21 - Calcolo del prezzo ombra delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport	66
Tabella 22 - Calcolo del beneficio climatico riguardo le emissioni operative evitate per il caso a sei unità carport	67
Tabella 23 - Risultati energetici delle dieci configurazioni, senza e con accumulo	71

Tabella 24 - Risultati ambientali delle dieci configurazioni, senza e con accumulo	76
Tabella 25 - Risultati economici delle dieci configurazioni, senza e con accumulo	80
Tabella 26 - Risultati integrati delle dieci configurazioni, senza e con accumulo	84
Tabella 27 - Sensibilità del valore attuale netto al tasso di attualizzazione (valori in €)	86
Tabella 28 - Sensibilità del valore attuale netto al prezzo dell'energia elettrica (valori in €) ..	87
Tabella 29 - Sensibilità del valore attuale netto al costo di investimento iniziale (valori in €)	88

Di seguito si riporta quella dell'Appendice:

Tabella A. 1 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per quattro unità carport.....	109
Tabella A. 2 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter per la singola unità carport	109
Tabella A. 3 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per quattro unità carport ..	110
Tabella A. 4 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter della batteria per quattro unità carport.....	110
Tabella A. 5 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per cinque unità carport.....	115
Tabella A. 6 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per cinque unità carport ...	116
Tabella A. 7 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per sette unità carport.....	125
Tabella A. 8 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per otto unità carport	131
Tabella A. 9 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter della batteria per otto unità carport.....	131

Lista degli Acronimi

Sigla	Significato
ANSI/ASHRAE	American National Standards Institute / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ARERA	Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente
BESS	Battery Energy Storage System
CAPEX	Capital Expenditure
CPBT	Carbon Payback Time
EN	European Norm (Norma Europea)
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPBT	Energy Payback Time
EPD	Environmental Product Declaration (Dichiarazione Ambientale di Prodotto)
EROI	Energy Return On Investment
GHG	Greenhouse Gas (gas serra)
GME	Gestore dei Mercati Energetici
GWP	Global Warming Potential
IEA-PVPS	International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRR	Internal Rate of Return
ISO	International Organization for Standardization

Sigla	Significato
IVA	Imposta sul Valore Aggiunto
LCA	Life Cycle Assessment
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
NPV	Net Present Value
NZEB	Nearly Zero Energy Building
OPEX	Operational Expenditure
PBT	Payback Time
PEF	Primary Energy Factor (fattore di energia primaria)
PNIEC	Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima
PUN	Prezzo Unico Nazionale
PV	Photovoltaic (fotovoltaico)
TMYx	Typical Meteorological Year extended
UE	Unione Europea
UNI	Ente Italiano di Normazione
WMO	World Meteorological Organization

Appendice

La seguente appendice contiene tutte le tabelle e figure utilizzate all'interno del lavoro di tesi.

Tabella A. 1 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per quattro unità carport

N pannelli: 60		
Area tot pv	155	m ²
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	133	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A4	4.54	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A5	1.22	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot B1-B7	0.000	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C1	0.000	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C2	0.056	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C3	0.76	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C4	0.13	kgCO ₂ eq/m ²
Valori calcolati:		
GHG emb pv A1-A3	20'614	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A4	704	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A5	189	kgCO ₂ eq
GHG emb pv B1-B7	0.00	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C1	0.00	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C2	8.71	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C3	117	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C4	20.8	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb pv tot	21'654	kgCO ₂ eq

Tabella A. 2 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter per la singola unità carport

INVERTER		10kW
Valori direttamente calcolati da EPD:		
GHG emb A1-A3	1'102	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	13.1	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	3.11	kgCO ₂ eq
GHG emb B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	0.298	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	1.6	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	4.04	kgCO ₂ eq
Valore finale:		
GHG emb x inverter	1'124	kgCO ₂ eq

Tabella A. 3 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per quattro unità carport

BESS n batterie :2		1 - H7 = 20.16 kWh	1 - H4 = 11.52 kWh
BESS capacity		20 kWh	10 kWh
		H7	H4
Valori unitari da EPD:			
GWP tot A1	184	187	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A2	2.53	2.56	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A3	5.56	5.52	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A4	3.96	4.04	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A5	0.655	0.726	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot B6	72.2	72.6	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C2	0.11	0.111	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C3	0.591	0.598	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C4	7.31	7.31	kgCO ₂ eq/kWh
Valori calcolati:			
GHG emb A1	3'680	1'870	kgCO ₂ eq
GHG emb A2	50.6	25.6	kgCO ₂ eq
GHG emb A3	111.2	55.2	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	79.2	40.4	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	13.1	7.26	kgCO ₂ eq
GHG emb B6	1'444	726	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	2.2	1.11	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	11.82	5.98	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	146.2	73.1	kgCO ₂ eq
Valori totali:			
GHG emb H7 e H4	4'094	2'079	kgCO ₂ eq
GHG emb bess tot	6'173		kgCO ₂ eq

Tabella A. 4 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter della batteria per quattro unità carport

INVERTER		29.9 kW
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	110	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot A4	1.31	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot A5	0.311	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot B1-B7	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C1	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C2	0.0298	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C3	0.16	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C4	0.404	kgCO ₂ eq/kW
Valori calcolati:		
GHG emb A1-A3	3'295	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	39.2	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	9.30	kgCO ₂ eq
GHG emb B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	0.89	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	4.78	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	12.08	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb tot	3'361	kgCO ₂ eq

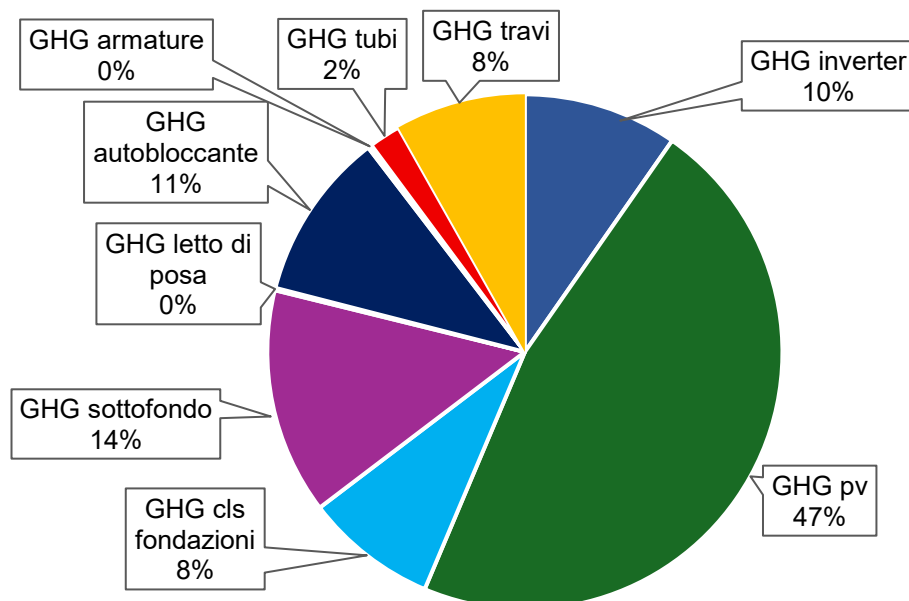


Figura A. 1 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a quattro unità carport

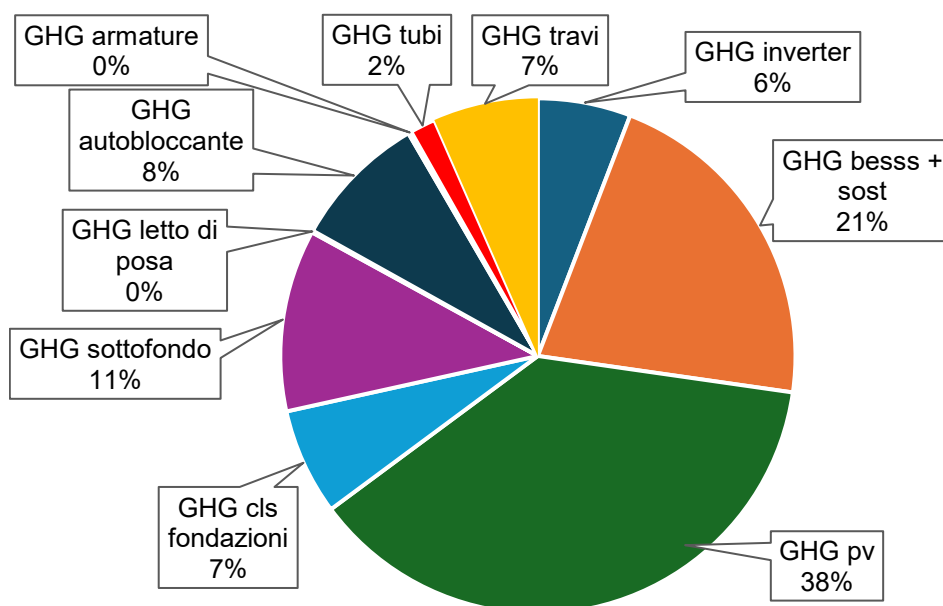


Figura A. 2 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a quattro unità carport con batteria

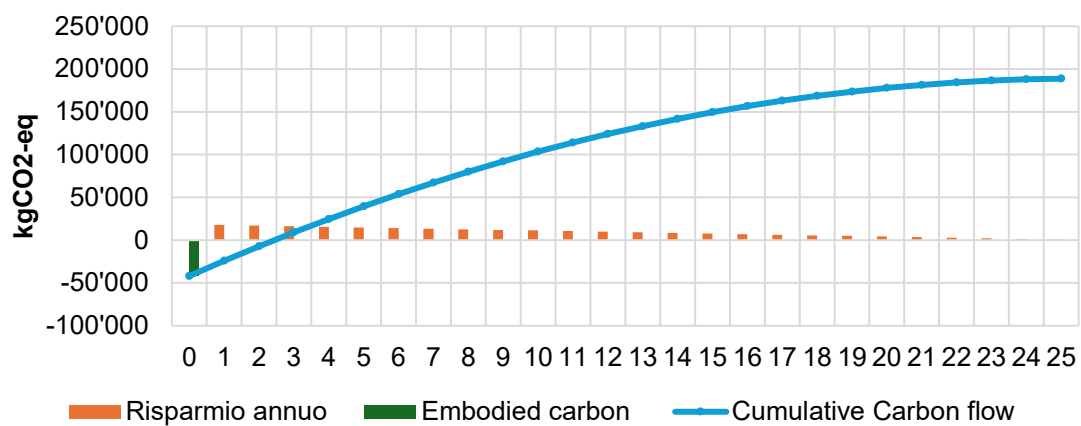


Figura A. 3 - Analisi del Carbon Payback per quattro unità carport

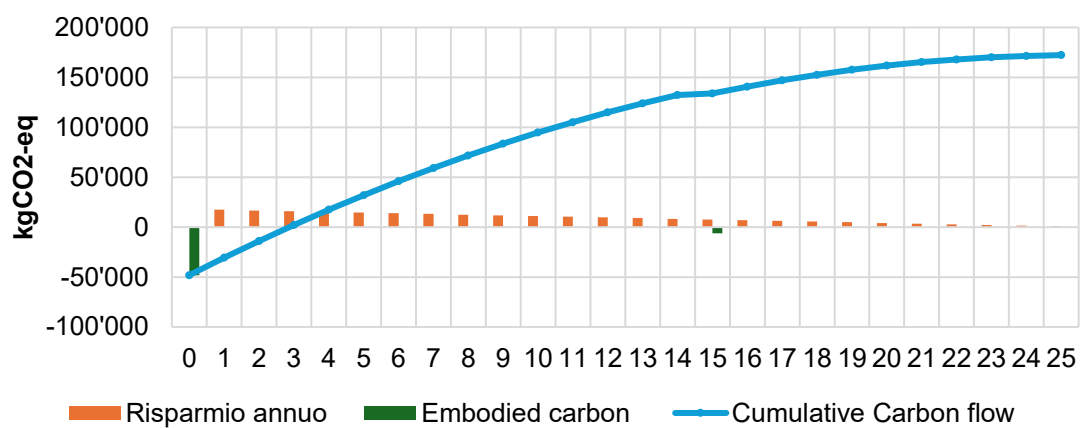


Figura A. 4 - Analisi del Carbon Payback per quattro unità carport con batteria

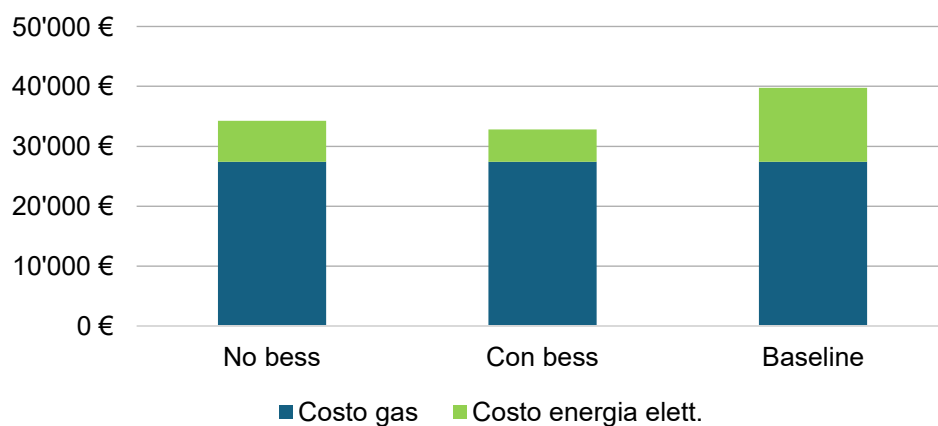


Figura A. 5 - Confronto della bolletta energetica per il caso a quattro unità carport

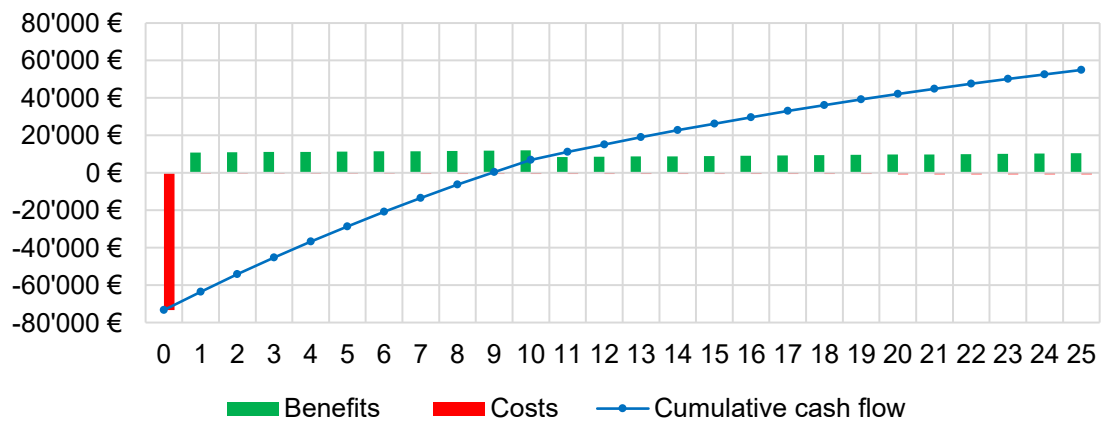


Figura A. 6 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con incentivo

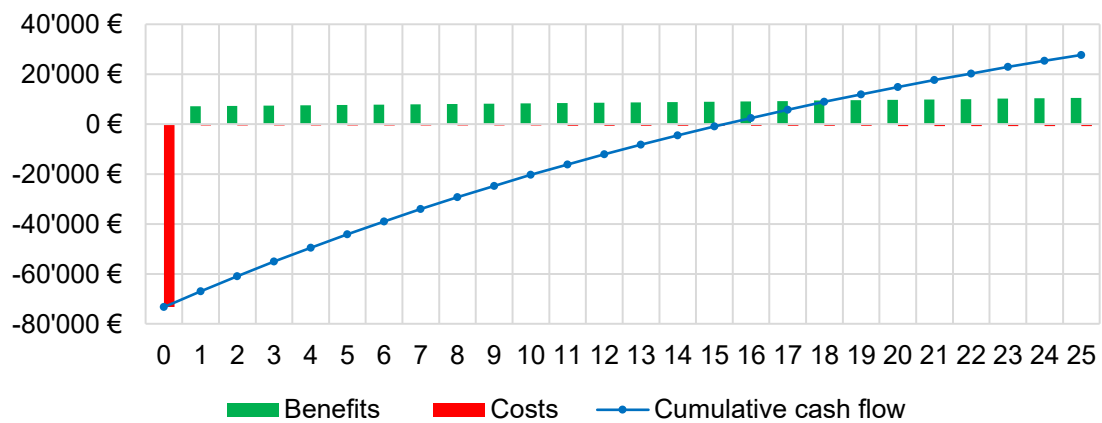


Figura A. 7 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport senza incentivo

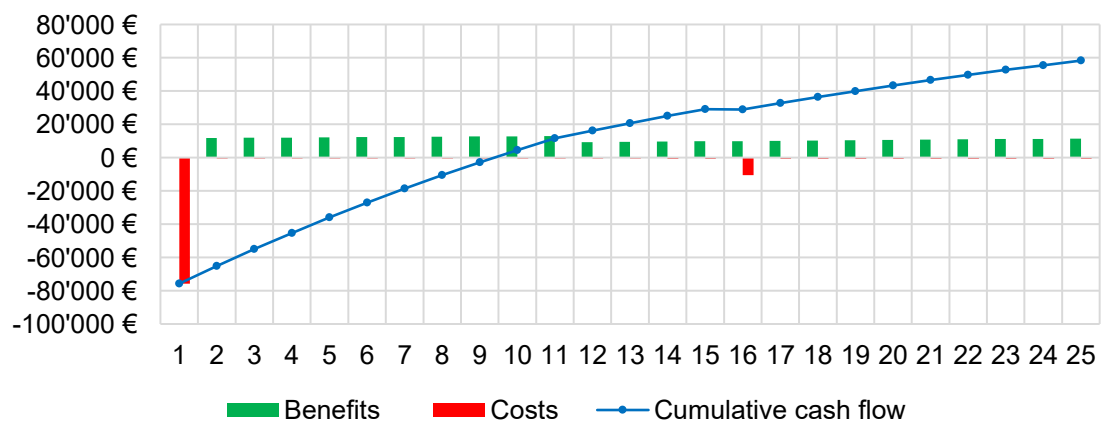


Figura A. 8 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con batteria e incentivo

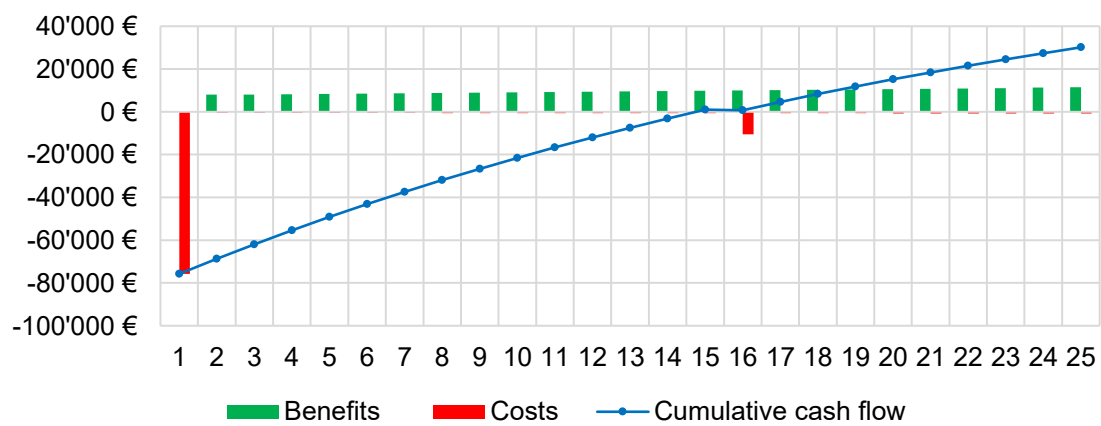


Figura A. 9 - Analisi costi-benefici per il caso a quattro unità carport con batteria senza incentivo

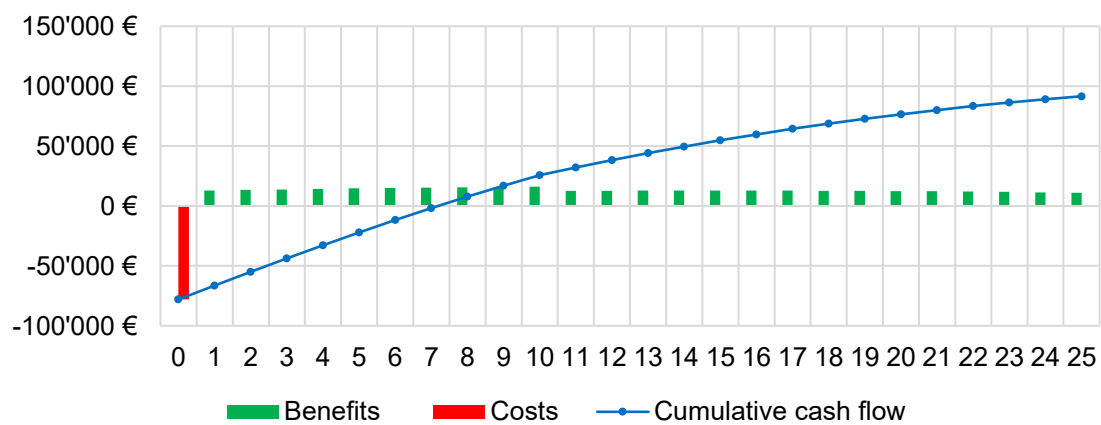


Figura A. 10 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con incentivo

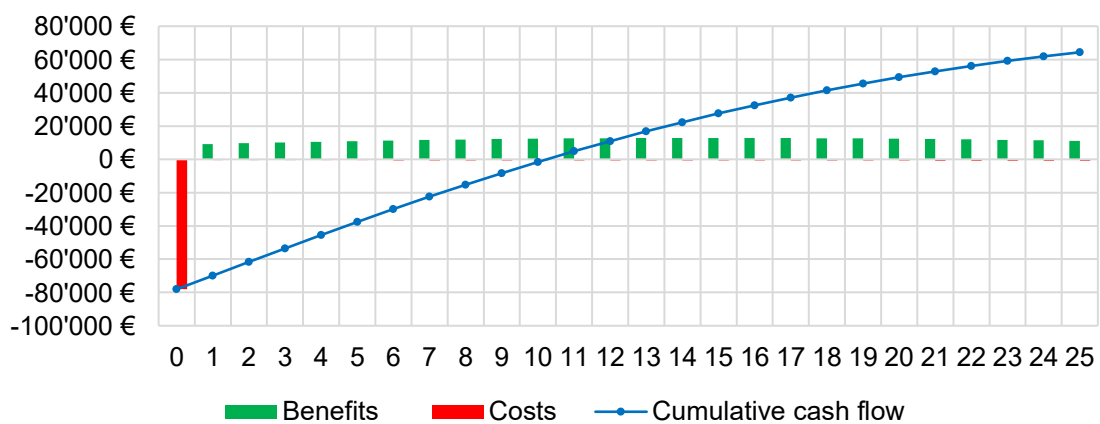


Figura A. 11 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport senza incentivo

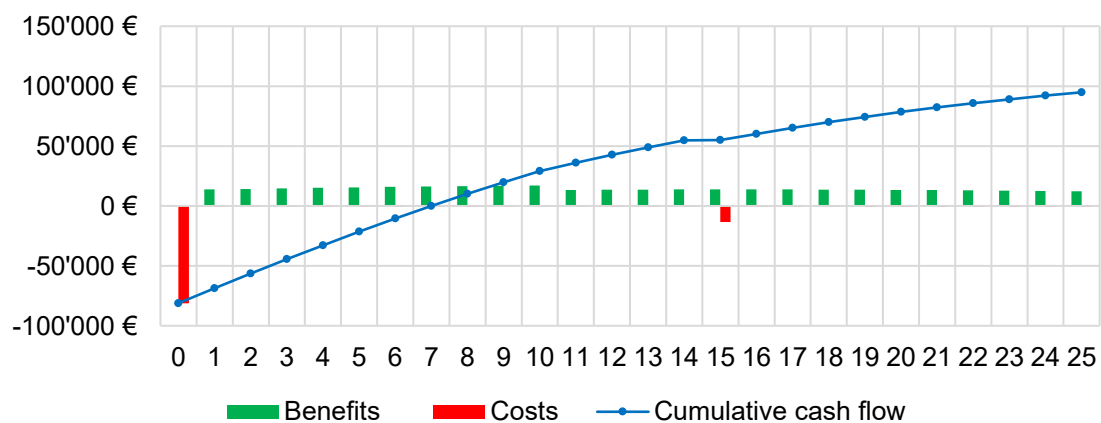


Figura A. 12 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con batteria e incentivo

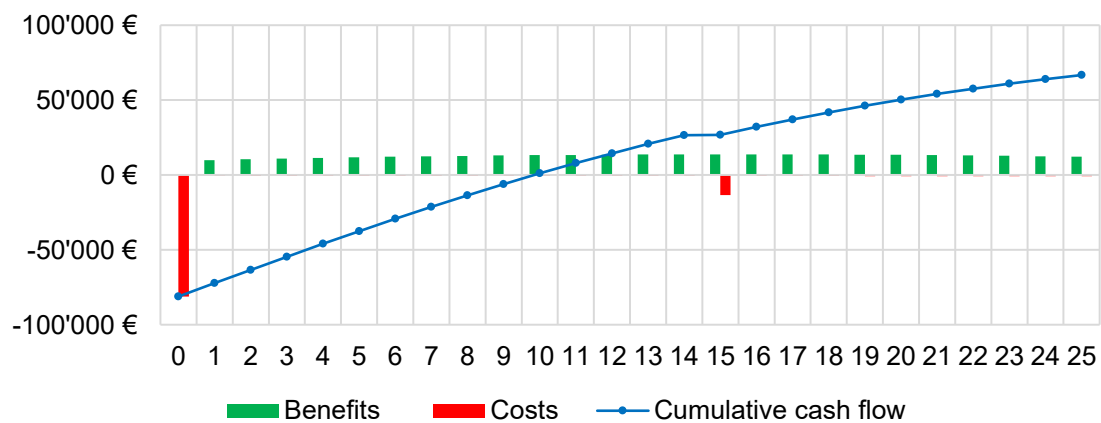


Figura A. 13 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a quattro unità carport con batteria senza incentivo

Tabella A. 5 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per cinque unità carport

N pannelli 75		
Area tot pv	193	m ²
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	133	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A4	4.54	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A5	1.22	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot B1-B7	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C1	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C2	0.0562	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C3	0.756	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C4	0.134	kgCO ₂ eq/m ²
Valori calcolati:		
GHG emb pv A1-A3	25'767	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A4	879	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A5	236	kgCO ₂ eq
GHG emb pv B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C1	0	kgCO ₂ eq

GHG emb pv C2	10.88	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C3	146	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C4	25.96	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb pv tot	27'067	kgCO ₂ eq

Tabella A. 6 - Calcolo delle emissioni incorporate della batteria per cinque unità carport

BESS	n batterie 2	H7 = 20.16 kWh
BESS capacity		40 kWh
	H7	
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1	184	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A2	2.53	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A3	5.56	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A4	3.96	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot A5	0.655	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot B6	72.2	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C2	0.11	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C3	0.591	kgCO ₂ eq/kWh
GWP tot C4	7.31	kgCO ₂ eq/kWh
Valori calcolati:		
GHG emb A1	7'360	kgCO ₂ eq
GHG emb A2	101	kgCO ₂ eq
GHG emb A3	222	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	158	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	26.2	kgCO ₂ eq
GHG emb B6	2'888	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	4.4	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	23.6	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	292	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb bess tot	8'188	kgCO ₂ eq

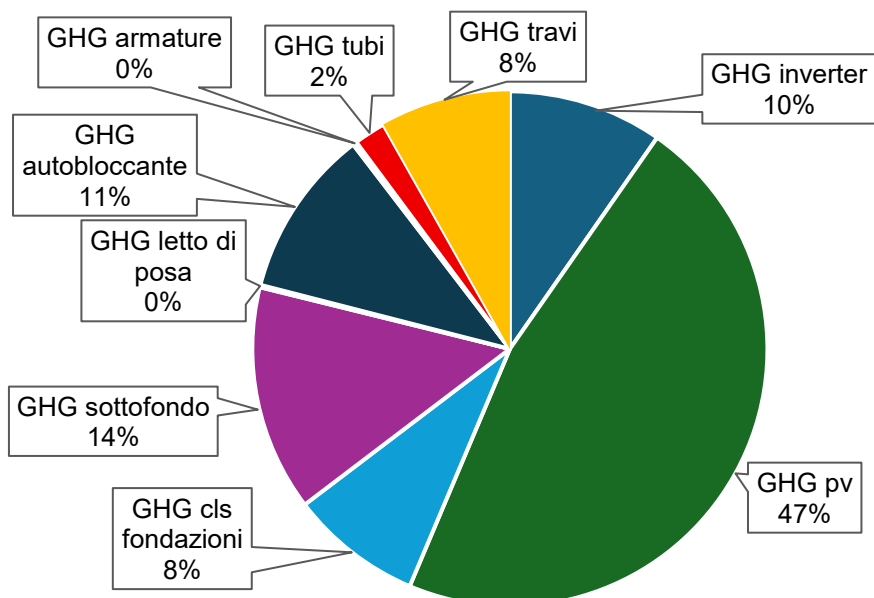


Figura A. 14 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a cinque unità carport

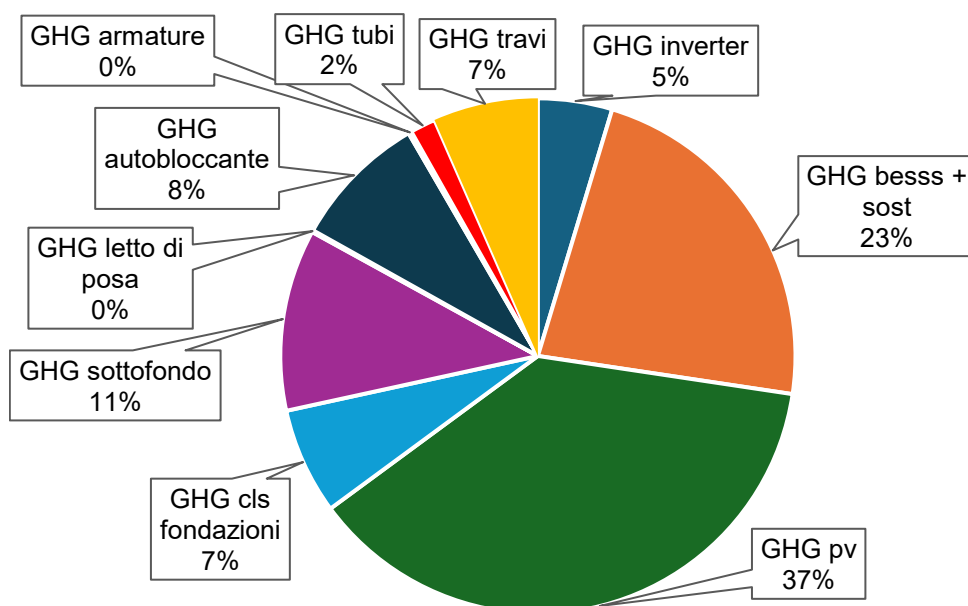


Figura A. 15 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a cinque unità carport con batteria

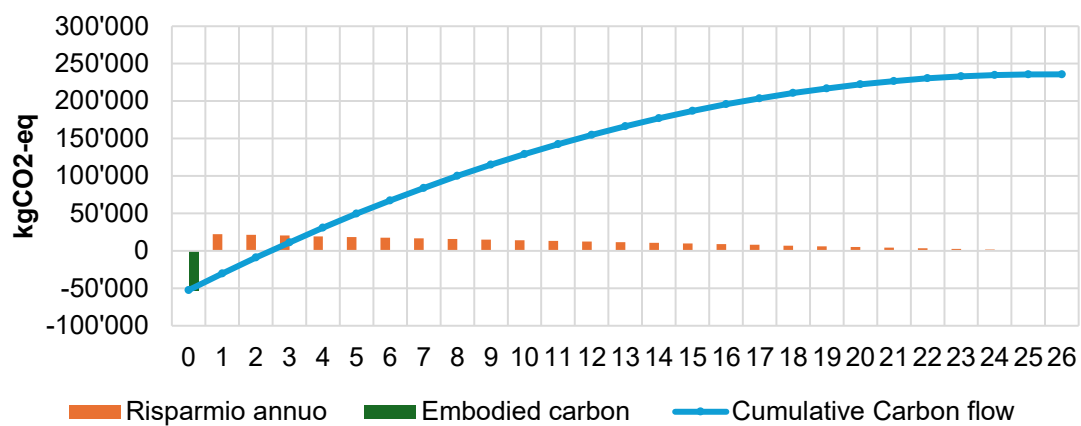


Figura A. 16 - Analisi del Carbon Payback per cinque unità carport

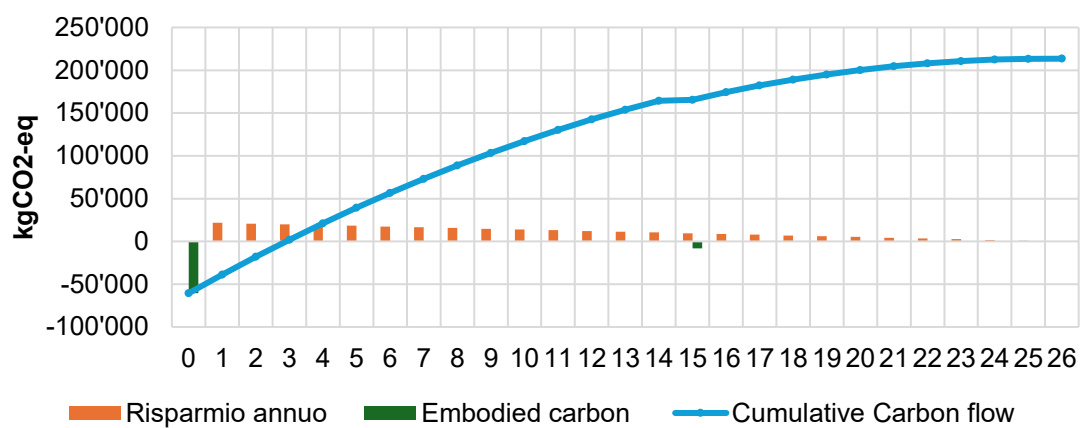


Figura A. 17 - Analisi del Carbon Payback per cinque unità carport con batteria

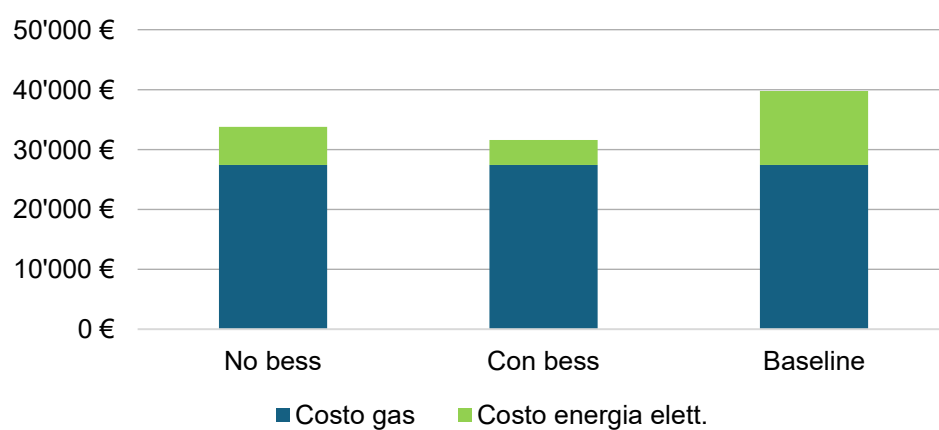


Figura A. 18 - Confronto della bolletta energetica per il caso a cinque unità carport

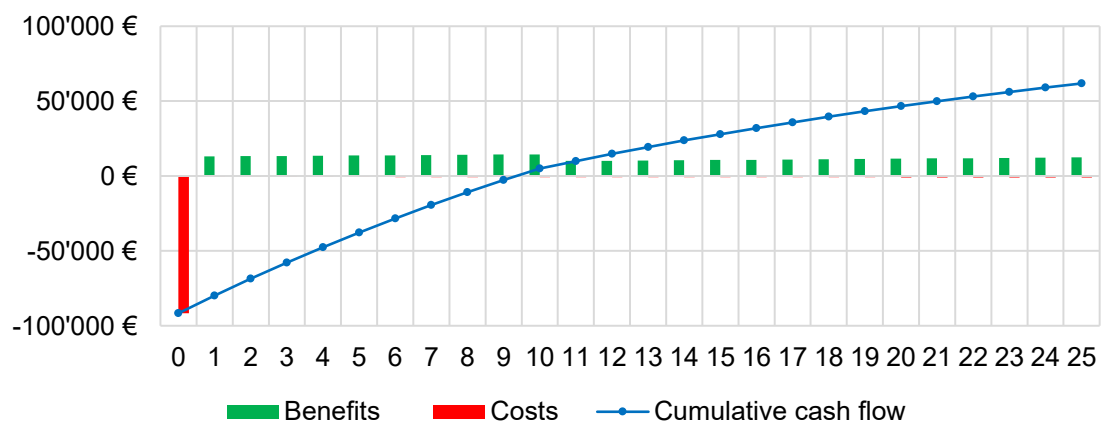


Figura A. 19 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con incentivo

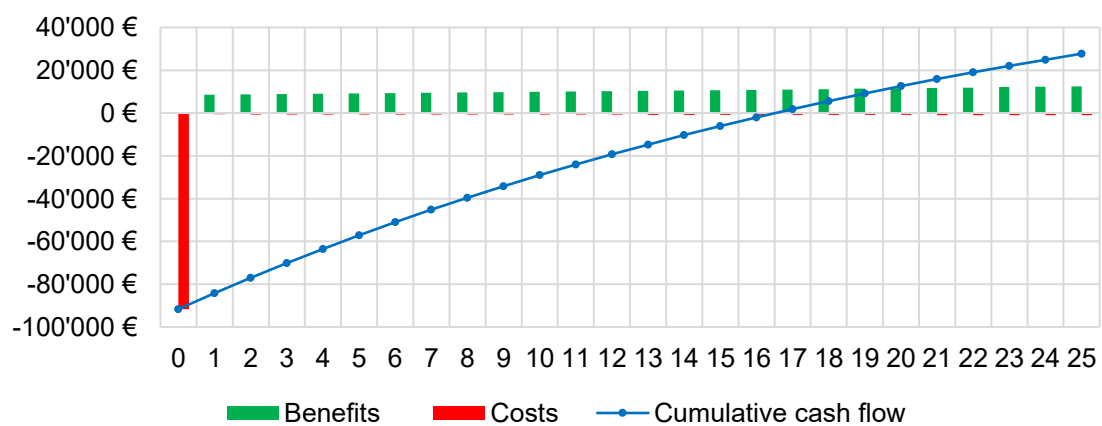


Figura A. 20 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport senza incentivo

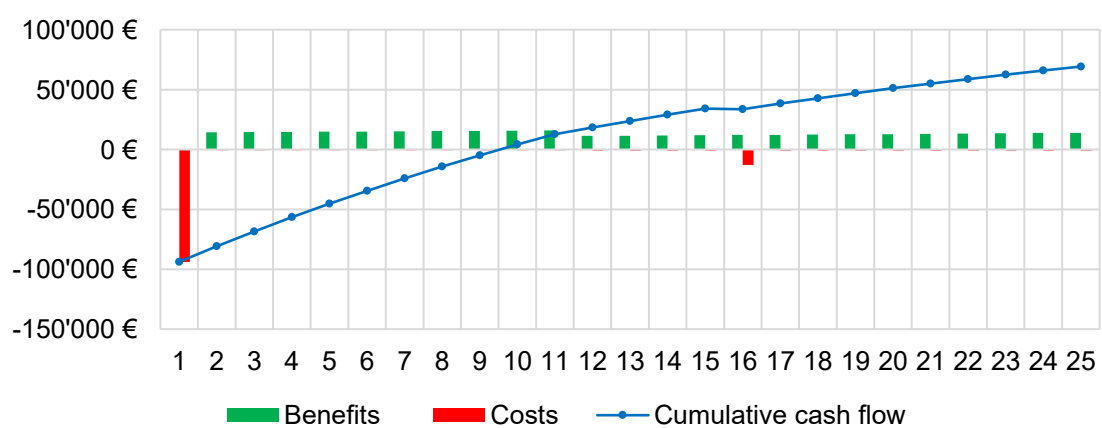


Figura A. 21 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con batteria e incentivo

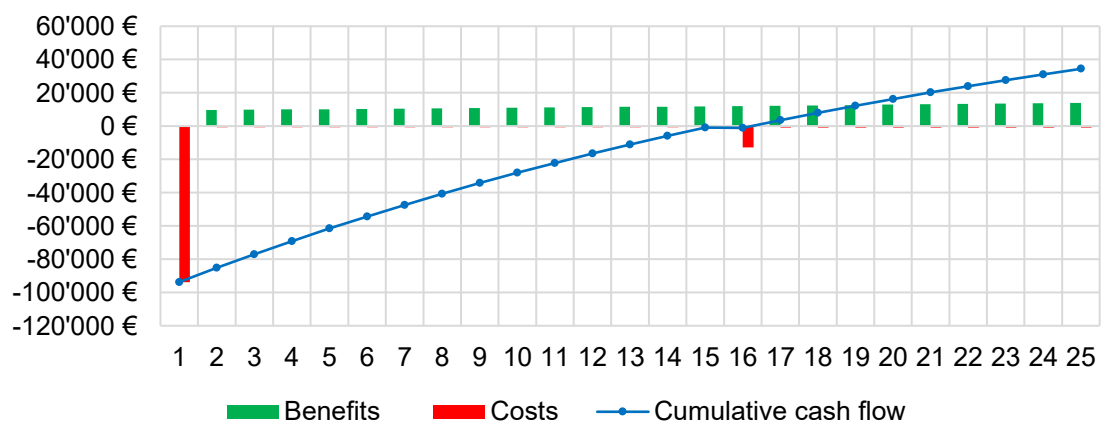


Figura A. 22 - Analisi costi-benefici per il caso a cinque unità carport con batteria senza incentivo

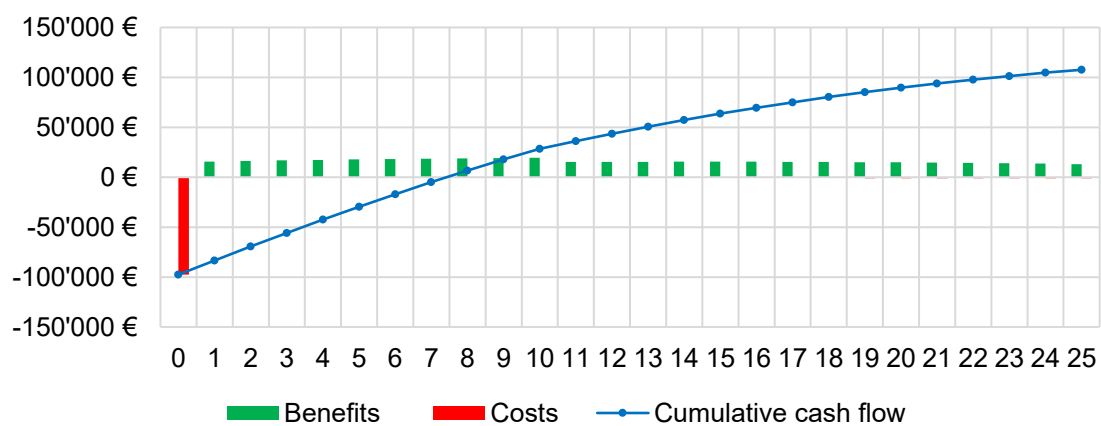


Figura A. 23 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con incentivo

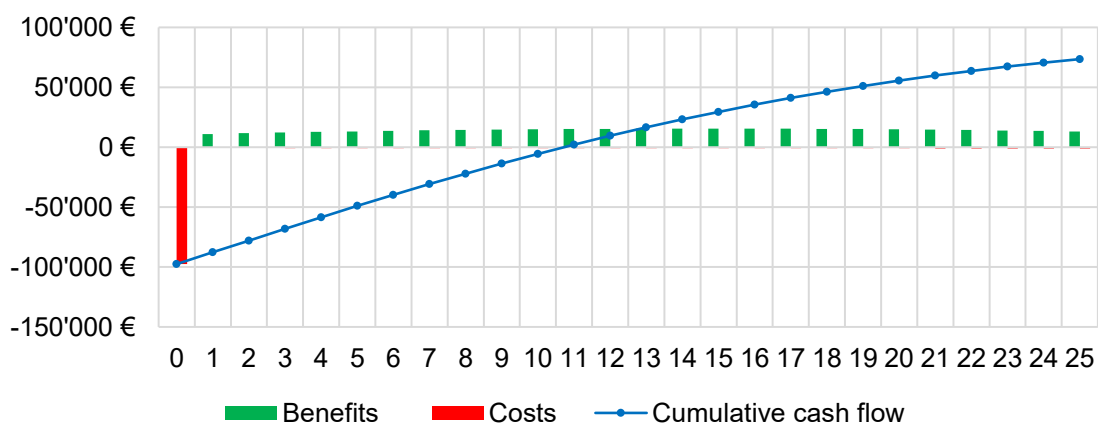


Figura A. 24 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport senza incentivo

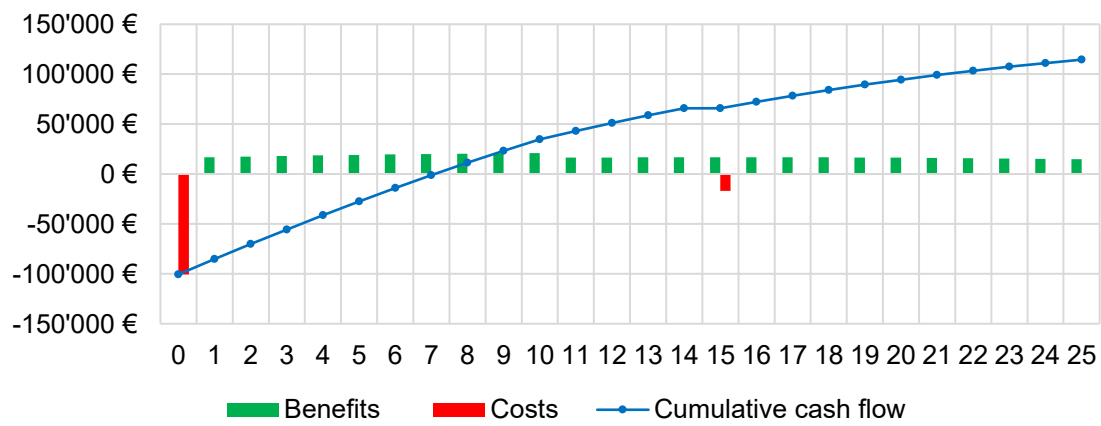


Figura A. 25 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con batteria e incentivo

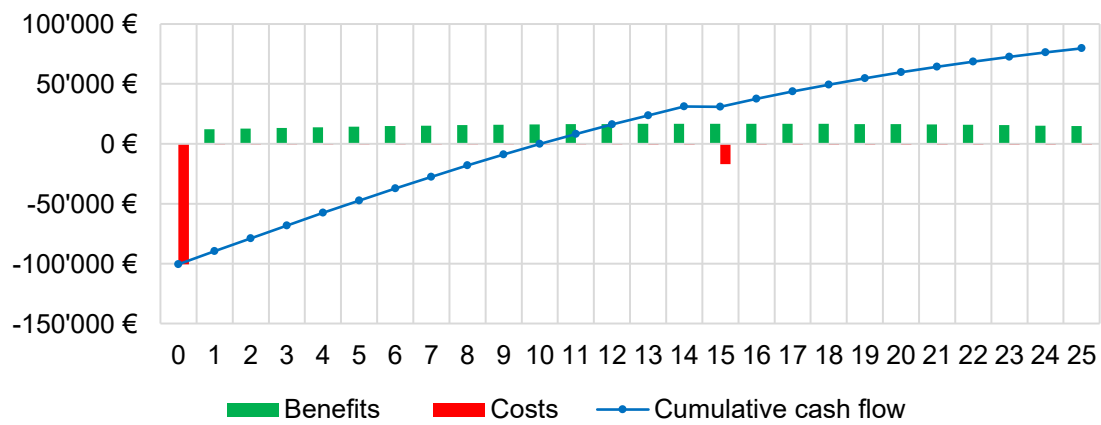


Figura A. 26 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a cinque unità carport con batteria senza incentivo

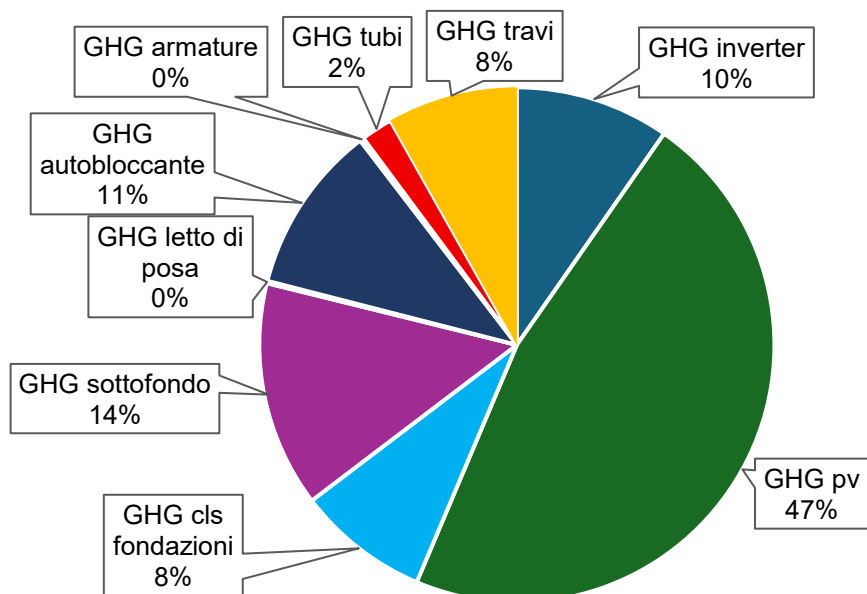


Figura A. 27 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sei unità carport

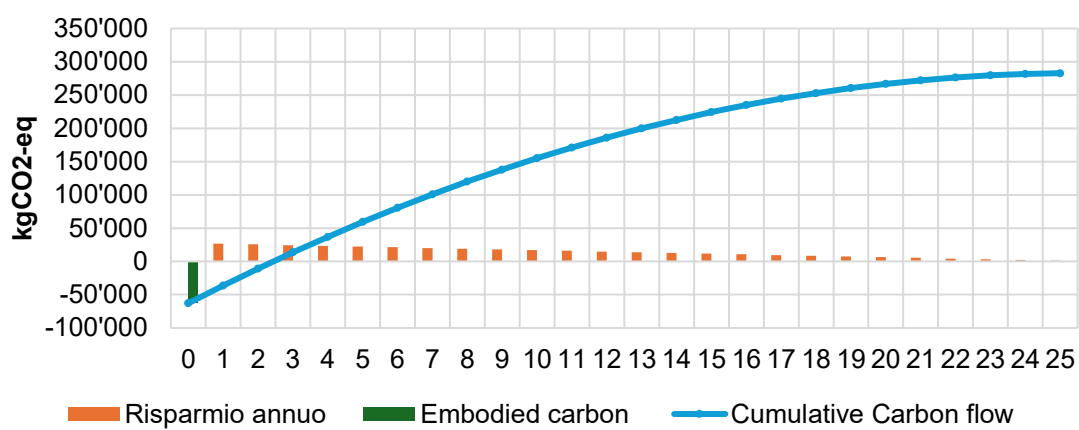


Figura A. 28 - Analisi del Carbon Payback per sei unità carport

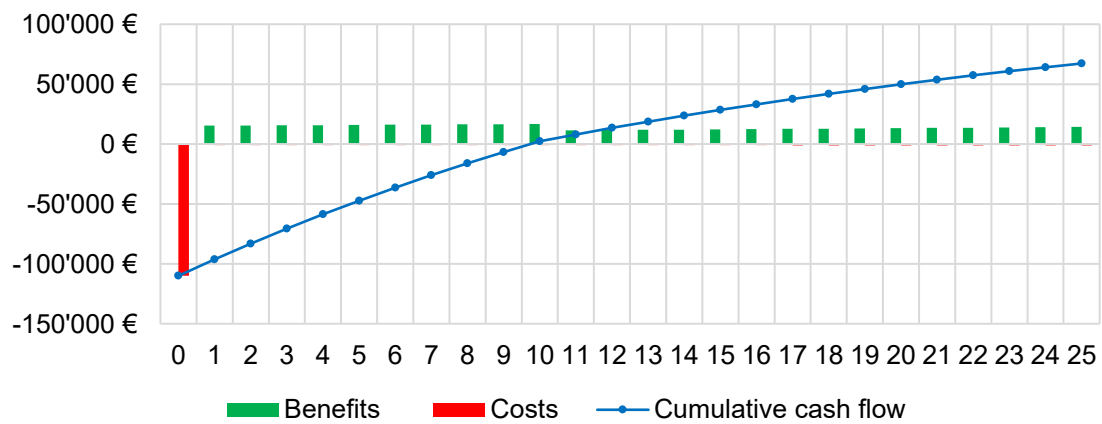


Figura A. 29 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con incentivo

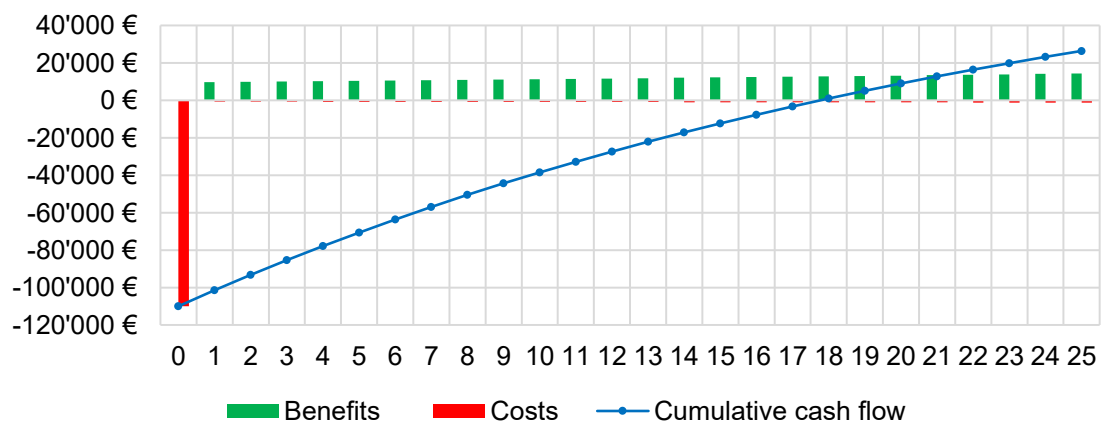


Figura A. 30 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport senza incentivo

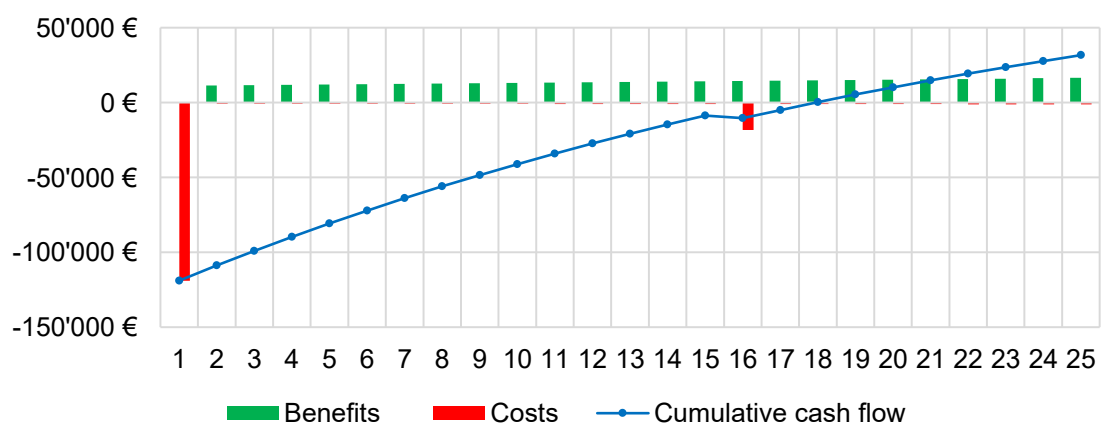


Figura A. 31 - Analisi costi-benefici per il caso a sei unità carport con batteria e incentivo

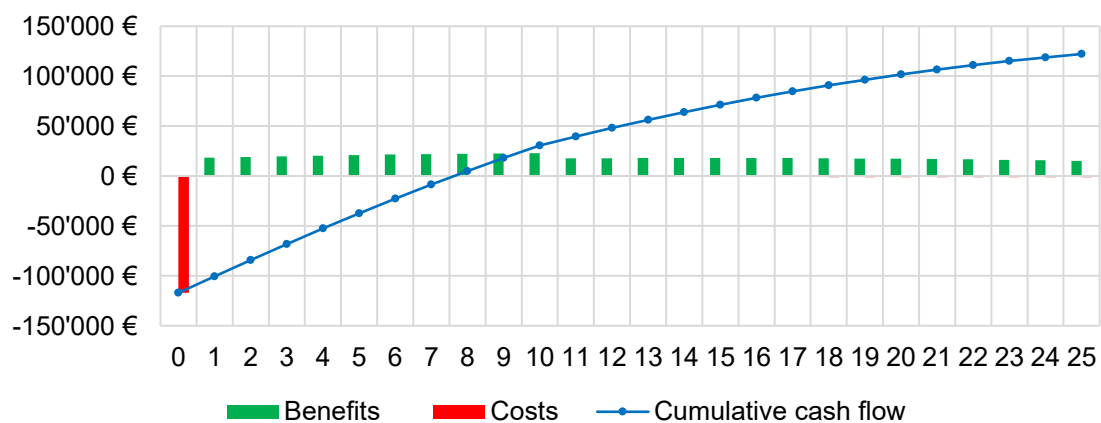


Figura A. 32 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con incentivo

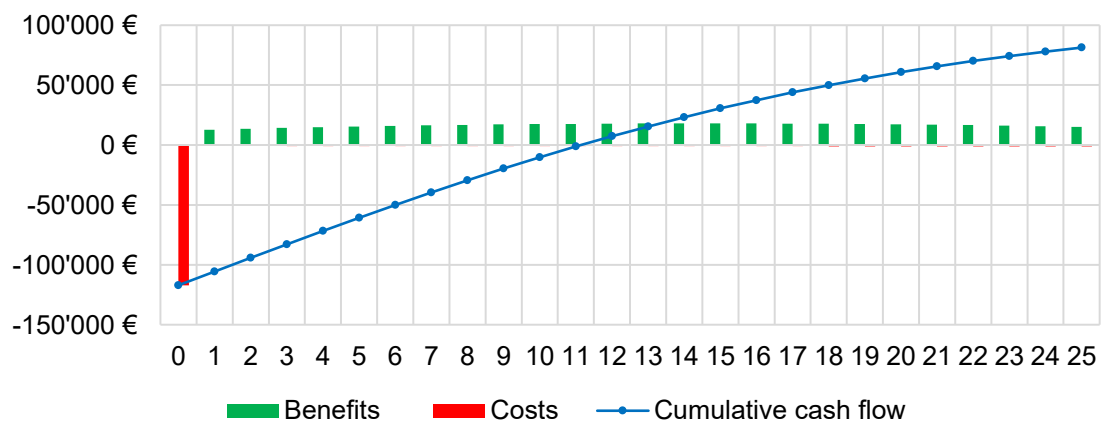


Figura A. 33 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport senza incentivo

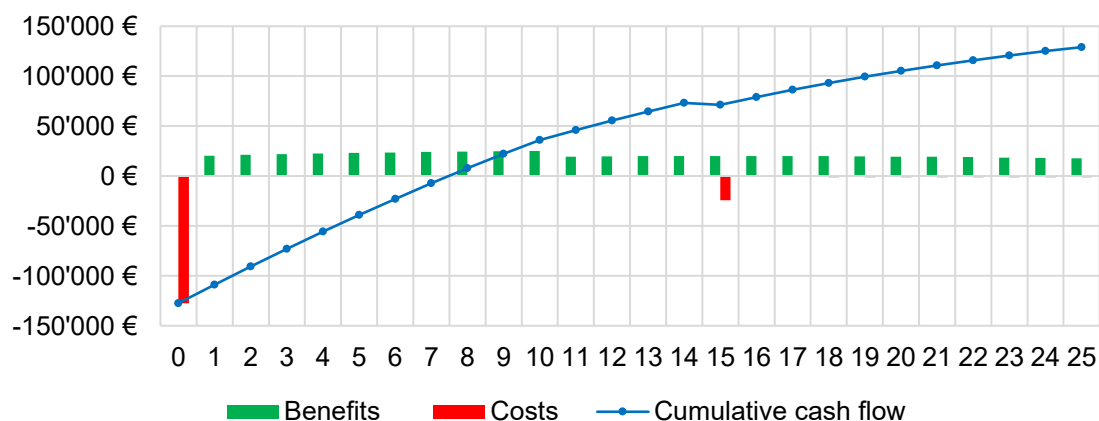


Figura A. 34 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria e incentivo

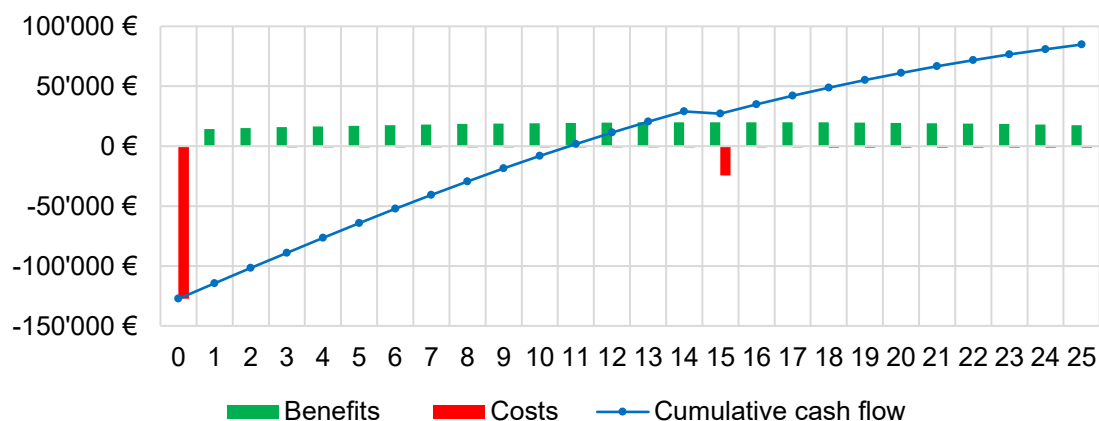


Figura A. 35 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sei unità carport con batteria senza incentivo

Tabella A. 7 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per sette unità carport

N pannelli 105		
Area tot pv	271	m ²
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	133	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A4	4.54	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A5	1.22	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot B1-B7	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C1	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C2	0.0562	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C3	0.756	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C4	0.134	kgCO ₂ eq/m ²
Valori calcolati:		
GHG emb pv A1-A3	36'075	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A4	1231	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A5	331	kgCO ₂ eq
GHG emb pv B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C2	15.2	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C3	205	kgCO ₂ eq

GHG emb pv C4	36.3	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb pv tot	37'894	kgCO ₂ eq

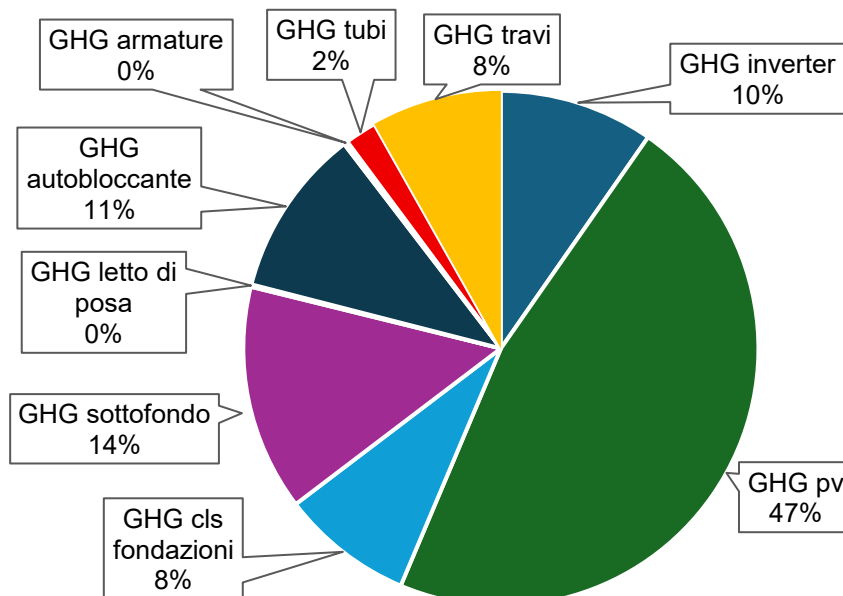


Figura A. 36 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sette unità carport

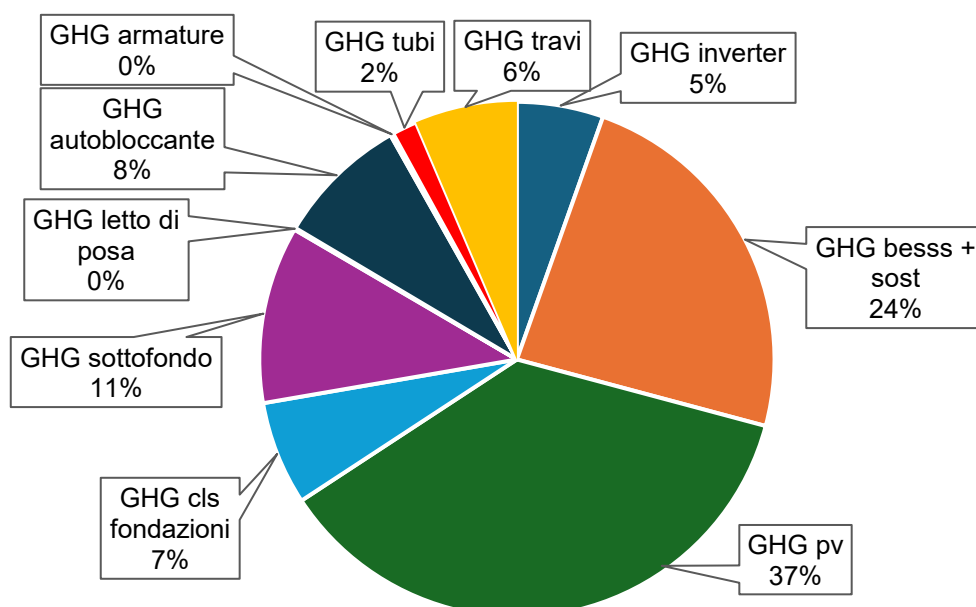


Figura A. 37 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a sette unità carport con batteria

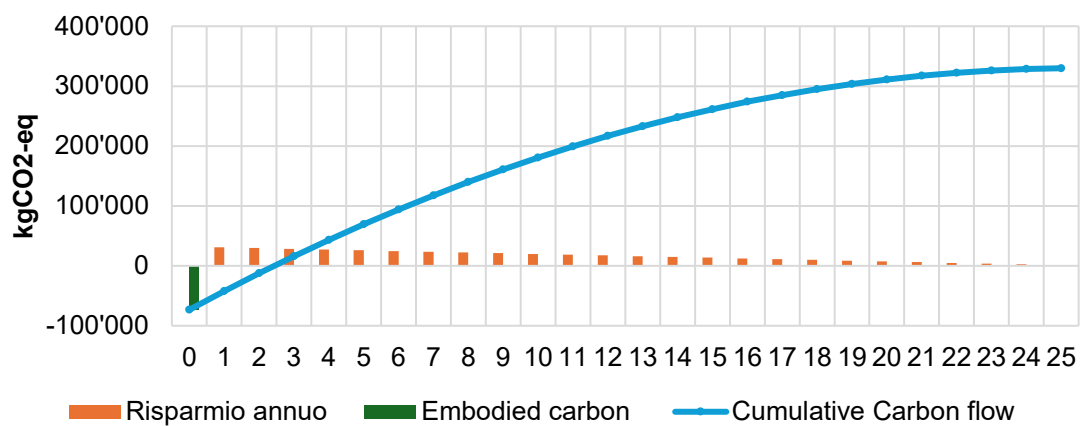


Figura A. 38 - Analisi del Carbon Payback per sette unità carport

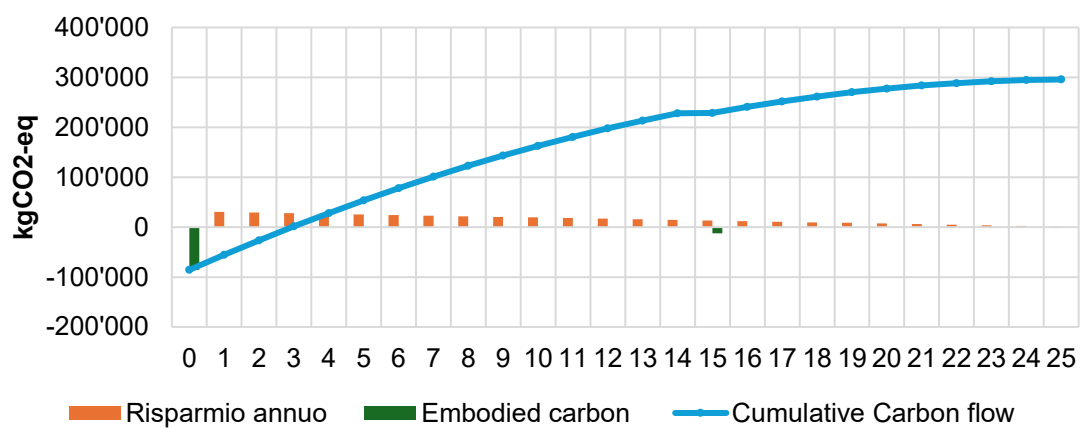


Figura A. 39 - Analisi del Carbon Payback per sette unità carport con batteria

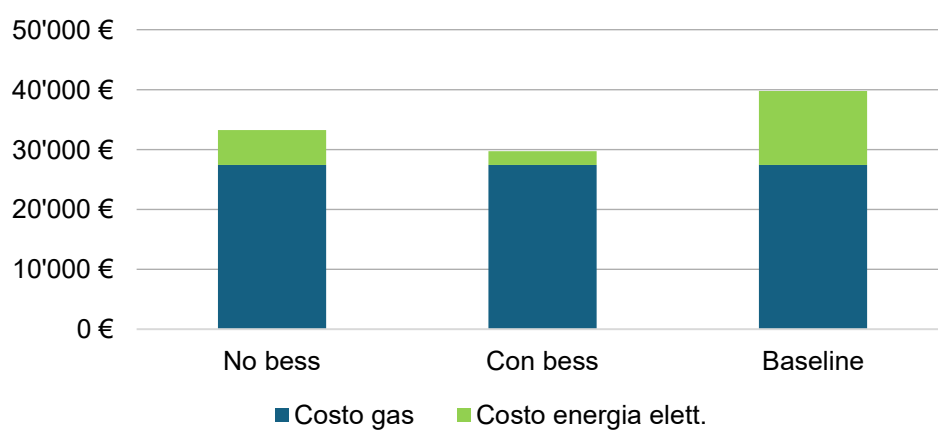


Figura A. 40 - Confronto della bolletta energetica per il caso a sette unità carport

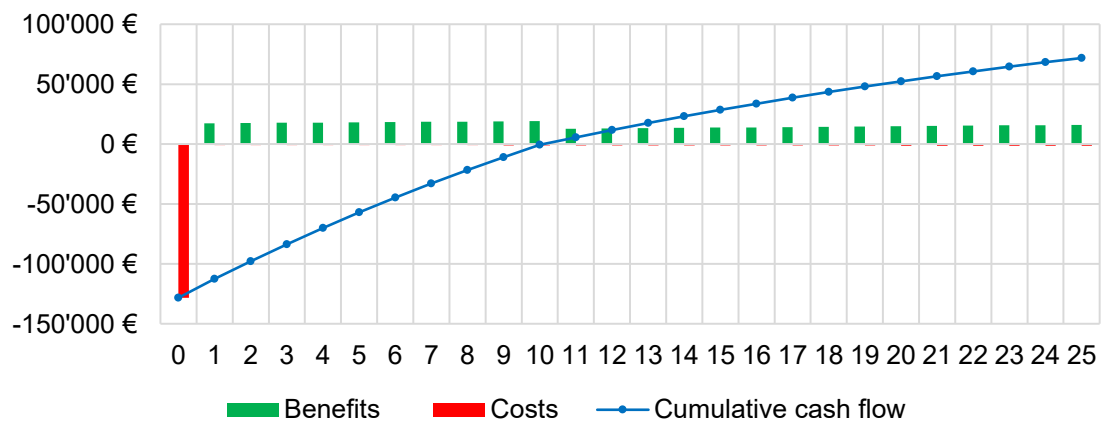


Figura A. 41 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con incentivo

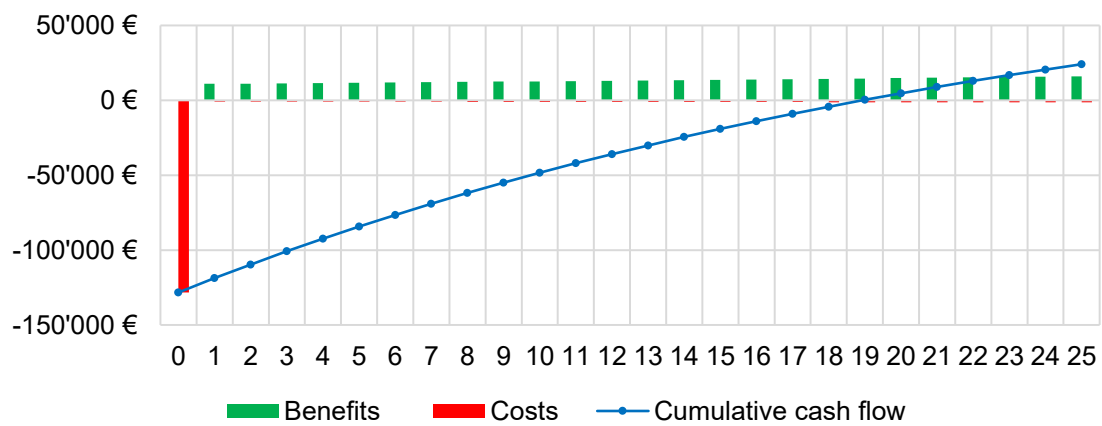


Figura A. 42 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport senza incentivo

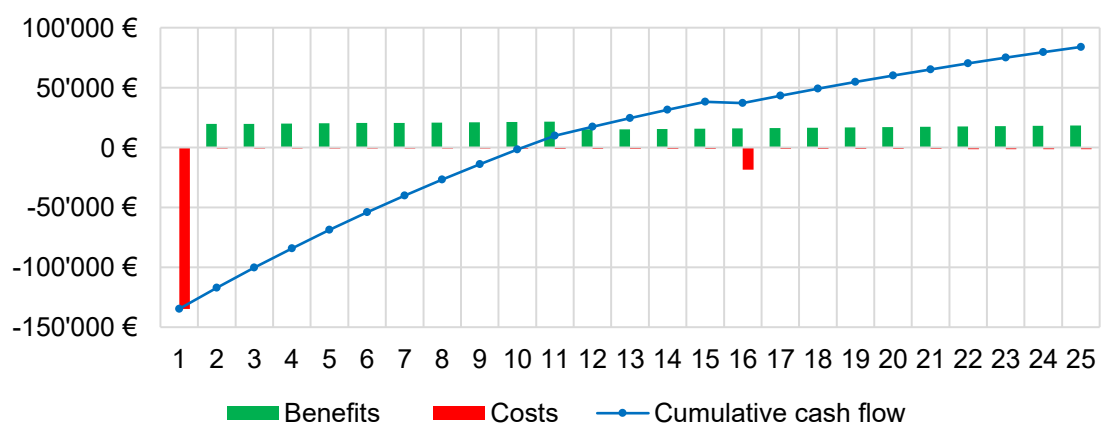


Figura A. 43 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con batteria e incentivo

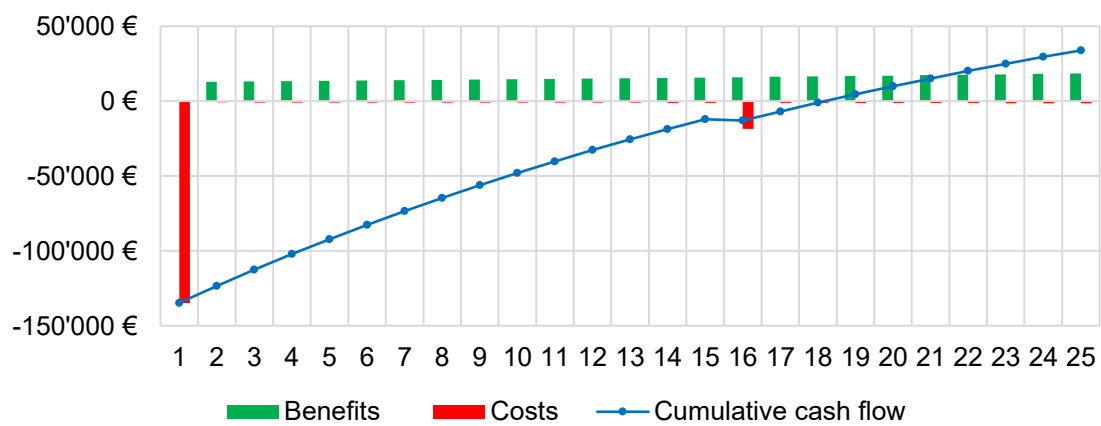


Figura A. 44 - Analisi costi-benefici per il caso a sette unità carport con batteria senza incentivo

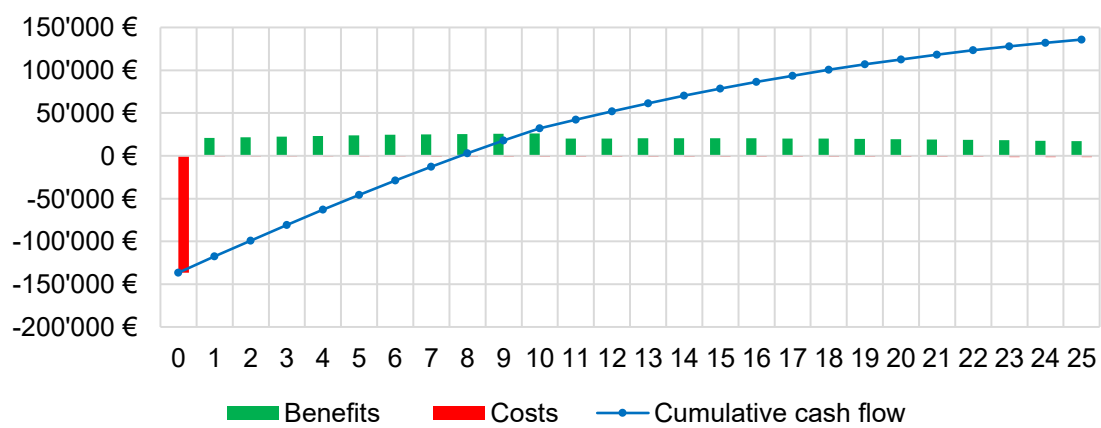


Figura A. 45 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con incentivo

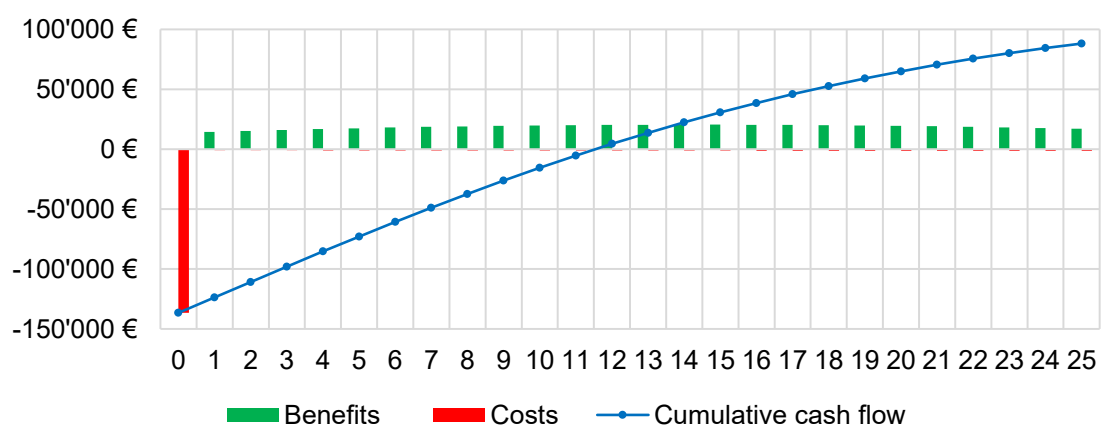


Figura A. 46 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport senza incentivo

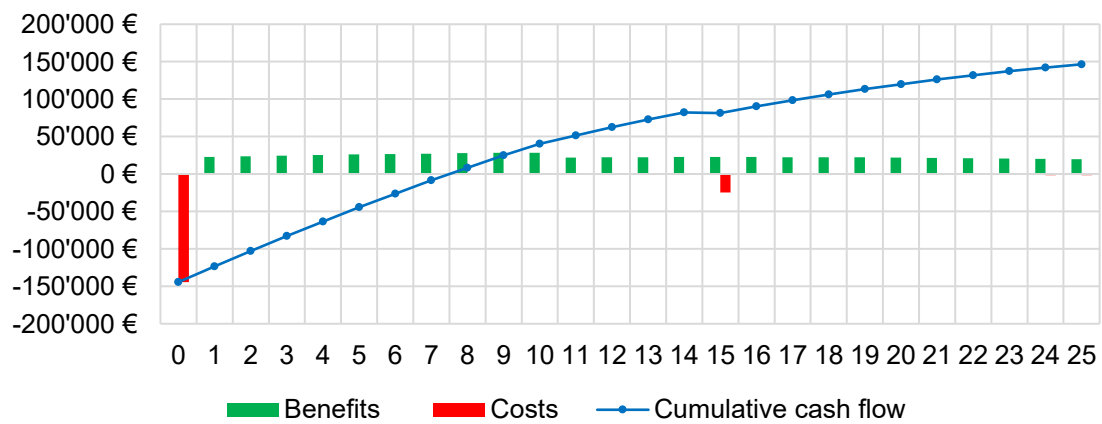


Figura A. 47 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con batteria e incentivo

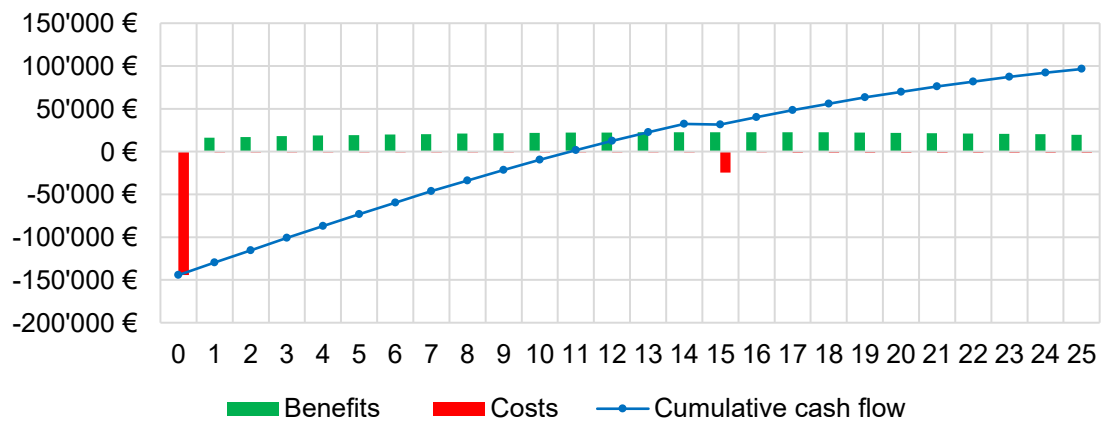


Figura A. 48 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a sette unità carport con batteria senza incentivo

Tabella A. 8 - Calcolo delle emissioni incorporate dei pannelli fotovoltaici per otto unità carport

N pannelli 120		
Area tot pv	310	m ²
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	133	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A4	4.54	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot A5	1.22	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot B1-B7	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C1	0	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C2	0.0562	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C3	0.756	kgCO ₂ eq/m ²
GWP tot C4	0.134	kgCO ₂ eq/m ²
Valori calcolati:		
GHG emb pv A1-A3	41'228	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A4	1'407	kgCO ₂ eq
GHG emb pv A5	378	kgCO ₂ eq
GHG emb pv B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C2	17.4	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C3	234.	kgCO ₂ eq
GHG emb pv C4	41.5	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb pv tot	43'308	kgCO ₂ eq

Tabella A. 9 - Calcolo delle emissioni incorporate dell'inverter della batteria per otto unità carport

INVERTER 54.9 kW		
Valori unitari da EPD:		
GWP tot A1-A3	110	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot A4	1.31	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot A5	0.31	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot B1-B7	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C1	0	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C2	0.0298	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C3	0.16	kgCO ₂ eq/kW
GWP tot C4	0.40	kgCO ₂ eq/kW
Valori calcolati:		
GHG embA1-A3	6'049	kgCO ₂ eq
GHG emb A4	71.9	kgCO ₂ eq
GHG emb A5	17.1	kgCO ₂ eq
GHG emb B1-B7	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C1	0	kgCO ₂ eq
GHG emb C2	1.63	kgCO ₂ eq
GHG emb C3	8.78	kgCO ₂ eq
GHG emb C4	22.1	kgCO ₂ eq
Valore totale:		
GHG emb tot	6'171	kgCO ₂ eq

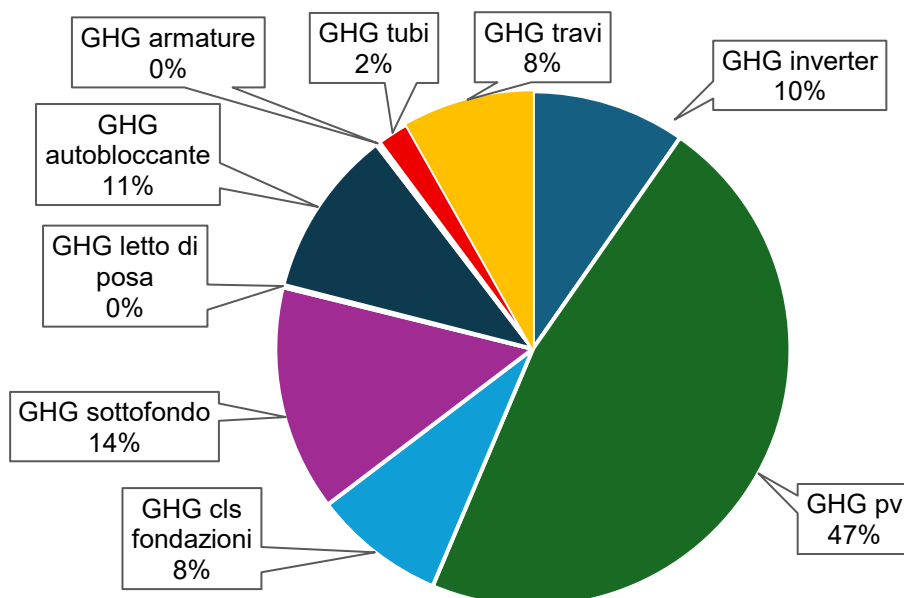


Figura A. 49 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a otto unità carport

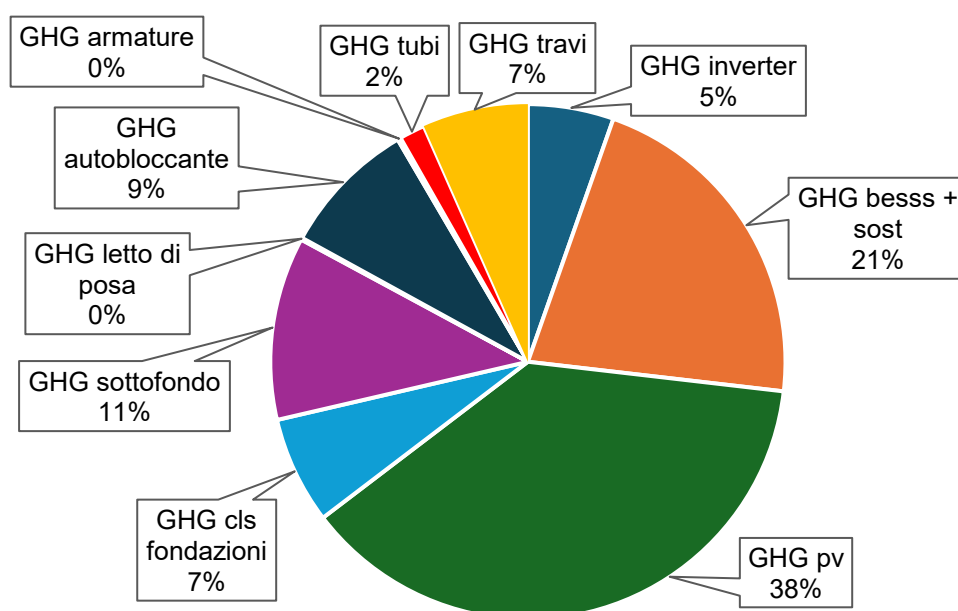


Figura A. 50 - Peso relativo di ogni componente all'interno delle emissioni incorporate per il caso a otto unità carport con batteria

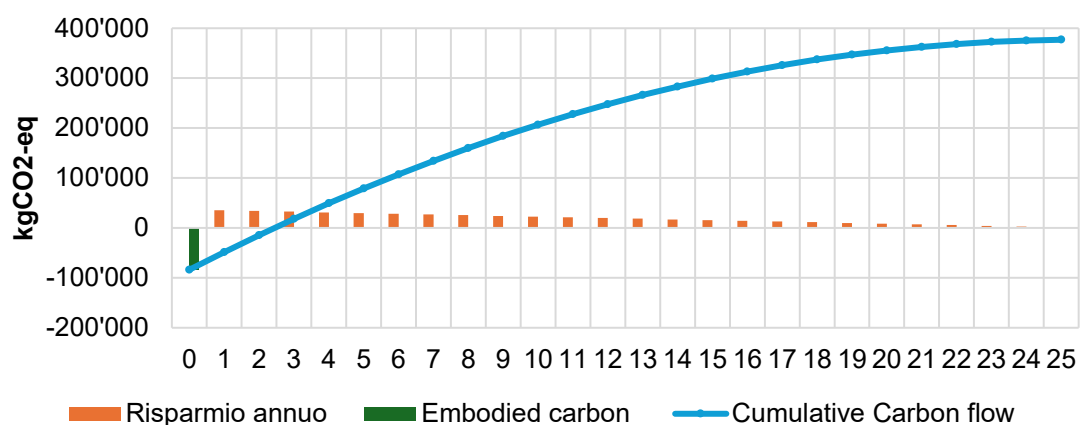


Figura A. 51 - Analisi del Carbon Payback per otto unità carport

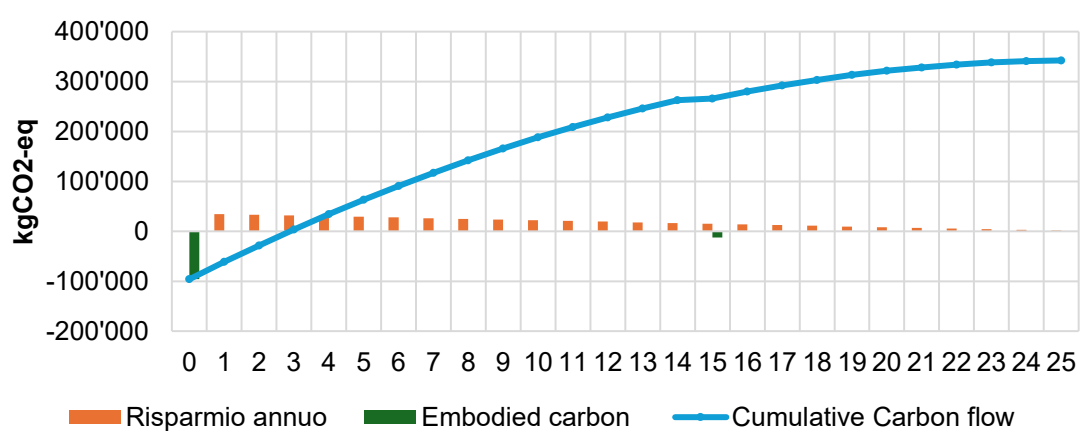


Figura A. 52 - Analisi del Carbon Payback per otto unità carport con batteria

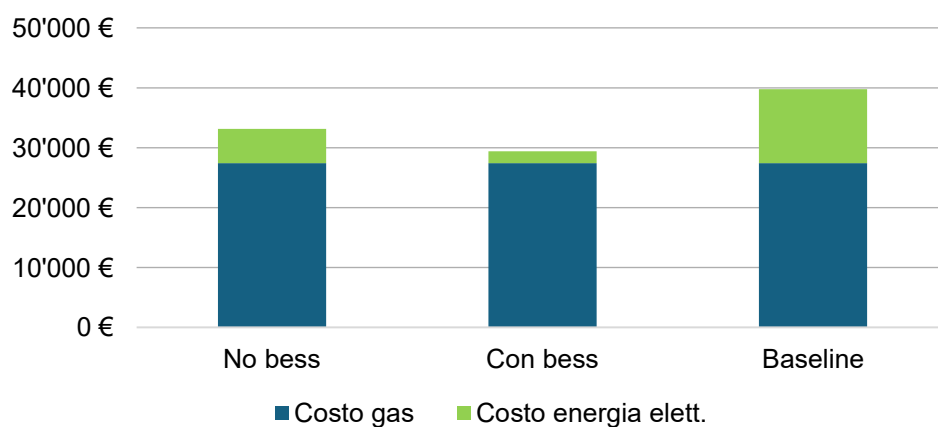


Figura A. 53 - Confronto della bolletta energetica per il caso a otto unità carport

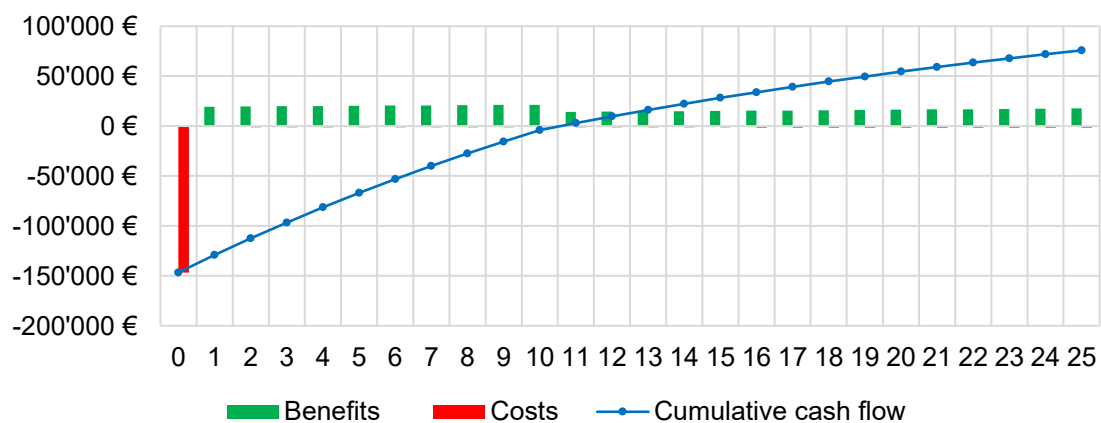


Figura A. 54 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con incentivo

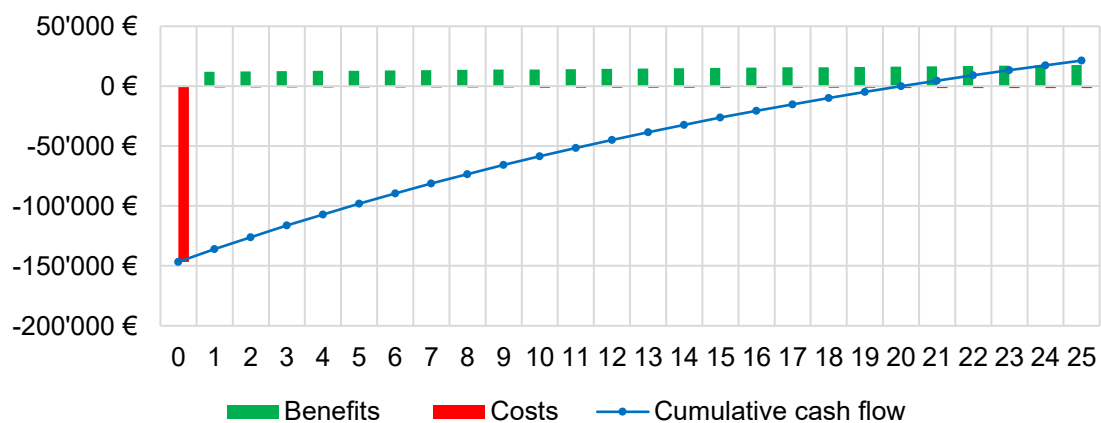


Figura A. 55 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport senza incentivo

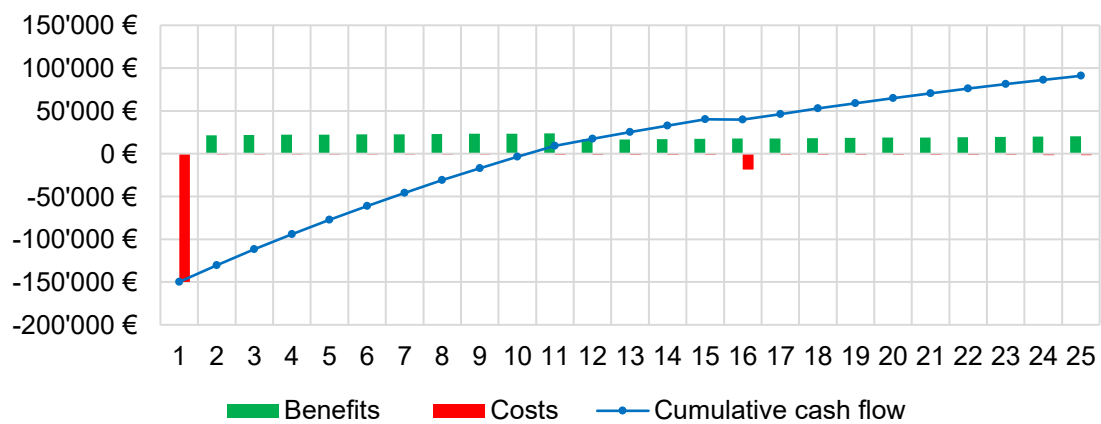


Figura A. 56 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con batteria e incentivo

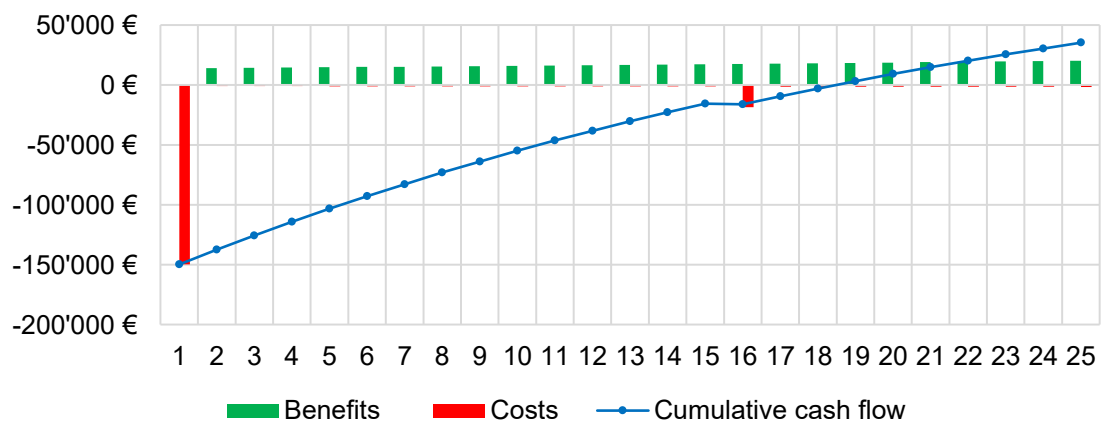


Figura A. 57 - Analisi costi-benefici per il caso a otto unità carport con batteria senza incentivo

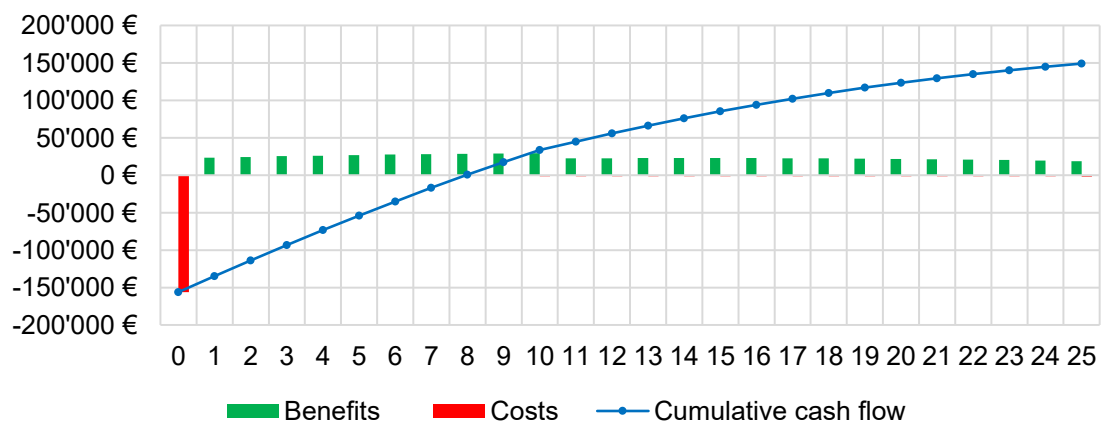


Figura A. 58 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con incentivo

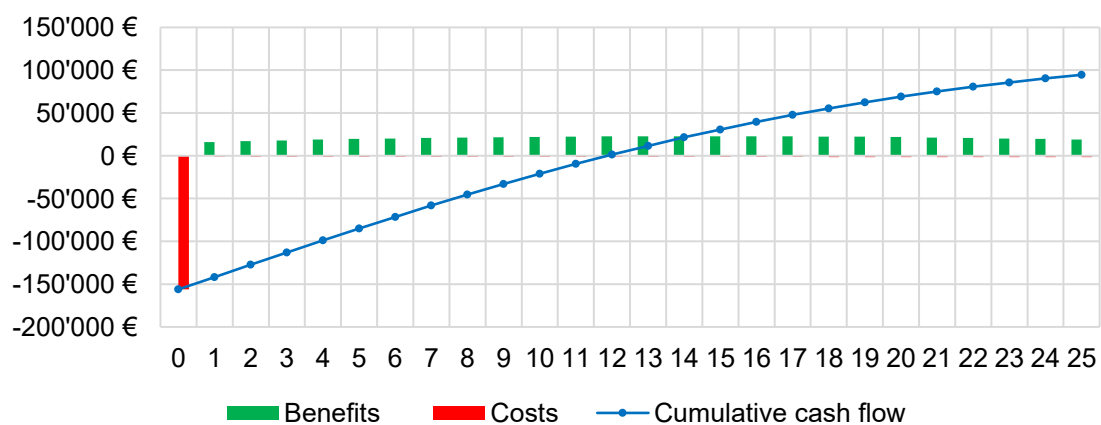


Figura A. 59 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport senza incentivo

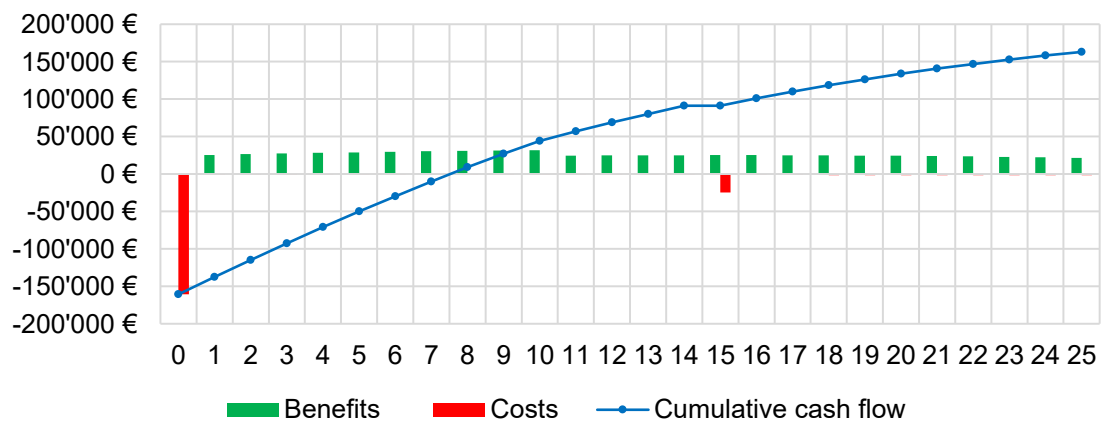


Figura A. 60 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con batteria e incentivo

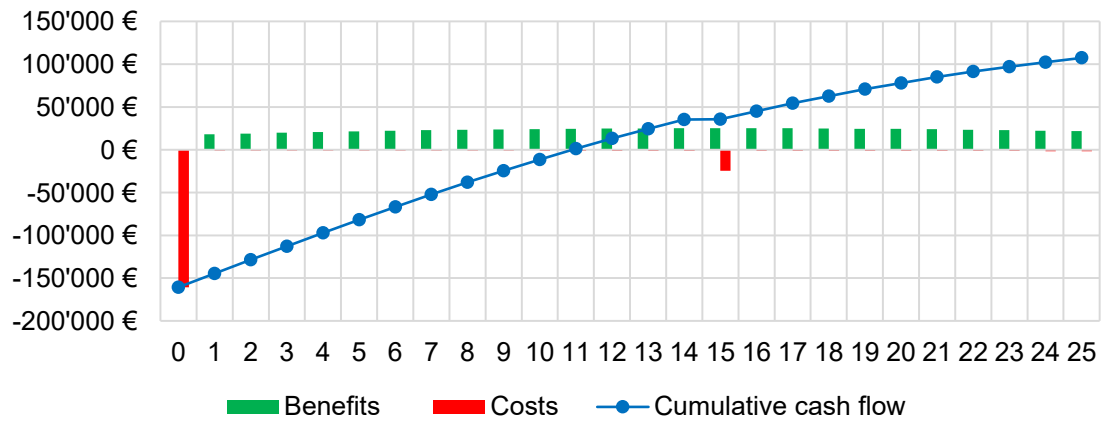


Figura A. 61 - Analisi costi-benefici integrata economico-ambientale per il caso a otto unità carport con batteria senza incentivo

